

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Présenté par : OTMANI Abdelmounaim

ACHBI Soheib

Thème :

**Etude numérique du comportements tripologiques
des composites hybrides Al/SiC/Gr**

Soutenue publiquement le /06/2022 devant le jury :

KHALFI Mehdi	M.A.A	Université de Ouargla	Président
REZGUI Imane	M.C.A.	Université de Ouargla	Rapporteur
TOUGGUI Youssef	M.A.B	Université de Ouargla	Examineur

Année universitaires : 2021/2022

Remerciement

قال تعالى: (وَمَنْ يَشْكُرْ فَإِنَّمَا يَشْكُرُ لِنَفْسِهِ) {لقمان "12"}

أول من يشكر و بحمده آناء الليل و أطراف النهار , هو العلي القهار الأول و الآخر و الظاهر ,
الذي أغرقنا بنعمه التي لا تحصى فالحمد لله كله و الشكر كله الذي وفقنا و ألهمنا الصبر
على المشاق التي واجهتنا في إنجاز هذا العمل المتواضع.

و الشكر الموصول إلى كل معلم أفادنا بعلمه, من أولى المراحل الدراسية حتى هذه اللحظة, كما
نرفع كلمة شكر إلى الدكتورة المشرفة "رزقي إيمان" التي لم تدخر جهدا في مساعدتنا, كما هي
عادتها مع كل طلبة العلم التي كانت تحثنا و توجهنا في بحثنا هذا فلها من الله أجر و منا كل
التقدير حفظها الله و متعها بالصحة و العافية.

كما نشكر الأساتذة الذين أشرفوا على مناقشة هذا العمل الدكتور "خالفي مهدي" و
الدكتور "توقي يوسف" خاصة و كل طاقم قسم الهندسة الميكانيكية بجامعة قاصدي مباح
—ورقلة- عامة و كل من له علينا حق الشكر فله الشكر.

عثماني عبد المنعم

عشي صهيب

Dédicace

الحمد لله و كفى و الصلاة على الحبيب المصطفى و أهله و من وفى, و أما بعد:

الحمد لله الذي وفقنا لتثمين هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية بمذكرتنا هذه

ثمرة الجهد و النجاح بفضلته تعالى مهداة إلى الوالدين الكريمين حفظهما الله

و أدامهما نورا لدربي.

لكل العائلة الكريمة التي ساندتني و لا تزال من إخوتي و أخواتي إلى رفقاء المشوار الذين

قاسموني لحظاته رعاهم الله و وفقهم لما يحبه و يرضاه: هيثم, عبد الرحيم, حسام الدين, عبد

المنعم, أحمد, جابر. و إلى زملاء الدفعة بقسم الهندسة الميكانيكية خاصة و بكلية العلوم

التطبيقية عامة, و إلى من كان له أثر على حياتي, و إلى كل من أحبهم قلبي و نسيم قلبي.

عشبي صهيب 

Dédicace

الحمد لله و كفى و الصلاة على الحبيب المصطفى و أهله و من وفى, و أما بعد:

الحمد لله الذي وفقنا لتثمين هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية بمذكرتنا هذه

ثمرة الجهد و النجاح بفضلته تعالى مهداة إلى روح أبي الطاهرة رحمه الله

و إلى روح أختي الزكية الطاهرة.

اهدي نجاحي هذا إلى من بسمتها غايتي و ما تحت أقدامها جنتي "أمي"

و لكل العائلة الكريمة التي ساندتني و لا تزال من إخوتي و أخواتي إلى رفقاء المشوار الذين

قاسموني لحظاته رعاهم الله و وفقهم لما يحبه و يرضاه: صهيب, هيثم, عبد الرحيم, حسام

الدين, عبد السميع, تميم, أبو بكر, وليد, صديق, عبد النور. و إلى زملاء الدفعة بقسم الهندسة

الميكانيكية خاصة و بكلية العلوم التطبيقية عامة, و إلى من كان له أثر على حياتي, و إلى كل

من أحبهم قلبي و نسيم قلبي.


عثماني عبد المنعم 

Table des matières

Liste de figure	
Liste de Tableau	
Introduction générale	1

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites

I.1 Introduction	3
I.2 Définitions des matériaux composites	3
I.3 Constituant des matériaux composites	3
I.3.1 La matrice	3
I.3.2 Les différents types de matrices	4
I.3.3 Renforts	5
I.4 Types des matériaux composites	6
I.4.1 Matériaux composites de grande diffusion	6
I.4.2 Matériaux composites de hautes performances	6
I.5 Les avantages et inconvénients des matériaux composites	7
I.5.1 Des avantages	7
I.5.2 Les inconvénients	7
I.6 Elaboration des matériaux composites	9
I.6.1 Moulage au contact	9
I.6.2 Moulage par projection simultanée	9
I.6.3 Injection thermodurcissable	10
I.6.4 Compression thermodurcissable	11
I.6.5 Enroulement filamentaire	11
I.6.6 Moulage par centrifugation	12
I.7 Architecture des matériaux composites	13
I.7.1 Monocouches	13
I.7.2 Structure composites stratifiées	13
I.7.3 Structure composites sandwichs	14
I.8 Propriétés des matériaux composites	15
I.9 Conclusion	16

Chapitre II

Matériaux composites à matrice métallique

II.1 Introduction	17
II.2 Définitions des composites à matrice métallique	17
II.3 Matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium	18
II.3.1 2xxx: Al-Cu et Al-Cu-Mg	19
II.3.2 4xxx: Al-Si-Mg	19
II.3.3 6xxx: Al-Mg-Si	19
II.4 Matériaux composites hybrides	19
II.4.1 Le principe	20
II.4.2 Les différents hybrides	20
II.4.3 Les avantages des composites hybrides	21
II.4.4 Les inconvénients	21
II.5 La propriété mécanique et tribologique des matériaux composites d'alliage d'aluminium hybrides	21
II.5.1 Propriété mécanique	21
II.5.2 Propriété tribologiques	22
II.6 Elaboration des matériaux à matrice d'alliage d'aluminium hybrides	24
II.7 Types de renforts	25
II.7.1 Fibres de verre	25
II.7.2 Fibres de carbone	26
II.7.3 Fibres aramides	27
II.7.4 Fibres céramiques	27
II.8 Renforts en carbure de silicium	28
II.9 Renforts en graphitiques	28
II.10. Paramètres tribologique des matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium hybrides	28
II.11 Conclusion	29

Chapitre II

Etude paramétrique sur tribologique des composites

III. Introduction	30
III.2 Définition	30
III.3 Principe	30
III.4 Données expérimentales	32

III.4.1 Système flou	33
III.5 Modélisation flou	33
III.5.1 Les variables flou	33
III. 5.2 Les sous-ensembles flou	36
III.6 Les règles floues	39
III.7 Résultats et discussion	40
III.7.1 Etude de précision et de l'erreur du système flou	40
III.7.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales	41
III.7.3 Représentation schématique des résultats	44
III.7.4 Validation des résultats	48
III.8 Conclusion	49
Conclusion Générale	50
Référence Bibliographia	51

Liste de figure

Chapitre I Généralités sur les matériaux composites

Figure. I.1	Schéma illustratif d'un matériau composite	3
Figure. I.2	Différent type des résines	4
Figure. I.3	Différentes familles du renfort	6
Figure. I.4	Principe de moulage en contact	9
Figure. I.5	Technologie de projection simultanée	10
Figure. I.6	Principe d'injection thermodurcissable	10
Figure. I.7	Compression thermodurcissables	11
Figure. I.8	Principe de l'enroulement filamentaire	12
Figure. I.9	Moulage par centrifugation	13
Figure. I.10	composite monocouche	13
Figure. I.11	Structures composites stratifiées	14
Figure. I.12	Structures composites sandwiches	15

Chapitre II Matériaux composites à matrice métallique

Figure. II.1	Exemples d'applications des composites à matrice métallique	17
Figure. II.2	Illustration schématique des matériaux composites hybrides inter-ply et intra-ply.	20
Figure. II.3	Fibres de verre	25
Figure. II.4	Fibres de carbone	26
Figure. II.5	Fibres d'aramides	27
Figure. I.6	Schéma de la configuration de test pin-on-disc utilisée pour	29

Chapitre III Etude de l'influence des paramètres d'essai sur le taux d'usure et le coefficient de frottement

Figure. III.1	Ternes et concepts en logique floue	31
Figure. III.2	Système floue pour les composites hybrides Al/Sic/Gr.	33
Figure. III.3	Variables Linguistiques pour la Charge normale	34

Figure. III.4	Variables Linguistiques pour le Vitesse de glissement	34
Figure. III.5	Variables Linguistiques pour la pourcentage de Graphite	35
Figure. III.6	Variables Linguistiques pour le taux d'usure.	35
Figure. III.7	Variables Linguistiques pour Le coefficient de frottement	36
Figure. III.8	Les fonctions d'appartenance triangulaires.	38
Figure. III.9	Les fonctions d'appartenance trapézoïdale.....	39
Figure. III.10	Variation de taux d'usure (Us) (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre essais.	41
Figure. III.11	Variation de la coefficient de frottement (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre essais.	42
Figure. III.12	Variation du taux d'usure prédite avec le modèle de logique floue en fonction des paramètres des composite hybrides Al/Sic/Gr	45
Figure. III.13	Variation du coefficient de frottement prédite avec le modèle de logique floue en fonction des paramètres des composite hybrides Al/Sic/Gr	47
Figure. III.14	Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux de taux d'usure des composites hybrides Al/Sic/Gr	48
Figure. III.15	Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux du coefficient de frottement des composites hybrides Al/Sic/Gr	48

Liste des tableaux

Chapitre II

Matériaux composites à matrice métallique

Tableau II.1	Séries des alliages d'aluminium	18
Tableau II.2	Matrices des matériaux composites à base d'aluminium	19
Tableau II.3	Comportements mécanique du composite hybride aluminium	22
Tableau II.4	Comportements tribologique du composite hybride aluminium	23
Tableau II.5	Composition chimique de l'alliage A356	24
Tableau II.6	Avantages et inconvénients de la fibre de verre	26
Tableau II.7	Avantages et inconvénients de la fibre de carbone	27
Tableau II.8	Caractéristiques des particules de Sic	28

Chapitre III

Etude de l'influence des paramètres d'essai sur le taux d'usure et le coefficient de frottement

Tableau III.1	Traduction mathématique sous la logique floue	31
Tableau III.2	Données expérimentales des composites Al/Sic/Gr	32
Tableau III.3	Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite Al/Sic/Gr	34
Tableau III.4	Les règles floues pour les composites hybrides Al/Sic/Gr	39
Tableau III.5	Les résultats du système flou pour les composites hybrides Al/Sic/Gr.	42

Abréviations

Introduction générale

Les matériaux composites sont d'une grande importance dans de nombreux domaines (aéronautique, aérospatial,.... etc.) car ils constituent un ensemble synthétique destiné à la structuration où les fonctions spatiales sont dominantes. Les matériaux composites trouvent de nombreuses applications pour la réalisation de structures de différentes tailles dans de nombreux secteurs industriels.

Après le développement des matériaux composites, les composites à matrice métalliques (MMC) en alliage d'aluminium ont pris une grande importance car ils contiennent des propriétés distinctives qui leur permettent d'être utilisés dans diverses industries.

Les composites à matrice métallique (MMC) avec la matrice en alliage d'aluminium, renforcée par des particules de céramique, sont encore les MMC les plus couramment étudiés. Leurs bonnes propriétés permettent leur large application dans diverses industries. Néanmoins, le coût plus élevé des composites à matrice d'aluminium (AMC), par rapport aux alliages d'aluminium, et l'approvisionnement limité en matériaux de renforcement en céramique restent un problème majeur dans l'application des AMC à grande échelle industrielle. L'une des approches adoptées pour résoudre ce problème est le développement d'AMC hybrides. Les AMC hybrides sont un type de composites dans lesquels la combinaison de deux ou plusieurs types de renforts différents est utilisée. Le plus souvent, il s'agit de la combinaison de particules de céramique dure et de graphite doux

Les méthodes et les techniques d'essais nécessitent beaucoup de temps. La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. Cette technique nous a permis de prédire les conditions opératoires sans recours à réaliser beaucoup d'essais expérimentaux.

L'objectif de la présente étude est de mettre en évidence l'effet des paramètres individuels (charge normale, vitesse de glissement et pourcentage d'addition de graphite) sur le taux d'usure et le coefficient de frottement des composites hybrides (Al/SiC/Gr).

Le mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur les matériaux composites.

Le deuxième chapitre est une synthèse bibliographique sur les matériaux composites à matrice métallique

Le troisième chapitre va mettre l'accent sur la méthode utilisée pour la résolution de notre problème et aborde la formulation et l'implantation d'un modèle pour la prédiction du comportement tribologique des composites hybrides Al/SiC/Gr.

Chapitre I

**Généralités sur les
matériaux composites**

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une étude générale sur les matériaux composites où nous définissons les matériaux composites, les types, les composants, les caractéristiques générales et les procédés de fabrication des composites.

I.2 Définitions des matériaux composites

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériaux renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue appelée matrice [1].

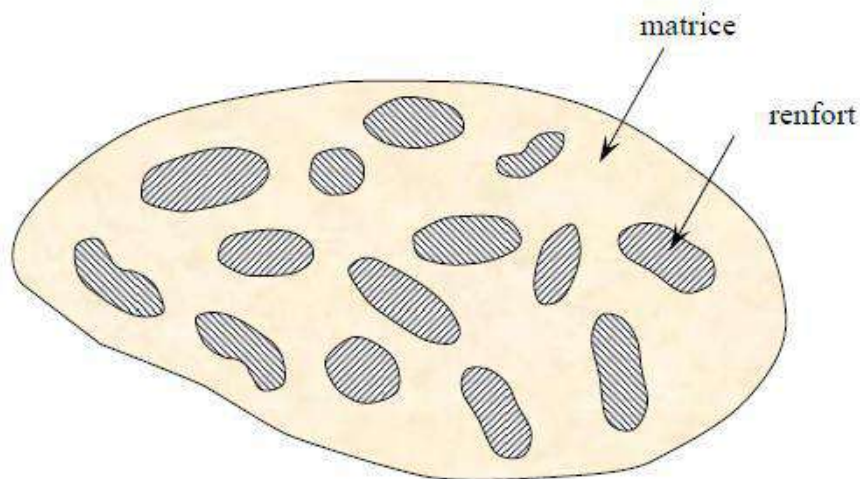


Figure. I.1: Schéma illustratif d'un matériau composite [2].

I.3 Constituants des matériaux composites

I.3.1 La matrice

La matrice est la phase continue dont les fonctions sont:

- De réaliser la liaison entre les renforts de manière à répartir les sollicitations et ainsi de prévenir les ruptures catastrophiques.
- D'assurer la protection de ces renforts vis-à-vis des agents agressifs.
- De donner la forme à la pièce et garantir ses caractéristiques géométriques.

I.3.2 Les différents types de matrices

Les matrices utilisées dans les matériaux composites se divisent en deux grandes familles : les matrices organiques et les matrices inorganiques (minérales). La (Figure I.2) présente les types des matrices [3].

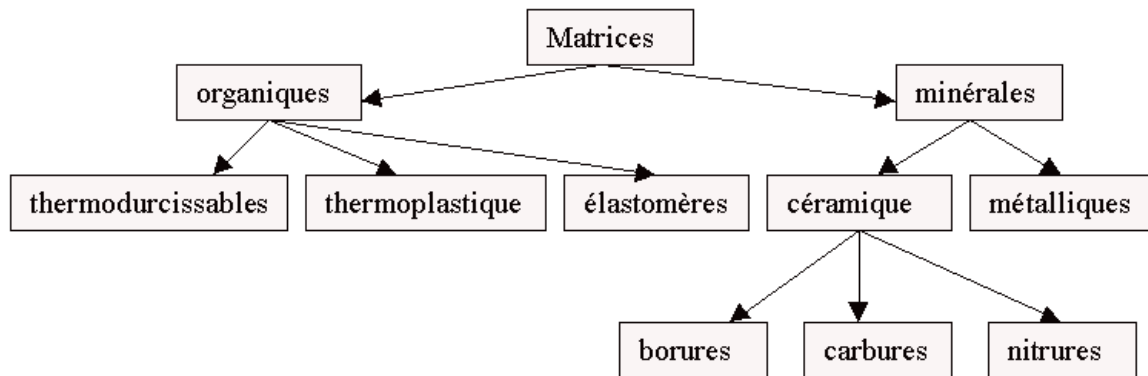


Figure I.2: Différent type des résines [4].

a. Les matrices organiques

La matrice organique est la partie polymère du système qui se divise en deux familles principales thermoplastiques et thermodurcissables.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices [5].

– Les résines thermodurcissables

Les résines TD sont exceptionnellement utilisées sans renforts, leurs caractéristiques intrinsèques ne le permettent pas. Elles ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois.

Après la polymérisation par rapport à la chaleur en présence d'un catalyseur, elles conduisent à une structure géométrique qui ne peut pas être détruite que par un apport important d'énergie thermique [5].

– Les résines thermoplastiques

Polymères linéaires ou ramifiés, qui peuvent être ramollis par chauffage et durcis par refroidissement plusieurs fois, elles sont fréquemment utilisées seules (sans renfort et sans charge), dans ce cas on peut plus les considérer comme matériaux composites, leurs propriétés intrinsèques sont suffisantes pour permettre la réalisation d'objets et de pièces à fonction diverses.

