

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 : BELMADANI ABDESSATAR

GHOUINI YUCEF

Thème :

Etude numérique et prédiction du comportement tribologique des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles

Soutenue publiquement le : /06/2022

Devant le jury composé de :

KAREK Rabie	M.A.A	Université de Ouargla	Président
REZGUI Imane	M.C.A.	Université de Ouargla	Rapporteur
HECINI Adel	M.A.A	Université de Ouargla	Examineur

Année universitaires : 2021/2022

Remerciement

قبل كل شيء ، أتوجه بالشكر في المقام الأول إلى الله القدير على الإرادة والصحة والشجاعة والصبر الذي أعطاني إياه خلال كل هذه السنوات الطويلة من العمل ونود أن نشكر السيدة رزقي ايمان مشرفتنا. على ترحيبها وتفهمها وصبرها ودعمها للقيام بهذا العمل . كما نشكر لجنة التحكيم السيد كارك ربيع و حسيني عادل على قبولهم فحص هذا العمل والحكم عليه. كما يسعدنا أن نعرب عن خالص شكرنا وامتناننا الصادق لكل من ساعدنا خلال تدريبنا الذي جرى في ظروف جيدة وفي مناخ مناسب. نتوجه بالشكر أيضًا إلى جميع الذين ساعدونا من قريب أو بعيد أثناء تدريبنا ونذكر على وجه الخصوص مدرسينا في قطاع "الهندسة الميكانيكية " ، دون أن ننسى أفراد عائلتنا ، وخاصة والدينا. خلال رحلتنا الطلابية.

Table des matières

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition des matériaux composites.....	3
I.3 Constituants des matériaux composites.....	3
I.3.1 Matrice.....	3
I.3.2 Renforts.....	5
I.4 Types de matériaux composites	6
I.6 Les procédés de fabrication des composites.....	7
I.6.1 Moulage au contact	8
I.6.2 Moulage par projection simultanée.....	8
I.6.3 Moulage par injection basse pression de résine RTM.....	9
I.6.4 Compression thermodurcissable SMC: (Sheet Molding Compound).....	9
I.6.5 Enroulement filamentaire.....	10
I.7 Caractéristiques du matériau composites	10
I.8 Architecture des matériaux composites	11
I.8.1 Monocouche.....	11
I.8.2 Sandwichs.....	11
I.8.3 Stratifiés.....	11
I.9 Conclusion.....	12

Chapitre II**Matériaux composites à fibres naturelles**

II.1 Introduction.....	13
II.2 Matériaux composites époxydes.....	13
II.2.1 Méthodes de fabrication de composés époxy.....	13
II.2.2 Techniques expérimentales de caractérisation des composés époxy	13
II.2.3 Propriétés mécaniques des composites époxyde.....	13
II.3 Matériaux composites à fibres naturelles.....	14
II.4 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites à fibres naturelles.....	15
II.5 Exemples de fibres naturelles.....	16
II.6 Applications des fibres naturelles.....	16
II.7 Matériaux composites à fibres végétales.....	17
II.7.1 Les fibres végétales.....	18
II.7.2 Classification des fibres végétales.....	18
II.7.3 Propriétés mécaniques des fibres naturelles	19
II.7.4 Présentations des différentes fibres végétales.....	19
II.8 Élaboration des matériaux composites a fibres de plante d’huile de ricin.....	22
II.8.1 Extraction de fibres de plante d’huile de ricin	22
II.8.2 Résine.....	23
II.8.3 Fabrication de composites.....	24
II.8.4 Paramètres tribologiques des matériaux composites à fibres de plante d’huile de ricin.....	242

II.9 Conclusion.....	25
----------------------	----

Chapitre III

Etude paramétrique sur le comportement tribologique des composites

III.1 Introduction.....	26
III.2 Historique.....	26
III.3 Définition.....	27
III.4 Principe de la logique floue.....	27
III.4.1 Ensembles flous.....	277
III.4.2 Concept de la logique floue.....	277
III.4.3 Variables linguistiques.....	28
III.4.4 Univers du discours.....	28
III.4.5 Fonction d'appartenance.....	28
III.4.6 Relations floues.....	29
III.5 Les opérations de la logique floue.....	29
III.5.1 Opérateur NON.....	29
III.5.2 Opérateur ET.....	29
III.5.2 Opérateur OU.....	30
III.6 Structure générale de la logique flou.....	30

III.6.1 Interface de fuzzification.....	30
III.6.2 Base de connaissances.....	31
III.6.3 Moteur d'inférence floue.....	31
III.6.4 Interface de défuzzification.....	32
III.7 Données expérimentales.....	32
III.8 Système flou.....	33
III.9 Modélisation floue.....	34
III.9.1 Les variables flous.....	34
III.9.2 Les fonction d'appartenance.....	36
III.10 Les règles floues.....	41
III.11 Résultats et discussion.....	43
III.11.1 Etude de la précision et de l'erreur du système flou.....	43
III.11.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonction d'appartenance triangulaires et trapézoïdales.....	43
III.11.3 Représentation schématique des résultat.....	46
III.11.4 Validation des résultats.....	51
III.12 Conclusion.....	52
Conclusion Générale.....	53
Références Bibliographiques.....	54

Liste des Figures

Chapitre I

matériaux composites

Figure I. 1 Matériau composite.....	3
Figure I.2 Classification des matrices.....	4
Figure I.3 Classification des renforts.....	6
Figure I. 4 Principe de moulage en contact.....	8
Figure I. 5 Principe du moulage par projection simultanée.....	8
Figure I.6 Moulage par injection cas de résine thermodurcissable.....	9
Figure I.7 Compression thermodurcissable SMC	9
Figure I.8 Principe de l'enroulement filamentaire	10
Figure I. 9 Couche de composite	11
Figure I.10 Structure en sandwich	11
Figure I.11 composite stratifié	12

Chapitre II

Matériaux composites à fibres naturelles

Figure II.1 Classification des fibres naturelles	15
Figure II.2 de principe de la structure d'une fibre végétale.....	17
Figure II.3 Cotton.....	20
Figure II.4 Lin (flax).....	21
Figure II.5 Coir.....	22
Figure II.6 Procédure d'extraction des fibres. (a) Plante de ricin, (b) tiges immergées dans l'eau, (c) tiges après immersion, (d) fibres extraites, et (e) fibres coupées.....	23
Figure II. 7 Schéma de la broche sur le tribomètre à disque.....	25

Chapitre III

Etude paramétrique sur le comportement tribologique des composites

Figure III.1 Formes des fonctions d'appartenances.....	28
figure III.2 Structure générale	30
Figure III.3 Système floue pour des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.....	34
Figure III.4 Variables Linguistiques pour la longueur de fibre.....	35
Figure III.5 Variables Linguistiques pour la charge normal.....	35
Figure III.6 Variables Linguistiques pour la distance de glissement.....	35
Figure III.7 Variables Linguistiques pour la quantité d'usure.....	36
Figure III.8 Variables Linguistiques pour la coefficient de frottement.....	36
Figure III.9 Les fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la longueur de fibre.....	37
Figure III.10 Les fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la charge normal.....	37
Figure III.11 Les fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la distance de glissement.....	38
Figure III.12 Les fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la quantité d'usure.....	38
Figure III.13 Les fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour le coefficient de frottement...	39
Figure III.14 Les fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la longueur de fibre.....	39
Figure III.15 Les fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la charge normale.....	40
Figure III.16 Les fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la distance de glissement.....	40
Figure III.17 Les fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la quantité d'usure.....	41
Figure III.18 Les fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour le coefficient de frottement..	41
Figure III.19 Variation de la quantité d'usure (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre essais.....	44
Figure III.20 Variation du coefficient de frottement (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre essais.....	44
Figure III.21 Variation de la quantité d'usure prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres individuels des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.....	47
Figure III.22 Variation du coefficient de frottement prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres individuels des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles....	50
Figure III.23 Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux de quantité d'usure des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.....	51

Figure III.24 Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux du coefficient du frottement des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.....52

Liste des tableaux

Chapitre I

Généralités sur les Matériau composite

Tableau I.1. Principales différences entre les Matrices TP et TD.....	5
--	---

Chapitre II

Matériau composite a fibres naturelle

Tableau II.1 Avantages et inconvénients des fibres naturelles.....	15
Tableau II.2 représente les propriétés mécaniques moyennes en traction des différentes fibres naturelles.....	19
Tableau II.3 Avantages et inconvénients des fibres végétales (Coton).....	20
Tableau II.4 Avantages et inconvénients des fibres végétales(Lin (flax)).....	21

Chapitre III

Etude paramétrique sur le comportement tribologique des composites

Tableau III.1 Données expérimentales.....	32
Tableau III.2 Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou fibre d'huile de ricin.....	34
Tableau III.3 Les règles floues pour des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles..	42
Tableau III.4 Les résultats du système flou pour des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.....	45

Nomenclature

Symbole	Unité	Désignation
CMC		composite à matrice céramique
CMM		composite à matrice métallique
RTM		Resine Transfert Molding
SMC		Sheet Molding Compound
LF	mm	Longueur de fibre
CH	N	Charge normale
DG	m	Distance de glissement

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis les années 60, le développement technologique dans l'industrie d'aéronautique et spatial a été caractérisé par la mise aux points de structures optimisées constituées fabriquées à base de matériaux spécifiquement résistants. La recherche permanente de performances techniques jointes au besoin d'optimisation et d'allègement de certaines structures a motivé l'utilisation puis le développement de matériaux spécifiques dont la composition et les caractéristiques ont été adoptées à la solution technologique des problèmes à résoudre.

Les matériaux composites disposent d'un nombre importants d'atouts par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : résistance mécanique, résistance chimique, légèreté, maintenance réduite, flexibilité de formes [1].

L'utilisation de matériaux à base de fibres naturelles n'est pas récente et date de plusieurs civilisations, les paniers en osier en sont un exemple frappant, plus récemment les sièges et les réservoirs des avions de 1896 ont été réalisés en fibres naturelles avec une petite quantité de liant polymériques. A l'heure actuelle, les différentes utilisations de ces matériaux composites à renforts naturels sont souvent limitées à des applications où les contraintes mécaniques et thermiques ne sont pas importantes [2].

Ces derniers temps, il y a eu une utilisation accrue de matériaux polymères pour les composants tribologiques tels que les rails de guidage, les engrenages en plastique, les paliers lisses et les joints artificiels, etc., comme alternative aux métaux. Cela est dû aux caractéristiques souhaitables des polymères telles que la légèreté, l'autolubrification, la réduction du bruit et une productivité élevée. En général, les performances tribologiques des polymères sont encore améliorées en renforçant les fibres, les particules, les charges et les trichites. Parmi celles-ci, les fibres naturelles en tant que renforts dans les matériaux polymères ont suscité un nouvel intérêt pour les applications tribologiques en raison de leur disponibilité facile, de leur processus simple d'extraction des fibres, de leur poids réduit, de leur faible coût et de leur biodégradabilité.

Les méthodes et les techniques d'essais sont énormément difficiles et 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 des conditions opératoires sans recours à réaliser beaucoup d'essais expérimentaux [3].

L'objectif de la présente étude est de mettre en évidence l'effet des paramètres individuels (longueur de fibre, charge normale, distance de glissement) sur quantité d'usure et le coefficient de frottement pour les composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

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 Matériaux composites à fibres naturelles.

Le troisième chapitre va mettre l'accent sur la méthode utilisée pour la résolution de notre problème (la logique floue) et aborde la formulation et l'implantation d'un modèle pour la prédiction du comportement tribologique des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

Chapitre I

**Généralités sur les
matériaux composites**

I.1 Introduction

Le développement technologique croissant a conduit à la nécessité de rechercher de nouveaux matériaux qui combinent des bonnes propriétés (la dureté ; Résistance mécanique, haute rigidité et grande légèreté). Ces propriétés physiques ne peuvent être obtenues dans des matériaux simples pris séparément, Pour atteindre cet objectif, les matériaux traditionnels doivent être remplacés par des matériaux composites [4].

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 procédé de fabrication des composites.

I.2 Définition des matériaux composites

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont les performances sont le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice [5].

