



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Mémoire une vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Ingénierie des Matériaux et des surfaces

Sur le thème :

**Elaboration et caractérisation des
composites à matrice métallique
(Al/ TiO₂)**

Présente par :

❖ Elouadhah Abbes
❖ Chettih Toufik

Encadré par :

Dr. Chiker Nabil

Année universitaire : 2024/2025

Remercîment

Avant tout, nous tenons à remercier ALLAH le Très-Haut qui nous a prodigué guidance, force et détermination pour la réalisation de ce mémoire.

Nos pensées se dirigent vers nos parents, qui ont toujours eu foi en nous. C'est leur appui et leurs prières qui nous ont permis de réaliser ce travail.

Nous exprimons notre gratitude à notre promoteur, le **Dr. CHIKER Nabil**, pour son soutien et son engagement tout au long du projet. Et de nous avoir guidés grâce à ces conseils inestimables et son appui moral.

Résumé :

Ce mémoire porte sur la conception, la fabrication et la caractérisation de composites à matrice métallique à base d'aluminium (Al) renforcé par des particules unidimensionnelles de dioxyde de titane (TiO_2). L'objectif principal est d'améliorer les propriétés mécaniques et tribologiques (usure, dureté, frottement) de l'aluminium pur, en y incorporant différents pourcentages de TiO_2 .

Abstract :

This thesis focuses on the design, fabrication, and characterization of aluminum-based metal matrix composites (MMCs) reinforced with one-dimensional titanium dioxide (TiO_2) particles. The main objective is to enhance the mechanical and tribological properties (wear resistance, hardness, friction) of pure aluminum by incorporating various TiO_2 weight percentages.

ملخص

مصفوفة ذات مركبة مواد وتوصيف وتحضير تصميم دراسة إلى المذكرة هذه تهدف التيتانيوم أكسيد ثاني من البعد أحادية بجزيئات مدعمة، (Al) الألمنيوم أساسها معدنية والسلوكية الميكانيكية الخصائص تحسين هو العمل هذا من الرئيسي الهدف. (TiO_2) من TiO_2 مختلفة نسب إدخال خلال من، النقي للألمنيوم والتآكل الاحتكاك ضد

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Recherche bibliographique sur Les composites à matrice métallique CMM.

I.1. Introduction	3
I.2. Historique des matériaux composites à base de métal	3
I.2.1. Première génération (années 1940)	3
I.2.2. Deuxième génération (1960)	4
I.2.3. Troisième génération (années 1970 et 1980)	4
I.2.4. Quatrième génération (1990)	5
I.3. Définition des composites à matrice métallique	6
I.4. Intérêt des matériaux composites	7
I.5. Différents types de matériaux composites	7
I.5.1. Matériaux composites de grande diffusion	7
I.5.2. Matériaux composites de haute performance	8
I.6. Classification des matériaux composites	8
I.6.1. Classification des matériaux composites selon la forme des composants	8
I.6.1.1. Composites à particules	8
I.6.1.2. Composites à fibres	8
I.6.2. Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants	9
I.7. Les types de matrices métalliques	10
I.8. Matrice à base d'aluminium (AMC)	10

I.8.1. Avantages de Matrice à base d'aluminium (AMC)	10
I.8.2. Applications typiques	11
I.9. Définition des matériaux de renfort	11
I.10. Classification des matériaux de renfort selon la structure	11
I.10.1. Fibres continues (Fibres continues)	11
I.10.2. Fibres courtes (Fibres discontinues ou courtes)	11
I.10.3. Particules et poudres (Particules, poudres)	12
I.11. Types de matériaux de renfort selon les dimensions géométriques	12
I.11.1. Matériaux de renfort tridimensionnels (3D – Tridimensionnelles)	12
I.11.1.1. Caractéristiques	12
I.11.1.2. Applications	12
I.11.2. Matériaux de renfort bidimensionnels (2D – Bidimensionnelles)	13
I.11.2.1. Caractéristiques	13
I.11.2.2. Applications	13
I.11.3. Matériaux de renfort unidimensionnels (1D – Unidimensionnelles)	13
I.11.3.1. Caractéristiques	13
I.11.3.2 Applications	13
I.11.3.3. Historique des matériaux de renforcement unidimensionnels.....	14
I.11.3.4. Propriétés générales des matériaux 1D	14
I.11.3.5. Avantages des matériaux de renfort 1D	15
I.11.3.6. Limites d'utilisation	15
I.11.3.7. Formes de conditionnement	15
I.11.3.8. Applications typique	15

Chapitre II : Aluminium.

II.1. L'élément Aluminium.....	17
II.2. Les alliages d'aluminium.....	18
II.2.1. Les alliages d'aluminium pour corroyage.....	19
II.2.1.1. Les différentes séries.....	19
• Série 1000 : Aluminium pur	
• Série 2000 : Aluminium-Cuivre (Al-Cu)	
• Série 3000 : Aluminium-Manganèse (Al-Mn)	
• Série 4000 : Aluminium-Silicium (Al-Si)	
• Série 5000 : Aluminium-Magnésium (Al-Mg)	
• Série 6000 : Aluminium-Magnésium-Silicium (Al-Mg-Si)	
• Série 7000 : Aluminium-Zinc (Al-Zn)	
II.2.2. Les alliages d'aluminium pour fonderie.....	21
II.2.2.1. Désignation des alliages de fonderie.....	21
II.2.2.2. Les différentes séries.....	22
• AU – Alliages Aluminium-Cuivre (série 20000)	
• AS – Alliages Aluminium-Silicium (série 40000)	
• AG – Alliages Aluminium-Magnésium (série 50000)	
• AZ – Alliages Aluminium-Zinc (série 70000)	
II.3. Domaine d'application de l'aluminium.....	23

Chapitre III : Technique expérimentale Elaboration et caractérisation.

III.1. Introduction	25
III.2. Matériaux utilisés	25
III.3. Préparation des mélanges	26
III.4. Compactage des échantillons	28
III.5. Frittage	29
III.6. Polissage des échantillons métallographiques	30
III.6.1. Enrobage des échantillons	30
III.6.2. Polissage (préparation de la surface)	31
III.6.3. Polissage final	32
III.7. Microscopie optique	33
III.8. La dureté	33
III.9. L'essais de tribologie	35

Chapitre IV : Résultats et discussion.

IV.1. Introduction.....	37
IV.2. Microscope optique.....	37
IV.3. Calcul de porosité ouverte avec ImageJ	39
IV.4. Dureté Vickers	40
IV.5. Tribologie	41
IV.6. Microstructure des traces d'usure.....	44
IV.7. Profil 2D	46
IV.8. Taux d'usure	47

Liste des Figures

Figure I.1 : matériaux composite renforcé par des particules.....	7
Figure I.2 : matériaux composites selon la forme des composants.....	9
Figure I.3 : Trois grandes familles de matrices.....	9
Figure I.4 : les matériaux de renfort selon la structure.....	12
Figure I.5 : matériaux de renfort selon les dimensions géométrique.....	13
Figure III.1 : Poudre d'aluminium.....	25
Figure III.2 : Poudre TiO ₂ 1D.....	25
Figure III.3 : Balances analytique Nimbus.....	27
Figure III.4 : Agitateur magnétique arco avec plaque chauffante.....	28
Figure III.5 : Presse hydraulique manuelle Specac.....	29
Figure III.6 : Four à chambre – VHT Séries.....	30
Figure III.7 : les échantillons enrobés.....	31
Figure III.8 : Machine Presi Mecatech 250.....	32
Figure III.9 : Poudre d'alumine (Al ₂ O ₃).....	32
Figure III.10 : Microscope optique de type Nikon Eclipse LV150N.....	33
Figure III.11 : duromètre de type Vickers (INOVATEST NEMESIS 9100).....	34
Figure III.12 : tribomètre de type (CSM Tribomètre, Switzer land).....	35
Figure IV.1 : A ,B,C,D,E et F représentent des Micrographies optique des composites élaborées (1,2,3,4,5,6) respectivement (agrandissement ×200).....	38
Figure IV.2 : les image des échantillons avec imagej.....	39
Figure IV.3 : histogramme de la dureté Vickers pour les échantillons.....	41

Figure IV.4 : La moyenne de coefficient de friction (μ) des échantillons dans les derniers 5 mètre du test.....	42
Figure IV.5: Variation de coefficient de friction avec distance de glissement des échantillon....	43
Figure IV.6 : micro graphies de microscope optique des traces d'usure Valley des échantillons (1,2,3,4,5,6) respectivement (A,B,C,D,E,F).....	44
Figure IV.7 : micro graphies de microscope optique des traces d'usure Hill des échantillons (1,2,3,4,5,6) respectivement (A,B,C,D,E,F).....	45
Figure IV.8 : la variation de la profondeur en fonction de la largeur de trace d'usure pour les différents échantillons (a) Hill et (b) Valley.....	46
Figure IV.9 : Taux d'usure des échantillons.....	48

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Carte d'identité de l'aluminium.....	18
Tableau III.1 : Les données de préparation des mélanges.....	26
Tableau IV.1 : Taux de porosité ouverte des échantillons.....	40
Tableau IV.2 : résultats de la dureté Vickers pour les différents échantillons.....	40
Tableau IV.3 : les données de teste tribologie.....	47
Tableau IV.4 : Taux d'usure des échantillons.....	48

Introduction générale

La croissance technologique et industrielle dans le monde actuel est extrêmement rapide. Chaque jour apporte son lot de nouveaux progrès, dans un contexte de forte concurrence entre pays, et parfois même entre organismes au sein d'un même pays. Pour que les industriels puissent rester compétitifs sur le marché, ils sont contraints d'améliorer continuellement leurs produits, tant en termes de coût que de qualité. L'un des aspects essentiels pour atteindre cet objectif est le choix des matériaux utilisés. Ainsi, des organismes dédiés exclusivement à la recherche ont été créés par les États et les entreprises industrielles. Les chercheurs ont ainsi développé des matériaux aux caractéristiques inimaginables il y a seulement quelques décennies, parmi lesquels figurent les composites à matrice métallique.

Les composites sont constitués de deux matériaux ou plus, distincts sur le plan physique et/ou chimique. Un composite est composé de trois éléments principaux : la matrice, le renforcement, et l'interface entre ces deux composants. La matrice constitue la phase continue du composite et a pour rôle de maintenir les renforts dans une orientation précise. Le renfort, quant à lui, est un matériau plus résistant réparti dans la matrice. La matrice et les renforts sont liés soit chimiquement, soit mécaniquement. Ensemble, la matrice, les renforts et leur interface déterminent les propriétés du composite. Bien que les caractéristiques de la matrice puissent être modifiées lors du processus de fabrication, celles des matériaux de renfort restent généralement inchangées, sauf dans de rares cas de traitements à très haute température.

L'objectif de ce travail est d'élaborer des composites à matrice métallique (CMMp) et d'étudier l'impact des particules céramiques sur leurs propriétés. Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente, dans une première partie, des définitions générales sur les composites à matrice métallique et leurs différents types.
- Le deuxième chapitre décrit la technique d'élaboration.
- Enfin, le troisième chapitre expose les résultats expérimentaux antérieurs (bibliographie) concernant l'influence des particules TiO_2 unidimensionnel sur les propriétés des CMMp.

Chapitre I :

Recherche bibliographique sur
Les composites à matrice
métallique CMMp.

I.1. Introduction :

La création de nouveaux matériaux répond aux exigences des utilisateurs, notamment des constructeurs. Ces derniers recherchent constamment des matériaux offrant de meilleures performances, à moindre coût et d'une durabilité accrue. Les chercheurs se trouvent souvent dans l'obligation d'optimiser les solutions existantes, mais dans certains cas, ils doivent repenser entièrement le problème et envisager des "nouveaux matériaux". En réalité, il ne s'agit plus de découvrir de nouveaux matériaux, mais plutôt de concevoir de nouvelles combinaisons de matériaux. L'un des résultats de cette approche est le développement d'un matériau composite, qui constitue le sujet de notre étude.

I.2. Historique des matériaux composites à base de métal : [1].

Le développement des matériaux composites (incluant les matrices polymères, céramiques et métalliques) peut se segmenter en quatre générations distinctes.

- Première génération (des années 1940) : polymères renforcés par des fibres de verre (PRFI).
- Deuxième génération (années 1960) : Des composites de haute performance dans l'ère post-Spoutnik.
- Troisième génération : l'exploration de nouveaux marchés et la synergie des propriétés (décennies 1970 et 1980).
- Quatrième génération (décennie 1990) : composites hybrides et nan composites.

Il est évident à partir de la classification elle-même que la matrice métallique n'a pas connu d'évolution significative durant la première génération de développement de composites.

I.2.1. Première génération (années 1940) : Polymères renforcés de fibres de verre.

Durant les années 1940, la première génération de matériaux composites a été dominée par l'utilisation de polymères renforcés de fibres de verre. Ces matériaux ont vu le jour principalement dans un contexte militaire et industriel, notamment pendant et après la Seconde Guerre mondiale.