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement à l'aide de fibres courtes leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle [5].

b. Les matrices métalliques

L'imprégnation de renforts par un alliage liquide étant une opération techniquement délicate, en pratique seuls les alliages d'aluminium sont utilisés dans ce type de technique, associés à des fibres ou particules de graphite ou de céramiques. Ils sont faciles à mettre en œuvre car leur température de fusion est relativement basse. Leur coût de mise en œuvre élevé réserve les composites à matrice métallique aux applications aéronautiques et spatiales [2].

c. Matrices Céramiques

Des composites à matrices céramiques peuvent être obtenus par imprégnation de préformés de fibres (métaux, verres, aramides, carbone, céramique) soit par des suspensions liquides, ensuite frittées en température sous haute pression, soit par des gaz réactifs permettant un dépôt entre les fibres (notamment pour les composites carbone-carbone) [2].

d. Les matrices carbonées

Elles sont produites par le même principe que celui utilisé pour la production des fibres de carbones : carbonisation d'une matrice organique à haute température. Elles sont constituées de grains de carbone pyrolytique qui se dépose à chaud sur les fibres, ce qui assure une liaison mécanique entre celle-ci et ferme les vides laissés entre elles. On obtient ainsi un matériau composite dont la masse volumique se rapproche de celle du carbone massif [5].

I.3.3 Renforts

Le renfort est le constituant qui confère au composite ses caractéristiques mécaniques : la rigidité, la résistance à la rupture, la dureté. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont de propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible coût. [3].

Les principaux matériaux de renforts, sont résumés dans l'organigramme suivant :

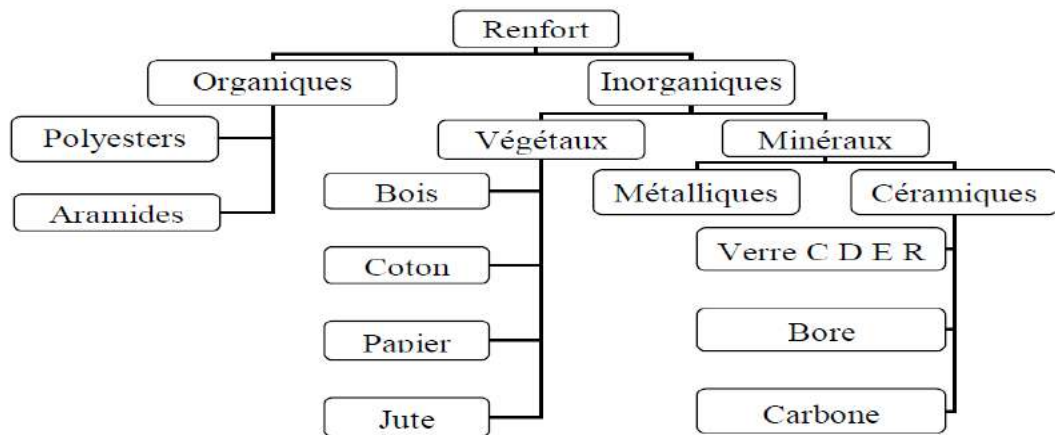


Figure. I.3: Différentes familles du renfort [4].

I.4 Types des matériaux composites

On distingue deux types de composites: les composites de grandes diffusions et les composites hautes performances [5].

I.4.1 Matériaux composites de grande diffusion GD

Les matériaux composites à grande diffusion occupent une portion de 95 % des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort est de 30%. Dans 90 % des cas, l'anisotropie n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters avec des fibres de verre avec la simplicité du principe d'élaboration des matériaux (moulage par contact, SMC et injection), ce qui rend leurs coûts voisins [6].

I.4.2 Matériaux composites de hautes performances HP

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%. Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes [5] :

- Drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- Beaucoup de procédés encore manuels.
- MM, CMC.

I.5 Les avantages et les inconvénients des matériaux composite

I.5.1 Des avantages

Facilité de mise en forme : Le matériau durcit et prend un aspect de surface définitif alors qu'il est positionné sur le moule. Il est ainsi possible de réaliser en une seule opération des formes qui auraient nécessité plusieurs étapes en utilisant d'autres matériaux (exemple : découpe, formage, soudure, polissage pour des tôles métalliques). La réalisation de pièces par moulage au contact nécessite un matériel d'application peu onéreux. La réalisation des moules pour ce procédé est également simple et permet donc une grande liberté dans la création des formes qui est notamment mise en œuvre dans les applications liées à la carrosserie (voitures, camions, bateaux, ferroviaire, ...) [4].

Légèreté : Pour des propriétés mécaniques équivalentes, l'utilisation de matériau composite à la place de métaux permet un gain de poids de près de 50 %. Cette propriété est notamment mise à profit dans le secteur automobile [4].

Adaptabilité : Les caractéristiques mécaniques du composite peuvent être ajustées en jouant globalement sur le taux de fibres mais aussi localement en adaptant la quantité et le positionnement des fibres dans des zones soumises à de plus fortes contraintes mécaniques [4].

Résistance à la corrosion ou à l'oxydation : À cause de leur composition chimique à base de résine organique, les composites sont peu sensibles à la corrosion et sont très résistants aux attaques chimiques. Cette caractéristique leur donne un avantage important par rapport aux métaux pour la réalisation de réservoirs et d'équipements destinés à un usage extérieur ou en zone humide [4].

Isolation électrique et thermique : Le bon niveau d'isolation que procurent les matériaux composites pourrait conduire à une utilisation plus importante dans le bâtiment. Toutefois, leur emploi massif est freiné à cause de coûts élevés par rapport aux matériaux de construction traditionnels.

I.5.2 Les inconvénients

Bien que les avantages des matériaux composites soient impressionnants, ces matériaux ne sont pas une solution miracle pour toutes les applications. Des inconvénients ou des problèmes existent et peuvent empêcher leur usage. Les inconvénients les plus courants sont les suivants [4].

Coût : Les matériaux composites hauts performances ont été développés principalement pour répondre aux besoins de la communauté aérospatiale où le coût élevé peut être toléré en

échange de matériaux plus performants. Par conséquent, le transfert de la technologie des composites aux produits de grande consommation est lent, à quelques exceptions comme les équipements de sports où la performance prime également sur le coût [4].

Conception et analyse : Les matériaux composites sont souvent à la fois hétérogènes et anisotropes. Ces deux caractéristiques sont différentes des celles de la plupart des matériaux conventionnels. Elles nécessitent de nouvelles approches, généralement plus compliquées, pour la conception et l'analyse des structures. L'hétérogénéité impose l'analyse selon au moins deux points de vue. La micromécanique examine l'interaction des constituants à l'échelle microscopique. La macro-mécanique suppose que le composite est homogène et s'intéresse aux propriétés apparentes du matériau. Les matériaux anisotropes nécessitent plus de propriétés mécaniques que les matériaux isotropes pour établir les relations contrainte-déformation (les lois de comportement). Ces propriétés sont déterminées selon les directions principales du pli élémentaire (directions parallèle et perpendiculaire à l'orientation des fibres). Pour les stratifiés composites, les rigidités sont déterminées à l'aide de la théorie classique des stratifiés. La rupture des stratifiés composites se produit de plusieurs façons très complexes. Il est donc difficile d'établir une théorie de résistance qui tienne compte de tous les modes de rupture et de leurs interactions. Par conséquent, la détermination des résistances est plus compliquée et nécessite des vérifications expérimentales. De plus, la résistance d'un stratifié peut être influencée par les contraintes inter laminaires au voisinage des bords libres. La séquence d'empilement du stratifié doit être soigneusement déterminée afin de minimiser ces contraintes [4].

Assemblage : Les matériaux composites sont généralement plus fragiles que les matériaux métalliques conventionnels. Par conséquent, la redistribution des contraintes autour des sites de concentration telle que le trou est moins efficace. La résistance et la rigidité d'un stratifié ne peuvent pas toujours être entièrement transférés par un joint. Le trou est donc souvent renforcé par des inserts métalliques ou par l'augmentation de l'épaisseur du stratifié dans la partie trouée. De tels renforcements entraînent du poids supplémentaire pour la structure. Le problème d'assemblage est donc critique pour le succès de l'emploi des matériaux composites [4].

Tolérance aux dommages : Un des points faibles les plus importants des matériaux composites est la tolérance aux dommages. Des dommages de diverses natures peuvent se produire dans la vie d'une structure, par exemple l'impact, soit en service ou pendant la maintenance, est inévitable. En règle générale, plus un matériau est ductile, plus il est capable de tolérer l'impact car la ductilité fournit la capacité d'absorber de l'énergie. Par conséquent,

les structures métalliques ont tendance de se déformer plutôt que de se fracturer sous l'impact. Le caractère fragile des matériaux composites ne permet pas, par contre, de subir l'impact sans avoir d'endommagement. Les dommages sont souvent des fissurations internes de la matrice, indétectables sur la surface de la structure. Ce type de dommages diminue considérablement la résistance en compression de la pièce endommagée. Les dommages des fibres diminuent la résistance en compression ainsi qu'en traction. Les outils pour évaluer la tolérance aux dommages des structures sont le programme d'inspection, l'analyse de la résistance résiduelle, et l'analyse de la propagation des dommages [4].

I.6 Elaboration des matériaux composites

La fabrication des matériaux composites nécessite à la fois mettre en place un appareil productif efficace et aussi un procédé industriel bien adapté avec la nature du produit à fabriquer afin d'atteindre les attentes de l'entreprise d'une part et les exigences et attentes du client en terme de qualité, délai et performance d'une autre part [7].

I.6.1 Moulage au contact

Ce procédé consiste à disposer dans un moule les renforts (sous forme de mat ou tissu), imprégnés manuellement d'une matrice therm durcissable. Cette méthode permet de réaliser des pièces prototypes ou de simulation avec une cadence très faible (Figure. I.4) [7].

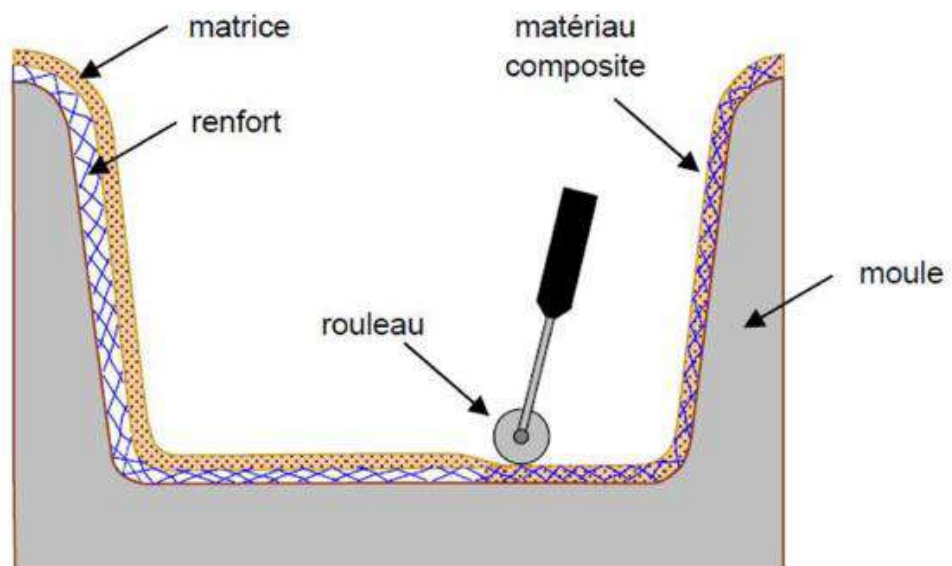


Figure. I.4: Principe de moulage en contact [7].

I.6.2 Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifié et d'un

pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et éboulée au rouleau cannelé. Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient [5].

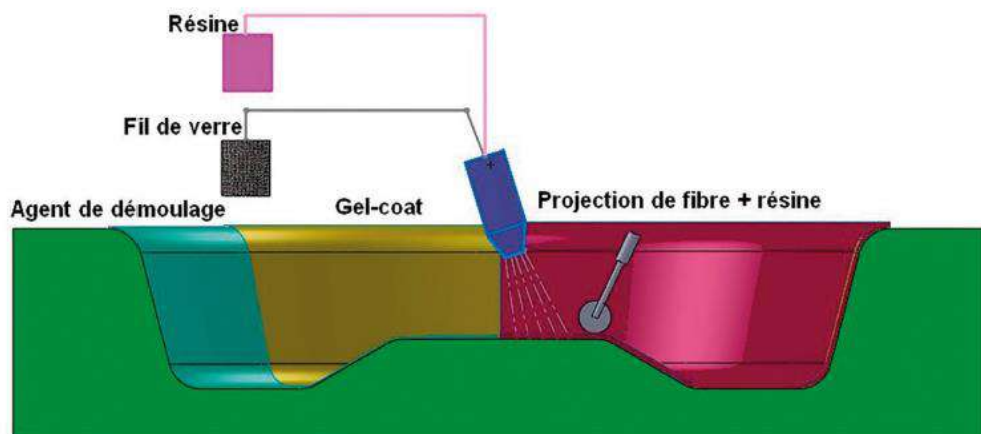


Figure. I.5: Technologie de projection simultanée [7].

I.6.3 Injection thermodurcissable BMC: (Bulk Molding Compound).

Le moulage du compound est réalisé entre moule et contre moule chauffé à température entre 140 à 170°C sous une pression de 50 à 100 bars.

Les avantages : réalisation de grandes séries, peu de finition.

Le compound : c'est de la résine, de la fibre coupée et de la charge [8].

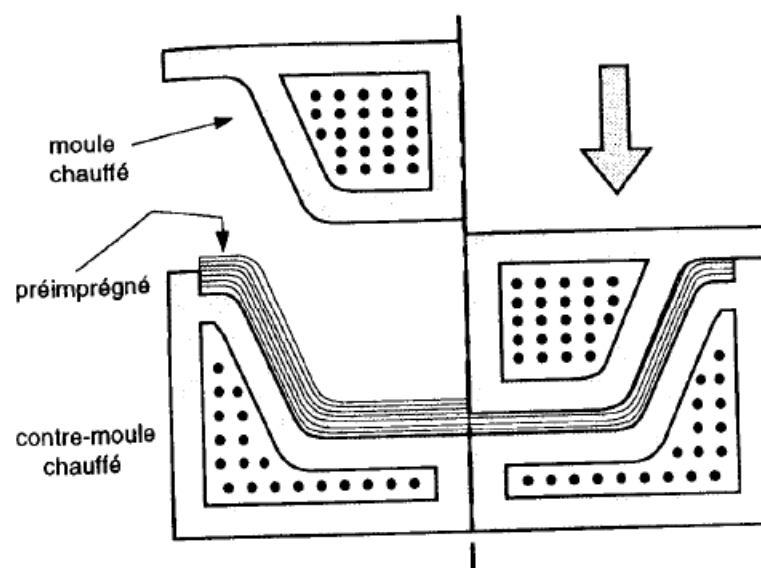


Figure. I.6: Principe d'injection thermodurcissable [8].

I.6.4 Compression thermodurcissable

C'est un procédé qui fait appel à déposer des feuilles de pré-imprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, réticulation puis éjection de la pièce. Cette méthode permet de réaliser des grandes pièces. La (Fig. I.7) présente le principe correspondant [7].

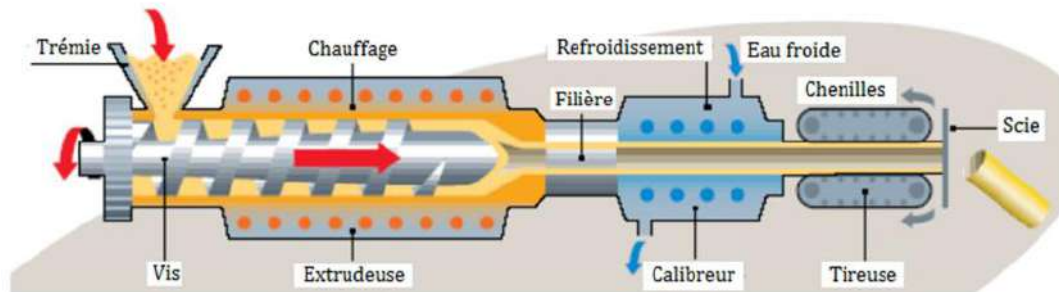


Figure. I.7: Compression thermodurcissables [7].

I.6.5 Enroulement filamentaire

L'enroulement filamentaire consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin, tournant autour de son axe, des fibres continues préalablement imprégnées d'un liant. Il permet d'obtenir des préformes sèches par enroulement (Figure. I.8) [7].

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation.

Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80 % en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement en matériel est très important [9].

Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements (et par conséquent de stratifications) sont obtenus. On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire [9].

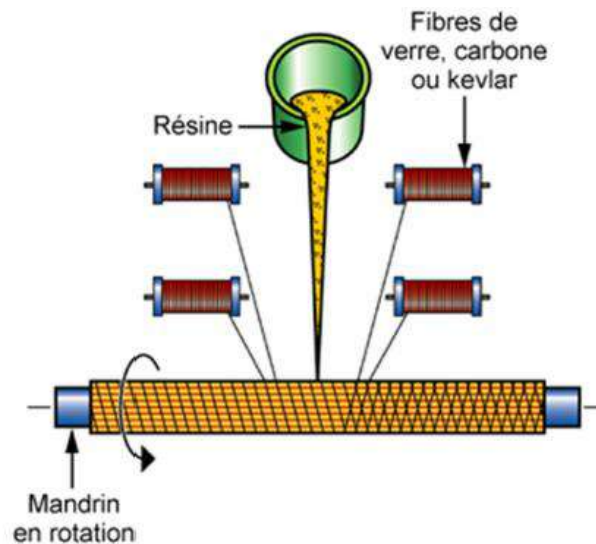


Figure. I.8: Principe de l'enroulement filamentaire [7].

I.6.6 Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation (figure I.9) de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé. Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2 000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel coati, on introduit simultanément en continu [9]:

- Le renfort : fibres coupées ou stratifié coupé.
- La résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve [9].