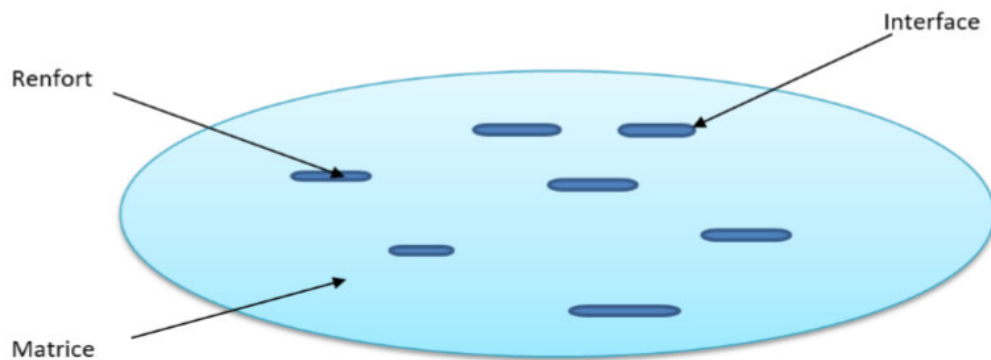


Figure I. 1 Matériau composite [4].

I.3 Constituants des matériaux composites

I.3.1 Matrice

Le rôle de la matrice est principalement de lier les fibres, mais aussi, d'assurer une répartition spatiale est homogène du renfort. D'un point de vue mécanique, la matrice

transmet et répartie les efforts extérieurs vers le renfort. D'un autre côté, elle apporte à la structure une tenue chimique et donner la forme désirée au produit [6].

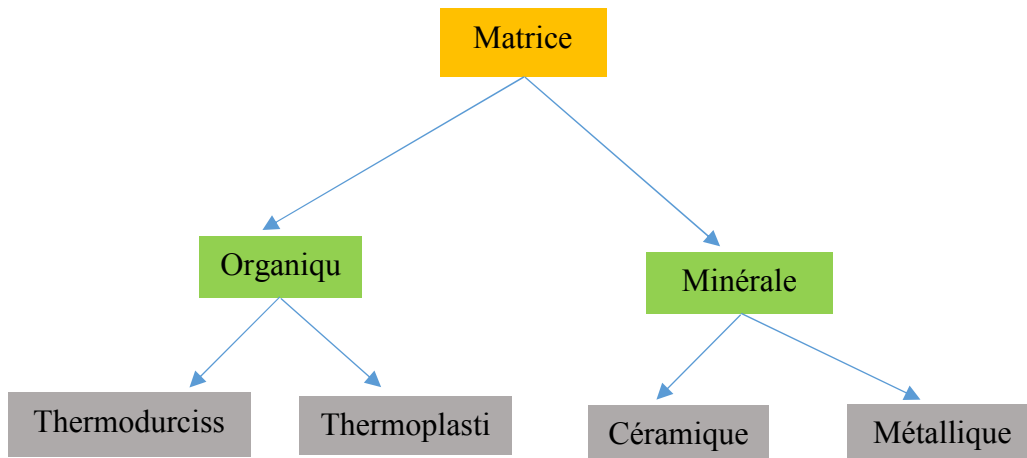


Figure I.2 Classification des matrices [6].

a. Les matrices organiques

Les matrices en polymère de synthèse sont les plus couramment rencontrées dans les composites de grande diffusion. Associées à des fibres de verre, d'aramide ou de carbone, elles ont un faible module et une faible résistance à la traction, mais se prêtent facilement à l'imprégnation des renforts pour leur fabrication. La structure des thermoplastiques (TP) se présente sous forme de chaînes linéaires, ils ont besoin d'être chauffés pour les mettre en forme. Le refroidissement par contre permet de les fixer (les chaînes se bloquent). Pour le cas des thermoplastiques (TP) l'opération est réversible. La structure des thermodurcissables (TD) possède la forme d'un réseau tridimensionnel, le durcir dans ce cas est définitive, la transformation est donc irréversible [1].

Les principales différences entre les Matrices (TP) et (TD) sont représentées dans le tableau (I.1) :

Tableau I.1 : Principales différences entre les Matrices TP et TD [1].

Matrices	Thermoplastiques (TP)	Thermodurcissables (TD)
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Moulage	Chauffage+ refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Court	Long
Tenue thermique	Réduite	Bonne
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Chutes et déchets	Recyclables	Perdus ou recyclés en charge
Mouillabilité renforts	Difficile	Aisé

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. Le compromis obtenu entre la ténacité de la matrice métallique et la rigidité des renforts donne au composite des caractéristiques mécaniques intéressantes par rapport à l'alliage seul, surtout au-dessus de 200 °C. Leur coût de mise en œuvre élevé réserve les composites à matrice métallique aux applications aéronautiques et spatiales [1]

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) [1].

I.3.2 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 tri directionnel ou plus) [7].

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la (figure I.3) :

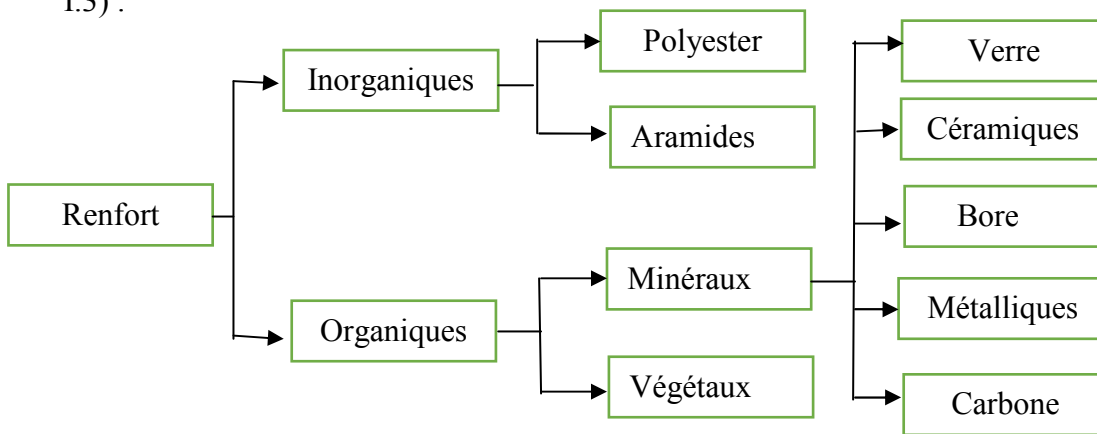


Figure I.3 Classification des renforts [1].

I.4 Types de matériaux composites

On distingue deux types des matériaux composites : les composites grandes diffusions et les composites hautes performances.

I.4.1 Matériaux composites de grande diffusion

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration des matériaux (moulage par contact, SMC et injection) [8].

I.4.2 Matériaux composites de hautes performances

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 :

- drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- beaucoup de procédés encore manuels.
- CMM, CMC [8].

I.5 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites

Chaque organe a des avantages et des inconvénients, il en est ainsi pour les matériaux composites. Bahlouli a fixé des avantages comme suit :

- Gain de masse

- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone).
- Insensibilité aux produits chimiques "mécaniques" comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants.

On peut ajouter d'autres avantages à ces matériaux comme :

- L'optimisation du design, impliquant une possible diminution du nombre d'éléments.
- L'adaptation au processus de design.
- La réduction du poids.
- La longue durée de vie [9].

En outre ils sont disponibles sous toutes les formes (fil, stratifié, mat, tissu...), ils ont aussi une excellente propriété mécanique qui leur apporte une résistance aussi bien à la rupture et à la traction qu'à la compression, une très grande rigidité et une très bonne tenue en température en atmosphère non-oxydant. En plus de ces avantages, il a été prouvé qu'ils ont de bonnes propriétés tribologiques, moins de contamination acoustique et une possibilité de travailler dans des milieux agressifs :

Néanmoins, les composites présentent des inconvénients comme :

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température
- Faible résistance aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes
- Si on peut constater une meilleure tenue au feu (classement M) que les alliages légers il faut également citer une forte émission de fumées (classement F) parfois toxiques pour certaines matrices.
- Prix élevé
- Tenue au choc faible [10].

I.6 Les procédés de fabrication des composites

De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins de l'industrie, leurs choix dépend surtout des caractéristiques mécaniques et de la géométrie du produit.

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 thermodurcissable. Cette méthode permet de réaliser des pièces prototypes ou de simulation avec une cadence très faible

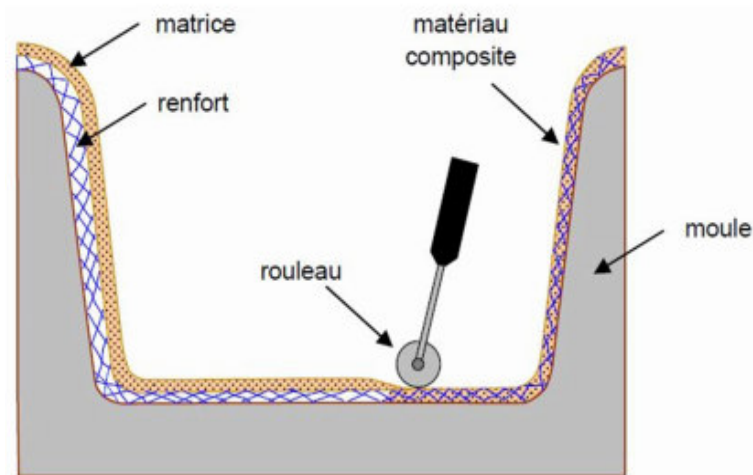


Figure I. 4 Principe de moulage en contact [11].

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 ébullée au rouleau cannelé. Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient [12].

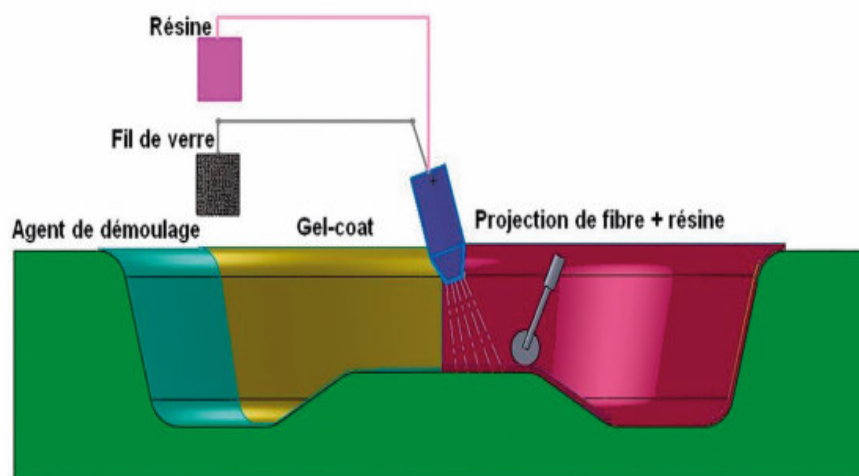


Figure I. 5 Principe du moulage par projection simultanée [11].

I.6.3 Moulage par injection basse pression de résine RTM

La RTM (Resine Transfert Molding) se fait par injection sous faible pression de la résine (thermodurcissable) liquide catalysé entre moule et contre moule où on a déjà placé le renfort. Après réticulation et durcissement de la résine, le moule est ouvert et la pièce est démoulée [13].

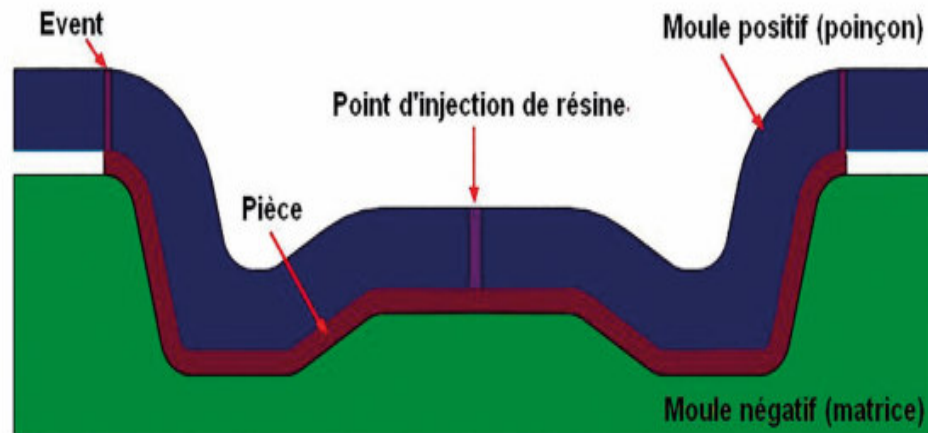


Figure I.6 Moulage par injection cas de résine thermosable [11].