I.2.2. Deuxième génération (1960) : Composites de haute performance à l'ère post-Spoutnik :

Le lancement du satellite soviétique Spoutnik en 1957 a marqué un tournant significatif dans l'histoire des matériaux composites.

Cet événement a déclenché une intense compétition spatiale entre les grandes puissances. Les vaisseaux spatiaux devaient être conçus avec des matériaux plus légers que les métaux traditionnels et plus résistants que les composites, tout en étant capables de supporter des températures élevées atteignant 1500 °C lors de la rentrée dans l'atmosphère. Les Cincinnati Développement Laboratories ont innové en associant de l'amiante à de la résine phénolique pour créer un matériau potentiel pour le nez des engins spatiaux.

C'est durant cette période que les chercheurs ont commencé à explorer les composites à matrice métallique comme solution.

Avant cette avancée, peu de recherches avaient été menées dans ce domaine, à l'exception de quelques tentatives pour renforcer le cuivre avec des fils d'acier.

La compétition spatiale a ainsi stimulé l'imagination des scientifiques et des innovateurs, les incitant à développer des fibres de carbone et de bore.

I.2.3. Troisième génération (années 1970 et 1980) :

Exploration de nouveaux marchés et synergie des matériaux. Après la fin de la course à la lune, les chercheurs ont commencé à envisager la réutilisation des vaisseaux spatiaux, à l'instar de MIR de l'U.R.S.S , Skylab et de la navette spatiale. Un vaisseau spatial réutilisable doit faire face à des variations de température fréquentes.

Cela a conduit les scientifiques à explorer des matériaux possédant des caractéristiques telles qu'une rigidité et une résistance élevées, une capacité à supporter des températures élevées, ainsi qu'un faible coefficient de dilatation thermique (C.T.E).

Ces propriétés sont essentielles pour éviter que le matériau ne se contracte ou ne se dilate de manière excessive lors des cycles thermiques.

Au milieu des années 1970, de nouvelles fibres ont été mises au point, ainsi que des revêtements pour les fibres de carbone et de bore, permettant leur utilisation dans des matrices métalliques.

En associant des particules de Sic à une matrice métallique comme l'aluminium, on parvient à diminuer le C.T.E du mélange. Ainsi, le C.T.E du composite peut être ajusté en modifiant la proportion volumique de l'armature.

Il est même possible d'obtenir une expansion thermique nulle en combinant des matrices et des renforts ayant des coefficients d'expansion thermique compensatoires.

Cette caractéristique est particulièrement utile dans des applications nécessitant une grande stabilité dimensionnelle, comme celles liées à l'espace.

Les fibres continues de Sic, de bore ou de carbone augmentent considérablement le module du composant.

Par exemple, l'ajout de 30 % de fibres de carbone continues à de l'aluminium peut faire doubler le module du métal.

Le principal défi pour les composites à matrice métallique, qui freine leur adoption sur les marchés de consommation en rapide évolution, est leur coût.

Une exception notable se trouve dans le secteur des équipements sportifs, où des matériaux comme le Dur Alcan (aluminium renforcé avec 10 % de particules d' Al_2O_3) et l'aluminium renforcé avec 20 % de particules de Sic sont utilisés.

I.2.4. Quatrième génération (1990) :

Hybrides et nano composites : Les matériaux hybrides intègrent des éléments organiques et inorganiques à l'échelle moléculaire.

L'exploration de la bio-minéralisation a historiquement suscité l'intérêt des chercheurs pour les potentialités des structures hybrides, donnant naissance à un nouveau champ scientifique connu sous le nom de bio mimétisme.

Par exemple, des métaux tels que l'aluminium sont associés à des nanoparticules de Sic, ce qui améliore les propriétés mécaniques.

Les scientifiques s'inspirent de la structure des os, illustrant ainsi un exemple manifeste de biomimétisme.

I.3. Définition des composites à matrice métallique :

Si l'on adopte une interprétation large du terme "composite", on peut considérer qu'un morceau de métal polycristallin constitue un composite formé de multiples grains.

Toutefois, il est essentiel de préciser la définition de ce terme, et nous établirons les critères suivants pour qualifier un composite :

- Il doit s'agir d'une association d'au moins deux matériaux chimiquement distincts, séparés par une interface bien définie.
- Les matériaux distincts qui composent le composite doivent être agencés de manière tridimensionnelle. (Les stratifiés, tels que les métaux plaqués ou les structures en nid d'abeille, ne sont pas considérés comme des composites fondamentaux si le même métal est utilisé dans l'ensemble.)
- Il doit être conçu pour offrir des propriétés qui ne pourraient pas être obtenues par l'un des composants pris isolément.

En général, les composites à matrice métallique se composent d'au moins deux éléments : le premier est la matrice métallique, qui est souvent un alliage, et le second est un renfort, généralement un composé intermétallique, un oxyde, un carbure ou un nitrure. Lors de la fabrication du composite, la matrice et le renfort sont mélangés. Cela permet de différencier un composite d'un alliage à deux phases ou plus, où la seconde phase se manifeste sous forme de particules, de réactions eutectiques ou eutectoïdes, etc. En d'autres termes, un composite débute comme une combinaison de composants distincts, à savoir la matrice métallique et le renfort.

Dans tous les cas, la matrice est définie comme un métal, bien qu'un métal pur soit rarement utilisé ; il s'agit généralement d'un alliage [2].

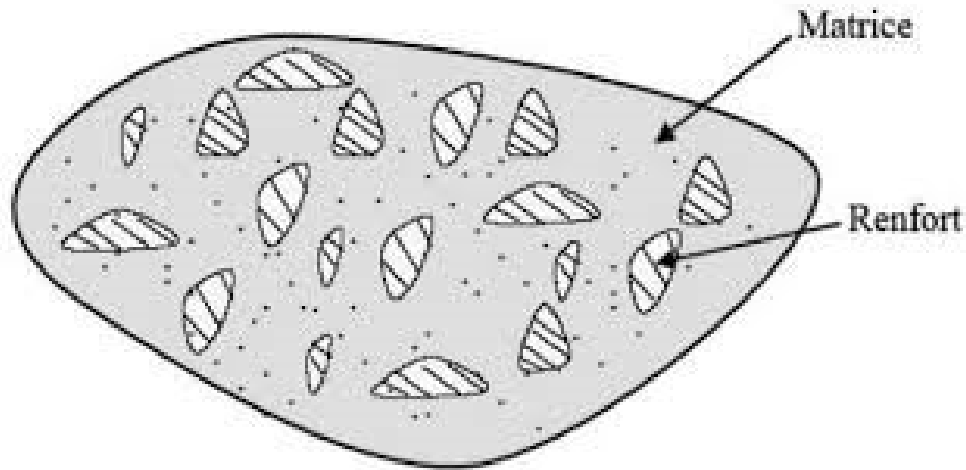


Figure I.1 : matériaux composite renforcé par des particules.

I.4. Intérêt des matériaux composites :

L'utilisation des matériaux composites est générée par leurs principales caractéristiques : L'allégement des structures, la bonne tenue en fatigue, la résistance à la corrosion, l'insensibilité aux produits chimiques couramment utilisés dans la mécanique et une meilleure tenue au feu, Par contre, les matériaux composites vieillissent sous l'action des agents extérieurs tels que l'humidité et la chaleur, et ont une tenue moyenne aux chocs et aux impacts.[3]

I.5. Différents types de matériaux composites : [3]

On peut classer les composites en deux catégories : les composites de grande diffusion et les composites de haute performance.

I.5.1. Matériaux composites de grande diffusion :

Les composites de grande diffusion présentent des avantages significatifs, notamment : une optimisation des coûts grâce à une réduction des prix de revient, une composition à base de polyester renforcé par des fibres de verre, qu'elles soient longues ou courtes (sous forme de mat ou de tissu), ainsi qu'une simplicité dans le processus de fabrication du matériau (moulage par contact, SMC et injection).

I.5.2 Matériaux composites de haute performance :

Les composites de haute performance sont principalement utilisés dans le secteur aéronautique, où des performances élevées sont requises en raison de leur forte valeur ajoutée. Les renforts utilisés sont généralement des fibres longues, avec un taux de renfort dépassant 50 %. Ces composites sont fabriqués par diverses méthodes, telles que : le drapage autoclave, l'enroulement filamentaire et le RTM. De nombreux procédés restent encore manuels, incluant les méthodes MM et CMC.

I.6. Classification des matériaux composites : [4]

Les matériaux composites sont classés en fonction de la forme et de la nature de leurs composants.

I.6.1. Classification des matériaux composites selon la forme des composants :

I.6.1.1. Composites à particules : le renfort est constitué de particules.

I.6.1.2. Composites à fibres : le renfort se présente sous forme de fibres, qui se subdivisent en :

- **Composites à fibres longues :** caractérisés par un ensemble de fibres continues, alignées et intégrées dans une matrice qui garantit leur cohésion.
- **Composites à fibres courtes :** le renfort est constitué de fibres discontinues disposées de manière aléatoire et non orientée.
- **Composites à renfort tissu :** un tissu est formé de fils tissés dans deux directions perpendiculaires, à savoir la direction de chaîne (liée à la direction longitudinale de la couche composite) et la direction de trame (associée à la direction transversale de la couche composite).

Les tissus varient en fonction du type de fils utilisés et du mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame.

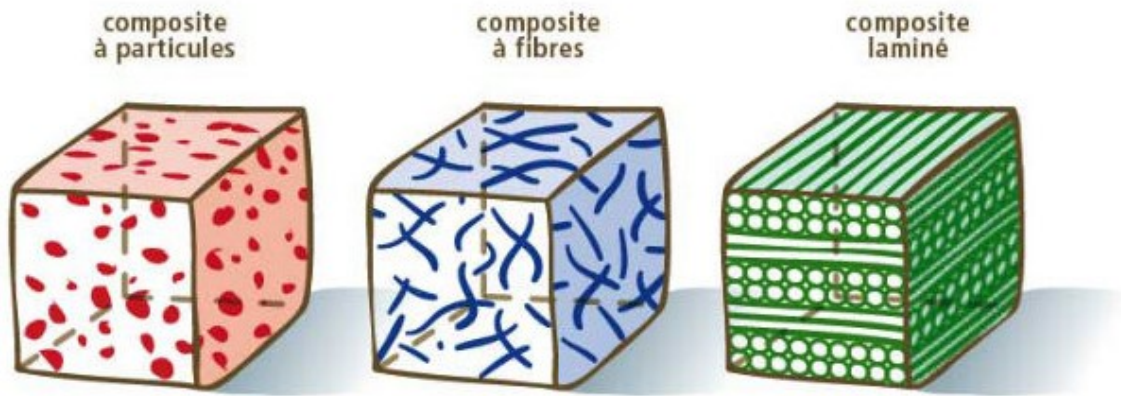


Figure I.2 : matériaux composites selon la forme des composants

I.6.2. Classification des matériaux composites suivant la nature des constituants :

En se référant à la matrice, on trouve des matériaux composites à :

- Matrice organique.
- Matrice métallique.
- Matrice céramique.

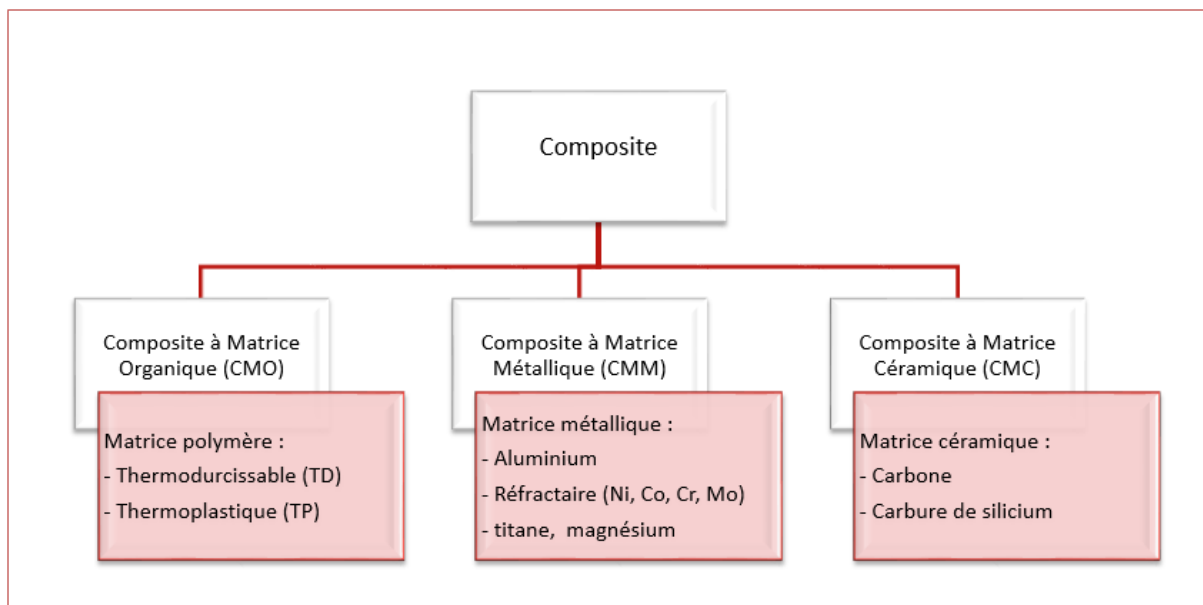


Figure I.3 : Trois grandes familles de matrices.