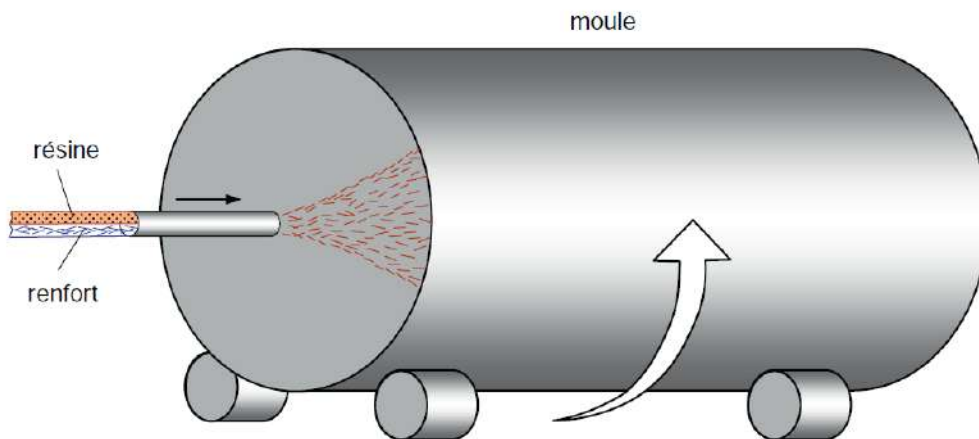


Figure. I.9 Moulage par centrifugation [9].

I.7 Architecture des matériaux composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches.
- Les stratifiées.
- Les sandwiches.

I.7.1 Monocouches

Représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes [10].

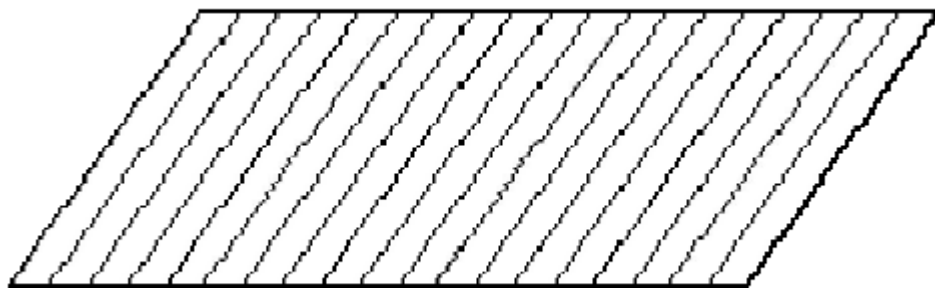


Figure. I.10 Composite monocouche [10].

I.7.2 Structures composites stratifiées

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées

réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou directionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurales sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. Les matériaux composites sont modélisés à une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique associée aux constituants de base du composite (le renfort et la matrice) et l'échelle macroscopique liée à la structure. À cette échelle, appelée méso échelle, une structure stratifiée est schématisée par un empilement de monocouches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter laminaires. La couche et l'interface sont les deux entités appelées méso constituants, comme illustré sur la (figure I.11), qui forment les bases des modèles dédiés à l'étude des structures stratifiées. L'interface inter laminaire est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre. En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier. L'étude des composites jusqu'à la phase ultime de la rupture montrera l'utilité d'employer un modèle d'interface pour simuler les phénomènes de délaminage (séparation progressive des couches) [12].

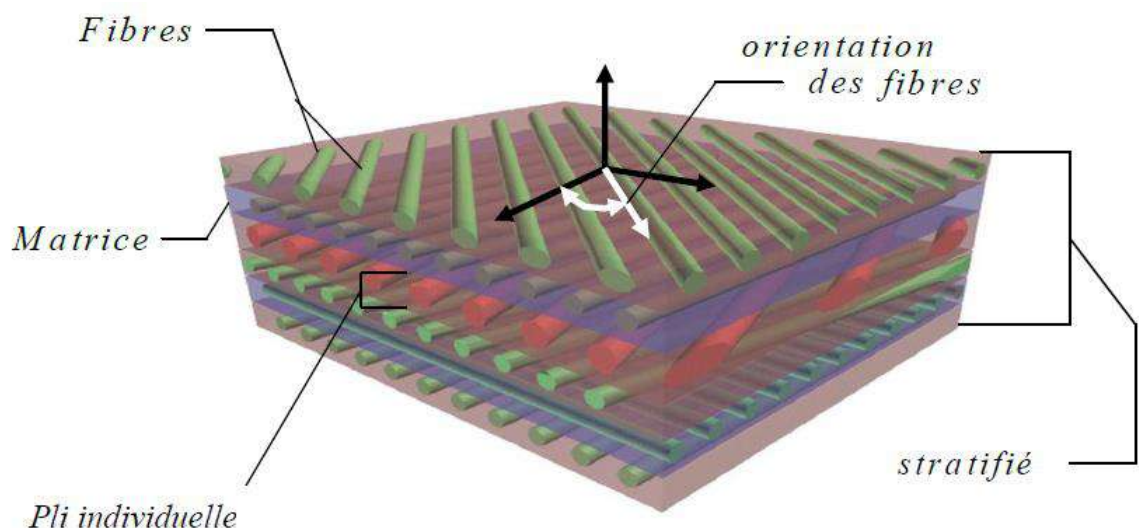


Figure. I.11 Structures composites stratifiées [10].

I.7.3 Structures composites sandwiches

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à

l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Une âme nid d'abeilles est présentée sur la figure I.12.

Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan [10].

$$10 \leq e_c / e_p \leq 100$$

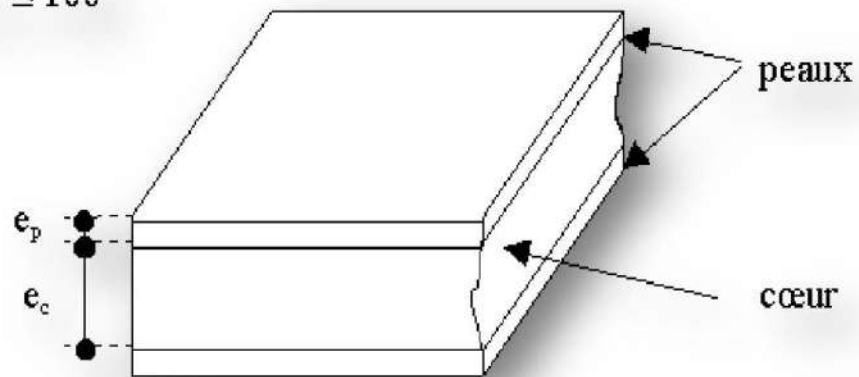


Figure. I.12 Structures composites sandwiches [11].

I.8 Propriétés des matériaux composites

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent [12]:

- Des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- Des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort.
- De leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort [12].

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- Le gain de masse (légèreté).
- Grande résistance à la fatigue.
- Liberté de forme.
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur et de la corrosion.
- Insensible aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- Une bonne isolation électrique.
- Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne.

- Très forte anisotropie [12].

I.9 Conclusion

Les matériaux composites sont les matériaux qui connaissent un grand succès en termes de pour sa fabrication et son utilisation dans divers domaines industriels grâce à ses gains techniques. Dans ce chapitre nous avons présenté les types, les structures et les procédés de fabrication des matériaux composites.

Chapitre II

Matériaux composites à matrice métallique

II.1 Introduction

Les composites à matrice métallique (CMM) ont été développés à partir des années 1960-1965 aux Etats-Unis et en France. À cette date, les applications envisagées étaient exclusivement orientées vers l'aéronautique et l'espace. Ce n'est qu'aux années 80 que les recherches dans ce domaine ont été élargies pour d'autres applications industrielles. Ces matériaux ont l'avantage de présenter de meilleures propriétés spécifiques par rapport aux métaux monolithiques. Toutefois, leur ténacité est inférieure à celle des alliages non renforcés et ils sont plus chers à l'heure actuelle [13]. Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques informations sur les matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium, ainsi que les Matériaux composites hybrides, avec une explication sur l'élaboration des matériaux à matrice d'alliage d'aluminium hybride.

II.2 Définition des composites à matrice métallique

Les composites à matrice métallique ont été élaborés pour tenter de concilier les qualités des métaux (ductilité, bonne tenue face au vieillissement et au feu...) avec la légèreté et les bonnes caractéristiques mécaniques propres aux structures composites. Ce sont des matériaux performants, mais pénalisés par un coût de revient encore élevé et réservés à des applications relativement exigeantes, dans divers domaines (figure II.1) [14].



Figure. II.1 Exemples d'applications des composites à matrice métallique [14].

Les CMM comportent une matrice en métal léger (aluminium et ses alliages, magnésium, titane...) et un renfort pouvant être, comme pour les CMO (comportent une matrice en organique) ou CMC (comportent une matrice en composite), de deux types :

- Soit des particules ou des fibres courtes céramiques ; les propriétés mécaniques sont alors légèrement supérieures à celle du métal formant la matrice, et les procédés traditionnels de mise en forme des métaux peuvent généralement être employés [14].

- Soit des fibres longues céramiques ou métalliques ; les propriétés sont alors bien supérieures à celles de la matrice, et les procédés de mise en forme sont plus coûteux (il s'agit typiquement d'infiltrer du métal fondu autour d'un tissu de fibres) [12].

Un avantage de ces composites est que la matrice étant métallique, ses caractéristiques mécaniques intrinsèques sont généralement bonnes. Il est donc possible de s'appuyer sur le comportement matriciel et de ne renforcer que certaines zones, ou encore de se contenter de renforts unidirectionnels ; cela est généralement impossible avec les matrices polymères (en raison de leur faible résistance) ou céramiques (en raison de leur fragilité). Un inconvénient est la grande réactivité chimique des métaux : lors de la mise au point du composite, il faut s'assurer que la matrice et le renfort ne peuvent pas réagir entre eux, faute de quoi les conséquences sur les propriétés mécaniques peuvent être catastrophiques [14].

II.3 Matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium

Après l'oxygène et le silicium, l'aluminium est le troisième élément le plus abondant dans la croûte terrestre (environ 7,5% en masse) et son extraction est peu coûteuse. À l'état solide, l'aluminium se cristallise dans un réseau cubique à faces centrées (CFC) et ne subit pas de transformation allotropique. Sa caractéristique la plus importante est sa légèreté (masse atomique 26,98 g.mol⁻¹), ce qui confère aux composites à matrice d'aluminium une faible densité. Sa température de fusion est relativement basse comparée à celles des éléments structuraux, elle vaut 660°C. Tandis que son point d'ébullition est d'environ 2467°C. L'aluminium non allié possède des propriétés mécaniques très réduites. Pour les améliorer, on ajoute des éléments entrant en solution solide et/ou formant des précipités hors solution solide pour former des alliages d'aluminium. D'après la nature de l'addition principale et la méthode d'obtention, on classe ces alliages en différentes séries [13].

Tableau II.1: Séries des alliages d'aluminium [13].

Alliages	Alliages corroyés	Alliages moulés
Aluminium pur	Série 1xxx	Série 1xxxx
Alliage aluminium-cuivre	Série 3xxx	Série 3xxxx
Alliage aluminium-manganèse	Série 3xxx	Série 3xxxx
Alliage aluminium-silicium	\	Série 4xxxx
Alliage aluminium-magnésium	Série 5xxx	\
Alliage aluminium-magnésium-silicium	Série 6xxx	\
Alliage aluminium-zinc-magnésium (soit avec ou sans cuivre).	Série 7xxx	Série 7xxx

Alliage aluminium-lithium

Série 8xxx

Dans le tableau II.2 sont répertoriés les alliages les plus utilisés comme matrice de matériaux composites.

Tableau II.2 : Matrices des matériaux composites à base d'aluminium. [15].

Désignation d'alliage	Composition chimique
2014	0,50-1,2% Si, 0,7% Fe, 3,9-5,0% Cu, 0,40% Mn, 0,20-0,8% Mg, 0,1% Cr, 0,25% Zn, 0,15% Ti
2024	Al, 0,5% Si, 0,50% Fe, 3,8-4,9% Cu, 0,30-0,9% Mn, 1,2-1,8% Mg, 0,1% Cr, 0,25% Zn, 0,15% Ti
2080	Al, 4,0% Cu, 1,5% Mg, 0,5% Mn, 0,3% Fe
A356	Al, 6,5-7,5% Si, 0,6% Fe, 0,25% Cu, 0,35% Mn, 0,2-0,45% Mg, 0,35% Zn, 0,25% Ti.
6061	Al, 0,40-0,8% Si, 0,7% Fe, 0,15-0,40% Cu, 0,15% Mn, 0,8-1,2% Mg, 0,04-0,35% Cr, 0,25% Zn, 0,15% Ti

II.3.1 2xxx : Al-Cu et Al-Cu-Mg

Caractéristiques mécaniques élevées à l'état T6 (supérieures à celles de l'acier doux), bonne tenue à chaud, mais résistance aux agents atmosphériques moins bonne que celle des alliages sans cuivre. Soudables uniquement par des techniques particulières comme le soudage par faisceau d'électrons [13].

II.3.2 4xxxx Al-Si-Mg

Présentent de bonnes propriétés pour la coulée en sable et en coquille, une bonne aptitude à donner des pièces étanches au soudage, une bonne stabilité dimensionnelle et résistance à la corrosion. Il convient pour un très grand nombre de pièces exigeant une résistance mécanique élevée [13].

II.3.3 6xxx : Al-Mg-Si

Caractéristiques mécaniques moyennes, inférieures à celles des alliages 2xxx et 7xxx, mais très bonne aptitude à la transformation à chaud et à la mise en œuvre à froid, comportement satisfaisant aux agents atmosphériques, et bonne aptitude au soudage [13].

II.4 Matériaux composites hybrides

Malgré les progrès des matériaux composites et leurs performances inégales, ils présentent certains inconvénients qui entravent leur emploi dans de nombreux domaines tel

que ; la rupture soudaine, faible tolérance aux dommages, faible résistance résiduelle ainsi que leur coût élevé et leur production limitée [16].

Le recours à l'hybridation a permis de surmonter certaines limitations de ces matériaux et d'étendre leurs applications dans des secteurs plus divers, d'où une amélioration significative de leurs performances a été prouvée, justifiée par l'effet synergique des propriétés intrinsèques des différents constituants. Il s'agit en fait d'utiliser au moins deux renforts ayant des propriétés différentes (physiques, mécaniques, etc.) dans une même matrice. Ces derniers se distinguent par la configuration de disposition des fibres (inter plis, intra plis), comme illustré dans la figure II.2 [16].

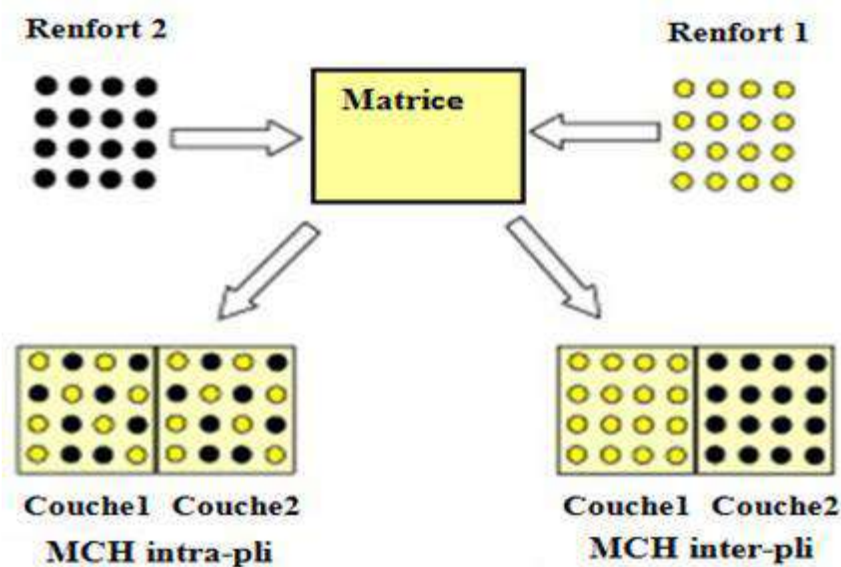


Figure II.2 Illustration schématique des matériaux composites hybrides inter-ply et intra-ply [16].

II.4.1 Le principe

Lorsque plusieurs fibres de renforts sont mélangés dans les même matrice de résine, le composite obtenu est appelé hybride. ce matériau est élaboré à partir d'une "matrice" composite fibre époxy classique, dans laquelle on insère des renfort dans une matrice polymère ou une matrice métallique [15].

II.4.2 Les différents hybrides

- Hybrides inter-plis: constitué d'une suite de plis de nature différente, par exemple un pli de carbone suivi d'un pli aramide. Ce système est plus performant et utilise au mieux les propriétés de chaque fibre, ce type d'hybride est largement employé dans l'industrie aéronautique [15].

- Hybride intra-plis: Constitués d'un empilement de plis de nature identique, mais chaque pli possède un tissage de plusieurs fibres de nature différente, son principale avantage est de réduire le nombre d'opération d'application des couches, cette solution est souvent adoptée dans le domaine naval [15].
- Hybrides de fibres et des feuilles métalliques: dans ce type de procédé, deux feuilles composites stratifiées therm durcissables peuvent être laminé entre les feuilles métalliques d'aluminium afin de garantir la légèreté et de meilleures résistances et ténacité [15].

II.4.3 Les avantages des composites hybrides

Cette combinaison conduit à des composites plus rigide à plus haut module d'élasticité, par exemple l'assemblage des fibres aramides et carbones produit un composite possédant une meilleur ténacité, traduite par une faible propagation des endommagements sous effort statique. Par ailleurs, la règle de mélange est applicable au module élastique en traction, à la résistance à la flexion et à la compression [15].

II.4.4 Les inconvénients

- Le prix de revient d'un composite hybride peut être plus élevé.
- La résistance à la traction de ces composites est parfois inférieur, dans ce cas la charge sera supportée par la fibre ayant un plus grand allongement, par exemple la combinaison des fibres de verre et de carbone dont l'allongement est respectivement 3% et 1% est moins intéressante que celle du carbone-aramides et aramides-verre [15].