I.6.4 Compression thermosable SMC: (Sheet Molding Compound)

Le principe consiste à déposer des feuilles de pré imprégnés dans un contre moule chauffé, décompresser le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce. Les avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques. Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition [8].

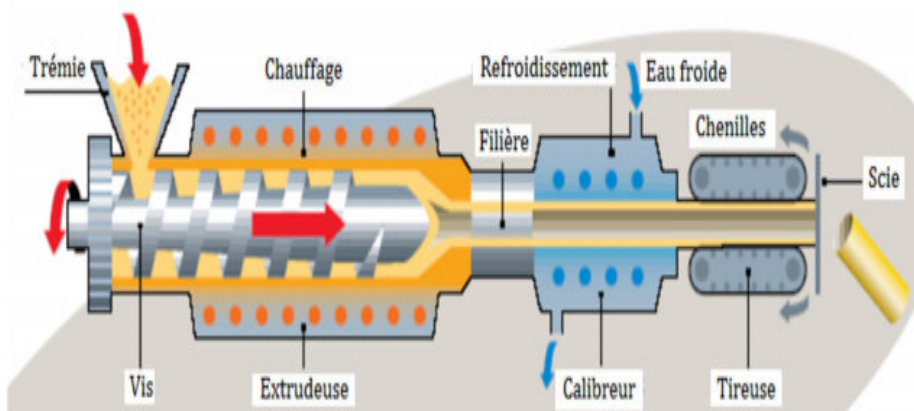


Figure I.7 Compression thermosable SMC [11].

I.6.5 Enroulement filamentaire

Technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant. Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses [8].

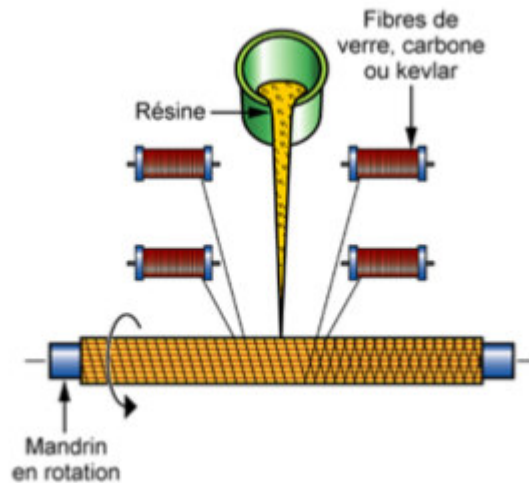


Figure I.8 Principe de l'enroulement filamentaire [11].

I.7 Caractéristiques du matériau composites

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

- Des propriétés, de la nature et de la qualité des matériaux constitutifs.
- Des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort.
- De leur interaction, de l'interface matrice-renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- Légèreté
- Grande résistance à la fatigue (durée de vie augmentée)
- Liberté de formes
- Maintenance réduite
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion
- Insensibles aux produits chimique sauf les décapants de peinture qui attaquent les résine
- Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne
- Très forte anisotropies

- Une bonne isolation électrique [14].

I.8 Architecture des matériaux composites

I.8.1 Monocouche

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissés et mat [12].

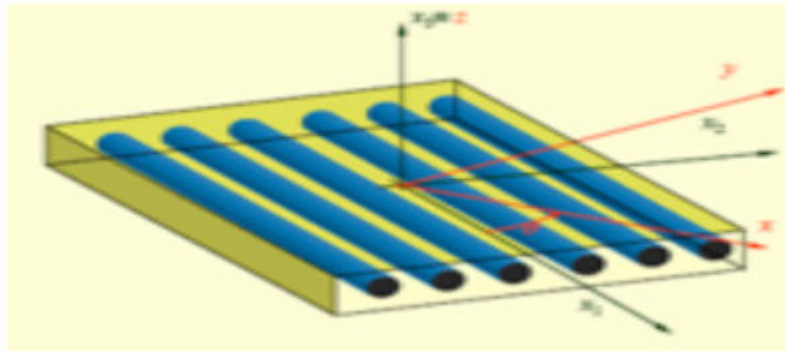


Figure I. 9 Couche de composite [12].

I.8.2 Sandwichs

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer sur une âme (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression), deux « feuilles » ou peaux (possédant de bonnes caractéristiques en traction) ; l'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité [15].

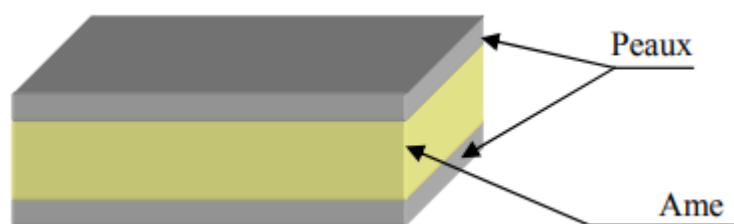


Figure I.10 Structure en sandwich [15].

I.8.3 Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. En jouant sur l'ordre et l'orientation de ces couches. Il est possible d'adapter finement les propriétés mécaniques du stratifié aux sollicitations extérieures, et donc d'atteindre un haut

niveau d'optimisation en mettant la matière là où elle est le plus utile [6].

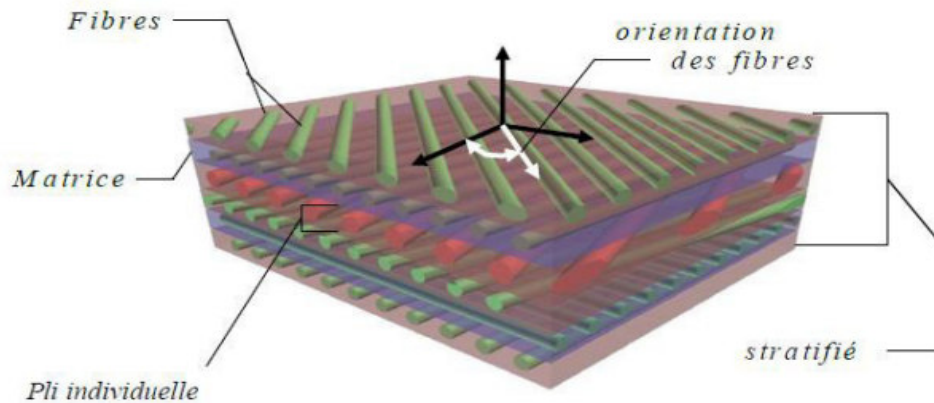


Figure I.11 composite stratifié [6].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude générale sur les matériaux composites, où nous avons constaté que les matériaux composites connaissent actuellement une croissance importante dans tous les domaines de l'industrie.

Cela est dû à ses performances, ses propriétés mécaniques élevées, ses composants de base et sa répartition géométrique. Nous avons également appris les avantages et les inconvénients des matériaux composites, les procédés de fabrication et leurs types.

Chapitre II

Matériaux composites à fibres naturelles

II.1 Introduction

Les fibres naturelles ont récemment attiré l'attention des scientifiques et ingénieurs en raison des avantages qu'elles fournissent par rapport aux fibres de renforcement classiques comme les fibres de verre. Le développement des composites comportant des fibres naturelles est donc un sujet d'intérêt depuis les dix dernières années. Ces fibres naturelles sont des fibres à faible coût et à faible densité et elles possèdent des propriétés spécifiques, par exemple elles sont biodégradables et non abrasives [16].

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques informations sur les matériaux composites époxy, ainsi que sur les matériaux composites à fibres naturelles, avec une explication sur l'élaboration des matériaux composites époxy renforcés de fibres d'huile de ricin.

II.2 Matériaux composites époxydes

II.2.1 Méthodes de fabrication de composés époxy

Pour la fabrication de composés époxy, plusieurs façons, dans différents domaines d'application, avec l'équipement de la forme et de la taille finales des composants. Certaines des méthodes les plus importantes utilisées pour la fabrication de composites époxy sont la manutention, le sablage sous vide, le moulage par transfert assisté par vide, l'autoclave, la compression, la pultrusion et l'enroulement de filaments. Toutes ces méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients. Le meilleur choix de la méthode donne le plus de résultats dans l'industrie manufacturière [17].

II.2.2 Techniques expérimentales de caractérisation des composés époxy

La compréhension détaillée des composites d'époxy est nécessaire pour son utilisation efficace dans divers domaines d'application. Plusieurs techniques de caractérisation ont été utilisées pour étudier l'effet de renforcement de différentes charges dans des matrices époxy. Certaines des techniques de caractérisation utilisées pour la caractérisation des composites époxy sont des machines d'essai universelles, une analyse mécanique dynamique, calorimétrie différentielle à balayage, rhéologie, analyse thermogravimétrique, microscopie électronique, études sur les contacts et les absorptions d'eau [17].

II.2.3 Propriétés mécaniques des composites époxydes

Les propriétés mécaniques des composites d'époxy sont un sujet important pour façonner son utilisation efficace dans n'importe quel domaine d'application. Les facteurs qui

affectent les propriétés mécaniques les composés époxy renforcés par les offiller sont la fraction de volume offiller, le rapport de remplissage, l'orientation de la charge et l'adhérence inter faciale de la matrice de remplissage. Les propriétés mécaniques des composites de fibres naturelles peuvent être améliorées lorsqu'elles sont utilisées en même temps que des fibres synthétiques. En d'autres termes, l'hybridation de la fibre naturelle et de la fibre synthétique conduit à des propriétés mécaniques améliorées en raison des effets synergiques des deux Fibres. Fioreetal. a étudié le traitement par l'épafctofakali (NaOH) sur les alcénibers. Ils ont indiqué que le traitement alcalin avait permis d'améliorer la force mécanique en réduisant la mobilité de la chaîne de polymères et en renforçant le transfert de stress. Cependant, le temps d'immersion dans le Nord avait un effet défavorable sur les propriétés mécaniques. La taille des particules des charges peut également affecter les propriétés mécaniques. Par exemple Wang étal. A montré la taille de l'article d'un graphe, une anoplaquète, sur les propriétés mécaniques des composites d'époxy. D'autre part, des particules plus grosses améliorent considérablement le module mais réduisent la résistance. D'autre part, les particules plus grosses améliorent remarquablement le module mais réduisent la résistance. Cela est dû à l'effet de renforcement des particules plus grosses, mais elles ont une mauvaise interaction inter faciale avec la théépixymétrie [17].

II.3 Matériaux composites à fibres naturelles

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges (Figure II.1) [16].