I.7. Les types de matrices métalliques :

Le choix de la matrice métallique dans un composite est crucial car elle influence les propriétés globales du matériau. Les principaux types de matrices métalliques sont décrits ci-dessous :

- **Matrice à base d'aluminium (AMC) :** Légère, résistante à la corrosion, avec de bonnes propriétés mécaniques.

Applications : automobile, aéronautique.

- **Matrice à base de titane (TMC) :** Excellente résistance mécanique et thermique, mais coûteuse. Utilisée dans l'aérospatial et le militaire.

- **Matrice à base de cuivre :** Haute conductivité thermique et électrique.

Applications : composants électroniques et dissipation thermique.

- **Matrice à base de magnésium :** Très légère, utilisée dans les applications nécessitant un faible poids (véhicules, aéronautique).

- **Matrice à base de fer ou d'acier :** Grande dureté, adaptée aux environnements sévères. Utilisée dans les outils de coupe et pièces structurelles. [5]

I.8. Matrice à base d'aluminium (AMC) :

L'aluminium est l'un des métaux les plus utilisés comme matrice dans les composites métalliques, en raison de sa faible densité ($2,7 \text{ g/cm}^3$), sa bonne conductivité thermique, sa résistance à la corrosion naturelle et sa facilité de mise en forme. Lorsqu'il est renforcé par des particules céramiques (telles que SiC , Al_2O_3 , ou TiO_2), ses propriétés mécaniques sont nettement améliorées, ce qui permet son emploi dans des applications structurelles avancées.[6]

I.8.1. Avantages de Matrice à base d'aluminium (AMC) :

- **Légèreté :** convient parfaitement aux applications où la réduction de poids est essentielle (automobile, aéronautique).
- **Bonne résistance à la corrosion :** due à la formation naturelle d'une couche d'oxyde protectrice.

- Renforcement mécanique : l'ajout de particules céramiques augmente la dureté, la résistance à l'usure et la tenue à haute température.
- Facilité de fabrication : les composites Al-matrice peuvent être produits par diverses méthodes comme le stir casting, la pulvérisation ou la métallurgie des poudres. [7]

I.8.2. Applications typiques :

- Composants de moteurs (pistons, cylindres)
- Pièces structurelles légères en aéronautique
- Disque de Frein
- Composant pour industries électronique.[8]

I.9. Définition des matériaux de renfort :

Les matériaux de renfort sont des éléments utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques ou physiques d'une structure ou d'un système. Ces matériaux sont conçus pour supporter les charges mécaniques, distribuer les contraintes et augmenter la résistance sans ajouter de poids ou de volume excessif.[9]

I.10. Classification des matériaux de renfort selon la structure : [10]

I.10.1 Fibres continues (Fibres continues) :

Les fibres continues représentent la forme la plus efficace pour transmettre les contraintes à travers la structure. Elles sont généralement de longueurs importantes par rapport à leur diamètre. Ces fibres sont produites par des techniques telles que l'étirage ou l'extrusion continue.

I.10.2. Fibres courtes (Fibres discontinues ou courtes) :

Ce sont des fibres de longueur limitée, utilisées lorsque la résistance directionnelle élevée n'est pas essentielle. Elles sont généralement dispersées de manière aléatoire dans la matrice ou le renfort, offrant une résistance plus répartie, mais moins importante que les fibres continues.

I.10.3. Particules et poudres (Particules, poudres) :

Les particules ou les poudres métalliques ou céramiques sont utilisées comme renforts pour améliorer des propriétés telles que la résistance à l'usure ou la dureté. Elles sont souvent utilisées dans des procédés comme la fabrication additive ou les couches de protection.

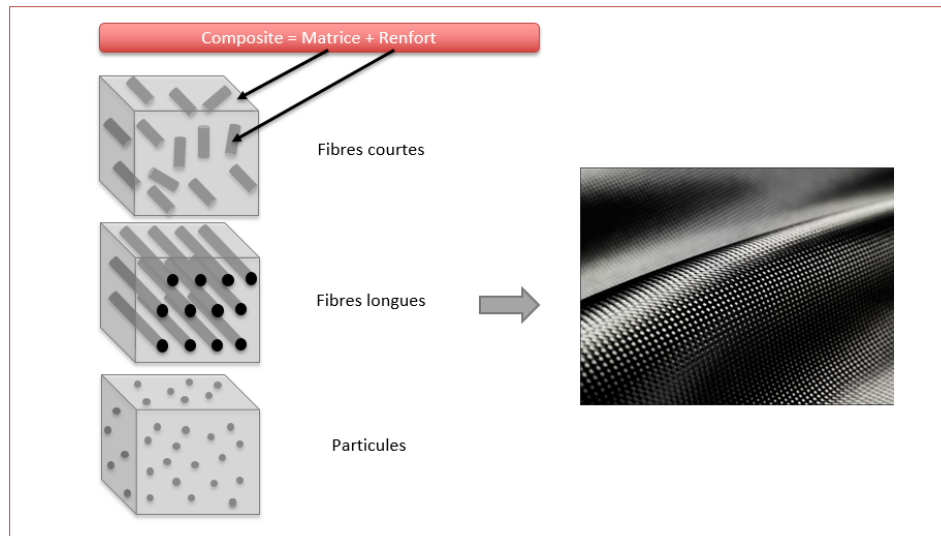


Figure I.4 : les matériaux de renfort selon la structure.

I.11. Types de matériaux de renfort selon les dimensions géométrique : [11]

I.11.1. Matériaux de renfort tridimensionnels (3D – Tridimensionnelles) :

Ce sont des structures plus complexes où les matériaux de renfort sont disposés dans les trois directions (X, Y, Z), et incluent des structures tissées, cousues ou tressées en 3D.

I.11.1.1. Caractéristiques :

Très haute résistance au délaminage et à l'impact

Excellente distribution des charges dans toutes les directions

Plus rigides mais plus complexes à produire

I.11.1.2. Applications :

Utilisés dans des applications structurelles lourdes, l'aéronautique, les boucliers de protection, et dans des domaines nécessitant une très grande résistance.

I.11.2. Matériaux de renfort bidimensionnels (2D – Bidimensionnelles) :

Ce sont des tissus ou des plaques dans lesquels les fibres sont disposées dans deux directions perpendiculaires (souvent X et Y).

I.11.2. 1. Caractéristiques :

- Bonne résistance dans deux directions.
- Meilleure distribution des contraintes.
- Facilité de mise en forme et de manipulation.

I.11.2.2. Applications :

Utilisés dans les tissus industriels, les réseaux de renforts, et les plaques techniques.

I.11.3. Matériaux de renfort unidimensionnels (1D – Unidimensionnelles) :

Il s'agit de fibres ou de fils longs avec une seule direction d'extension, généralement droite.

I.11.3.1 Caractéristiques :

- Haute résistance mécanique dans la direction longitudinale.
- Légèreté.
- Moins performant dans les directions transversales.

I.11.3.2 Applications :

Utilisés dans les câbles, les cordes haute résistance, et dans les composants soumis à des charges axiales.

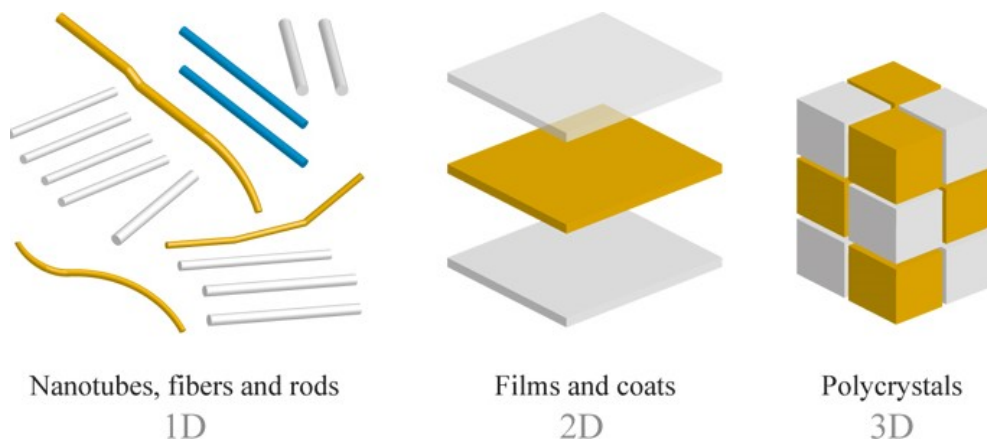


Figure I.5 : matériaux de renfort selon les dimensions géométrique.

I.11.3.3. Historique des matériaux de renforcement unidimensionnels :

L'utilisation des matériaux de renforcement unidimensionnels remonte à l'Antiquité. Les civilisations anciennes, telles que les Égyptiens, intégraient déjà des fibres naturelles comme la paille dans l'argile pour renforcer la résistance mécanique des briques séchées au soleil. Au cours du Moyen Âge, les fibres végétales telles que le lin, le chanvre et le coton furent largement utilisées pour la fabrication des cordages, des voiles et des textiles renforcés.

À partir du XIX^e siècle, l'essor de la chimie industrielle a permis la mise au point des premières fibres artificielles, notamment la rayonne (soie artificielle). Le développement s'est poursuivi avec l'invention du nylon dans les années 1930, une fibre synthétique offrant d'excellentes propriétés mécaniques.

Au milieu du XX^e siècle, l'émergence des composites modernes a été marquée par l'introduction des fibres de verre, puis par les fibres de carbone et les fibres d'aramide (telles que le Kevlar), destinées à des applications exigeant à la fois légèreté et haute résistance (aéronautique, spatial, militaire).

Dans les décennies récentes, les recherches ont abouti à la création de renforts de dimension nanométrique, tels que les nanotubes de carbone, qui offrent des propriétés mécaniques exceptionnelles et ouvrent de nouvelles perspectives pour les matériaux composites avancés.[12]

I.11.3.4. Propriétés générales des matériaux 1D :

Ces matériaux présentent des caractéristiques spécifiques :

Résistance mécanique élevée dans la direction longitudinale

Module d'élasticité élevé

Faible masse volumique pour certaines fibres

Flexibilité permettant un façonnage facile

I.11.3.5. Avantages des matériaux de renfort 1D :

Transmission optimale des charges

Légèreté associée à une haute rigidité

Facilité d'intégration dans différentes structures

I.11.3.6 Limites d'utilisation :

Résistance limitée dans les directions transversales

Besoin d'une matrice ou d'un support pour l'alignement

Sensibilité aux défauts (microfissures, ruptures locales)

I.11.3.7. Formes de conditionnement :

Les matériaux 1D peuvent être fournis sous différentes formes :

Monofilaments

Torons de fils torsadés

Tissus de fibres alignées

Bandes continues de renfort

I.11.3.8. Applications typiques :

Câbles de ponts suspendus

Armatures pour béton renforcé

Textiles techniques haute performance

Structures aéronautiques et spatiales

Dispositifs médicaux (ligaments artificiels, fils chirurgicaux)

Chapitre II :

Aluminium.

II.1. L'élément Aluminium :

L'élément Aluminium : L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al et de numéro atomique 13. C'est un élément important sur la Terre avec 1,5 % de la masse totale. C'est un métal pauvre, argenté et malléable. Il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité. [13]

En fait, il est très oxydable mais à l'air, il se forme une couche de quelques micromètres d'alumine, un oxyde imperméable de formule Al_2O_3 qui protège le reste du métal et se reforme très rapidement. On parle alors d'une protection cinétique contrairement à la protection thermodynamique car l'aluminium reste très oxydable.

Il est principalement extrait de la bauxite, minéral où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. Il peut aussi être extrait de la néphéline, de la leucite, de la sillimanite, de l'andalousite et de la muscovite. [13]

L'aluminium est un métal mou, léger, mais résistant avec un aspect argent-gris mat, dû à une mince couche d'oxydation de cinq à dix nanomètres qui se forme rapidement quand on l'expose à l'air et qui empêche la corrosion de progresser dans des conditions normales d'exposition chimiques.