II.5 Les propriétés mécaniques et tribologiques des matériaux composites d'alliage d'aluminium hybrides

II.5.1 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du composite hybride aluminium à savoir, la résistance à la traction, la limite d'élasticité, l'allongement et la dureté ont été déterminées par des études par certains des chercheurs. Le tableau II.3 montre les comportements mécaniques de quelques Composites hybrides aluminiums [17].

Tableau II.3: Comportements mécaniques du composite hybride aluminium [17].

Aluminium Matrice utilisée	Renforcement utilisé	Comportement mécanique de l'hybride Composite
Al 2024	Carbure de silicium et cendres volantes	Composite plus léger avec des augmentations, en dureté, résistance à la traction et diminution en allongement de la matrice métallique hybride composite par rapport à aluminium non renforcé
alliage Al-Mg-Si	Carbure de silicium et graphite Carbure de silicium et bambou cendre de feuilles (un cendres de déchets agricoles)	Résistance à la traction et module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la fraction volumique et la taille des particules de graphite La dureté, la résistance ultime à la traction, et pourcentage d'allongement de l'hybride composites diminue avec l'augmentation de Teneur en cendres de feuilles de bambou (BLA)
Alliage A356.2	Cendre de balle de riz (RHA) et Carbure de silicium (SiC)	L'augmentation de la dureté se produit lorsque la fraction volumique de renforcement augmente. En outre, la traction ultime (UTS) et le rendement la force augmente mais avec une diminution de élongation

II.5.2 Propriétés tribologiques

Le taux d'usure des composites hybrides d'aluminium a été serait inférieur à celui des composites binaires. Différent la matrice d'aluminium et les méthodes de traitement ont également été employées par divers chercheurs pour déterminer la tribologie comportement du composite hybride aluminium. Tableau suivant montre la matrice aluminium, le renforcement et les comportements tribologiques observé dans certains composites hybrides aluminiums [17].

Tableau II.4: Comportements tribologiques du composite hybride aluminium [17].

Aluminium Matrice utilisée	Renfort utilisé	Comportement tribologique de l'hybride Composite
alliage AA6061	Saffil et Particules de carbure de Silicium (SiCp) Particules Carbure de silicium et graphite/antimoine trisulfure Saffil et SiC	Faible taux d'usure. Le taux d'usure diminue avec l'augmentation de la charge et augmente avec une vitesse accrue et un faible coefficient de frottement, une faible élévation de température et un faible niveau de bruit Meilleure résistance à l'usure sous glissement à sec à température élevée et charge élevée par rapport au composite monolithique
alliage Al-12Si AA6061	Al ₂ O ₃ et Carbone fibres Carbure de silicium et Graphite	Le taux d'usure diminue avec l'augmentation en fraction volumique de fibre de carbone. L'usure diminue avec l'augmentation de la teneur en SiC à 20 vol. %, mais augmente au- delà teneur
alliage Al 6061	Carbure de silicium et Carbure de silicium graphite et Nickel Graphite (Gr- Ni)	La résistance à l'usure de l'hybride composites augmente avec l'augmentation de taille des particules de graphite. Le coefficient de frottement diminue lorsque le pourcentage d'addition Gr-Ni augmente. Les taux d'usure de tous les composites avec des additions de Gr-Ni sont supérieur au taux d'usure de la base Matériau Al/SiC sans Gr-Ni une addition
alliage A356 Graphite alliage AlMg10	Carbure de silicium et Graphite Carbure de silicium et Graphite	L'ajout de graphite entraîne une diminution de l'usure du contre-corps. Meilleure résistance à l'usure de l'hybride composites est atteint lorsque par rapport au matériau de base AlMg10 De plus, il y a une plus grande résistance à l'usure pour le même % en poids de SiC dans composites à plus haute teneur en graphite
alliage Zn-Al pur	Carbure de silicium et Graphite Carbure de silicium et Graphite	Augmentation de la résistance à l'usure et coefficient de frottement réduit. Les composites hybrides possèdent des valeurs de coefficient de frottement entre celui de Zn-Al-SiC et Zn-Al-graphite composites et possèdent également d'excellents résistance à l'usure par rapport à la composites monolithiques.

alliage Al 2219	Carbure de silicium	Augmentation de l'usure par glissement à sec
alliage Al-Si10Mg	particules (SiCp) et	résistance du composite Al/SiCp due à l'ajout
alliage Al 6061	Graphite	de particules de graphite.
	Alumine et Graphite	la distance de glissement est la plus élevée
		influence sur le taux d'usure suivi de charge et
		vitesse de glissement la résistance à l'usure de
		l'hybride le composé augmente avec
		l'augmentation de les durées de vieillissement.

II.6 Elaboration des Matériaux à matrice d'alliage d'aluminium hybrides

L'alliage hypoeutectique Al-Si A356 (EN AlSi7Mg0.3), avec la composition chimique indiquée dans le tableau II.5, a été utilisé comme matrice pour obtenir les composites. Des composites ont été produits par le procédé de compocasting, en utilisant des particules de carbure de silicium (SiC) et des particules de graphite (Gr). Avant le processus de compocasting, l'alliage de matrice a été nettoyé du laitier (par fusion et surchauffe à 650 °C), tandis que les poudres de SiC et de Gr ont été mélangées de manière homogène à l'état solide et préchauffées à 150 °C. Après cela, l'alliage de matrice a été refroidi à la température de travail de 600 ± 3 °C, et cette température a été maintenue constante pendant environ 10 min, puis un mélangeur à plaques a été inséré dans le bain semi-solide et une agitation isotherme à 500 tr/min a été effectuée pendant 5 min. Le mélangeur était en acier revêtu d'oxyde d'aluminium par projection plasma atmosphérique. Par conséquent, la réaction du mélangeur d'acier et de la masse fondue semi-solide a été empêchée.

Tableau II.5 : Composition chimique de l'alliage A356 [18]

Elément	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Ni	Ti	Al
Pourcentage	7.20	0.02	0.29	0.01	0.18	0.01	0.02	0.11	reste

L'infiltration des particules de SiC et Gr a été réalisée pendant une durée de 7 min. A ce stade, avec la quantité croissante de particules, la température a été légèrement élevée à 610 °C afin de faciliter l'infiltration, car l'ajout des particules (phase secondaire) a augmenté la viscosité de la matrice semi-solide. Après l'étape d'infiltration, une agitation en deux étapes a été effectuée. Le premier a été utilisé pour la stabilisation du processus et a duré 2 min, avec la vitesse de rotation du mélangeur de 1000 tr/min. Au cours de cette étape, la température du bain semi-solide a été ramenée à 600 °C. La deuxième étape, d'une durée de 5 min, a été réalisée avec la vitesse de rotation du mélangeur de 1500 tr/min en mode isotherme, à une température de 600 ± 3 °C. Les coulées solides ont été fabriquées à l'aide d'un moule préchauffé à 500 C. Les pièces moulées obtenues ont ensuite été pressées à chaud dans un

outil spécial à une température de 570 C, avec une charge de 60 kN. Tous les spécimens ont été soumis au traitement thermique commercial T6 avec les paramètres suivants : mise en solution à 540 C pendant 4 h avec trempe à l'eau et vieillissement artificiel à 160 C pendant 6 h [18].

II.7 Types de renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tridirectionnel ou plus)

II.7.1 Fibres de verre

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.

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore) [19].

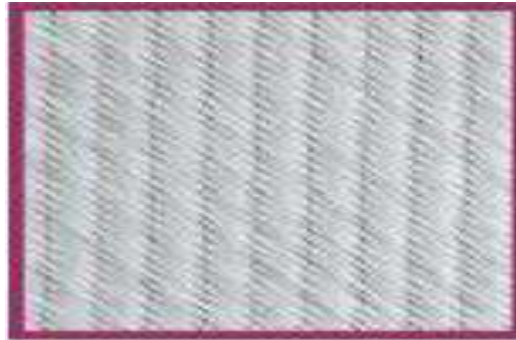


Figure. II.3 Fibres de verre [19].

Les avantages et les inconvénients des fibres de verre sont représentés sur le tableau II.6 :

Tableau II.6. Avantages et inconvénients de la fibre de verre [2].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Bonne résistance thermique et électrique – Bonne résistance aux agents chimiques et à l'humidité. – Bonne compatibilité avec les matrices organiques. – Faible coût. 	<ul style="list-style-type: none"> – Caractéristiques mécaniques moyennes, notamment la rigidité élastique. – Tenue au choc médiocre.

II.7.2 Fibres de carbone

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées { partir d'un polymère de base, appelé précurseur actuellement, les fibres *précurseurs* utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir, du polydactyle intrique (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.

Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitassions. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone [20].

**Figure II. 4:** Fibres de carbone [20].

C'est la fibre la plus utilisées dans les applications de hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres [20] :

- Fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- Fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

Les avantages et les inconvénients des fibres de carbone sont représentés sur le tableau II.7 :

Tableau II.7 : Avantages et inconvénients de la Fibre de carbone [2].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Grande résistance à la traction et grande rigidité longitudinale. – Très bonne tenue en température sans chute de propriétés (jusqu'à 1 500 °C en atmosphère non oxydante). – Inertie à la corrosion et aux agents chimiques. – Coefficient de dilatation longitudinal très faible. 	<ul style="list-style-type: none"> – Fragilité au choc; – Fragilité à la courbure ou au pliage; – Coût élevé.

II.7.3 Fibres aramides

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des ensimages des fibres peuvent être utilisé. L'utilisation de composites (fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis) [20].



Figure II. 5 Fibres d'aramides [20].

II.7.4 Fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2000°C [20].

II.8 Renforts en carbure de silicium

Le SiC est une néo-céramique qui a été développée il y a une cinquante neuf d'années. On le fabrique par un frittage chimique à haute température, supérieure à la température de fusion du silicium, d'un mélange de poudres de Sic, de graphite et de silicium. Le Tableau II.8 donne un aperçu des caractéristiques du Sic sous forme de particules. Caractérisé par une très grande dureté, le carbure de silicium est le solide le plus dur après le diamant. Il possède une bonne conductivité thermique, comparable à celle de certains alliages métalliques, ce qui est exceptionnel, car les céramiques sont généralement des isolants thermiques. Une autre propriété favorable au Sic est sa faible densité, qui est proche de celle de l'aluminium. L'utilisation des particules de SiC comme renfort dans la matrice d'alliage d'aluminium prend l'avantage de sa bonne compatibilité chimique avec l'aluminium, de sa grande rigidité et de sa grande résistance. Les particules de SiC sont non seulement dures (-3500 HV), mais aussi abrasives [21].

Tableau II.8 : Caractéristiques des particules de SiC [21].

nature chimique	densité	E	Rm	Dureté	coef. Exp .therm.	pt fusion
SiC	3,2	480 GPa	2-3 GPa	2700 br.	4,5 um/m K	2300 °C

II.9 Renforts en graphitiques

Le carbone est présent dans les composites graphiques sous forme de graphite. A l'opposé du diamant, le graphite a une structure en forme de lamelles. Ces lamelles sont reliées entre elles par de très faibles liaisons pouvant glisser les unes sur les autres. Cette facilité de glissement confère au graphite des propriétés lubrifiantes, ce qui facilite l'usinage. Le mode d'usure des outils lors de l'usinage des électrodes en graphite est l'abrasion [22].

II.10 Paramètres tribologiques des Matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminiums hybrides :

Les tests d'usure pour les composites Al doivent être effectués sous conditions de glissement à l'aide d'un test de type broche sur disque machine selon la norme ASTM. En général, les tests sont effectués à température ambiante sans aucune lubrification. Dans un premier temps, les échantillons (broche) sont usinés et poli pour assurer un contact plat avec la rotation disque (matériau de contre-face). Lors des essais, l'échantillon les goupilles sont pressées contre le disque en rotation en appliquant charges adéquates Figure. II.6 .Le matériau

de contre-face est en acier avec une dureté appropriée (avec HRC Dureté au cône Rockwell de l'ordre de 60 à 70). Les tests d'usure sont effectués sous les valeurs spécifiées des paramètres de fonctionnement tels que la charge appliquée, la vitesse de glissement, la distance de glissement, et le contenu des renforts. Le coefficient de frottement et le taux d'usure sont considérés comme les principales fonctions de réponse pour évaluer les performances d'usure du matériaux composites . Le mouvement relatif entre le glissement surfaces entraîne une détérioration des caractéristiques de surface (de l'une ou des deux surfaces de glissement), mais la détérioration peut être réduite dans une certaine mesure en utilisant un lubrifiant solide. Par conséquent, les caractéristiques de surface (frottement et usure) des surfaces usées de l'éprouvette de composites hybrides Al/SiC/Gr (contenant des céramiques et lubrifiants solides) sont discutées dans les sections. Un certain nombre d'études ont été menées pour déterminer les performances relatives des alliages Al et composites hybrides [18].

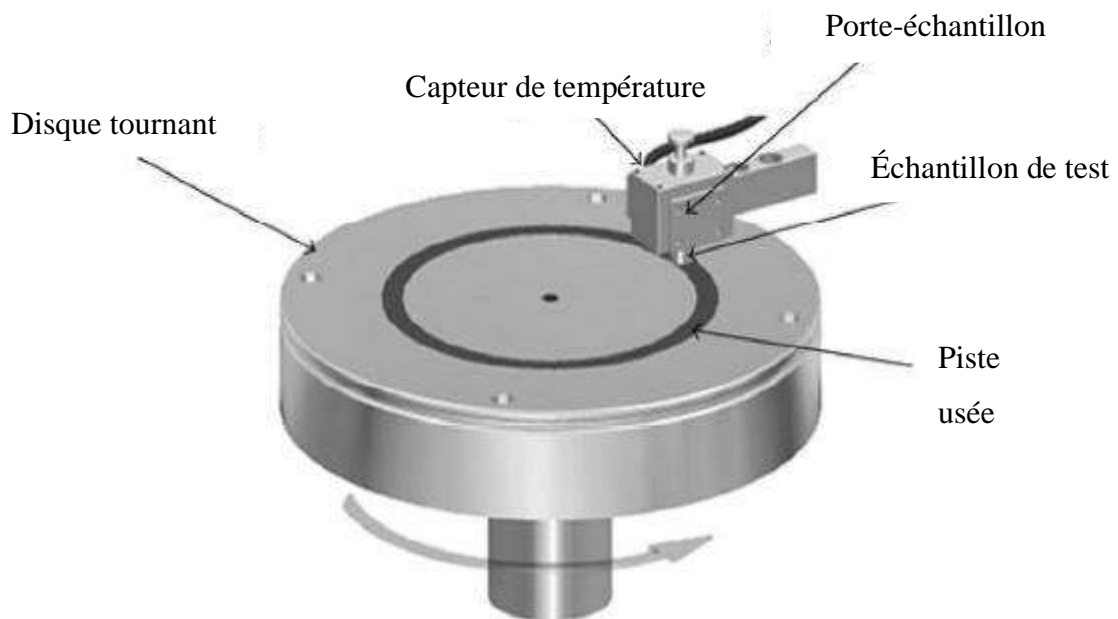


Figure. II.6 Photo illustrative de la configuration du test de broche sur le disque utilisé pour les tests d'abrasion des matériaux [18].

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'expliquer les composites à matrice métallique et Matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium .surtout lors de l'ajout de renforts, où nous nous sommes concentrés sur les gains que les alliages d'aluminium gagnent lors de l'ajout de graphite et carbure de silicium sont ajoutés dans les paramètres tribologique.

Chapitre III

Etude paramétrique sur le comportement tribologique des composites

III.1 Introduction

La logique floue nous permet d'étudier et d'analyser les résultats avec diverses fonctions car la logique floue est une méthode intégrée à la plupart des applications actuelles.

Dans ce chapitre, nous utilisons un modèle flou pour étudier le comportement tribologique (Le taux d'usure et le coefficient de frottement) des composites hybrides Al/SiC/Gr.

III.2 Définition

La logique floue peut être définie comme de la logique booléenne qui a été étendue pour réunir le concept de vérité partielle. Dans la logique booléenne nous avons des valeurs de vérité entre "vrai complètement" et "complètement faux" (0 ou 1). Avec la logique floue on utilise toutes les valeurs possibles comprises entre 0 et 1 [23].

La logique floue est basée sur la théorie des ensembles flous introduits par Lotfi A. Zadeh en 1965.

III.3 Principe

La logique floue est un type de modélisation qui s'intéresse à la prédiction d'une variable catégorielle Y « subjective » au sens où elle n'est pas objectivable : elle dépend de l'observateur (l'individu est « grand », « moyen » ou « petit »). Ce cadre sort de la statistique classique dans lequel la valeur de la variable Y est objectivable (« l'individu mesure 176 cm »). L'application de la logique floue revient à tenter d'appliquer un raisonnement proche de la pensée humaine [24].

- Les variables prédictives (comme la variable à prédire) sont catégorielles avec des modalités subjectives (« grand », « petit ») et non pas de données objectivables (176 cm). Ces variables catégorielles sont appelées « variables linguistiques ». Dans le cadre statistique usuel, la variable continue initiale (ici la taille en cm) peut être discrétisée pour donner des intervalles distincts, par exemple : « petit < 170cm < moyen < 180cm < grand ». La logique floue vise à prendre en compte les incertitudes qui existent au voisinage des seuils (due en partie à des principes de subjectivité) [24].
- Une donnée peut appartenir à plusieurs modalités d'une même variable (un individu de 165 cm peut être considéré comme petit mais aussi comme moyen). Les classes définies ne partitionnent donc pas l'ensemble des possibles car elles peuvent se recouper [24].

- La logique floue intègre un ensemble de règles permettant d'attribuer (d'une manière logique) une sortie à une entrée [24].