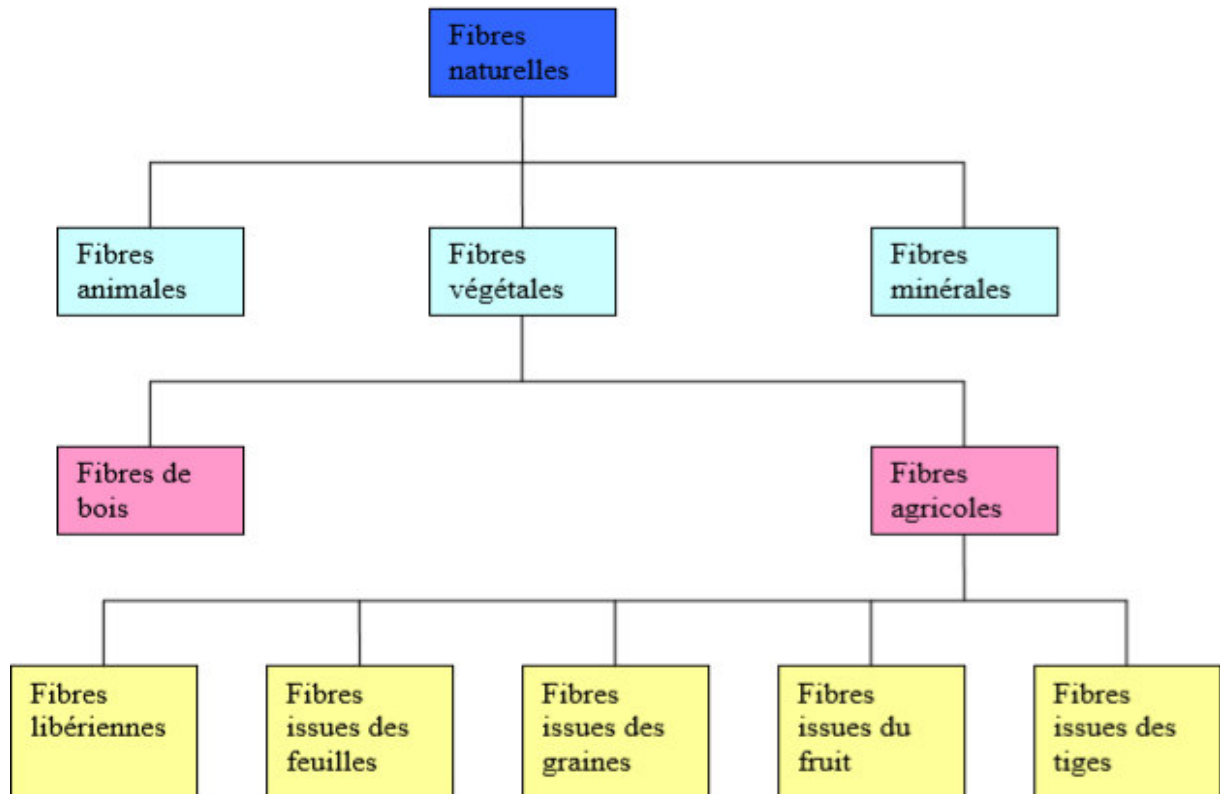


Figure II.1 Classification des fibres naturelles [16].




II.4 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites à fibres naturelles

Tableau II.1 Avantages et inconvénients des fibres naturelles [18].

Avantages	Inconvénients
– Un poids spécifique inférieur entraîne une résistance spécifique et une rigidité supérieures à celles du verre	– Propriétés mécaniques plus faibles, en particulier la résistance aux chocs
– Ressources renouvelables	– Hétérogénéité
– Production à faible investissement et à coût réduit	– Sensibilité à l'humidité
– Faible abrasion	– Stabilité thermique faible
– Non toxique	– Faible durabilité
– Abondamment disponible	– Mauvaise résistance au feu
– Biodégradable	– Faible adhésion entre la fibre et la matrice
– Recyclage thermique possible	– fluctuation des prix selon les résultats de la récolte ou de la politique agricole

II.5 Exemples de fibres naturelles

Les fibres naturelles proviennent généralement de trois sources essentielles : animale, minérale et végétal.

Les fibres naturelles végétales	Les fibres naturelles minérales	Les fibres naturelles animales
des feuilles (sisal, etc.), des fruits (coir, etc.), des herbes (aronde donax, etc.), de la paille (blé, etc.) ; coton	les fibres de verre (principalement constituées de silice) et de basalte (à base de roche volcanique)	La Laine
		

II.6 Applications des fibres naturelles

Depuis plusieurs années, les ressources naturelles sont utilisées pour la production de produits de base ainsi qu'une grande quantité de produits techniques. Textiles, cordes, toiles et papiers ont été également faits de fibres naturelles, telles que le doum, l'alfa, le chanvre, la fibre de coco, et la bagasse de canne à sucre. Dès 1908, les premiers matériaux composites ont été fabriqués pour être utilisés dans des tubes et des tuyaux pour l'électronique.

Actuellement dans les pays de l'UE, environ 75% du poids total des véhicules hors d'usage est recyclé, dont 25%, appelés broyage des résidus de l'automobile, sont éliminés comme le remblai en raison de leurs complexité. La réduction de ce pourcentage reste un défi majeur, l'End-of-Life Véhicule (ELV) Directive Européenne stipule que d'ici 2015, seulement 5% du poids du véhicule peut être éliminés dans des sites de décharge. L'utilisation des matériaux qui se dégradent naturellement après leur utilisation est une manière d'éviter la complexité du recyclage. C'est dans ce sens que les chercheurs ont, depuis quelque temps développé l'utilisation des dérivés de fibres de jute, de chanvre, de lin, de sisal, et de noix de coco, à partir des matières végétales telles que BAST (l'extérieur de la tige), afin de renforcer le polymère. Ces fibres cellulosiques offrent une haute rigidité spécifique (par rapport aux poids) et ont peu d'impacts environnementaux par rapport aux produits issus de fibres synthétiques. Elles ont fait leurs preuves parmi les matériaux d'intérieur des véhicules.

Aujourd'hui, la solution aux problèmes écologiques est offerte par les matériaux verts. En Europe, les constructeurs automobiles utilisent des tapis fabriqués à base d'abaca.

Notamment, le lin et le chanvre sont utilisés dans la fabrication des portes à panneaux pressés (figure II.2), tablettes arrière, dossiers de siège, boucliers moteur et appuie-tête.

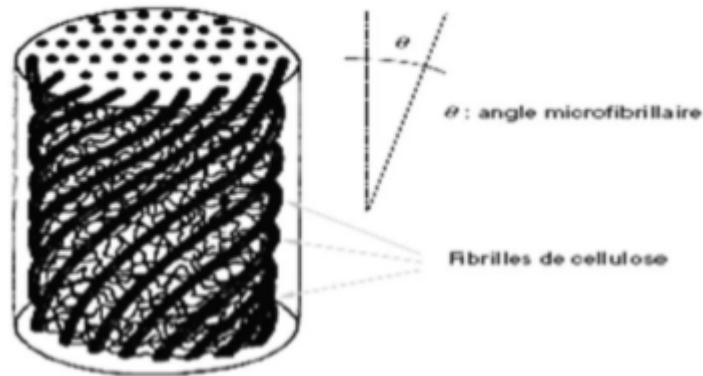


Figure II.2 principe de la structure d'une fibre végétale [19].

Pour les consommateurs, les composites à base de fibres naturelles dans les voitures fournissent une meilleure isolation thermique et acoustique, par rapport aux fibres synthétiques. Ils réduisent également l'irritation de la peau et du système respiratoire. Les composites à fibres naturelles offrent également de vastes possibilités d'exploitation en tant que matériaux de remplacement, en particulier les substituts du bois sur le marché de la construction. Divers produits composites basés sur la fibre naturelle, tels que les stratifiés, les panneaux, les cloisons, les cadres de portes, les volets, et toiture constituent une alternative aux matériaux existants. D'autres applications de l'utilisation des fibres dans la matrice polymère sont présentes, comme la conservation des sols, la fabrication du matériel de sport et de plus en plus dans le secteur du sport automobile, en raison de leur potentiel de réduction de masse. Les structures d'impact dans le sport automobile sont tenues d'agir à la fois comme éléments porteurs et des dispositifs pour l'absorption d'énergie [19].

II.7 Matériaux composites à fibres végétales

L'industrie en général cherche évidemment à réduire sa dépendance aux combustibles et aux produits à base de pétrole. Dans le monde des composites des essais ont été réalisés pour utiliser des fibres végétales en remplacement du verre, principalement dans des applications non structurelles. De nombreuses composantes automobiles, fabriquées auparavant avec des fibres de verre, utilisent actuellement des renforts à fibres végétales. Celles-ci deviennent de

plus en plus attrayantes pour l'industrie de la construction qui cherche continuellement à minimiser le poids et le prix des infrastructures.

Dans le domaine du sport et loisirs, ce type de fibre se positionne remarquablement bien comme remplaçant potentiel de la fibre de verre pour la fabrication d'outils, de coques de bateaux, de kayaks, de cadres de bicyclettes et de raquettes de tennis. Par conséquent, le potentiel d'utilisation des fibres végétales pour des composantes de moyenne et grande taille positionne celles-ci comme une alternative intéressante aux fibres synthétiques.

Actuellement, les fibres végétales sont utilisées avec les matrices thermoplastique ou thermodurcissable. Elles sont généralement utilisées sous forme de fibres courtes transformées en mats, principalement pour des pièces moulées par compression, ainsi que sous forme de granules pour des pièces obtenues par injection et extrusion. Les composites à fibres végétales courtes orientées ou non sont généralement caractérisés par des propriétés mécaniques faibles et limitées, dominées par les propriétés de la matrice plutôt que celles des fibres. Pour des applications supportant des charges importantes, l'utilisation de renforts sous forme de fibres continues et alignées devient nécessaire afin d'exploiter les propriétés des fibres de façon optimale. Ainsi et comme pour les fibres synthétiques, les fibres végétales sont généralement transformées en fils ou mèches et utilisées pour fabriquer des tissus dont l'orientation des fils est bien contrôlée [20].

II.7.1 Les fibres végétales

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [21].

II.7.2 Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

- suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (Kénafe, jute, lin, ramie), et de feuilles (Sisal, abaca, paille de graminée).
- Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigide provenant de matériels ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux

souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin)

- Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libérienne, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine. et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues [2].

II.7.3 Propriétés mécaniques des fibres naturelles

De par leur composition physique et chimique, les fibres naturelles présentent des propriétés mécaniques très variables conférant ainsi à chaque type de fibre une utilisation bien spécifique. Les travaux menés par Baley montrent que les propriétés des fibres naturelles changent considérablement, cette variabilité prend naissance à partir de leurs récoltes par l'identification de l'aspect physiologique et biochimique sur les espèces de récoltes de la tige de jute .

Le **tableau II.2** représente les propriétés mécaniques moyennes en traction des différentes fibres naturelles [2].

Fibres	E (GPa)	A(%)	σ_u (MPa)	Densité
Lin	12-85	1-4	600-2000	1,45
Lin : moyenne	58±15	3,27±0,84	1339±486	1,53
mini-maxi	27-91	1,6-5,9	531-3282	
Ramie	61,4-128	1,2-3,8	400-938	400-938
	27	3,2	755	755
	65±18		800-1000	800-1000
Chanvre	35	1,6	389	1,07
jute	26,5	1,5-1,8	389	1,44
sisal	9-21	3-7	350-700	1,45
Noix de coco	4-6	15-40	131-175	1,15
Cotton	5,5-12,6	7-8	287-597	1,5-1,6

II.7.4 Présentations des différentes fibres végétales

a. Coton

- Fibre cellulosique

- À partir de «capsules» (gousses de graines) poussant sur des buissons
- Le coton «respectueux de l'environnement» peut être cultivé dans une gamme de couleurs
- Principaux produits textiles de Chine, Inde, Iran, Pakistan et Egypte.
- Fabriqué dans une large gamme de vêtements.



Figure. II.3 Coton [22].

Tableau II.3 Avantages et inconvénients des fibres végétales (Coton) [22].

Avantages	Inconvénients
– Confortable	– Rétrécit dans l'eau chaude
– Absorbant	– Se ride facilement
– Bonne rétention des couleurs	– Affaibli par la transpiration et le soleil
– Teint et imprime bien	– Brûle facilement
– Lavable	– Affecté par le mildiou
– Fort	
– Drapé bien	
– Facile à manipuler et à coudre	
– Peu coûteux	

b. Lin (en anglais flax)

- Lin est le nom de la fibre; le lin est le nom du tissu.
- La plus ancienne fibre textile au monde remonte à l'âge de pierre de 5 000 ans
- Fibre cellulosique de tige de plante de lin
- Les serviettes, les draps et les nappes sont appelés «linge de maison».



Figure. II.4 Lin (flax) [22].

Tableau II.4 Avantages et inconvénients des fibres végétales (Lin (flax)) [22].