Ce film composé d'alumine se forme spontanément très rapidement quand l'aluminium est mis en contact avec un milieu oxydant comme l'oxygène de l'air. À la différence de la plupart des métaux, il est utilisable même s'il est oxydé en surface. On peut même dire que sans cette couche d'oxyde, il serait impropre à la plupart de ses applications. Il est possible d'augmenter artificiellement l'épaisseur de cette couche d'oxydation par anodisation, ce qui permet d'augmenter la protection et de décorer les pièces en colorant la couche d'oxyde. Contrairement à l'aluminium qui est un très bon conducteur, l'oxyde d'aluminium est un excellent isolant. [14]

L'aluminium a une densité environ trois fois plus faible que celle de l'acier ou du cuivre ; il est malléable, ductile et facilement usiné et moulé. Il possède une excellente résistance à la corrosion et une grande longévité. Il est également paramagnétique et ne provoque pas d'étincelles. C'est le deuxième métal le plus malléable et le sixième le plus ductile [14]. Bombardé par un laser à électrons libres, l'aluminium devient transparent dans les ultraviolets extrêmes.

En tonnage et en valeur, l'aluminium est le métal le plus utilisé après le fer, grâce à sa légèreté et sa bonne conductivité électrique et thermique. L'aluminium pur est mou et fragile,

mais avec des petites quantités de cuivre, magnésium, manganèse, silicium et d'autres éléments, il peut former des alliages aux propriétés variées.

Parmi les secteurs utilisant l'aluminium, on peut citer :

- Les transports (automobiles, avions, camions, trains, bateaux, vélos etc.) ;
- L'emballage (boîtes de conserve, papier aluminium, canettes, barquettes, aérosols, etc.)

et notamment les emballages alimentaires ;

- la construction (fenêtres, portes, gouttières, etc.) **[14]**

Propriété	Valeur
Symbole	Al
Numéro atomique	13
Masse molaire atomique	$27 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Température de fusion	$660 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Point d'ébullition	$2056 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Densité	2,7
Résistivité électrique	$2,7 \times 10^{-8} \Omega\cdot\text{m}$
Conductivité thermique	$22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Capacité thermique massique	$9,102 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Système cristallin	Cubique à faces centrées
Module d'élasticité	69 000 MPa
Coefficient de dilatation	$24 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Tableau II.1 : Carte d'identité de l'aluminium.[14]

II.2. Les alliages d'aluminium :

Les alliages d'aluminium sont aussi appelés alliages légers compte tenu de la masse volumique de l'aluminium comparée à celle des autres métaux.

Ils sont divisés en deux grandes catégories : les alliages de fonderie, qui sont élaborés tenant compte de leurs propriétés à l'état liquide afin de produire des pièces de fonderie saines, et les alliages de corroyage élaborés en tenant compte plus particulièrement de leur capacité à

être mis en forme à l'état solide. Pour différencier un alliage d'un autre, il est important d'avoir un système normalisé. [15]

II.2.1 Les alliages d'aluminium pour corroyage :

Les alliages d'aluminium pour corroyage sont des alliages à base d'aluminium destinés pour la majorité à être transformés par des techniques de forge (laminage, filage, matriçage, forge, etc.) La norme européenne EN 573-1 indique que cet ensemble de 4 chiffres doit être précédé pour les alliages destinés à être corroyés par le préfixe EN, les lettres « A » (aluminium), « W » (pour les produits corroyés, wrought en anglais) et un tiret « - ». Exemple : EN AW-4007 La notation complète est rarement utilisée. Par souci de simplification, seule la désignation à quatre chiffres sera utilisée dans le reste de l'article. C'est la notation la plus utilisée.[15]

II.2.1.1. Les différentes série :

Série 1000 (aluminium) :

Il ne s'agit pas à proprement parler d'alliage puisqu'il s'agit de nuances, en principe sans ajout d'éléments.

Cependant, les différentes nuances de la série 1000 se distinguent par la présence plus ou moins importante d'impuretés. Souvent, le troisième chiffre indique le degré de pureté en donnant la valeur de la première décimale à ajouter à 99 %. [15]

Série 2000 (aluminium cuivre) :

L'élément d'alliage de la famille 2000 est le cuivre (Cu). Ils obtiennent leurs caractéristiques mécaniques par durcissement structural. Ils sont caractérisés par de bonnes caractéristiques mécaniques notamment à l'état trempé revenu ou mûré. C'est grâce à ces caractéristiques mécaniques qu'ils ont été choisis pour les applications aéronautiques. Ils présentent également de bonnes aptitudes de tenue à chaud et pour le décolletage. En revanche, ils ont une résistance à la corrosion faible en atmosphère corrosive du fait de la présence de cuivre. Ces alliages ont de nombreuses applications en aéronautique et en mécanique. En général, ils sont utilisés pour des pièces soumises à des contraintes. [15]

Série 3000 (aluminium manganèse) :

L'élément d'alliage de cette série est le manganèse (Mn). Pour certains alliages de cette famille, le taux de magnésium (Mg) est relativement important, on peut parler d'alliage aluminium manganèse magnésium (Al-Mn-Mg). Le manganèse a pour effet d'augmenter les

caractéristiques mécaniques. Pour augmenter les caractéristiques mécaniques, il est également possible de jouer sur le taux de cuivre (jusqu'à 0,20 %). Ce sont des alliages à écrouissage. Leurs caractéristiques mécaniques ne sont pas obtenues par traitement thermique mais par la déformation à froid. Ces alliages sont caractérisés par des caractéristiques mécaniques relativement faibles, une très bonne aptitude à la mise en forme, une bonne soudabilité et une bonne résistance à la corrosion. [15]

Série 4000 (aluminium silicium) :

L'élément d'alliage de cette série est le silicium (Si). Les alliages de la série des 4000 sont nettement moins utilisés que les alliages des autres séries. Les alliages aluminium silicium sont principalement des alliages de fonderie. [15]

Série 5000 (aluminium magnésium) :

L'élément d'alliage est le magnésium (jusqu'à 5%). Ce sont des alliages par écrouissage. Ces alliages ont des caractéristiques mécaniques moyennes qui augmentent avec le taux de magnésium. Ces caractéristiques augmenteront également avec le taux d'écrouissage. Ils ont une bonne aptitude à la déformation. Cette aptitude diminuant si le taux de magnésium augmente. Ils ont un excellent comportement à la soudure et à ce titre sont utilisés en chaudronnerie soudure. [15]

Série 6000 (aluminium magnésium silicium) :

Les éléments d'alliage de cette série sont le magnésium (Mg) et le silicium (Si). Cette famille d'alliage a une grande importance industrielle. Elle est très utilisée pour les profilés. Ils ont une très bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage principalement) et à la mise en forme à froid à l'état recuit. Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et sont inférieures à celles des alliages 2000 et 7000. Ces caractéristiques peuvent être augmentées par addition de silicium qui donnera le précipité durcissant Mg_2Si . Ils ont une excellente résistance à la corrosion notamment atmosphérique. Ils se soudent très bien (soudure à l'arc ou brasage). [15]

Série 7000 (aluminium zinc) :

L'élément d'alliage de cette série est le zinc (Zn). Globalement, ils ont de très bonnes caractéristiques mécaniques ; ce sont les alliages d'aluminium à haute résistance. Malheureusement ces très bonnes caractéristiques mécaniques sont obtenues au détriment de la résistance à la corrosion. Pour retrouver une bonne résistance à la corrosion, il faut

effectuer ce qui est appelé un sur-revenu ou revenu à double palier (T7). Ce traitement se paie par une baisse des caractéristiques mécaniques. Ces alliages se divisent en deux groupes : les 7000 avec addition de cuivre et les 7000 sans addition de cuivre. [15]

II.2.2. Les alliages d'aluminium pour fonderie :

Les alliages d'aluminium pour fonderie sont des alliages dont le constituant principal est l'aluminium, destinés à être transformés par des techniques de fonderie. Ils sont souvent appelés « alliages légers » du fait de leur masse volumique nettement inférieure à celles d'autres métaux utilisés dans l'industrie.

II.2.2.1. Désignation :

Comme pour les alliages d'aluminium pour corroyage, il existe plusieurs modes de désignation, dont une numérique (EN 1780-1). Il s'agit d'une désignation à 5 chiffres dont le premier suit la même règle que celle qui codifie les alliages pour corroyage. Pour les plus employés :

Le deuxième chiffre indique le groupe de l'alliage. Cette notion de groupe est utilisée pour les alliages normalisés (EN 1706). Chaque groupe présente un ensemble de caractéristiques mécaniques ou physiques similaires. Par exemple, les alliages du groupe AlSi ont une composition proche de l'eutectique aluminium-silicium (12,6 % en masse), ce qui leur confère une excellente aptitude à la coulée.

Désignation basée sur les symboles chimiques :

Il existe aussi une désignation dite « chimique » ou « symbolique », elle aussi normalisée (EN1780-2). Elle reprend les symboles des constituants de l'alliage, suivis, pour les principaux, de leurs proportions dans l'alliage. Cependant, ces proportions sont indiquées en pourcentage massique, il ne s'agit donc pas d'une véritable formule chimique.

Exemple : Al Si5Cu3Mg : alliage contenant (environ) 5% de silicium, 3% de cuivre et moins de 1% de magnésium.

Désignation complète :

Les normes prévoient que la désignation numérique ou symbolique soit précédée par :

- EN qui signifie que l'appellation est conforme aux normes européennes
- la lettre A (aluminium)
- une lettre représentant la forme du produit

- B : lingot

- C : pièce moulée
- M : alliage mère (alliage qui sera réutilisé pour l'élaboration d'autres alliages pour fonderie ou écrouissage).
- Un tiret

Représentent un alliage de fonderie base aluminium conforme aux norme CEN comportant entre autres 4,20 à 5,0 % de cuivre, 0,15 à 0,35 % de magnésium et 0,15 à 0,30% de titane.

La désignation complète est assez peu utilisée. [15]

II.2.2.2. Les différentes séries :

Les AU - alliages aluminium-cuivre, série 20000 :

Les alliages d'aluminium-cuivre ont été largement utilisés sous forme fondue et corrigée lorsque la résistance et la ténacité sont requises. Ces alliages présentent une résistance et une dureté élevées à température ambiante et élevée. Les premiers alliages de fonderie d'aluminium significatifs contenaient du cuivre à des concentrations allant jusqu'à 10%, sans aucune compréhension du traitement thermique, ces alliages présentaient des résistances et des duretés considérablement améliorées à l'état brut de fonderie. [15]

Les AS - alliages aluminium-silicium, série 40000 :

Les alliages aluminium-silicium sont parfois appelés silumins ; l'Alpax fait partie de cette famille. Ce sont les plus appropriés à la réalisation des pièces de fonderie. De nombreuses nuances existent, souvent avec adjonction de magnésium et de titane. Certains alliages de cette série contiennent aussi du cuivre, ce qui permet d'associer les propriétés du silicium et du cuivre, et d'obtenir ainsi des alliages ayant de bonnes caractéristiques mécaniques et une très bonne aptitude à l'usinage tout en évitant le principal défaut des AU (série 20000), à savoir le risque de criques. [15]

Les AG - alliages aluminium-magnésium, série 50000 :

Les alliages aluminium-magnésium sont beaucoup moins utilisés que les AS ou même les AU. Il s'agit d'alliages pauvres en silicium, auxquels la teneur en magnésium (comprise entre 3 % et 10 % suivant les nuances) confère une bonne résistance mécanique à l'état brut (F). [15]

Les AZ - alliages aluminium-zinc, série 70000 :

Le principal représentant de cette série assez peu courante en fonderie, est l'A-Z5G (71000) qui est principalement utilisé en moulage sable par gravité, avec refroidissement contrôlé après solidification (trempe au démoulage) et vieillissement naturel (maturation) (ST1). Les alliages aluminium-zinc sont beaucoup plus courants en produits de corroyages qu'en fonderie. [15]

II.3. Domaine d'application de l'aluminium :

Aéronautique et spatial :

- Composants de structure (fuselage, longerons, cadres)
- Pièces mécaniques soumises à fortes contraintes
- Supports de voilure, trains d'atterrissage (dans certains cas)

Automobile (haut de gamme et sport) :

- Pièces de châssis légères à haute résistance
- Supports de suspension
- Bras de direction ou bras oscillants
- Éléments d'allègement renforcés

Armement / Défense :

- Corps d'armes légères ou pièces mobiles
- Éléments de structure de véhicules militaires
- Supports de blindage légers

Industrie mécanique et ingénierie :

- Outillage de précision nécessitant rigidité et stabilité dimensionnelle
- Moules ou pièces de machines soumises à fortes charges

Sport et loisirs :

- Cadres de vélo haute performance
- Composants de skateboard, trottinettes
- Pièces de drones ou modèles réduits nécessitant une forte légèreté

Chapitre III :

Technique expérimentale
Elaboration et caractérisation.

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les matières premières utilisées ainsi que les techniques d'élaboration et de caractérisation des matières premières (poudres métalliques) et des produits élaborés, les modes opératoires ainsi que les paramètres expérimentaux.

III.2. Matériaux utilisés :

Dans ce travail, les matériaux de base employés sont l'aluminium (Al) (Figure III.1) en tant que matrice métallique et le dioxyde de titane (TiO_2) 1D (Figure III.2) sous forme particulaire comme agent de renforcement. L'aluminium utilisé est de haute pureté, tandis que le TiO_2 1D est sélectionné pour ses propriétés mécaniques et chimiques favorables.