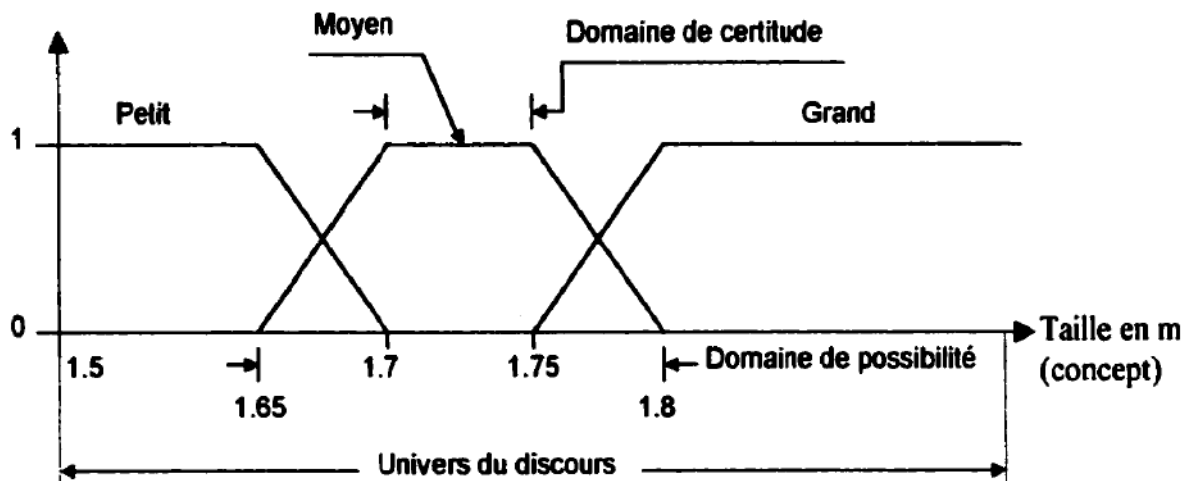


Figure III.1 Ternes et concepts en logique floue [25].

Au-delà de cette différence de principe, elle intègre également une prise en compte des interactions différentes de celle du monde probabiliste en redéfinissant les opérateurs logiques [24].

Tableau III.1 : Traduction mathématique sous la logique Floue [24].

	Opérateurs flous de Zadeh	Opérateurs probabilistes
A ET B	$Min(\mu_A, \mu_B)$	$\mu_A \times \mu_B$
A OU B	$Max(\mu_A, \mu_B)$	$\mu_A + \mu_B - \mu_A \times \mu_B$
NON A	$1 - \mu_A$	$1 - \mu_A$

Dans le Tableau III.1 : traduction mathématique sous la logique Floue, μ désigne la fonction de véracité pour les opérateurs flous qui est l'analogue de la mesure de probabilité en théorie des probabilités classiques [24].

Son fonctionnement peut se résumer en trois grandes étapes :

- **La fuzzification** : transformation des variables en variables floues (aussi appelées variables linguistiques) en leur associant des lois de véracité (la variable taille est divisée en modalités « un individu de taille 162 cm est « petit » à 60%, « moyen » à 40% et « grand » à 0% »). Ce procédé s'apparente à la définition de lois *a priori* en statistiques bayésiennes, avec dans cet exemple une loi *a priori* (0,6 ; 0,4 ; 0). La différence dans ce cadre est que la somme des véracités n'est pas tenue de valoir 1 [24].

- **L'inférence floue** : construction de règles (et de résultats) basées sur les variables linguistiques, attribution d'une véricité à chaque règle, puis agrégation des règles pour obtenir un résultat (linguistique) unique [24].
- **La défuzzification** : passage d'un résultat linguistique à un résultat chiffré [24].

III.4 Données expérimentales

Sur la base des données expérimentales recueillies dans le tableau : III.2 obtenues à partir de référence [26]. Nous suggère d'utiliser la méthode de simulation basée sur la théorie de la logique floue par le programme MATLAB pour étudier le comportement tribologique des composites hybrides Al/SiC/Gr.

Tableau III.2: Données expérimentales des composites Al/SiC/Gr [26].

Essais	Charge normale (N)	Vitesse de glissement (m/s)	Graffite (%)	Taux d'usure (mm ³ /m)	CoF ^a
1	40	0.25	0	0.442	0.129
2	40	0.25	1	0.325	0.104
3	40	0.25	3	0.147	0.082
4	40	0.50	0	0.304	0.119
5	40	0.50	1	0.252	0.098
6	40	0.50	3	0.141	0.063
7	40	1.00	0	0.257	0.101
8	40	1.00	1	0.201	0.086
9	40	1.00	3	0.120	0.059
10	80	0.25	0	0.626	0.135
11	80	0.25	1	0.373	0.120
12	80	0.25	3	0.232	0.105
13	80	0.50	0	0.441	0.122
14	80	0.50	1	0.285	0.104
15	80	0.50	3	0.202	0.081
16	80	1.00	0	0.334	0.108
17	80	1.00	1	0.215	0.091
18	80	1.00	3	0.168	0.065
19	120	0.25	0	0.904	0.141
20	120	0.25	1	0.488	0.130
21	120	0.25	3	0.435	0.118

22	120	0.50	0	0.615	0.132
23	120	0.50	1	0.338	0.115
24	120	0.50	3	0.297	0.103
25	120	1.00	0	0.431	0.118
26	120	1.00	1	0.245	0.097
27	120	1.00	3	0.198	0.073

III.4.1 Système flou

Nous avons choisi, un système d'inférence flou de type Mamdani pour des composites hybrides Al/SiC/Gr.

Nous utilisons un système flou avec trois (03) entrées : Vitesses de glissements(VG) , charges normales (CH) , pourcentage de Graphite (Gr%) et deux variables de sortie: Le taux d'usure et le coefficient de frottement.

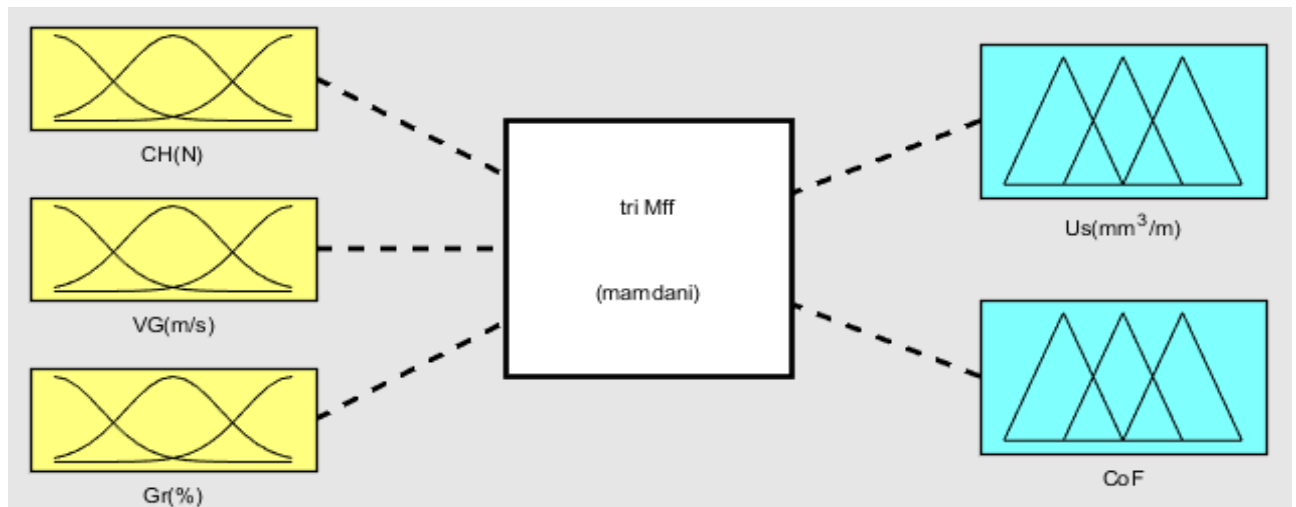


Figure III.2 Système flou pour les composites hybrides Al/SiC/Gr.

III.5 Modélisation floue

III.5.1 Les variables floues

Pour définir l'univers de discours associé à cette étude, nous présentons dans le tableau ci-dessous (tableau III.3) les valeurs limites des paramètres d'entrée et de sortie, pour le modèle flou utilisé.

Tableau III.3 : Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite Al/SiC/Gr

	Valeur Mini	Valeur Max
Les paramètres d'entrée		
Charge normale (N)	40	120
Vitesse de glissement (m/s)	0.25	1
Pourcentage de Graphite (%)	0	3
Les paramètres de sortie		
Taux d'usure (Us) (mm ³ /m)	0.120	0.904
Le coefficient de frottement (Cof)	0.059	0.141

L'ensemble des variables utilisés dans notre étude sont découpée en catégories appelées variables linguistiques. Chaque variable linguistique correspond à un intervalle de donnée numérique.

Les variables linguistiques pour la première variable (La charge normale) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.3)

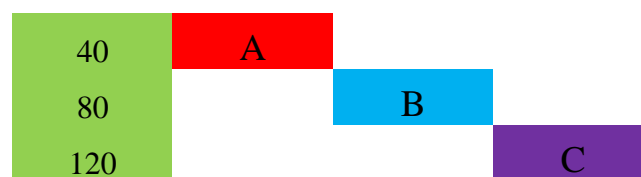


Figure III.3 Variables Linguistiques pour la charge normale.

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (la vitesse de glissement) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.4)

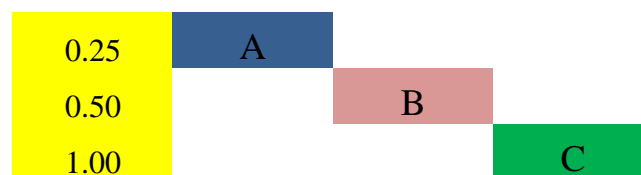


Figure III.4 : Variables Linguistiques pour la vitesse de glissement.

Les variables linguistiques pour la troisième variable (pourcentage de Graphite) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.5)

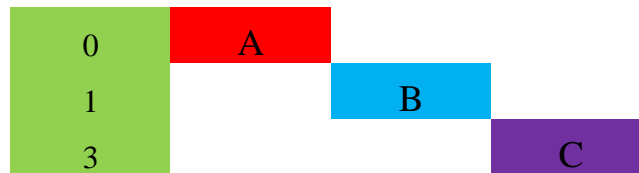


Figure III.5 Variables Linguistiques pour le pourcentage de Graphite.

Les variables linguistiques pour la première sortie (Taux d'usure) est choisie comme il est indiqué dans la figure (III.6)

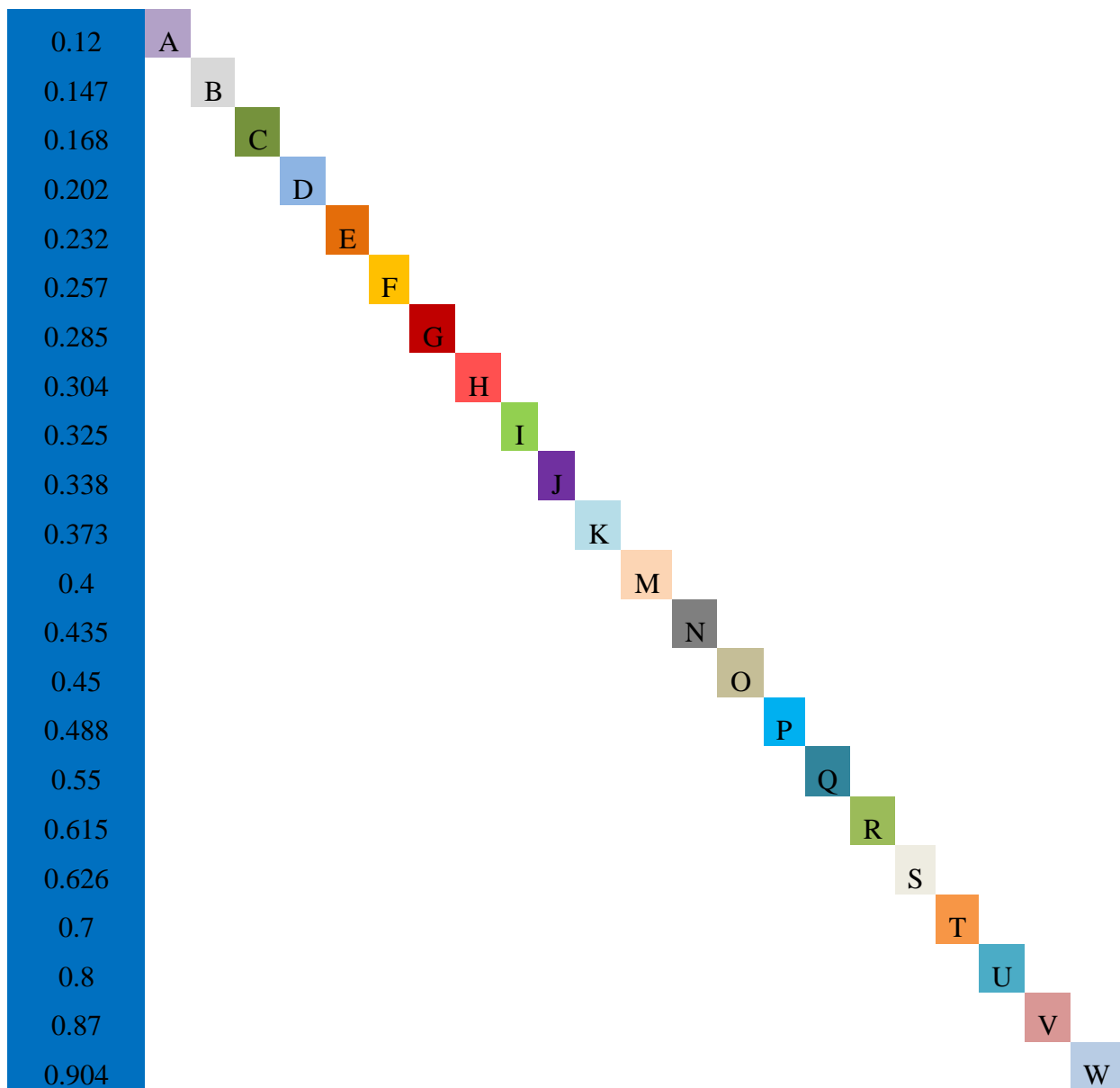


Figure III.6 Variables Linguistiques pour le taux d'usure.

Les variables linguistiques pour la deuxième sortie (Le coefficient de frottement) est choisie comme il est indiqué dans la figure (III.7)

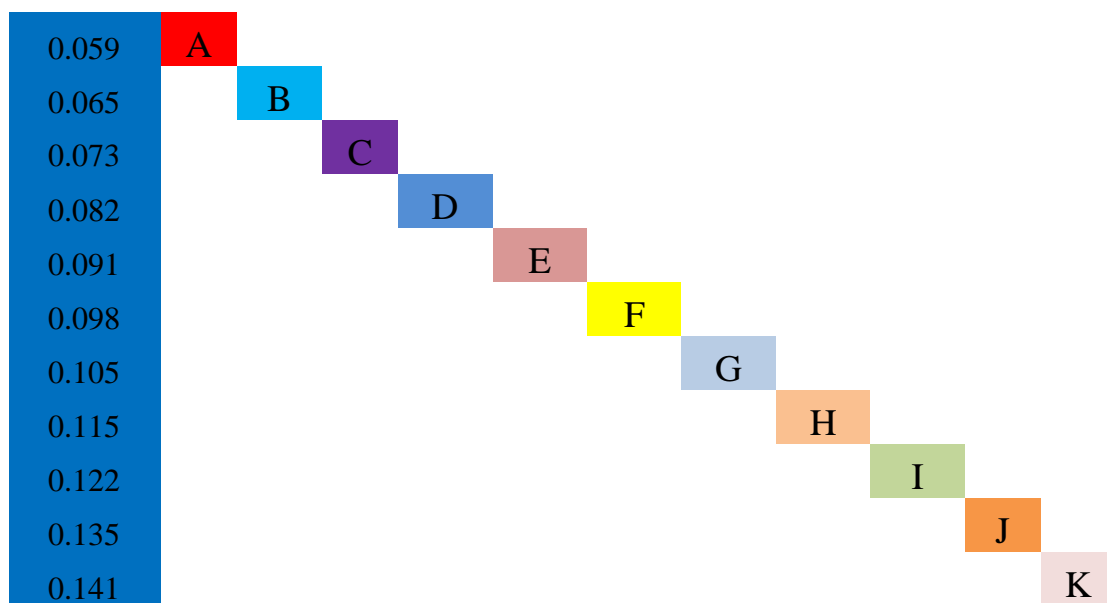


Figure III.7 Variables Linguistiques pour Le coefficient de frottement

III.5.2 Les sous-ensembles flous

Les sous-ensembles flous (ou parties floues) ont été introduits afin de modéliser la représentation humaine des connaissances, et ainsi améliorer les performances des systèmes de décision qui utilisent cette modélisation.