Avantages	Inconvénients
– Fort	– Se ride facilement
– Confortable	– Peut être coûteux
– Lavable à la main ou nettoyable à sec	– Rétrécit
– Absorbant	– Brûle facilement
– Teint et imprime bien	– Affecté par la moisissure et la transpiration
– Résiste à la saleté et aux taches	– Ravels
– Durable	– Difficile d'enlever les plis
– Résiste à la chaleur élevée	– Brille si repassé
– non pelucheux	

c. Coir

- Est une fibre naturelle extraite de la cosse de noix de coco
- Produits tels que tapis de sol, paillasons, brosses, matelas, etc
- Techniquement, le coco est le matériau fibreux trouvé entre la coque interne dure et la couche externe d'une noix de coco.
- Le coco brun (fabriqué à partir de noix de coco mûre) est également utilisé dans le rembourrage, l'horticulture.
- Le coco blanc, récolté à partir de noix de coco non mûres, est utilisé pour fabriquer des pinceaux plus fins, de la ficelle, de la corde et filets de pêche [22].



Figure II.5 Coir [22].

d. Chanvre

- La fibre de chanvre a été largement utilisée tout au long de l'histoire. Articles allant de la corde aux tissus en passant par les matériaux industriels étaient fabriqués à partir de fibres de chanvre
- Le chanvre était souvent utilisé pour fabriquer des toiles de voile, et le mot toile dérive du cannabis.
- Aujourd'hui, il existe une modeste industrie du tissu de chanvre et les fibres de chanvre peuvent être utilisées dans les vêtements.
- Le chanvre pur a une texture similaire au lin [22].

e. Fibres de banane

- Il est utilisé pour fabriquer des articles de fantaisie comme des sacs, des nattes de table, des sacs à main, etc. et leur dernière entreprise est tissage de tissu en fibre de banane.
- Plante indigène d'Asie du Sud-Est, la banane est maintenant largement cultivée dans tous les pays tropicaux pour fruits, fibres ou feuillage
- Ces fibres sont obtenues principalement à partir de la tige.
- Les fibres obtenues à partir du noyau central sont de moins bonne qualité que les fibres obtenues principalement de pseudo-tige [22].

II.8 Élaboration des matériaux composites à fibres de plante d'huile de ricin

II.8.1 Extraction de fibres de plante d'huile de ricin

La tige de la plante d'huile de ricin a été collectée à Kompally, Hyderabad, en Inde. La tige recueillie a été immergée dans l'eau à température ambiante pendant neuf jours

consécutifs pour la dégradation microbienne, de sorte que le cortex, le xylème et la moelle ont été facilement séparés. Deux fibres extraites étaient des fibres de cortex (type écorce) et des fibres de xylème (type bois). Les fibres extraites ont été séchées et testées mécaniquement. Un aperçu du processus d'extraction des fibres suivi a été mentionné à la Figure.II.6. Notre étude primaire a révélé que la résistance à la traction d'une seule fibre de cortex et d'une fibre de xylème unique était de 323 et 100 MPa, respectivement. Le diamètre de la fibre du cortex s'est avéré être de 0,3 mm De plus, les fibres extraites ont été conditionnées à 28 °C pour maintenir une humidité relative de 65 % avant la fabrication des échantillons. Comme la longueur de la fibre de cortex d'huile de ricin extraite varie de 6 à 8 m, elle a été hachée en longueurs de 5, 10, 15 et 20 mm respectivement pour fabriquer les composites à fibres courtes [23].

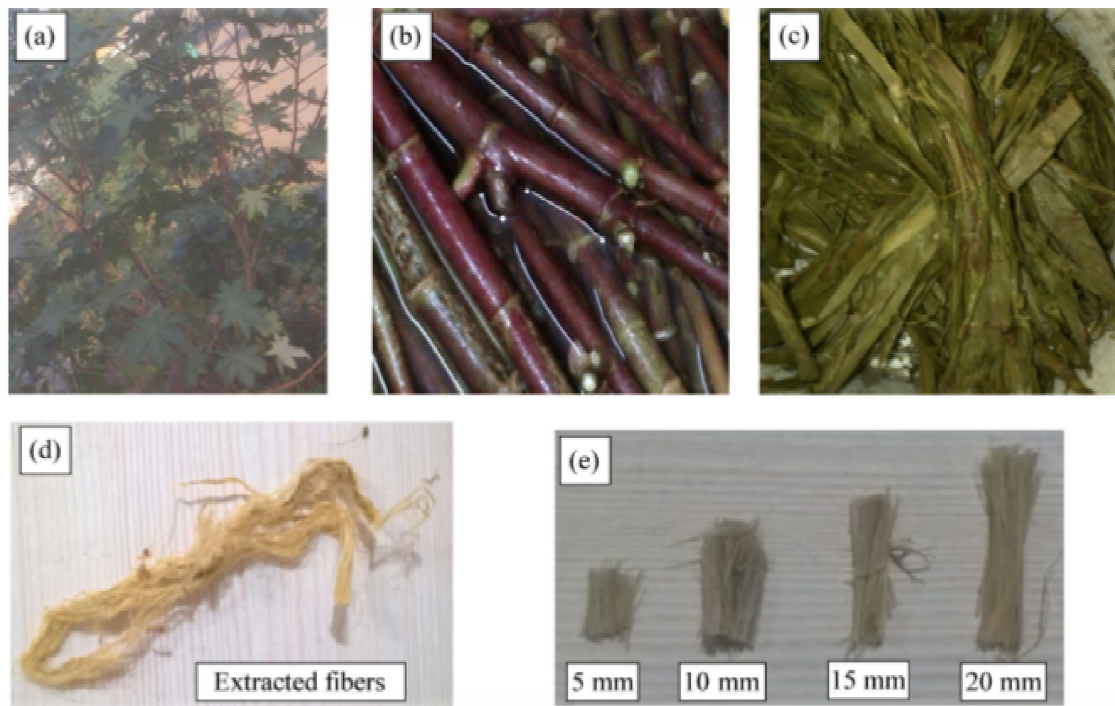


Figure II.6 Procédure d'extraction des fibres. (a) Plante de ricin, (b) tiges immergées dans l'eau, (c) tiges après immersion, (d) fibres extraites, et (e) fibres coupées [23].

II.8.2 Résine

Le matériau de la matrice époxy est un polymère thermodurcissable qui polymérise et se réticule lorsqu'il est mélangé à un durcisseur. Avec l'ajout de durcisseur, l'époxy peut être rendu souple ou rigide, transparent ou coloré, et aussi pour une prise extrêmement rapide ou lente. Le degré de mouillage pendant le processus de fabrication du composite est très

important pour une forte adhérence entre la matrice et la fibre. La qualité époxy (LY556) et la qualité durcisseur (HY 951) ont été utilisées pour la fabrication de composite époxy unidirectionnel. [24].

II.8.3 Fabrication de composites

Le procédé de pose manuelle à la main a été utilisé pour la fabrication de composite époxy renforcé de fibres de ricin courtes unidirectionnelles. Comme mentionné précédemment, la résistance à la traction de la fibre du cortex était beaucoup plus grande que celle de la fibre de xylème. Par conséquent, les fibres du cortex de l'huile de ricin ont été préférés aux fibres de xylème pour obtenir de meilleures propriétés mécaniques et tribologiques. Les composites ont été fabriqués avec une fraction volumique de 40% de fibre cortex avec des longueurs de fibres de 5, 10, 15 et 20 mm, respectivement [25].

II.8.4 Paramètres tribologiques des matériaux composites à fibres de plante d'huile de ricin

Le comportement tribologique des composites époxy renforcés de fibres de ricin fabriqués a été étudié à l'aide d'un tribomètre broche sur disque fourni par DUCOM. Le diagramme schématique du tribomètre broche sur disque a été montré à la figure II.7. Des expériences d'usure coulissante à sec ont été réalisées conformément à la norme G 99 de l'American Society for Testing and Materials (ASTM). Les spécimens ont été fixés dans un porte-spécimen avec une face coulissante sur le disque. La surface de contour est un disque en acier trempé EN-31 avec une dureté 69 HRC, une rugosité de surface de 0,6 μm et une épaisseur de 8 mm. La charge requise sur la broche est appliquée au moyen d'une poulie dans la gamme de 15, 30 et 45 N. Les rotations par minute (RPM) sont réglées à 500 et les diamètres de voie sont réglés à 100, 110 et 120 mm pour atteindre les distances de glissement de 1, 2 et 3 m, respectivement, en ajustant successivement le temps de fonctionnement. La rugosité initiale de la surface du disque et des échantillons est maintenue en frottant contre des papiers émeri de tailles de grain 220 et 600 respectivement, de sorte que la rugosité initiale était comprise entre Ra 0,02 et 0,07 μm pour le disque et Ra 0,33 à 0,45 μm pour l'échantillon. Les échantillons sont pesés avant et après l'expérience pour estimer la quantité d'usure [23].

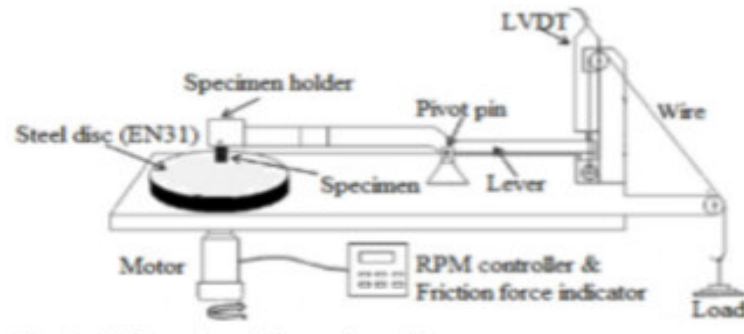


Figure II .7 Schéma de la broche sur le tribomètre à disque [23].

II.9 Conclusion

Nous avons constaté que les fibres naturelles sont devenues une excellente alternative aux fibres synthétiques qui consomment de l'énergie lors de leur fabrication car les fibres naturelles sont facilement extraites et fabriquées et possèdent de nombreuses propriétés environnementales et économiques meilleures que les fibres synthétiques.

Nous avons mené une étude sur l'un des types de fibres végétales, à savoir les fibres d'huile de ricin, où nous avons montré comment elle était préparée et extraite, et nous sommes arrivés à une étude de ses performances tribologiques.

Chapitre III

Etude paramétrique sur le comportement tribologique des composites

III.1 Introduction

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes.

Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel. [26].

Dans ce chapitre nous utilisons la logique floue, pour prédire l'effet des paramètres individuels (longueur de fibre, charge et distance de glissement) sur la quantité d'usure et le coefficient de frottement des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles

III.2 Historique

Les prémisses de la logique floue sont apparues en 1940 lorsque des chercheurs américains ont commencé à se pencher sur le concept d'incertitude.

En 1965, Lofti Zadeh introduit la théorie des ensembles flous, (fuzzy set theory), il est alors professeur à l'université californienne de Berkeley et deviendra un automaticien de renommée internationale.

En 1973 le professeur Zadeh publie un article qui mentionne pour la première fois le terme de valeurs linguistiques, i.e. dont la valeur est un mot et non une lettre.

En 1974 un chercheur Mamdani établit la première application industrielle de la logique floue : la régulation floue d'une chaudière à vapeur. Il introduit ainsi la commande floue dans la régulation industrielle.

Grâce au chercheur japonais M. Sugneo, la logique floue a été introduite au Japon dès 1985. Les sociétés japonaises comprirent l'avantage à la fois technique et commercial de cette logique :

- Facilité d'implantation
- Solution de problèmes multi-variables complexes
- Robustesse vis à vis des incertitudes
- Possibilité d'intégration du savoir de l'expert [27].

III.3 Définition

Logique floue : « logique qui substitue à la logique binaire une logique fondée sur des variables pouvant prendre, outre les valeurs « vrai » ou « faux », les valeurs intermédiaires « vrai » ou « faux » avec une certaine probabilité [28].

III.4 Principe de la logique floue

III.4.1 Ensembles flous

Si la fonction caractéristique d'un ensemble classique ne peut prendre que deux valeurs soit 1 ou bien 0, la fonction d'un ensemble flou peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 1.

On définit alors un sous ensemble A de U comme suit :

$$A = (x / \mu_A(x), \forall x \in U) \quad (\text{III.1})$$

$\mu_A(x)$ degré d'appartenance de l'élément x au sous-ensemble flou A.

μ_A : est la fonction d'appartenance définie dans l'intervalle [0,1].

$$\mu_A \Rightarrow U[0,1]$$

$$Z = \frac{\sum_j^n 1\mu_z(Z_j)Z_j}{\sum_j^n 1\mu_z(Z_j)} \quad (\text{III.2})$$

[29].