Figure III.1 : Poudre d'aluminium

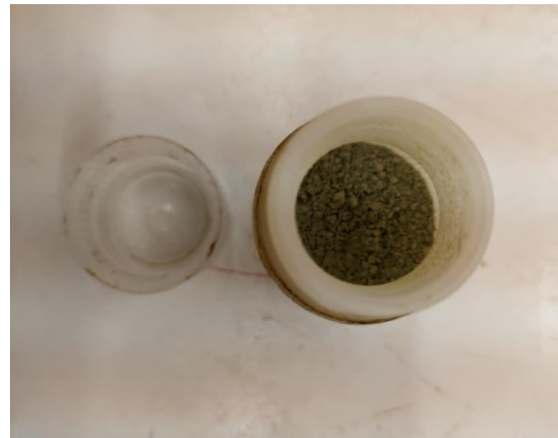


figure III.2 : Poudre TiO_2 1D

III.3. Préparation des mélanges :

Afin de préparer les composites, six formulations différentes ont été établies en variant la quantité de TiO_2 incorporée dans l'aluminium, selon les proportions massiques indiquées dans le tableau suivant :

Échantillon	% d'Aluminium(g)	% TiO ₂ (g)	Masse d'Aluminium (g)	Masse de TiO ₂ (g)
1	100	0	3,000	0,000
2	99.9	0.1	2,997	0,003
3	99.75	0,25	2,9925	0,0075
4	99.5	0,5	2,985	0,015
5	99.25	0,75	2,9775	0,0225
6	99	1	2,970	0,030

Tableau III.1 : Les données de préparation des mélanges

Les poudres ont été pesées avec une grande précision à l'aide d'une balance analytique (Figure.III.3)



Figure III.3 : Balances analytique Nimbus

Le mélange des poudres d'aluminium et de TiO_2 a ensuite été réalisé à l'aide d'un agitateur mécanique chauffant dans une solution d'éthanol jusqu'à l'évaporation de ce dernier, pendant une durée suffisante afin d'assurer une distribution homogène du renfort au sein de la matrice métallique (Figure III.4).



Figure III.4 : Agitateur magnétique arco avec plaque chauffante.

III.4. Compactage des échantillons :

Après l'étape de mélange, les poudres obtenues ont été compactées par pressage uni axial à froid en utilisant une presse hydraulique (Figure III.5). La pression appliquée correspond à une force de 7 tonnes, exercée afin d'assurer la cohésion initiale des particules et de former des échantillons compacts appelés « préformes vertes ».



Figure III.5 : Presse hydraulique manuelle Specac.

III.5. Frittage :

Le procédé de frittage a été réalisé dans un four sous atmosphère de vide (Figure III.6), afin de limiter les phénomènes d'oxydation de l'aluminium pendant le chauffage. Le cycle thermique appliqué est structuré comme suit :

- Rampe de chauffage : montée en température sur 50 minutes jusqu'à atteindre 700 °C.
- Temps de maintien à 700 °C : 20 minutes.
- Refroidissement : les échantillons ont été laissés à refroidir naturellement à l'intérieur du four pendant 50 minutes.

Ce traitement thermique permet la diffusion atomique et favorise la consolidation des particules, tout en limitant la formation de porosités et en optimisant les propriétés mécaniques du matériau composite final.



Figure III.6 : Four à chambre – VHT Séries

III.6. Polissage des échantillons métallographiques :

III.6.1. Enrobage des échantillons :

Les échantillons ont été enrobés dans une résine thermodurcissable (figure III.7) afin de :

- Faciliter leur manipulation durant le polissage,
- Assurer un bon maintien mécanique,
- Protéger les bords de l'échantillon pour éviter leur arrachement pendant l'usinage.

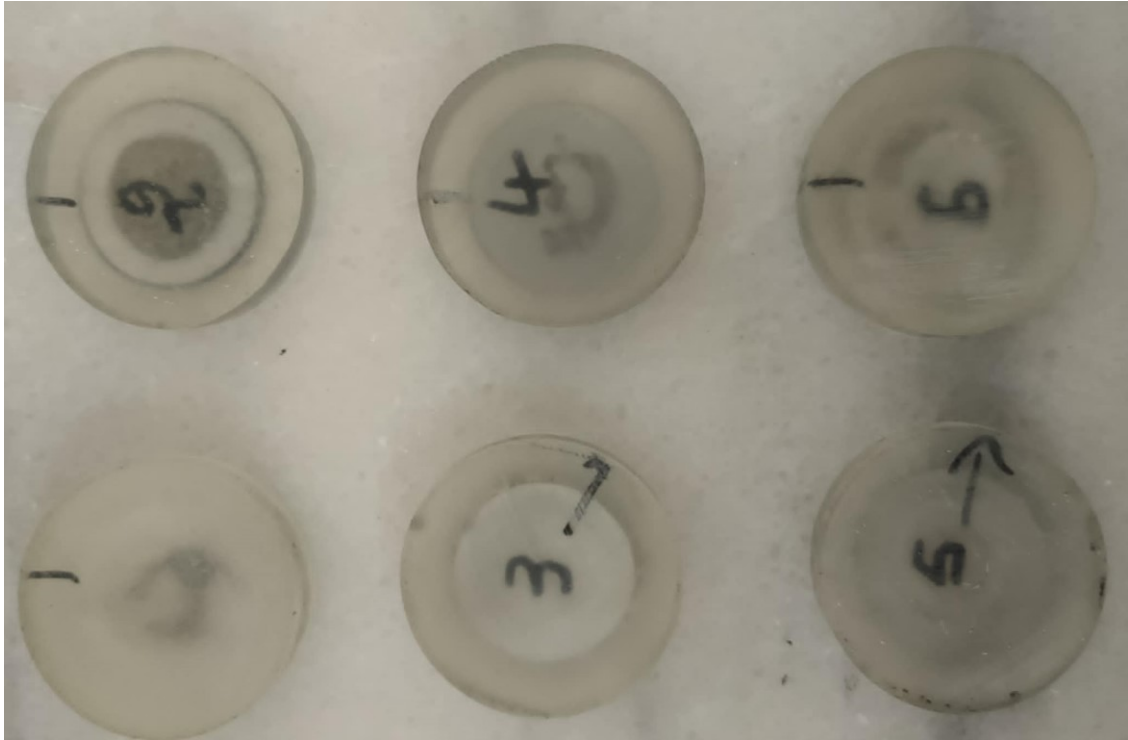


Figure III.7 : les échantillons enrobés.

III.6.2 Polissage (préparation de la surface) :

Après l'enrobage, les échantillons ont été soumis à un polissage progressif avec machines Presi Mecatech 250 (figure III.8) à l'aide de papiers

Abrasifs de granulométries successives dans l'objectif de :

- Éliminer les irrégularités de surface,
- Obtenir une planéité suffisante avant le polissage final.

Les papiers abrasifs utilisés sont :

- **P200** : abrasion grossière pour éliminer les irrégularités majeures,
- **P600** : réduction des rayures laissées par le papier P200,
- **P1200** : affinage de la surface pour une meilleure préparation.

Chaque étape de polissage a été réalisée avec ajout d'eau comme lubrifiant afin de limiter :

- L'échauffement de la surface.
- La contamination par les particules abrasives.



Figure III.8 : Machine Presi Mecatech 250

III.6.3 Polissage final :

Une fois le ponçage terminé, les échantillons ont été polis à l'aide d'une poudre d'alumine (Al_2O_3) (Figure III.9) en suspension sur un feutre de polissage.

Ce polissage permet d'obtenir une surface miroir, indispensable pour l'observation microscopique fine et l'analyse métallographique.



Figure III.9 : Poudre d'alumine (Al_2O_3).

III.7. Microscopie optique :

La microscopie est une méthode permettant d'examiner les échantillons à l'échelle microstructurale. À cet effet, un microscope optique de type Nikon Eclipse LV150N a été utilisé (Figure III.10). Ce dernier est équipé d'une caméra reliée à un ordinateur, ce qui permet d'enregistrer les micrographies observées.

Les observations ont été réalisées au sein du laboratoire d'études et de recherche en technologie industrielle (LERTI) de l'université Blida 1.



Figure III.10 : Microscope optique de type Nikon Eclipse LV150N

III.8. La dureté :

Les mesures de dureté ont été réalisées à l'aide d'un duromètre de type Vickers (INOVATESTNEMESIS 9100) (Figure III.11), en appliquant une charge de 5 kgf pendant un temps de maintien de 10 secondes. L'appareil est équipé d'un système de lecture automatique permettant de mesurer précisément les deux diagonales de l'empreinte. Pour chaque échantillon, cinq indentations ont été effectuées à différents endroits afin d'obtenir une moyenne représentative de l'ensemble de la surface.

L'essai de dureté Vickers utilise une pointe pyramidale en diamant à base carrée, formant un angle de 136° entre les faces opposées. La charge appliquée peut varier entre 1 et 120 kgf.

L'empreinte laissée par l'indenture a généralement une forme carrée, avec des côtés de l'ordre de 0,5 mm. La dureté Vickers (HV) est calculée selon la formule suivante :

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2}$$

Tels que :

HV : Dureté Vickers [$\text{kgf} \cdot \text{mm}^{-2}$]

F : Force appliquée [N]

d : Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]

g : Accélération terrestre. ($9,80665 \text{ [mm} \cdot \text{s}^{-2}]$)

La mesure de dureté pour nos échantillons a été faite au niveau de laboratoire études et Recherche en technologie industrielle (LERTI) (université de Blida 1).



Figure III.11 : duromètre de type Vickers (INOVATEST NEMESIS 9100)

III.9. L'essais de tribologie :

La tribologie est la science et l'ingénierie des surfaces en interaction en mouvement relatif.

Elle englobe l'étude et l'application des principes de frottement, de lubrification et d'usure.

Les essais d'usure par glissement à sec ont été réalisés en configuration bille sur disque à atmosphère ouverte, en utilisant un tribomètre de type (CSM Tribomètre, Switzer land) (Figure III.12). La bille était constituée d'un acier de type 100cr6 avec un diamètre de 6 mm et une dureté de HV~ 8 GPa. Les tests ont été effectués sous des charges normales appliquées de 1, 5 et 10 N et un glissement relatif (vitesse de 5 cm/s, et sur une distance de 150 m). Le coefficient de frottement à l'état d'équilibre (μ) de chaque configuration a été déterminé en prenant la moyenne des valeurs de μ des 10 derniers mètres enregistrés.

Le profilomètre TRIBOtechnique 2D a été utilisé pour mesurer la rugosité arithmétique R_a ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$) et les profils 2D des surfaces des échantillons après essais.

Les taux d'usure spécifiques (WR) ont été fournis par le logiciel de tribomètre en utilisant la formule suivante :

$$WR = V/(F_N \cdot d)$$

V : le volume d'usure.

F_N : la charge normale appliquée.

d : la distance totale parcourue par la balle lors de l'expérience de glissement.

Les tests de tribologie ont été faits au niveau de laboratoire études et recherche en technologie industrielle (LERTI). (Université de Blida 1).



Figure III.12 : tribomètre de type (CSM Tribomètre, Switzer land)

Chapitre IV :

Résultats et discussion.

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons les résultats expérimentaux obtenus sur les composites à matrice d'aluminium renforcés par des particules unidimensionnelles de TiO_2 . L'objectif est d'évaluer l'effet du renfort sur la microstructure, la porosité, la dureté, ainsi que sur le comportement tribologique de ces matériaux.

Les analyses ont été menées à l'aide de diverses techniques, notamment la microscopie optique, les essais de dureté Vickers, les tests tribologiques et la caractérisation des traces d'usure. Ces résultats sont discutés en mettant en relation la composition des composites avec leurs performances mécaniques et de surface, afin d'identifier la formulation optimale en termes de résistance à l'usure et de stabilité mécanique.

IV.2. Microscope optique :

L'image (A) illustre la microstructure de l'échantillon d'aluminium pur, obtenu par frittage naturel. La structure observée est relativement homogène, mais présente de nombreuses zones sombres signalant la présence de porosité résiduelle, typique de ce procédé, ainsi que des signes de manque de frittage (phases sombres). Concernant les autres échantillons composites (Figure IV.1 . B, C, D, E et F), il est difficile d'identifier les particules de renfort de TiO_2 1D dans la matrice, en raison de leur taille nanométrique, ce qui nécessite l'utilisation d'un microscope électronique à balayage (MEB) , ou un travail plus approfondi est requis pour comprendre les divers phénomènes de l'évolution de la microstructure qui se manifestent dans notre cas.