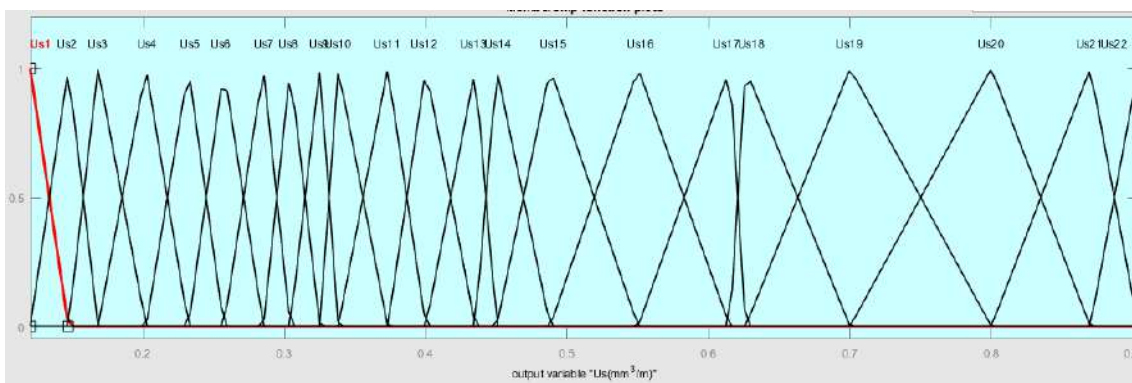
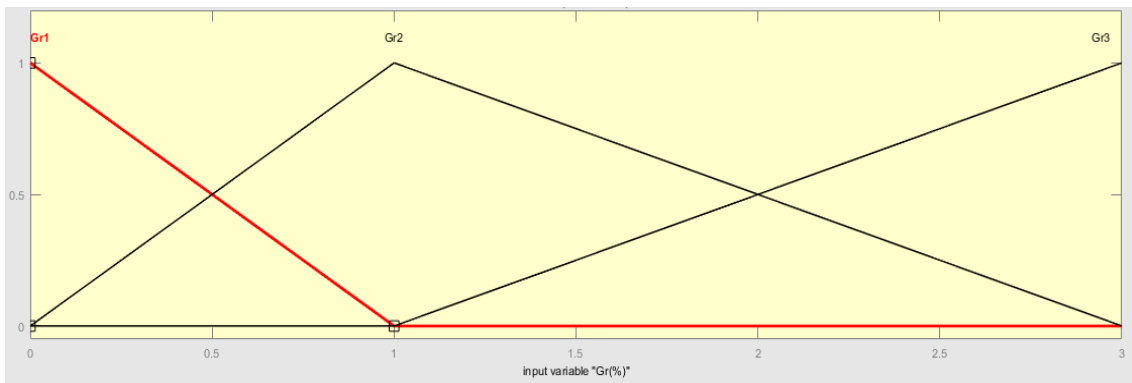
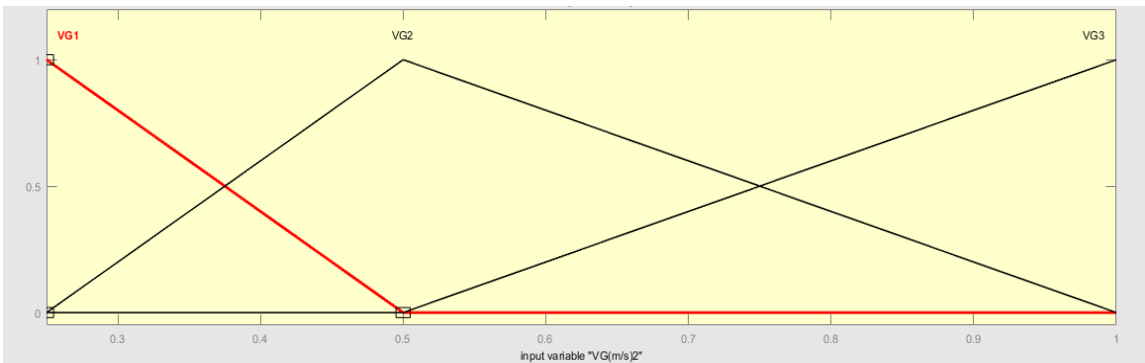
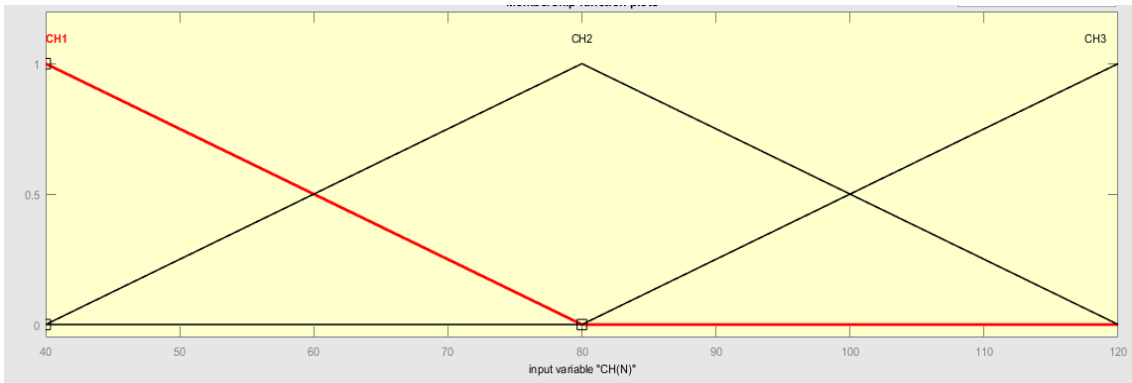
Les sous-ensembles flous sont utilisés soit pour modéliser l'incertitude et l'imprécision, soit pour représenter des informations précises sous forme lexicale assimilable par un système expert.

Un ensemble flou est défini à sa fonction d'appartenance, qui correspond à la notation de fonction caractéristique.

Les fonctions d'appartenance se présentent sous différentes formes, y compris triangulaire, trapézoïdale, gaussienne et sigmoïde. Dans la présente étude, les fonctions d'appartenance triangulaire et trapézoïdale ont été utilisées pour les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie.

Les fonctions d'appartenance utilisées pour les paramètres d'entrées et sortie sont représentées dans les figures : de III.8, III.9.

a. Utilisation des fonctions d'appartenance triangulaires



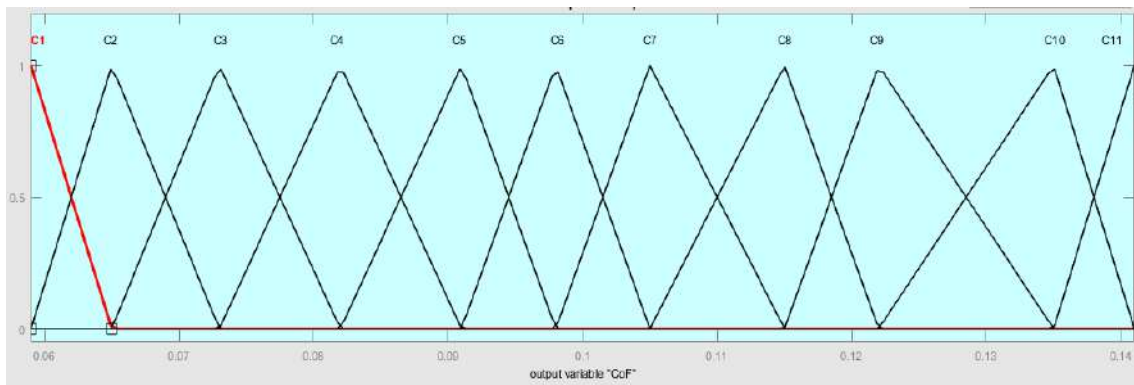
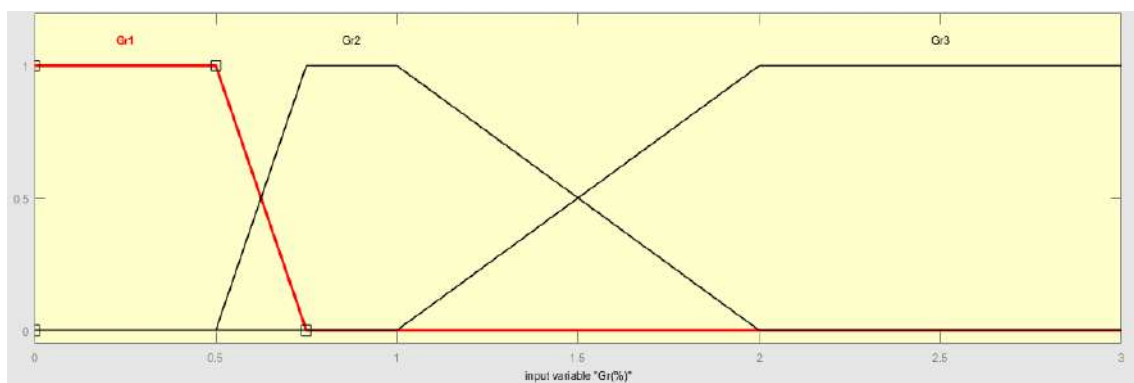
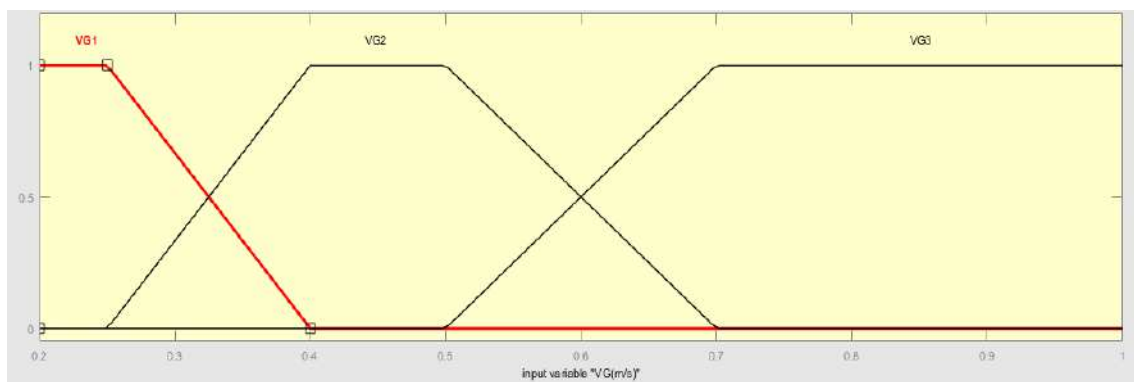
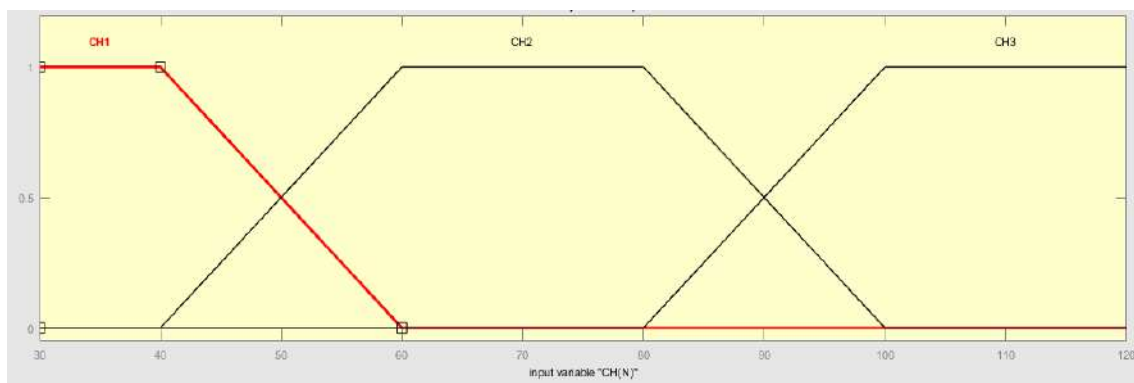


Figure III.8 Les fonctions d'appartenance triangulaires.

b. Utilisation des fonctions d'appartenance trapézoïdales:



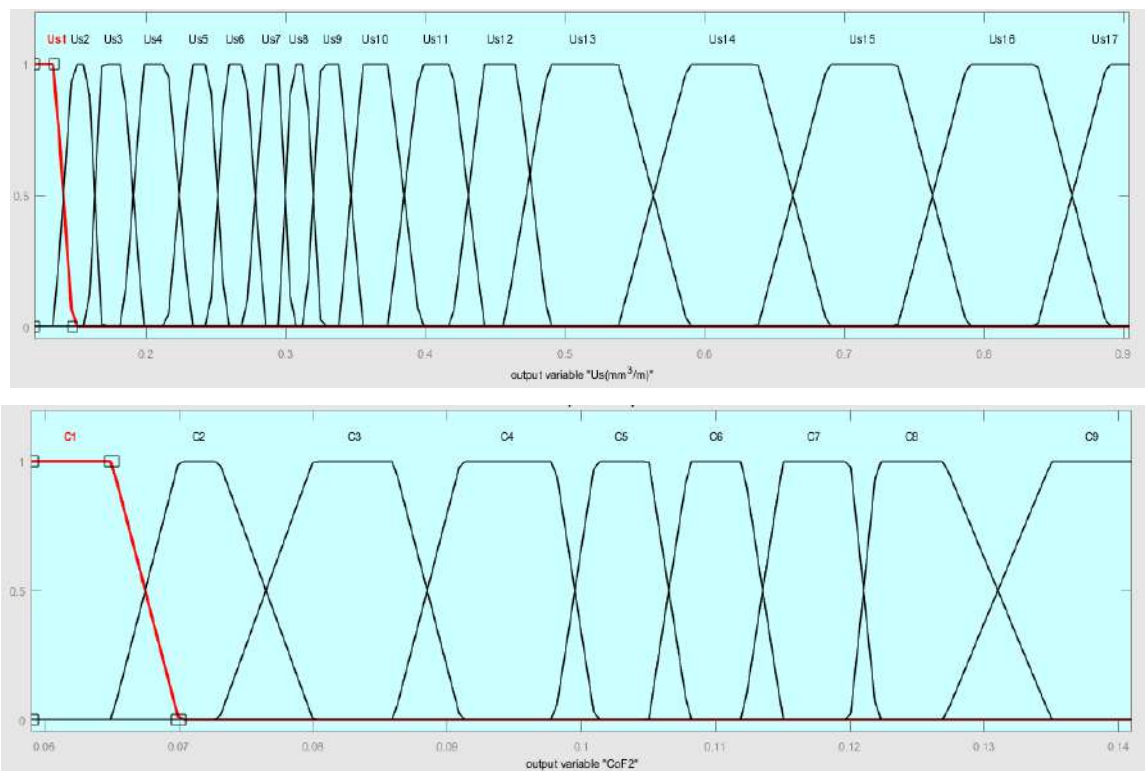


Figure III.9 Les fonctions d'appartenance trapézoïdale.

III.6 Les règles floues

vingt sept (27) règles floues ont été établies en fonctions des conditions expérimentales indiquées dans le tableau (III.2) En adhérant au processus de composition maximum-minimum, la logique floue de ces règles a produit une sortie floue. Chaque règle prend la forme suivante :

Si CH est (variable linguistique) et VG est (variable linguistique) et Gr est (variable linguistique) **Alors** Us est (variable linguistique) et Cof est (variable linguistique).

L'ensemble de règles floues élaborées sont regroupées dans le tableau III.4

Tableau III.4 Les règles floues pour les composites hybrides Al/SiC/Gr

Essai	Charge normale (N)	Vitesse de glissement (m/s)	Graphite (%)	Taux d'usure (mm ³ /m)	CoF ^a
1	CH1	VG1	G1	Us6	C5
2	CH1	VG1	G2	Us4	C3
3	CH1	VG1	G3	Us 1	C1
4	CH1	VG2	G1	Us 4	C4
5	CH1	VG2	G2	Us 3	C2
6	CH1	VG2	G3	Us 1	C1

7	CH1	VG3	G1	Us 3	C3
8	CH1	VG3	G2	Us 2	C1
9	CH1	VG3	G3	Us 1	C1
10	CH2	VG1	G1	Us 7	C6
11	CH2	VG1	G2	Us 5	C5
12	CH2	VG1	G3	Us 3	C3
13	CH2	VG2	G1	Us 6	C5
14	CH2	VG2	G2	Us 4	C3
15	CH2	VG2	G3	Us 2	C1
16	CH2	VG3	G1	Us 4	C3
17	CH2	VG3	G2	Us 2	C2
18	CH2	VG3	G3	Us 1	C1
19	CH3	VG1	G1	Us 8	C6
20	CH3	VG1	G2	Us 6	C6
21	CH3	VG1	G3	Us 6	C4
22	CH3	VG2	G1	Us 7	C6
23	CH3	VG2	G2	Us 4	C4
24	CH3	VG2	G3	Us 4	C3
25	CH3	VG3	G1	Us 6	C4
26	CH3	VG3	G2	Us 3	C2
27	CH3	VG3	G3	Us 2	C1

III.7 Résultats et discussion

Les résultats ont été obtenus par défuzzification. L'étape de la défuzzification consiste à convertir ces valeurs floues en variables réelles.

III.7.1 Etude de la précision et de l'erreur du système flou

Le pourcentage d'erreurs est obtenu en divisant la différence absolue entre la valeur mesurée et la valeur prédite par la valeur mesurée comme indiqué par l'équation (III.1).

$$e_i = \left(\frac{|V_{ex} - V_p|}{V_{ex}} \right) \times 100\% \quad (III.1)$$

La précision est calculée en trouvant l'approchement de la valeur prédite à la valeur mesurée. Dans l'équation (III.2), A est la précision du modèle et N est le nombre total de jeux de données testés. La précision du modèle est la précision individuelle moyenne

$$A = \frac{1}{N} \sum \left[1 - \frac{|V_{ex} - V_p|}{V_{ex}} \right] \times 100\% \quad (III.2)$$

III.7.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance triangulaires et trapézoïdales

La comparaison des résultats obtenus en utilisant les fonctions triangulaires et trapézoïdales nous montre le type de fonctions approprié pour notre problème

Les figures ci-dessous illustrent une comparaison directe entre les résultats obtenus avec les deux types de fonctions d'appartenance.