III.4.2 Concept de la logique floue

La pensée humaine est un mélange de la logique et de l'imagination. C'est-à-dire une superposition de rigueur et d'intuition agissant ensemble ou séparément. La logique humaine est un enchaînement d'idées et de concepts aboutissant à des conclusions qui entraînent des décisions.

Le caractère flou de la pensée humaine est illustré par sa capacité de résumer les informations pour extraire à partir des collections de données une conclusion en rapport avec la tâche considérée.

En termes plus formels, la logique floue vise à modéliser les aspects qualificatifs imprécis et incertains. [3].

III.4.3 Variables linguistiques

Les sous-ensembles flous permettent d'exprimer en termes mathématiques les différents attributs qualificatifs du langage commun (petit, grand...). Ceci est effectué par l'introduction d'un nouveau type de variables dites variables linguistiques qui, contrairement à une variable numérique dont la valeur est un nombre, prennent comme variable des termes du langage humain, qu'on appelle valeurs floues. Comme exemple de variables linguistiques, nous pouvons citer « TEMPERATURE » qui peut prendre pour valeurs floues les attributs qualificatifs suivants « CHAUD », « TIEDE » et « FROID ». La représentation mathématique d'une valeur floue est réalisée par les sous-ensembles flous. En effet, une valeur floue n'est rien d'autre qu'un sous-ensemble flou dans un univers de discours [29].

III.4.4 Univers du discours

C'est un sous ensemble de \mathbb{R} qui décrit dans le cas général le domaine de variation d'une variable donnée. Par exemple : si on a une température qui varie entre 10° et 100° donc $U = [10 \ 100]$. On utilise souvent des univers de discours normalisés $[-1 \ 1]$, et il existe alors un coefficient de normalisation « g » entre l'univers réel et l'univers normalisé [29].

III.4.5 Fonction d'appartenance

La fonction d'appartenance permet de décrire l'évolution du degré de vérité de la variable linguistique dans l'univers de discours U . Elle peut prendre plusieurs formes, les plus utilisées sont :

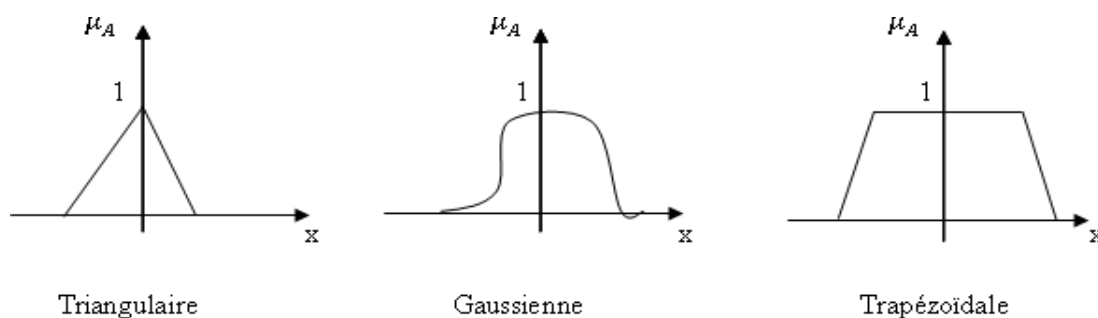


Figure III.1 Formes des fonctions d'appartenances [29].

III.4.6 Relations floues

Une relation floue entre deux sous-ensembles flous A et B dans les univers de discours U_1 et U_2 respectivement, est un sous ensemble flou R dans l'univers $U = U_1 \times U_2$ (produit cartésien) dont la fonction d'appartenance s'exprime par :

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (\text{III.3})$$

III.5 Les opérations de la logique floue

Dans certain cas, on trouve que la réponse de la logique floue dépend de plus qu'une condition (deux ou plus). Dans la logique classique il existe des opérations qui permettent de gérer le chevauchement de plusieurs conditions. Les mêmes opérateurs utilisés pour la logique booléenne sont encore utilisables pour la logique floue

III.5.1 Opérateur NON

Selon la logique classique, la négation est définie par :

$$c = \text{NON}(a) = \bar{a} \quad (\text{III.4})$$

Dans le cas de la logique floue, cette expression peut être écrite d'une façon plus générale [30] :

$$\text{NON}(\mu_a(x)) = 1 - \mu_a(x) \quad (\text{III.5})$$

III.5.2 Opérateur ET

L'opérateur ET dans la logique floue correspond à l'opération minimum. L'application de cette opération sur deux fonctions d'appartenances $\mu_a(x)$ et $\mu_b(x)$, donne la fonction $\mu_c(x)$ qui représente l'intersection entre les deux fonctions [30].

$$\mu_c(x) = \min[\mu_a(x), \mu_b(x)] \quad (\text{III.6})$$

III.5.3 Opérateur OU

Selon la théorie des ensembles, l'opération OU est utilisée souvent pour exprimer l'union entre deux ensembles. Dans la logique floue, cette opération est définie par l'opération maximum. L'application de cette opération sur deux fonctions d'appartenance $\mu_a(x)$ et $\mu_b(x)$, donne la fonction $\mu_c(x)$ qui représente l'union des deux fonctions [30].

$$\mu_c(x) = \max[\mu_a(x), \mu_b(x)] \quad (\text{III.7})$$

III.6 Structure générale de la logique floue

La logique est composée de quatre éléments suivants (figure III.2)

- Interface de fuzzification.
- Base de connaissances.
- Moteur d'inférence floue.
- Interface de défuzzification.

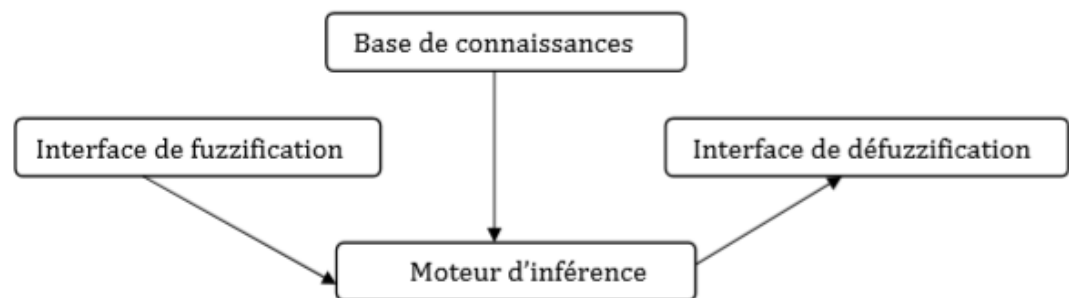


Figure III.2 Structure générale [31].

III.6.1 Interface de fuzzification

Transforme les entrées numériques (vecteurs précises) en des ensembles flous. Le choix de l'opérateur de fuzzification dépend de la confiance que l'on accorde aux mesures effectuées. Ainsi si la mesure x_0 est exacte, le sous-ensemble flou x A doit être représenté par un fait précis. Par conséquent, on utilise comme opérateur de fuzzification la transformation dite de singleton. La fonction d'appartenance du sous ensemble flou x A est alors définie par :

$$\mu_{A_x}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x=x_0 \\ 0 & \text{si } x \neq x_0 \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Par contre, si la mesure de la variable est incertaine, par exemple à cause du bruit, le sous-ensemble flou A_x doit être représenté par un fait imprécis. On utilise alors la méthode de fuzzification qui associe à la variable de mesure x_0 une fonction d'appartenance telle que, par exemple : Ce sous-ensemble flou comprend donc la mesure x_0 avec une appartenance unité et les valeurs voisines de x_0 avec une appartenance inversement proportionnelle à l'écart avec x_0 .

La base du triangle est fonction de l'importance relative des erreurs de mesures. En effet, plus elles sont importantes, plus la mesure de la variable x_0 devient imprécise, et donc, plus le triangle doit s'élargir [31].

III.6.2 Base de connaissances

La conception d'une base de connaissances représente la phase dans la conception des systèmes experts. Elle comprend la base de données et la base des règles floues.

– La base de données

Contient la définition des ensembles flous, les facteurs d'échelle pour la normalisation des ensembles de référence et la partition de l'espace flou d'entrée et sortie.

– La base des règles floues

Elle rassemble l'ensemble des règles floues de type « Si-Alors » décrivant en termes linguistiques basés sur la connaissance d'un expert le comportement dynamique du système

R1 : Si x_1 est A_{11} et et x_n est A_{1n} Alors u_1 est B_1 [31].

III.6.3 Moteur d'inférence floue

Le moteur d'inférence floue transforme, à l'aide des techniques de raisonnement flou, la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue afin de définir l'ensemble flou caractérisant la commande. En fait, le mécanisme d'inférence combine les règles floues pour effectuer une transformation à partir des ensembles flous dans l'espace d'entrée vers des ensembles flous dans l'espace de sortie.

Il existe plusieurs méthodes d'inférence utilisées dans la littérature parmi elles [Buh94], on cite [32].

- Méthode d'inférence MAX-MIN.
- Méthode d'inférence MAX-PROD.
- Méthode d'inférence SOMME-PROD.

III.6.4 Interface de défuzzification

L'étape de défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'inférence de différentes règles en une valeur numérique unique représentative de cet ensemble, cette valeur numérique est appliquée pour commander un processus réel. Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la défuzzification. .

Il existe différentes méthodes de défuzzification, parmi lesquelles on peut citer :

- La méthode du centre de gravité.
- La méthode de la valeur maximum.
- La méthode de la moyenne des maximums.
- Méthode de hauteurs pondérées [32].

III.7 Données expérimentales

Sur la base des données expérimentales recueillies dans le tableau (III.1) obtenues à partir de la référence [23]. Nous suggérons d'utiliser la méthode de simulation basée sur la théorie de la logique floue (Mamdani) par le programme MATLAB Évaluer les performances tribologiques du composite époxy renforcé de fibre d'huile de ricin

Tableau III.1 Données expérimentales

Essai	LF (mm)	CH (N)	DG (m)	Usure (mg)	Cof
1	5	15	1.000	2.05	0.239
2	5	15	2.000	2.6	0.251
3	5	15	3.000	3.4	0.274
4	5	30	1.000	2.8	0.305
5	5	30	2.000	3.5	0.321
6	5	30	3.000	4.1	0.341
7	5	45	1.000	4.55	0.368
8	5	45	2.000	5.05	0.395
9	5	45	3.000	5.65	0.412
10	10	15	1.000	2.45	0.245
11	10	15	2.000	3.30	0.268
12	10	15	3.000	4.15	0.295
13	10	30	1.000	3.35	0.319
14	10	30	2.000	4.15	0.332
15	10	30	3.000	4.70	0.369
16	10	45	1.000	4.95	0.397

17	10	45	2.000	5.40	0.411
18	10	45	3.000	6.30	0.430
19	15	15	1.000	2.70	0.275
20	15	15	2.000	3.40	0.300
21	15	15	3.000	3.60	0.316
22	15	30	1.000	4.00	0.337
23	15	30	2.000	4.70	0.375
24	15	30	3.000	5.35	0.401
25	15	45	1.000	5.60	0.414
26	15	45	2.000	6.00	0.435
27	15	45	3.000	6.35	0.445
28	20	15	1.000	2.80	0.305
29	20	15	2.000	3.60	0.310
30	20	15	3.000	3.80	0.345
31	20	30	1.000	4.10	0.375
32	20	30	2.000	4.55	0.384
33	20	30	3.000	5.40	0.402
34	20	45	1.000	5.60	0.435
35	20	45	2.000	6.35	0.455
36	20	45	3.000	6.55	0.469

III.8 Système flou

Nous avons choisi, un système d'inférence flou de type Mamdani pour des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

Nous utilisons un système flou avec trois entrées : la longueur de fibre (LF), la charge normale (CH), la distance de glissement (DG) et deux variables de sortie: la quantité d'usure (Usure) et le coefficient de frottement (Cof)

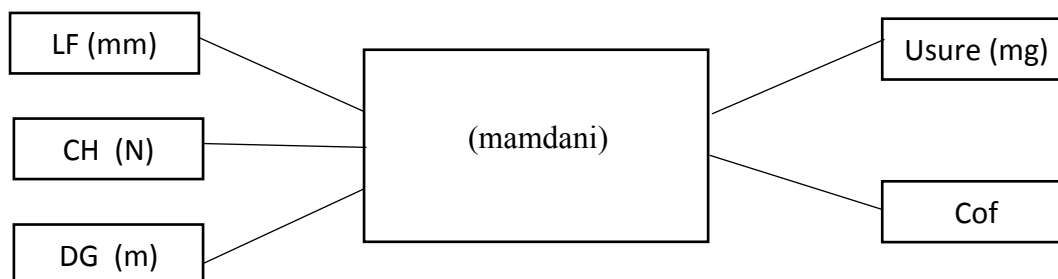


Figure III. 3 Système flou pour des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

III.9 Modélisation floue

III.9.1 Les variables floues

Pour définir l'univers de discours associé à cette étude, nous présentons dans le tableau ci-dessous (tableau III.2) les valeurs limites des paramètres d'entrée et de sortie, pour le modèle flou utilisé.