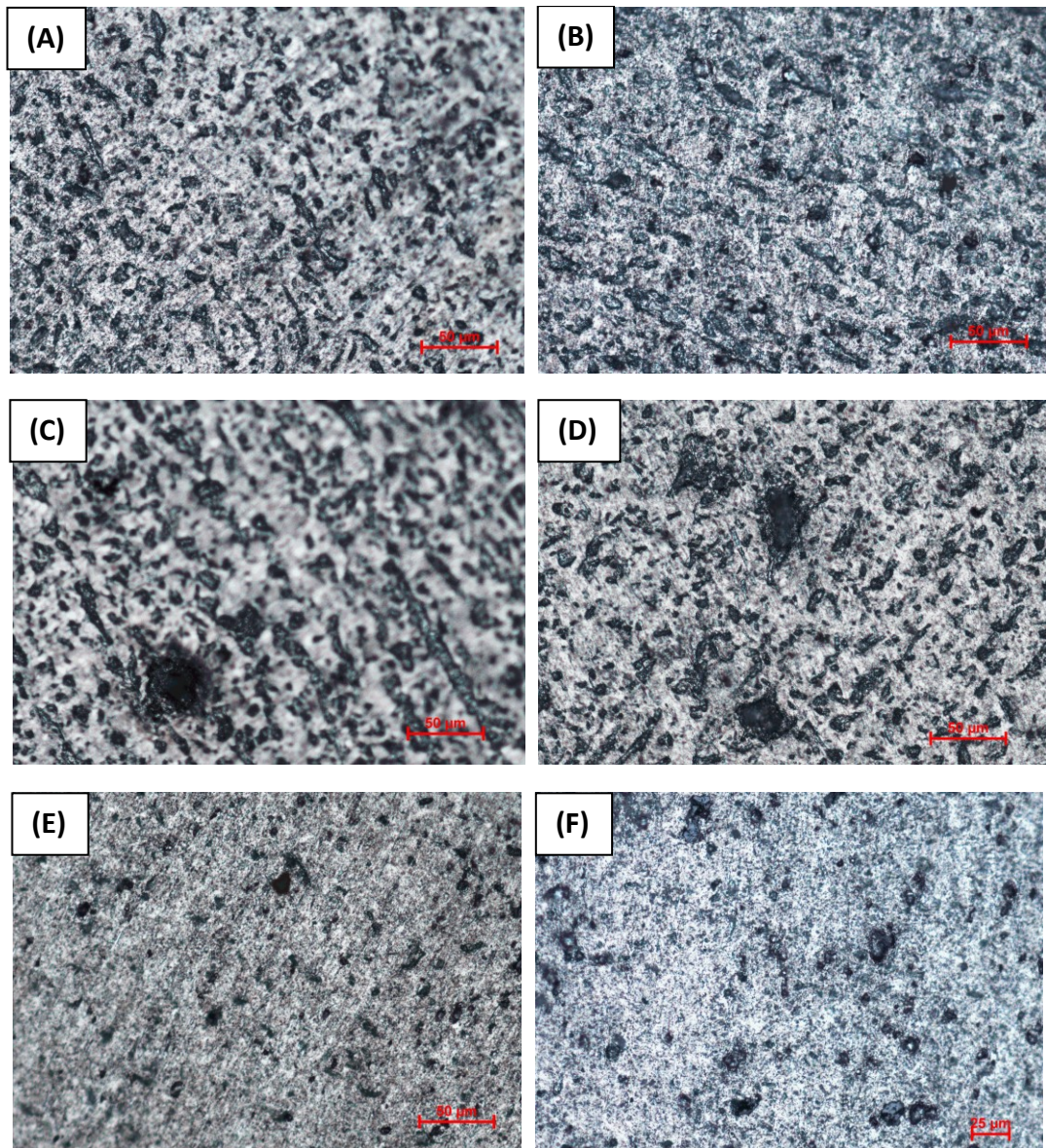


Figure IV.1 : A ,B,C,D,E et F représentent des Micrographies optique des composites élaborées (1,2,3,4,5,6) respectivement (agrandissement $\times 200$).

IV.3. Calcule de porosité ouverte avec imagej :

Figure I.V.2 représente les micrographies optiques des échantillons traités par le logiciel imageJ ; les zones marquées par la couleur rouge sont considérées comme des pores ouverts. Dans les échantillons 2, 3 et 4, qui contiennent du TiO_2 , on observe plus de vides que dans l'échantillon 1, qui est composé à 100 % d'aluminium. En revanche, les échantillons 5 et 6 présentent une nette diminution des pores. Le tableau IV.1 récapitule les proportions de porosités ouvertes calculés.

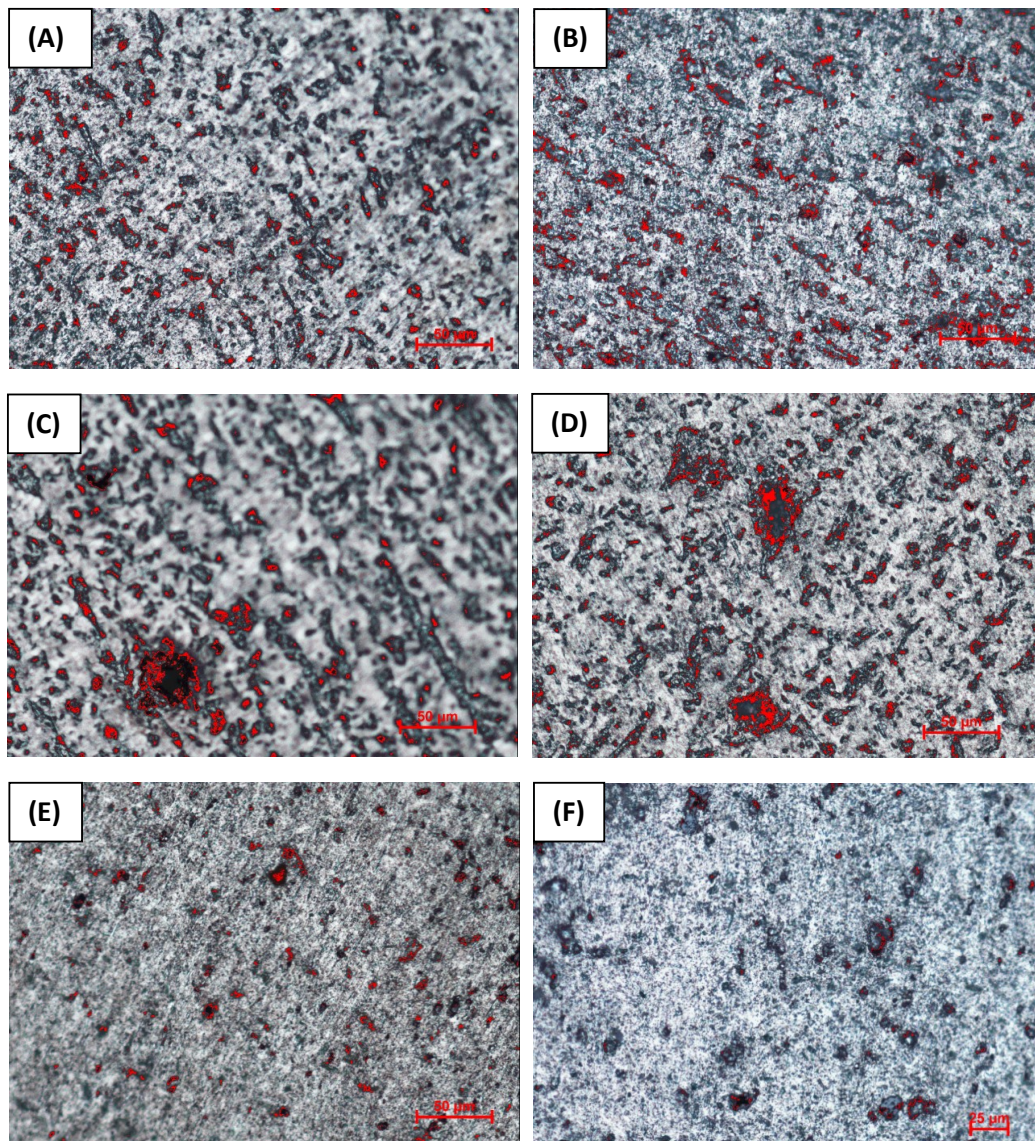


Figure IV.2 : les image des échantillons avec imagej.

Échantillon	1	2	3	4	5	6
Taux de porosité ouverte %	1.629	3.427	2.880	2.598	0.902	0.265

Tableau IV.1 : Taux de porosité ouverte des échantillons.

IV.4. Dureté Vickers :

Le tableau IV.2 illustre les résultats de dureté Vickers obtenus après des tests à 1Kgf de charge ; la moyenne de 6 différents indentations a été pris pour avoir une idée globale sur la dureté des échantillons. L'échantillon 1 (100% Al) a une dureté moyenne de 21.5HV se qui est en concordance avec la littérature. Les composites en aluminium renforcés par des particules unidimensionnelles d'oxyde de titane (TiO₂) 1D ont montrés des valeurs de dureté Vickers plus élevées par rapport à l'aluminium pur. L'ajout de 0,1 % de particules d'oxyde de titane unidimensionnelles a permis d'atteindre la valeur de dureté la plus élevée pour le composite aluminium–oxyde de titane (24,12 HV). Les valeurs de dureté sont très proches pour les différents échantillons élaborés. On peut dire que les proportions du renfort choisi dans notre travail n'ont pas un effet significatif en termes de dureté des échantillons.

Dureté Échantillon	HV	HV	HV	HV	HV	HV	HV Moyenne
1	18.85	23.21	22.41	20.73	19.74	24.06	21.5
2	19.68	27.41	24.14	21.89	26.5	25.14	24.12
3	24.3	23.82	23.95	25.10	22	23	23.69
4	21.21	24.46	22.12	21.32	21	22.18	22.04
5	19.51	21.37	19.73	23.57	21.41	19.61	20.86
6	23.05	22.68	23.64	23.35	21.53	22.73	22.83

Tableau IV.2 : résultats de la dureté Vickers pour les différents échantillons.

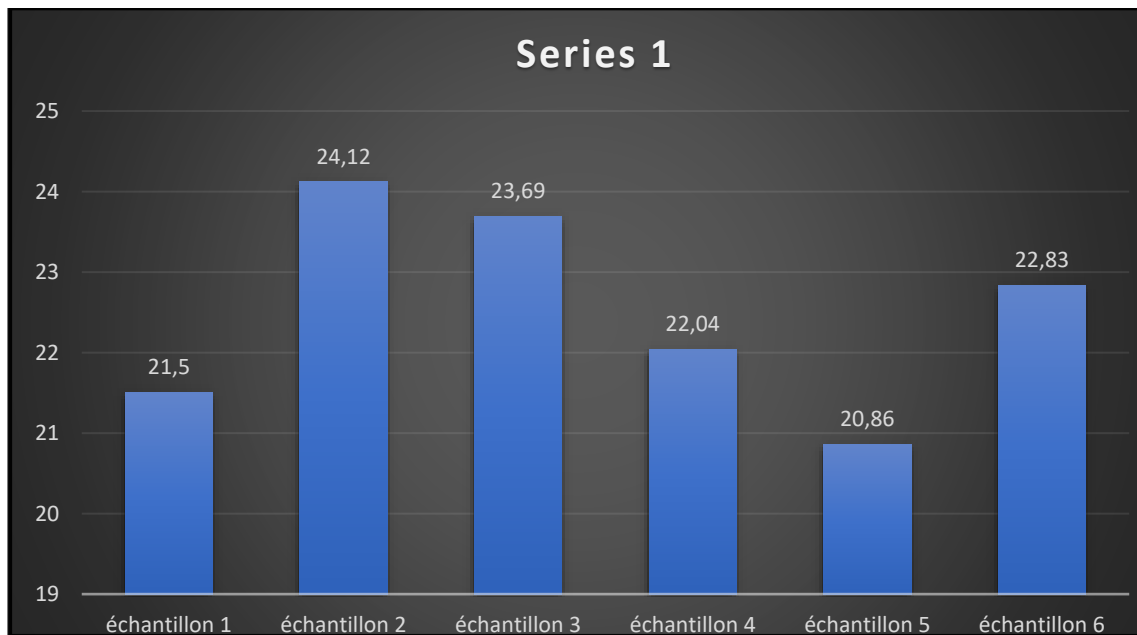


Figure IV.3 : histogramme de la dureté Vickers pour les échantillons.

IV.5. Tribologie :

La variation du coefficient de frottement avec la distance de glissement après tests de tribologie sont regroupés dans la figure IV.5 Les courbes sont caractérisés par des fluctuations prononcées, donnant un signe de déformation plastique de la matrice d'aluminium résultants du contact cohésive très intense entre la bille d'acier 100cr6 et la matrice ductile. Ce phénomène est connu d'être dominant pour les matériaux ductiles [18], [19].

La figure I.V.4 représente les valeurs du coef de friction dans les derniers 5 mètres parcouru par la bille. Les résultats indiquent que nos composites possèdent des valeurs de coef de friction inférieur à celle de l'aluminium pur, suivie d'une augmentation marquée pour l'échantillon 6 ($\mu = 1.134$). L'ajout modéré de TiO_2 1D réduit la Friction et améliore la glissance.

Cependant, une teneur excessive génère une surface rugueuse ou provoque le décollement de particules, augmentant ainsi le frottement.