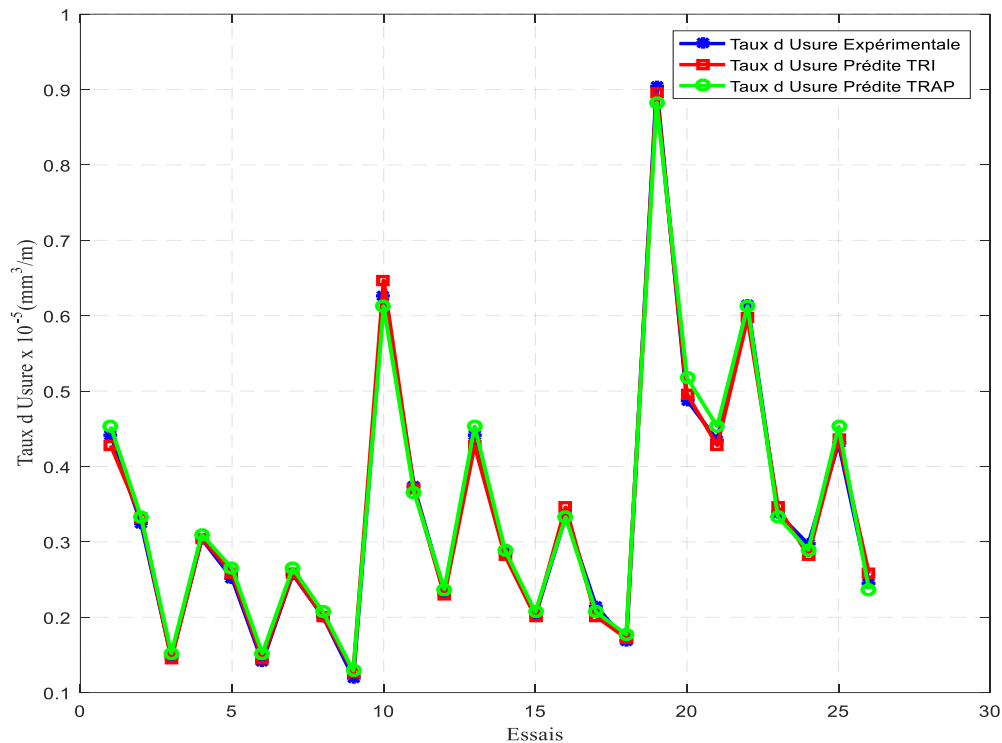


Figure III.10 Variation de taux d'usure (U_s) (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre d'essais.

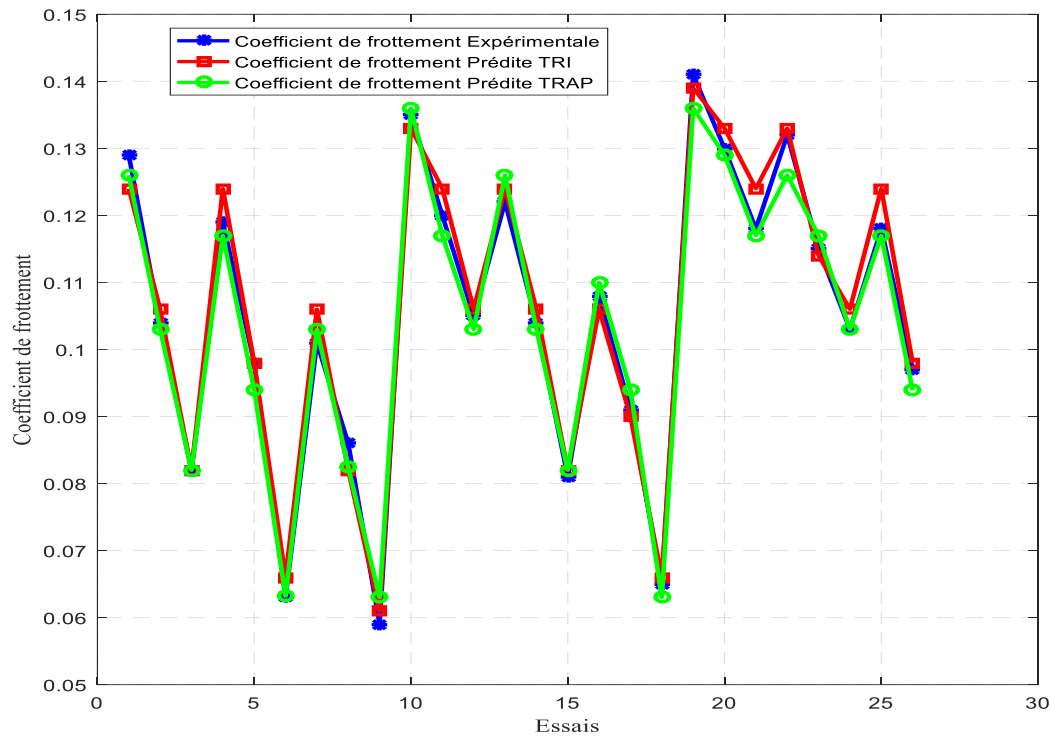


Figure III.11 Variation du coefficient de frottement (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre d'essais.

Les figures (III.10) et (III. 11) montrent que la variation des deux sorties en utilisant les deux types de fonctions d'appartenance est presque la même. Donc, cette représentation ne nous permet pas de choisir entre les deux types de fonctions.

Pour faire ce choix nous proposons d'utiliser la précision pour définir les résultats les plus proches aux résultats expérimentaux.

Donc les résultats proches aux résultats expérimentaux sont celles obtenues avec des fonctions d'appartenance triangulaires.

Les résultats que nous les présentons dans le reste du manuscrit, nous les avons acquises à l'aide des fonctions d'appartenance triangulaires.

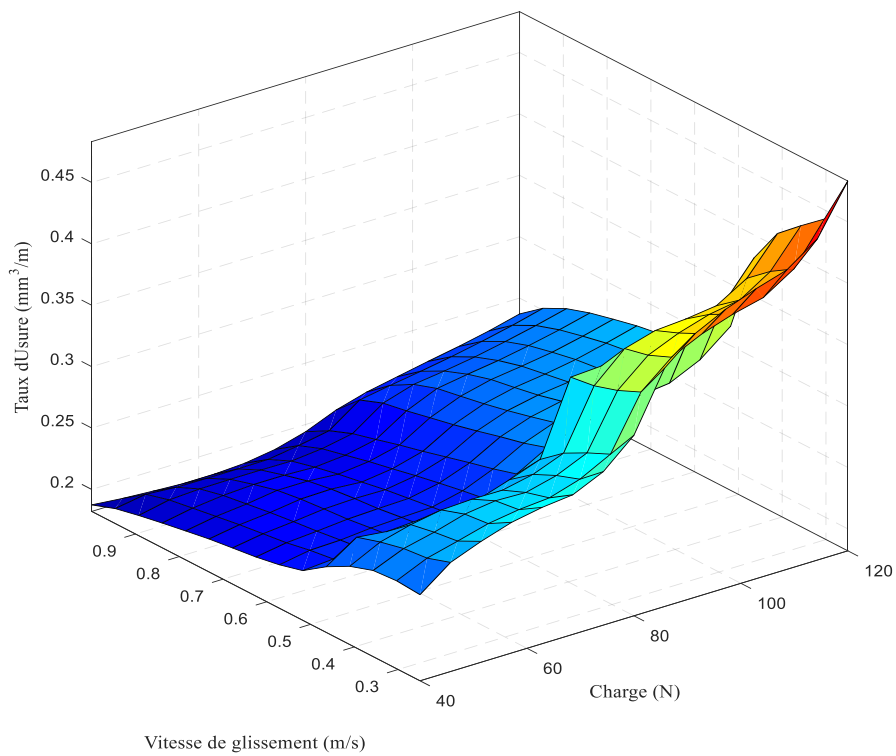
Le tableau III.5 regroupe l'ensemble des résultats obtenus par notre système flou

Tableau III.5 : Les résultats du système flou pour les composites hybrides Al/SiC/Gr.

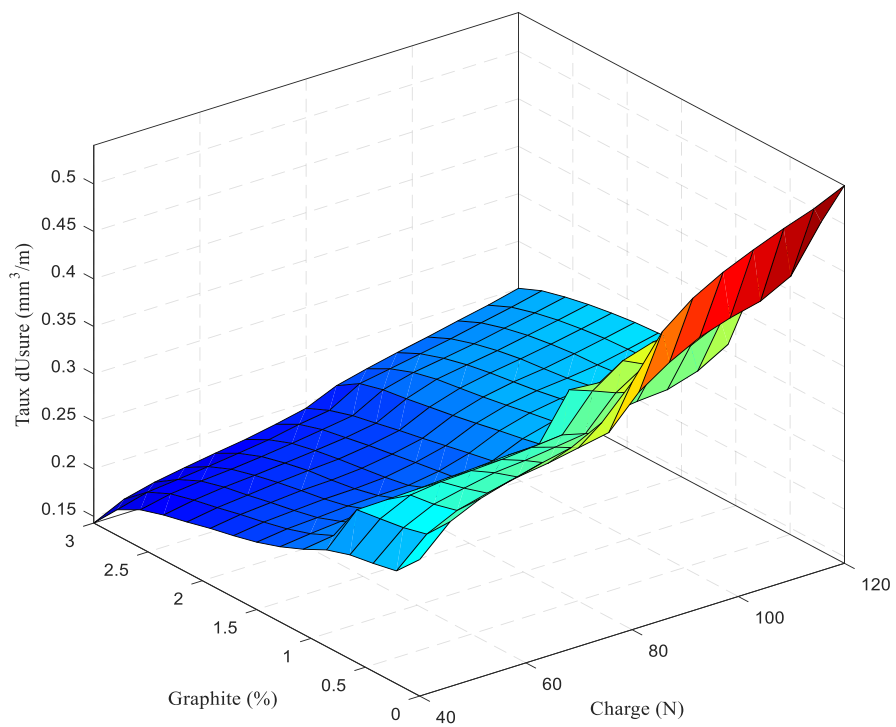
Essai	Us (Ex)	Us (P)	Erreur (%)	Précision (%)	CoF (Ex)	CoF (P)	Erreur (%)	Précision (%)
1	0.442	0.428	3.175	96.825	0.129	0.124	3.875	96.125
2	0.325	0.332	2.154	97.846	0.104	0.106	1.923	98.077

3	0.147	0.145	1.379	98.621	0.082	0.082	0	100	
4	0.304	0.305	0.329	99.671	0.119	0.124	4.201	95.799	
5	0.252	0.258	2.380	97.692	0.098	0.098	0	100	
6	0.141	0.145	2.84	97.16	0.063	0.066	4.761	95.239	
7	0.257	0.258	0.389	99.611	0.101	0.106	4.950	95.05	
8	0.201	0.201	0	100	0.086	0.082	4.651	95.349	
9	0.120	0.127	5.333	94.667	0.059	0.061	3.389	96.611	
10	0.626	0.647	3.35	96.65	0.135	0.133	1.481	98.519	
11	0.373	0.370	0.804	99.196	0.120	0.124	3.333	96.667	
12	0.232	0.230	0.862	99.138	0.105	0.106	0.952	99.048	
13	0.441	0.428	2.948	97.052	0.122	0.124	1.923	98.077	
14	0.285	0.282	1.052	98.948	0.104	0.106	1.923	98.077	
15	0.202	0.201	0.495	99.505	0.081	0.082	1.234	98.766	
16	0.334	0.346	3.593	96.407	0.108	0.106	1.851	98.149	
17	0.215	0.201	6.511	93.489	0.091	0.090	1.098	98.902	
18	0.168	0.172	2.381	97.619	0.065	0.066	1.538	98.462	
19	0.904	0.895	0.996	99.004	0.141	0.139	1.418	98.582	
20	0.488	0.496	1.639	98.361	0.130	0.133	2.307	97.693	
21	0.435	0.428	1.609	98.391	0.118	0.124	5.084	94.916	
22	0.615	0.597	2.926	97.074	0.132	0.133	0.757	99.243	
23	0.338	0.346	2.367	97.633	0.115	0.114	0.869	99.131	
24	0.297	0.282	5.05	94.95	0.103	0.106	2.912	97.088	
25	0.431	0.436	1.160	98.4	0.118	0.124	5.084	94.916	
26	0.245	0.258	5.306	94.694	0.097	0.098	1.030	98.97	
27	0.198	0.201	1.515	98.485	0.073	0.073	0	100	
				La precision=97.684%					La precision=97.695%

III.7.3 Représentation schématique des résultats



(a)



(b)

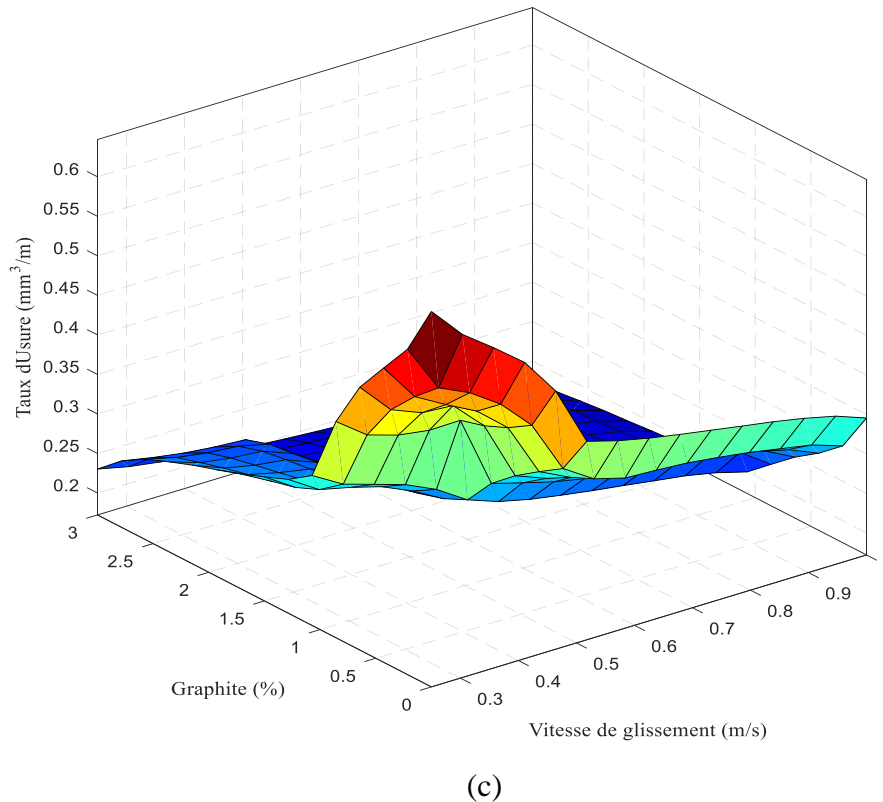
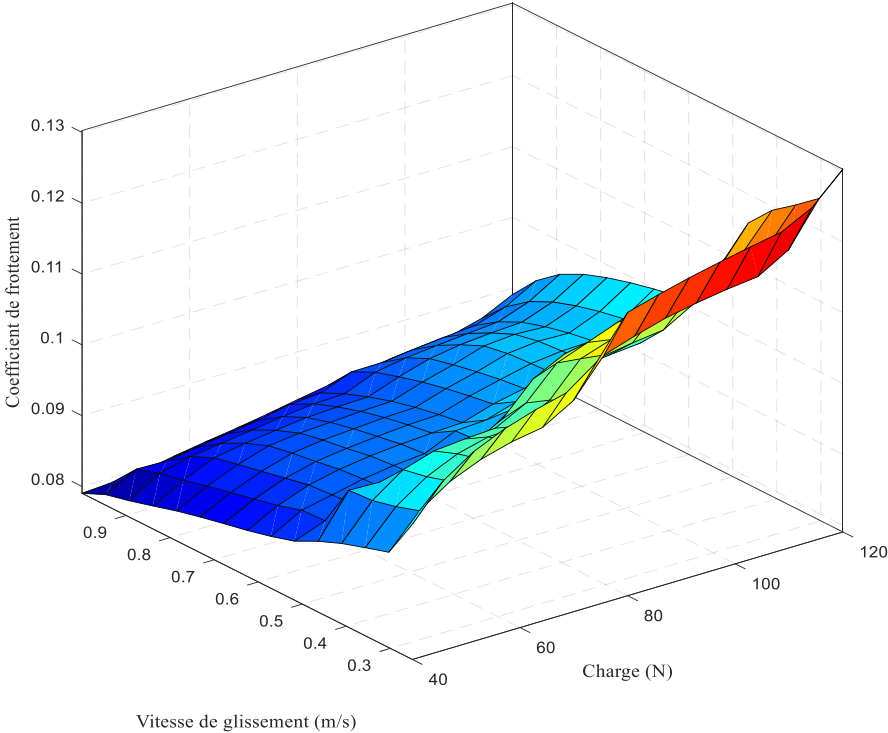


Figure III.12 Variation du taux d'usure prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres individuels des composites hybrides Al/SiC/Gr.

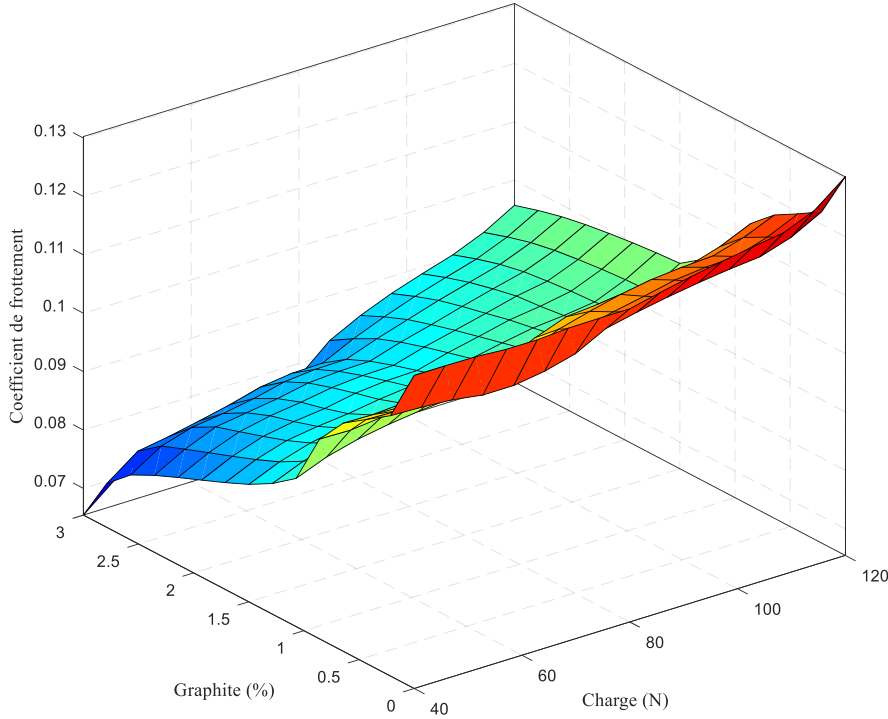
- Le schéma (a) représente la variation du taux d'usure en fonction de la vitesse de glissement et de la charge normale.
- Le schéma (b) représente la variation du taux d'usure en fonction du pourcentage de graphite et de la charge normale.
- Le schéma (c) représente la variation du taux d'usure en fonction du pourcentage de Graphite et de la vitesse de glissement.