Tableau III.2 Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou fibre d'huile de ricin.

	Valeur Max	Valeur Min
Les paramètres d'entrée		
La longueur de fibre (LF)(mm)	20	5
La charge normale (CH) (N)	45	15
La distance de glissement (DG) (m)	3	1
Les paramètres de sortie		
La quantité d'usure (Usure) (mg)	6.35	2.05
Le coefficient de frottement (Cof)	0.469	0.239

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.

a. Les variables d'entrée

Les variables linguistiques pour la première variable (la longueur de fibre) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.4)



Figure III.4 Variables Linguistiques pour la longueur de fibre.

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (la charge normale) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.5).

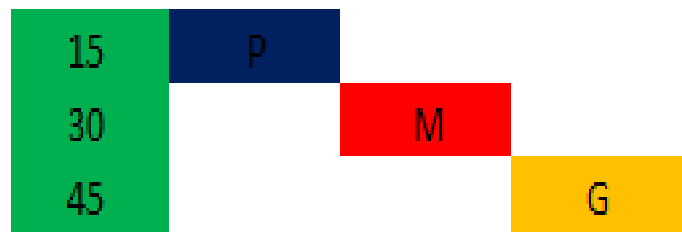


Figure III.5 Variables Linguistiques pour la charge normale.

Les variables linguistiques pour la troisième variable (la distance de glissement) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.6).

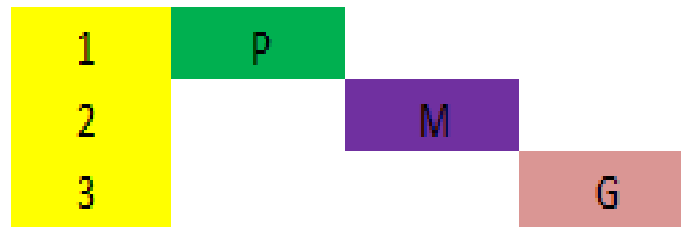


Figure III.6 Variables Linguistiques pour la distance de glissement.

b. Les variables de sortie

Les variables linguistiques pour la première variable (la quantité d'usure) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.7).

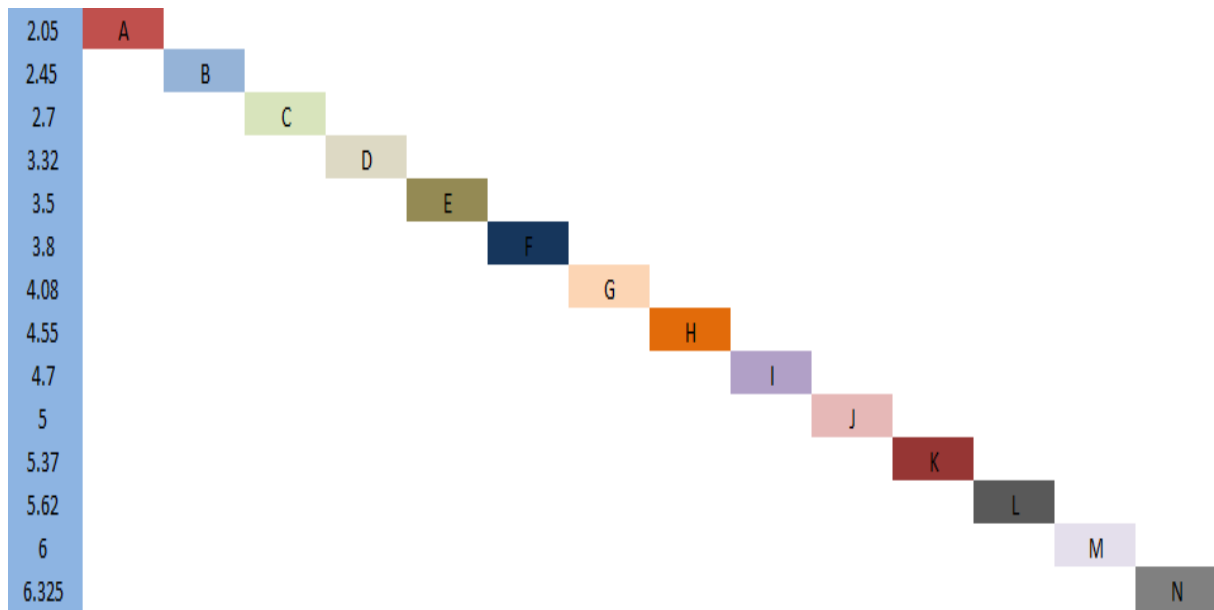


Figure III.7 Variables Linguistiques pour la quantité d'usure.

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (le coefficient de frottement) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.8).

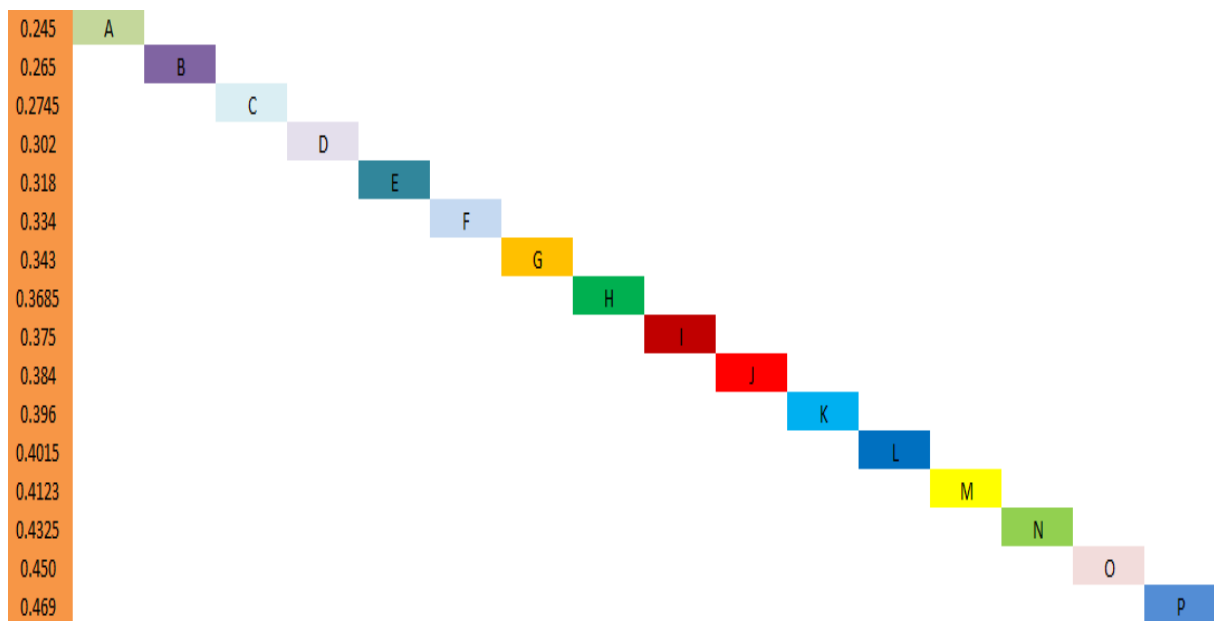


Figure III.8 Variables Linguistiques pour le coefficient de frottement.

III.9.2 Les fonctions d'appartenance

Deux types de fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale) sont utilisés dans cette étude.

a. Utilisation des fonctions d'appartenance de type triangulaire

➤ Les paramètres d'entrées

En utilisant les intervalles flous présentés précédemment, les fonctions d'appartenance de type triangulaire pour les paramètres d'entrée sont présentées dans les figures III.9, III.10 et III.11 :

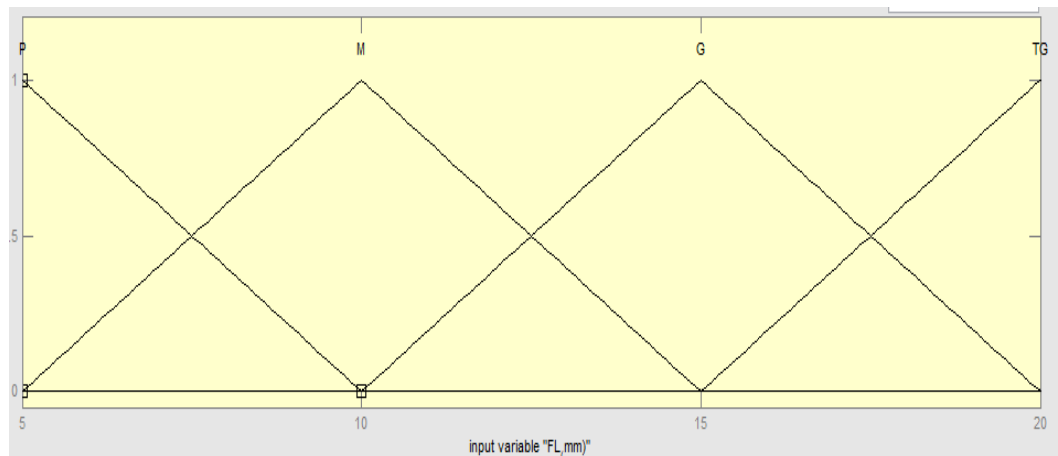


Figure III.9 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la longueur de fibre.

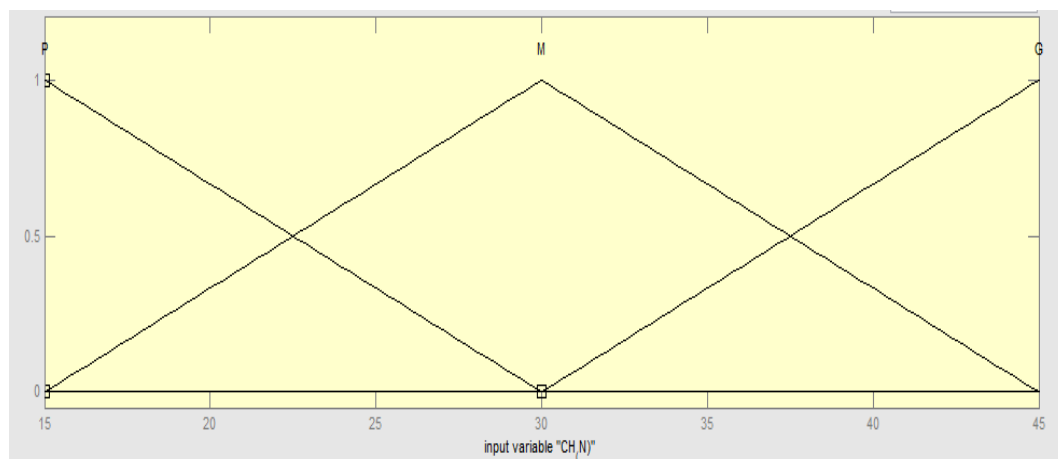


Figure III.10 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la charge normale.