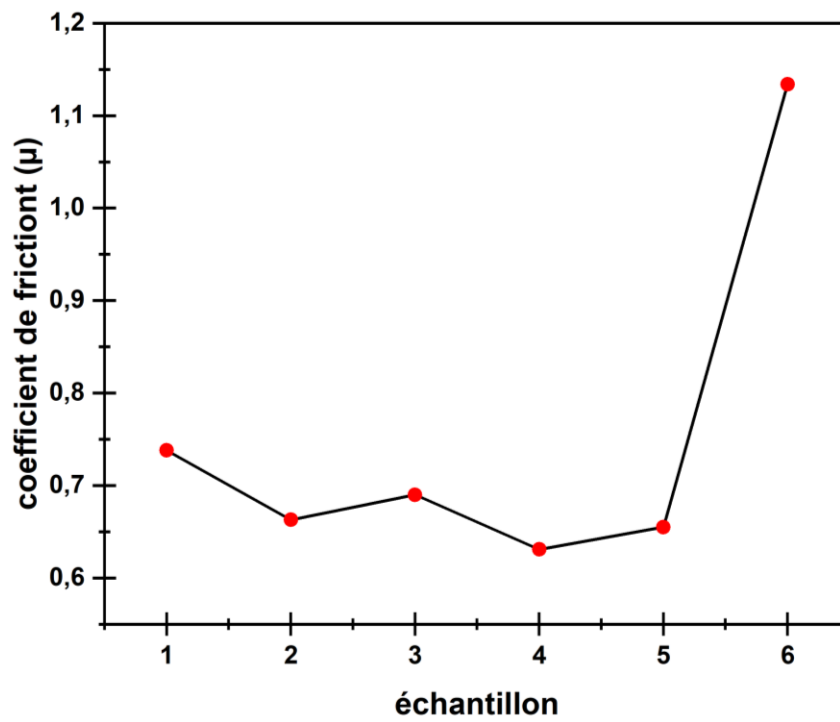


Figure IV.4 : La moyenne de coefficient de friction (μ) des échantillons dans les derniers 5 mètres du test.

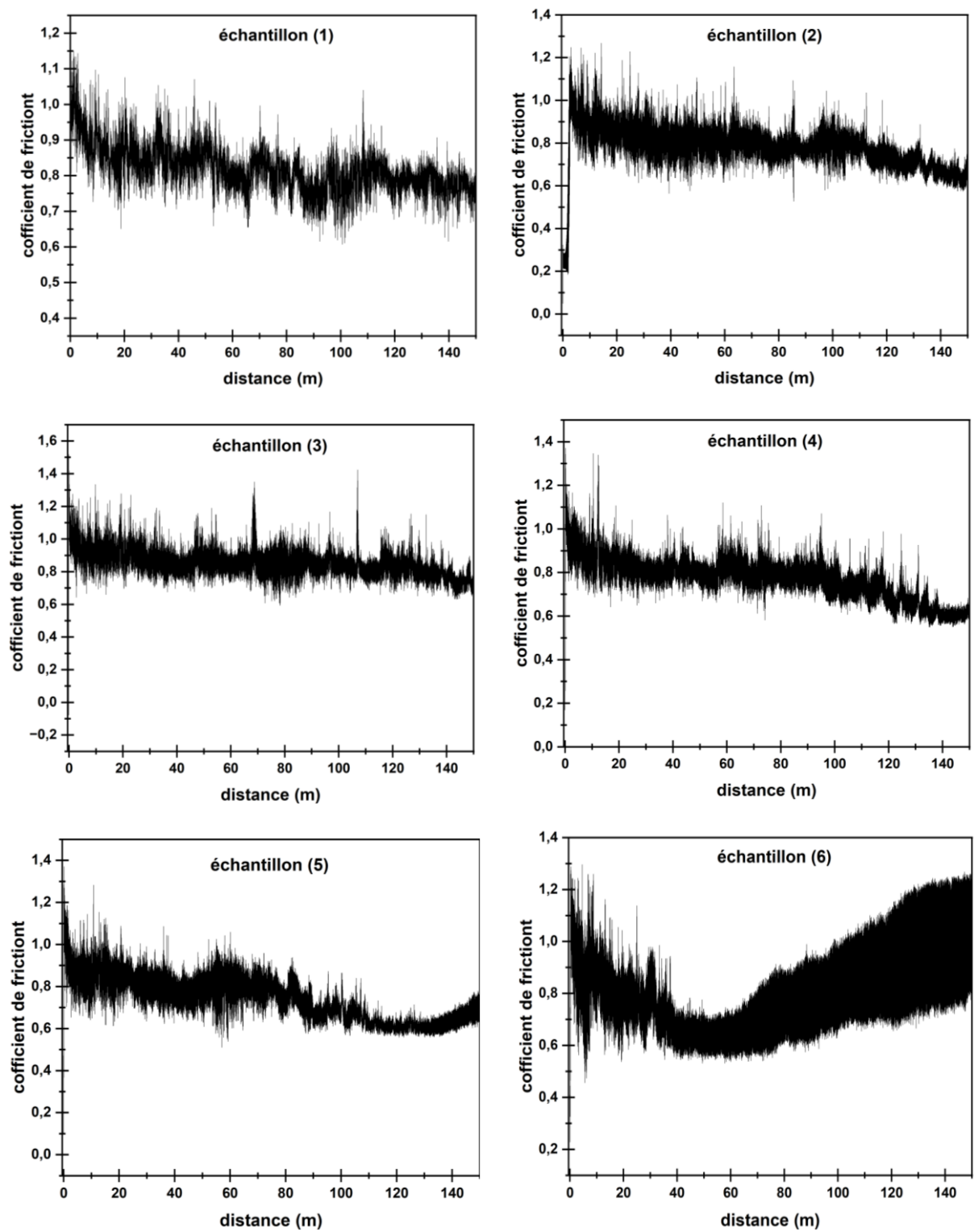


Figure IV.5 : Variation de coefficient de friction avec distance de glissement des échantillons.

IV.6. Microstructure trace d'usure :

Les figures IV.6 et 7 illustrent les micrographies des traces d'usure après tests de tribologie , on peut voir que les différents échantillons sont caractérisé par une structure Hill-Valley caractéristique des matériaux ductiles. Les traces d'usure montrent des signes d'usure sévère et d'abrasion manifesté par des strie. Aussi la présence de tribofilms, la formation de ces dernier peut être élaborées après enlèvement de la matière et selon le glissement répété durant le test les débris d'usure peuvent être coincé et compacté entre la bille et la surface d'échantillon en formant des tribofilm généralement à base d'oxydes.

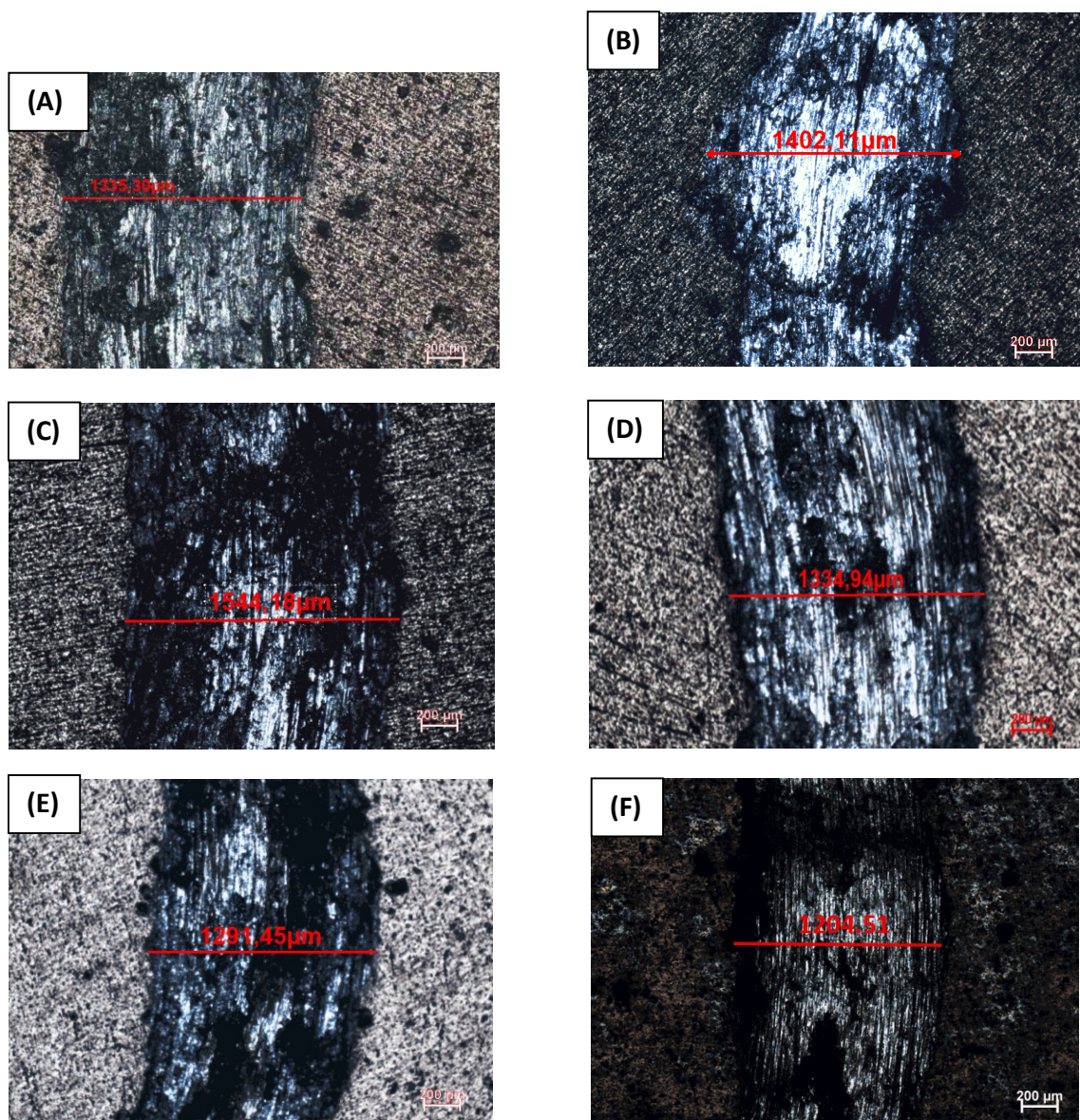
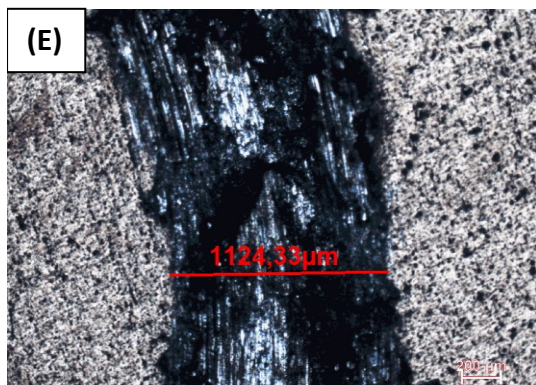
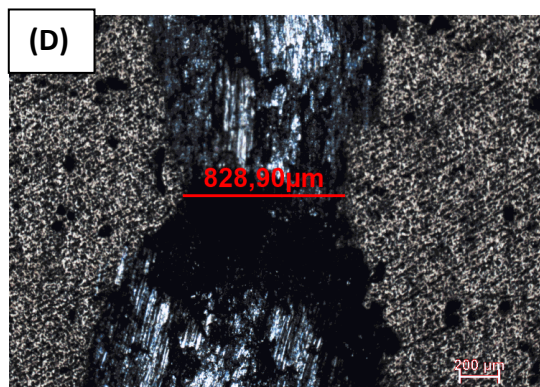
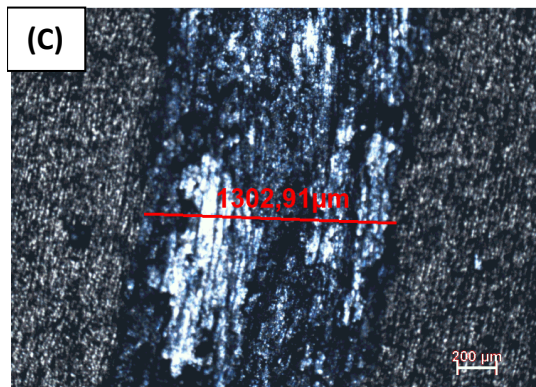
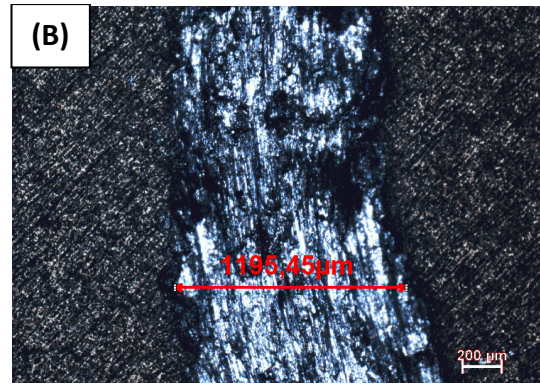
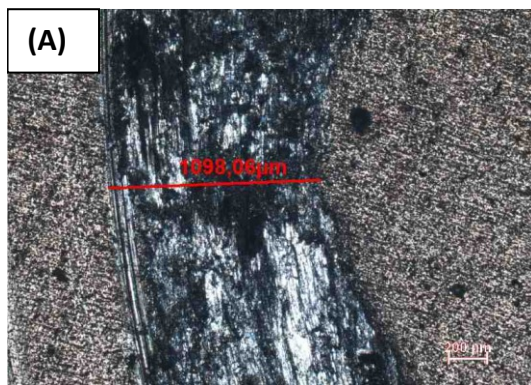


Figure IV.6 : micro graphies de microscope optique des traces d'usure Valley des échantillons (1,2,3,4,5,6) respectivement (A ,B,C,D,E,F).