La figure III.12 illustre l'influence des paramètres individuels sur le taux d'usure des composites hybrides Al/SiC/Gr.

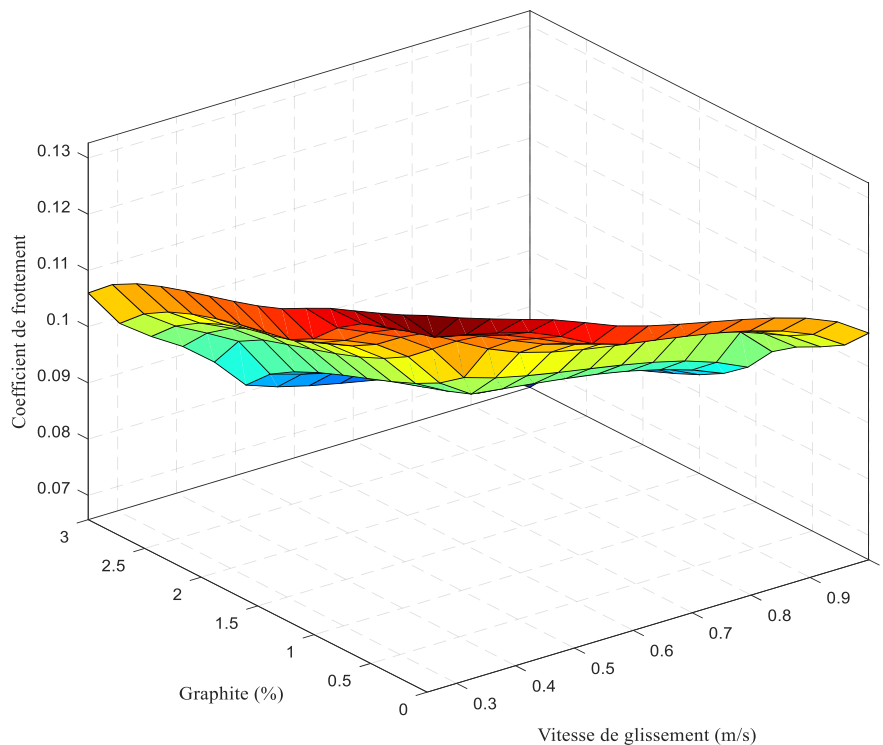
De la figure III.12 (a) (b) et (c) on remarque que l'effet le plus fort sur le taux d'usure a été montré par l'addition de Gr, tandis que les autres paramètres montrent un impact moindre. Le taux d'usure augmente avec l'augmentation de la charge normale et diminue avec l'augmentation de l'addition de Gr et de la vitesse de glissement. Le taux d'usure le plus faible se produit pour la charge normale la plus faible et l'addition de Gr et la vitesse de glissement les plus élevées.



(a)



(b)



(c)

Figure III.13 Variation du coefficient de frottement prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres individuels des composites hybrides Al/SiC/Gr.

- Le schéma (a) représente la variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement et de la charge normale
- Le schéma (b) représente la variation du coefficient de frottement en fonction du pourcentage de Graphite et de la charge normale.
- Le schéma (c) représente la variation du coefficient de frottement en fonction de pourcentage de Graphite et de la vitesse glissement.

La figure III.13 illustre l'influence des paramètres individuels sur le coefficient de frottement des composites hybrides Al/SiC/Gr.

De la figure III.13 (a) (b) et (c) on constate que le coefficient de frottement est principalement affecté par l'addition de Graphite. Le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de l'addition de Gr et de la vitesse de glissement et augmente avec l'augmentation de la charge normale.

III.7.4 Validation des résultats

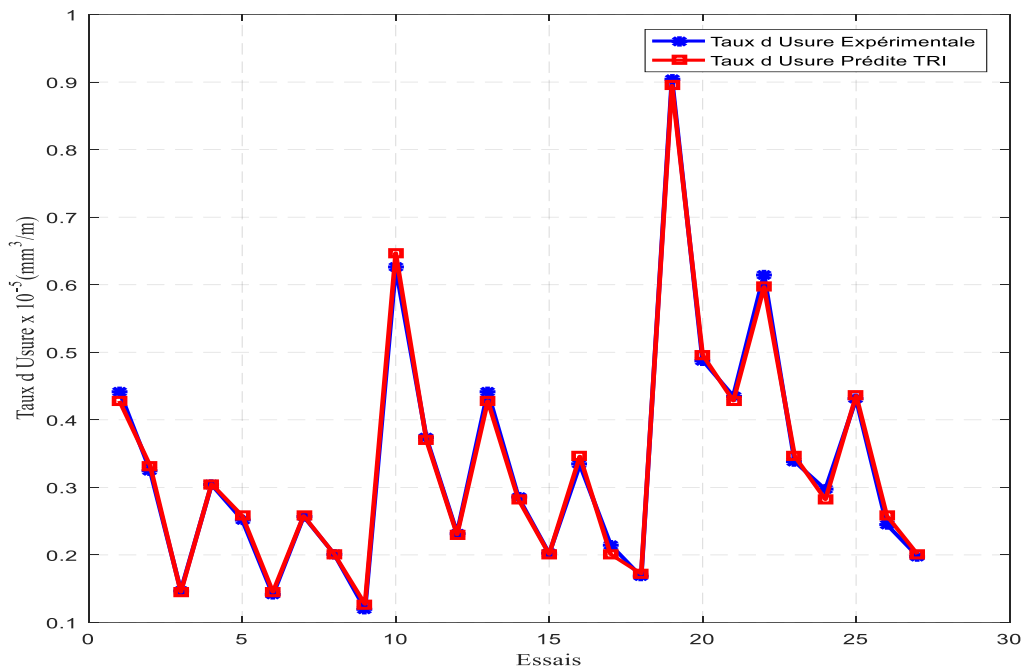


Figure III.14 Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux du taux d'usure des composites hybrides Al/SiC/Gr.

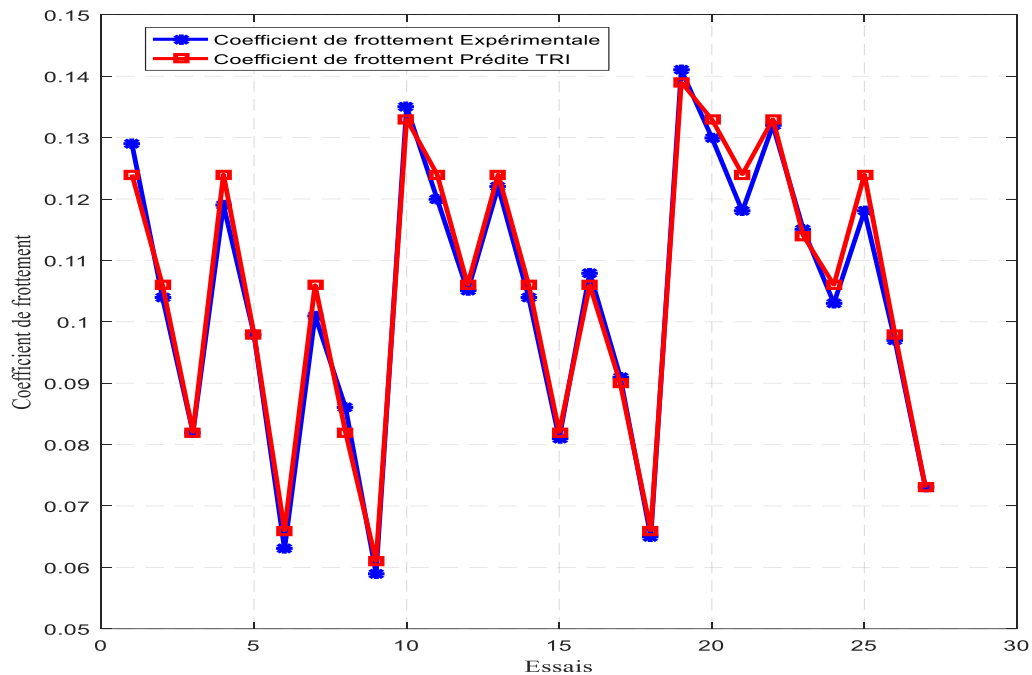


Figure III.15 Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux du coefficient du frottement des composites hybrides Al/SiC/Gr.

Les figures III.14 et III.15 montrent que le modèle proposé est capable de prédire avec précision le taux d'usure et du coefficient de frottement des composites hybrides Al/SiC/Gr. La concordance entre les valeurs prédites et expérimentales indique que le modèle de logique floue est une solution efficace qui peut être utilisée pour prédire le taux d'usure et le coefficient de frottement des composites hybrides Al/SiC/Gr pour une plage spécifique de paramètres.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons on 'est le modèle la modélisation prédictive du comportement tribologique des composites hybrides Al/SiC/Gr en se basant sur le travail expérimental [26]. Les valeurs prédites sont en bon accord avec les valeurs expérimentales réelles avec une précision de 97,68% pour le taux d'usure et de 97.70 % pour le coefficient de frottement des composites hybrides Al/SiC/Gr.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif de notre travail a été de prédire le comportement tribologique des composites hybrides Al/SiC/Gr

L'étude que nous avons menée nous a permis de conclure que :

- Le taux d'usure et le coefficient de frottement des composites hybrides Al/SiC/Gr diminuent avec l'augmentation de la vitesse de glissement et l'addition de graphite et augmentent avec l'augmentation de la charge normale.
- La présence de particules de SiC augmente la dureté des composites, alors que les particules de Gr maintiennent la porosité minimale dans le composite.
- La résistance à l'usure des composites hybrides Al/SiC/Gr augmente avec l'ajout de teneurs en Gr. Ce phénomène a été attribué au fait que les particules de Gr agissent comme composant autolubrifiant et enduisent la contre-face, réduisant ainsi le taux d'usure.
- Le modèle flou utilisé, pour la prédiction du comportement tribologique des composites hybrides Al/SiC /Gr, ont montré une bonne concordance entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux
- Les valeurs prédites sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, avec une précision de 97,68% pour le taux d'usure et de 97,70% pour le coefficient de frottement des composites hybrides Al/SiC /Gr.

Références

Bibliographiques

Référence Bibliographique

- [1]. W .TUMI . Optimisation de la configuration des tubes en matériaux composites sous pression. Université Mohamed Khider de Biskra. mercredi 10 juillet 2019.
- [2]. A.Ben Amara. Étude de l'influence des paramètres de structure sur l'optimisation de la résistance des tubes en composites sous des sollicitations de torsion. Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras. 21/04/2016.
- [3]. A. KHALDOUNE. Effet des paramètres d'élaboration sur le comportement mécanique d'un bio-composites. Université de M'sila. 2015 / 2016.
- [4]. M. BENDIFALLAH. Travail de recherche sur les matériaux à mémoire viscoélastiques parfaitement élastiques pour une nouvelle Prothèse Totale de Hanche. UNIVERSITÉ DE BATNA. 2011 / 2012.
- [5]. L. METTOUCHI. Influence de la charge particule de cuivre et du renfort couches de fibres de verre sur le comportement mécanique d'un composite. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [6]. B.SEMSARI. Etude et simulation d'un composite Aéronautique à base de fibre de carbone et matrice époxy. UNIVERSITE BLIDA 1. 2019.
- [7]. F.Baala et N. Ouhnane. MATERIAUX COMPOSITES. Filière de licence fondamentale. 24 Mai 2018
- [8]. DJEBLOUN Youcef. Généralité sur les matériaux composites.
- [9]. J.M.Bethelot. Matériaux composites. Comportement mécanique et analyse des structures. www.edition.lavoisier.fr
- [10]. K. ROUAM. Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles. UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES. 2013/2014.
- [11]. Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00470296v1>. 19 May 2011.
- [12]. Dr. Taqiyeddine MOUMENE. Les composites. Université Ibn Khaldoun- Tiaret.
- [13]. Z. SIDHOUM. Étude du composite céramique-métal (SiC/alliage d'aluminium) obtenu par infiltration. UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU. 2012-2013.

- [14]. L.GENORE. Les grandes familles de matériaux composites. UNIVERSITE PARIS-SACLAY. 04 /05/2011.
- [15]. L.Belgacem. Contribution à l'étude de l'endommagement des pipes en matériaux composites hybrides sollicités au flambement. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. 05/12/2018.
- [16]. Zeddour Mohamed Brahim Zahera. PREDICTION DES MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DANS UN MATERIAU COMPOSITE. Université des Sciences et Techniques d'Oran Mohamed Boudiaf. 2017/2018.
- [17]. S. O. Adeosun, L. O. Osoba, O. O. Taiwo. Characteristics of Aluminum Hybrid Composites. World Academy of Science, Engineering and Technology.
- [18]. Jaswinder SINGH. Fabrication characteristics and tribological behavior of Al/SiC/Gr hybrid aluminum matrix composites. University Institute of Engineering and Technology, Panjab University SSG Regional Centre, Hoshiarpur, Punjab 146023, India. 2016.
- [19]. Laurent Gornet , Généralités sur les Matériaux Composites, École Centrale de Nantes-2011.
- [20]. M. TAHAR. ETUDE DE L'ENDOMMAGEMENT DANS UN COMPOSITE STRATIFIE. UNIVERSITE ABDEL-HAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM. 2011/2012.
- [21]. DANIEL ASSELIN ing. L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC A CHICOUTIMI COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE. UNIVERSITE DU QUEBEC. AOUT 1993.
- [22]. Using des composites à matrice d'alliage d'aluminium GrA-NI. UNIVERSITE DE MONTREAL. Décembre 2000.
- [23]. <https://www.epfi.fr/Files/Other/newsletters-juin-2017-ct191.pdf>
- [24]. <https://actudactuaire.typepad.com/files/principe-de-la-logique-floue-1.pdf>
- [25]. A.Sinzinkayo. Application de la logique floue au choix d'une d'assemblage. UNIVARSITE DE MONTREAL. December 2000.
- [26]. M. A. Trindade. Experimental optimisation of the tribological behaviour of Al/SiC/Gr hybrid composites based on Taguchi's method and artificial neural network. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (2018).

Résumé

Les composites à matrice métallique (MMC) sont considérés comme des matériaux d'ingénierie importants en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et tribologiques. Lorsque la matrice métallique (ou alliage) est renforcée par deux renforts ou plus, ces composites sont les composites dits hybrides. Les composites à matrice métallique en aluminium, renforcés de carbure de silicium (SiC) et de graphite (Gr), sont largement utilisés en raison de leur haute résistance et de leur résistance à l'usure. Les caractéristiques présente une méthode pour prédire le comportement tribologique des composites hybrides Al/SiC/Gr en utilisant la logique floue. Les valeurs prédites, avec ce modèle flou, sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, avec une précision de 97,68% pour le taux d'usure et de 97,70% pour le coefficient de frottement.

Mots clés : composites hybrides, Al/SiC/Gr, logique floue, comportement tribologique.

Abstract

Metal matrix composites (MMC) are considered important engineering materials due to their excellent mechanical and tribological properties. When the metal matrix (or alloy) is reinforced by two or more reinforcements, these composites are called hybrid composites. Aluminum metal matrix composites, reinforced with silicon carbide (SiC) and graphite (Gr), are widely used due to their high strength and wear resistance. The tribological characteristics of such materials are superior to the characteristics of the matrix. This study presents a method to predict the tribological behavior of Al/SiC/Gr hybrid composites using fuzzy logic. The predicted values, with this fuzzy model, are in good agreement with the experimental values, with an accuracy of 97.68% for the wear rate and 97.70% for the coefficient of friction.

Keywords: hybrid composites, Al/SiC/Gr, fuzzy logic, tribological behavior.

ملخص

تعتبر المواد المركبة المصنوفة المعدنية (MMC) مواد هندسية مهمة نظرًا لخصائصها الميكانيكية و التريبولوجية الممتازة. عندما يتم تعزيز المصنوفة المعدنية (أو السبائك) بواسطة تعزيزين أو أكثر ، تسمى هذه المركبات المركبات الهجينة. تُستخدم مركبات المصنوفة المعدنية المصنوعة من الألمنيوم ، المقواة بكرييد السيليكون (SiC) والجرافيت (Gr) ، على نطاق واسع نظرًا لقوتها العالية ومقاومتها للتآكل. تتفوق الخصائص التريبولوجية لهذه المواد على خصائص المصنوفة. تقدم هذه الدراسة طريقة للتنبؤ بالسلوك التريبولوجي لمركبات الهجين Al / SiC / Gr باستخدام المنطق الضبابي. تتوافق القيم المتوقعة مع هذا النموذج الضبابي مع القيم التجريبية بدقة 97.68٪ لمعدل التآكل و 97.70٪ لمعامل الاحتكاك.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة الهجينة ، Al / SiC / Gr ، المنطق الضبابي ، السلوك التريبولوجي.