Fifure IV.7 : micro graphies de microscope optique des traces d'usure Hill des échantillons (1,2,3,4,5,6) respectivement (A,B,C,D,E,F).

IV.7. Profile 2D :

La Figure IV.8 présente la variation de la profondeur en fonction de la largeur de la trace d'usure pour différents échantillons, selon deux modes d'analyse : Hill (Figure IV.8 a) et Valley (Figure IV.8 b). Dans les deux cas, l'aluminium pur montre une profondeur d'usure significative, atteignant environ $-100\text{ }\mu\text{m}$ en mode Hill et $-80\text{ }\mu\text{m}$ en Valley, traduisant une faible résistance de surface à l'usure. De même, l'échantillon contenant 0,25 % de TiO_2 (échantillon 3) en Valley présente également une profondeur importante, avoisinant $-90\text{ }\mu\text{m}$. En revanche, les composites renforcés par des pourcentages plus élevés de TiO_2 (échantillons 2, 4, 5 et 6) affichent des profondeurs nettement plus faibles dans les deux configurations, indiquant une amélioration significative du comportement à l'usure. L'échantillon 5 (0,75 % TiO_2) se distingue particulièrement en Hill, avec la profondeur la plus faible, tandis que l'échantillon 6 en Valley enregistre la plus faible valeur négative, traduisant une surface moins rugueuse et plus résistante. Bien que les variations entre les pourcentages ne permettent pas d'établir une tendance parfaitement linéaire, il apparaît clairement que les taux les plus élevés de TiO_2 confèrent au composite une résistance à l'usure optimale.

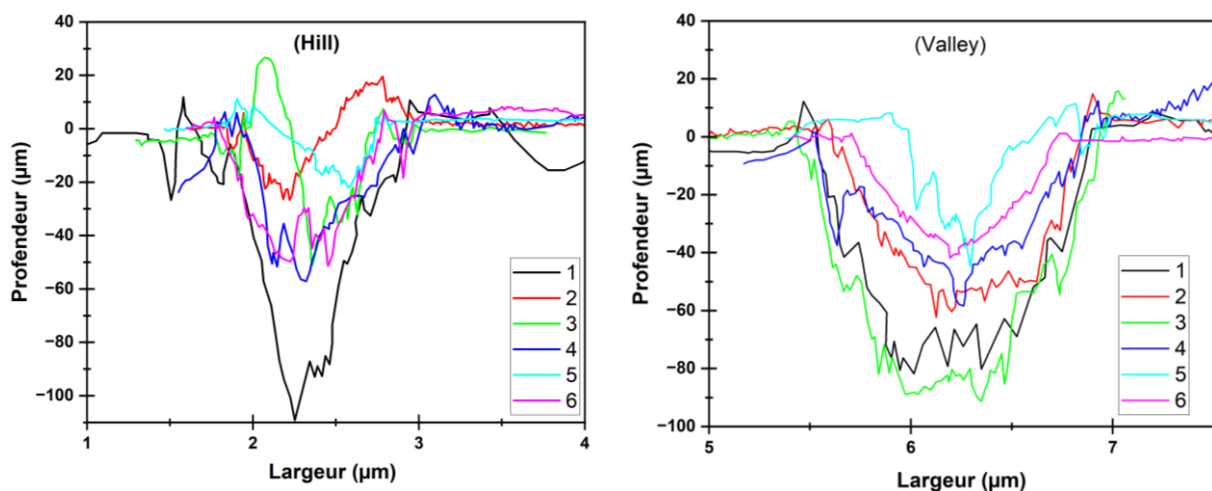


Figure IV.8 : la variation de la profondeur en fonction de la largeur de trace d'usure pour les différents échantillons (a) Hill et (b) Valley.

IV.8. Taux d'usure :

$$WR = \frac{V}{F.d} (mm^3/Nm) \text{ et on a : } V = 2\pi r.Sm (mm^3)$$

Échantillon	F (N)	d (m)	S Valley (mm ²)	S Hill (mm ²)	S moyen (mm ²)	r (mm)
1	1	150	0.086336	0.055061	0.070698	8.36
2	1	150	0.053781	0.008692	0.031237	6.50
3	1	150	0.098128	0.014204	0.056166	6.76
4	1	150	0.041717	0.036741	0.039229	5.41
5	1	150	0.019611	0.008369	0.013990	5.41
6	1	150	0.032991	0.023174	0.028082	7.82

Tableau IV.3 : les données de teste tribologie.

Échantillon 1 :

$$V = 2\pi r.Sm$$

$$Sm = \frac{S_{\text{valley}} + S_{\text{hill}}}{2}$$

$$Sm = \frac{0.086336 + 0.055061}{2}$$

$$Sm = 0.070698$$

$$V = 2 \times 3.14 \times 8.36 \times 0.070698$$

$$V = 3.71170(mm^3)$$

$$WR = \frac{3.71170}{1 \times 150}$$

$$WR = 0.02471(mm^3/Nm)$$

Le tableau IV.4 représente les taux d'usure des échantillons. On a observé une diminution progressive du coefficient d'usure avec l'ajout de particules de TiO_2 à la matrice en aluminium. Pour l'échantillon 1 de l'aluminium pur, le coefficient d'usure était d'environ $2,5 \times 10^{-3}$, et avec l'augmentation de la teneur en TiO_2 , ce coefficient a diminué pour atteindre environ $0,8 \times 10^{-3}$ dans l'échantillon 2, ce qui indique une amélioration notable de la résistance à l'usure. Cette diminution s'est poursuivie jusqu'à atteindre son minimum dans l'échantillon 5, avec une valeur d'environ 3×10^{-3} , qui a montré la meilleure résistance à l'usure.

Cependant, une légère augmentation a été observée dans l'échantillon 6, ce qui pourrait indiquer l'existence d'un pourcentage optimal de TiO_2 , au-delà duquel un effet négatif léger commence à apparaître en raison de l'agglomération ou de l'accumulation des particules.

Échantillon	1	2	3	4	5	6
$WR (\text{mm}^3/\text{Nm}) \times 10^{-3}$	24.71	8.49	15.90	8.89	3.17	9.20

Tableau IV.4 : Taux d'usure des échantillons.

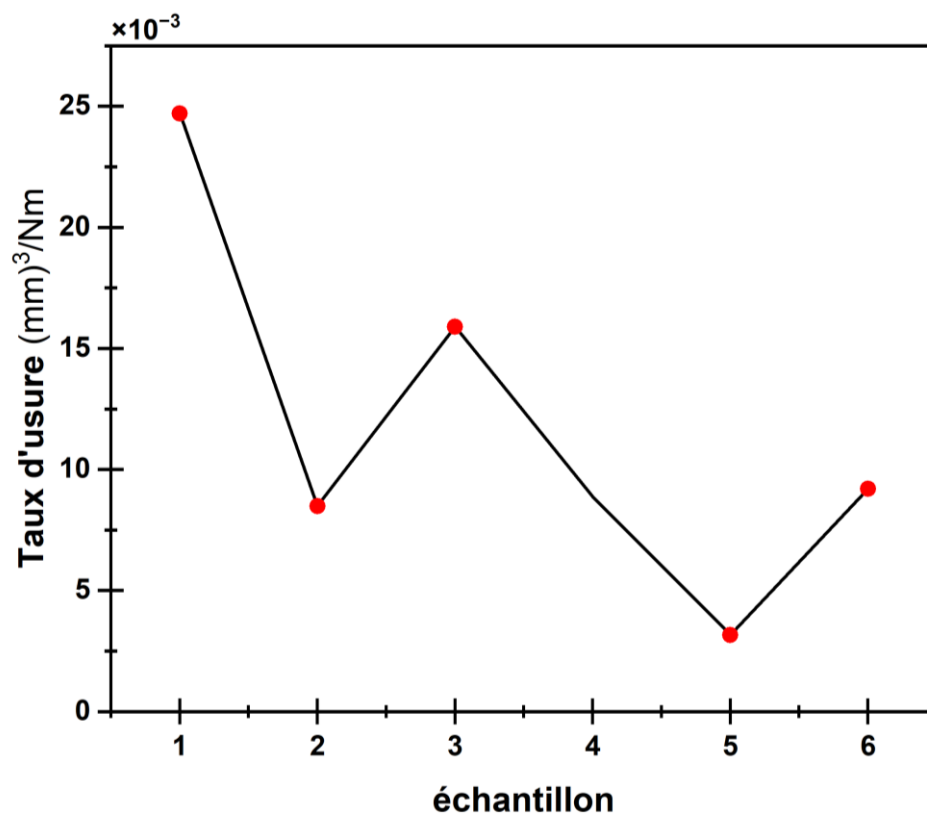


Figure IV.9 : Taux d'usure des échantillons.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail a été l'élaboration et la caractérisation de composites à matrice d'aluminium renforcés par des particules unidimensionnelles de TiO_2 , en vue d'améliorer les propriétés mécaniques et tribologiques de l'aluminium. Différentes analyses ont été menées, notamment la microscopie optique, les tests de dureté Vickers, les essais tribologiques et l'étude des traces d'usure, afin d'évaluer l'impact des pourcentages de renfort sur les performances des composites élaborés.

Les résultats ont montré que l'ajout de TiO_2 améliore sensiblement la résistance à l'usure et la dureté des échantillons, bien que l'effet ne soit pas strictement linéaire avec la teneur en renfort. L'échantillon contenant 0,75 % de TiO_2 a présenté les meilleures performances globales, avec une faible porosité, une bonne homogénéité de la microstructure et une excellente résistance tribologique. Ces performances sont attribuées à une meilleure dispersion du renfort et à un bon ancrage dans la matrice, favorisé par un procédé d'élaboration maîtrisé.

Ce mémoire met en évidence l'intérêt des renforts nanostructures unidimensionnels pour le développement de matériaux composites légers et performants, adaptés à des applications dans des domaines exigeants tels que l'aéronautique, l'automobile ou la mécanique de précision. Des perspectives de recherche peuvent être envisagées, notamment en explorant d'autres types de renforts nanométriques, en optimisant les procédés d'élaboration, ou en combinant plusieurs types de renforts pour un effet synergique.

- [1] Ajith James Cyriac: 'Metal Matrix composites : history, status, factors and future', cochin university of science and technologie cochin kerala, 2005.
- [2] MINORU TAYA, RICHARD J. ARSENAULT: 'Metal Matrix Composites: Thermomechanical Behavior', University of Washington, Seattle, WA, USA, 23 Mar 2007.
- [3] Pierre Jaquinet, Utilisation des matériaux composites, Edition Hermès, paris, 1991.
- [4] Jean Marie Berthelot, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4ème Edition, Lavoisier 2005.
- [5] Clyne, T.W., & Withers, P.J. (1993). An Introduction to Metal Matrix Composites. Cambridge University Press.
- [6] Surappa, M.K. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. Sadhana, 28(1-2), 319-334.
- [7] Chawla, N., & Chawla, K.K. (2006). Metal matrix composites. Springer.
- [8] Hashim, J., Looney, L., & Hashmi, M.S.J. (1999). Metal matrix composites: production by the stir casting method. Journal of Materials Processing Technology, 92-93, 1-7.
- [9] Mallick, P. K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press.
- [10] Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). *Engineering Materials 1 & 2*. Butterworth-Heinemann.
- [11] Schwartz, M. M. (1984). *Composite Materials Handbook*. McGraw-Hill.
- [12] Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press.
- [13] L.F.Mondolfo, Aluminium Alloys, structures and proprieties, Butterworth, 1st edition, London 1976.
- [14] H. Leiris, Métaux et alliages autres que les aciers et les fonts, Tome II, Masson et cie éditeurs. pp.71-92, 1971.
- [15] A. Hadouche. Mémoire de mastère. Université de Beskra (2014).
- [16] Hutchings, I. M., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- [17] Y.S. Zhang, Z. Han, K. Wang, K. Lu, Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of pure copper, Wear. 260 (2006) 942–948, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.06.010>.