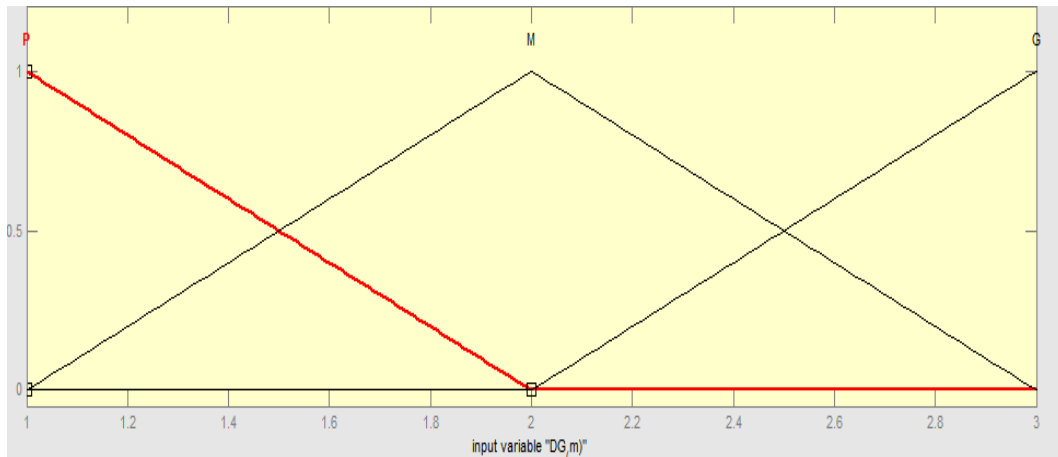


Figure III.11 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la distance de glissement.

➤ **Le paramètre de sortie**

En utilisant les intervalles présentés dans la figure III.7, les fonctions d'appartenance pour le paramètre de sortie (la quantité d'usure) sont illustrées dans la figure III.12 :

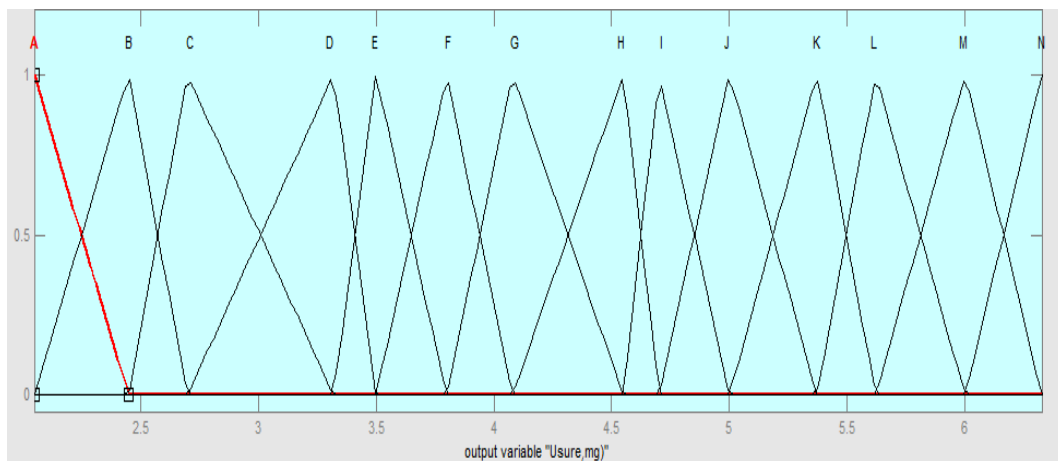


Figure III.12 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la quantité d'usure.

En utilisant les intervalles présentés dans la figure III.8, les fonctions d'appartenance pour le paramètre de sortie (le coefficient de frottement) sont illustrées dans la figure III.13 :

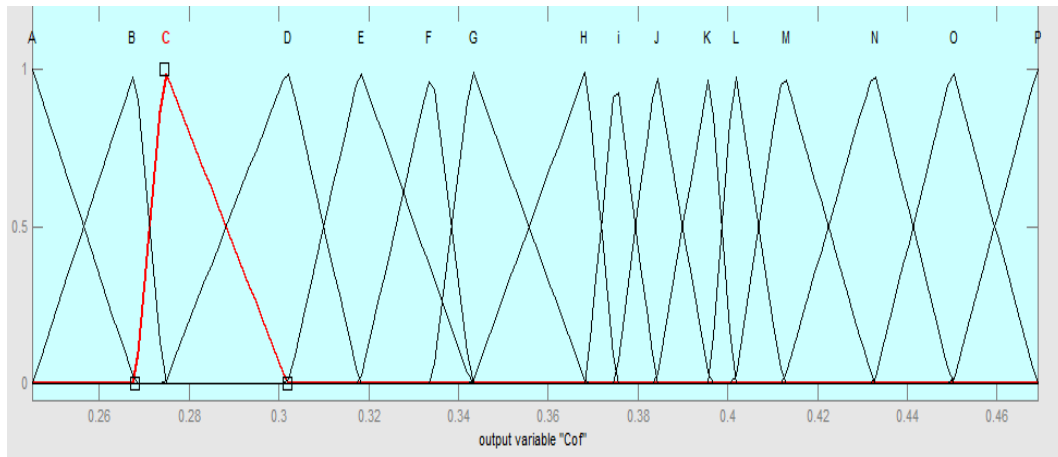


Figure III.13 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour le coefficient de frottement.

b. Utilisation des fonctions d'appartenance de type trapézoïdale

➤ Les paramètres d'entrées

En utilisant les intervalles flous présentés précédemment, les fonctions d'appartenance de type trapézoïdale pour les paramètres d'entrée sont présentées dans les figures III.14, III.15 et III.16 :

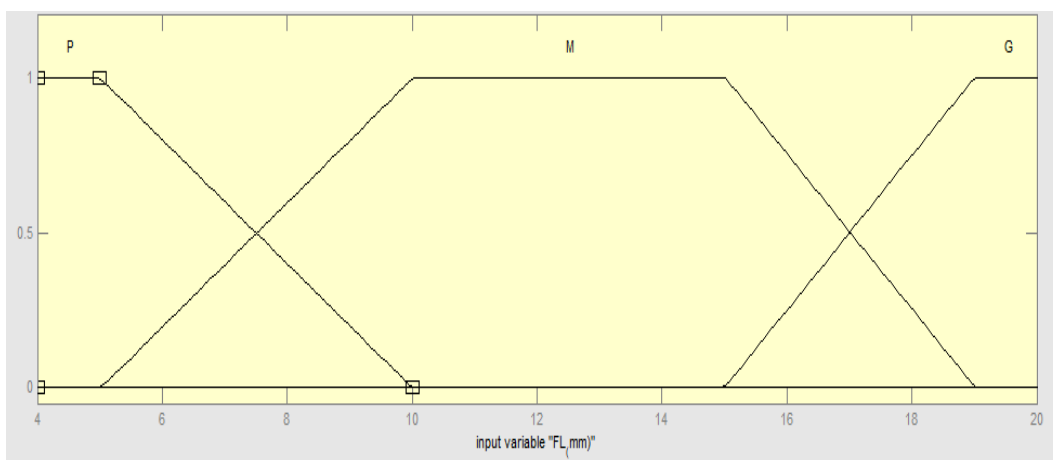


Figure III.14 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la longueur de fibre.

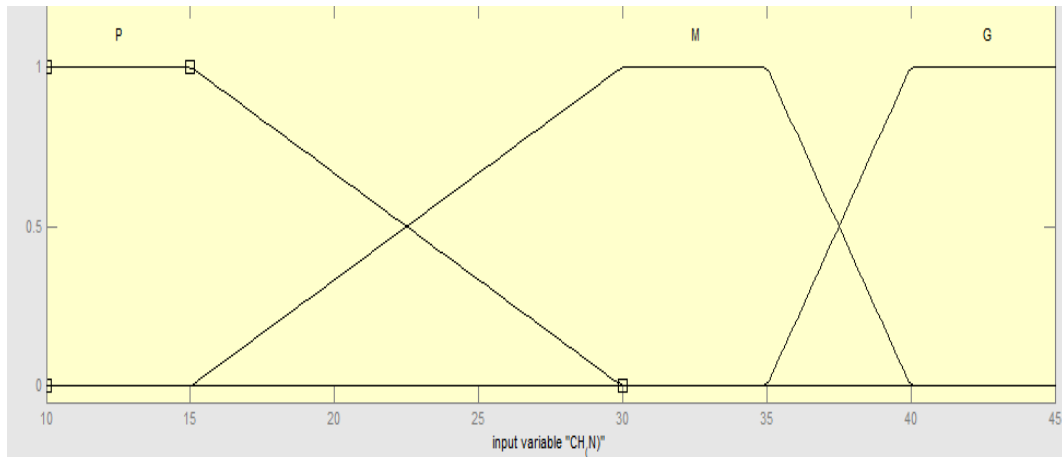


Figure III.15 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la charge normale.

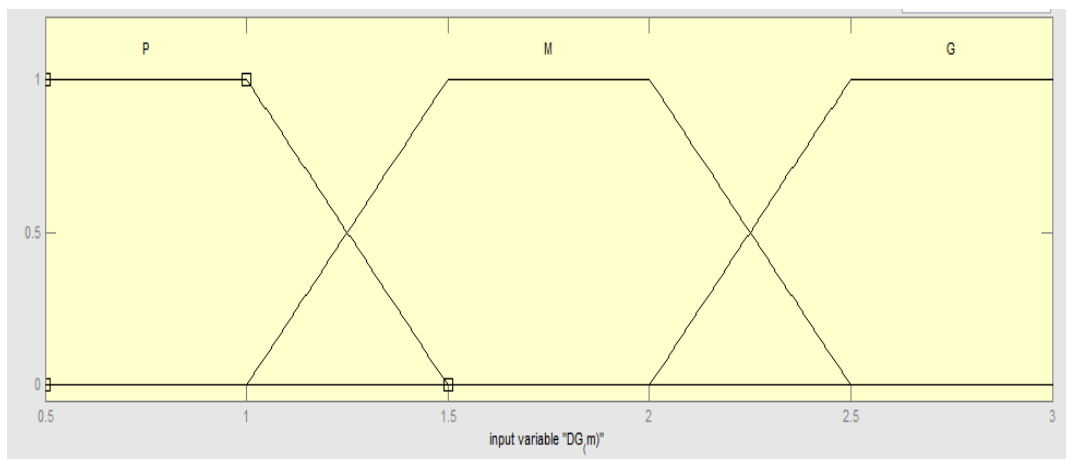


Figure III.16 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la distance de glissement.

➤ **Le paramètre de sortie**

En utilisant les intervalles présentés dans la figure III.7, les fonctions d'appartenance pour le paramètre de sortie (la quantité d'usure) sont illustrées dans la figure III.17 :

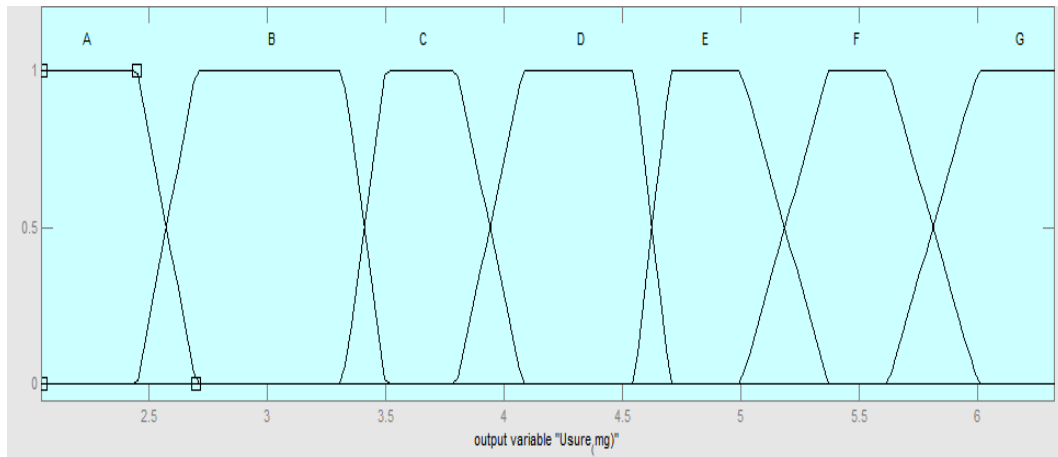


Figure III.17 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la quantité d'usure.

En utilisant les intervalles présentés dans la figure III.8, les fonctions d'appartenance pour le paramètre de sortie (le coefficient de frottement) sont illustrées dans la figure III.18 :

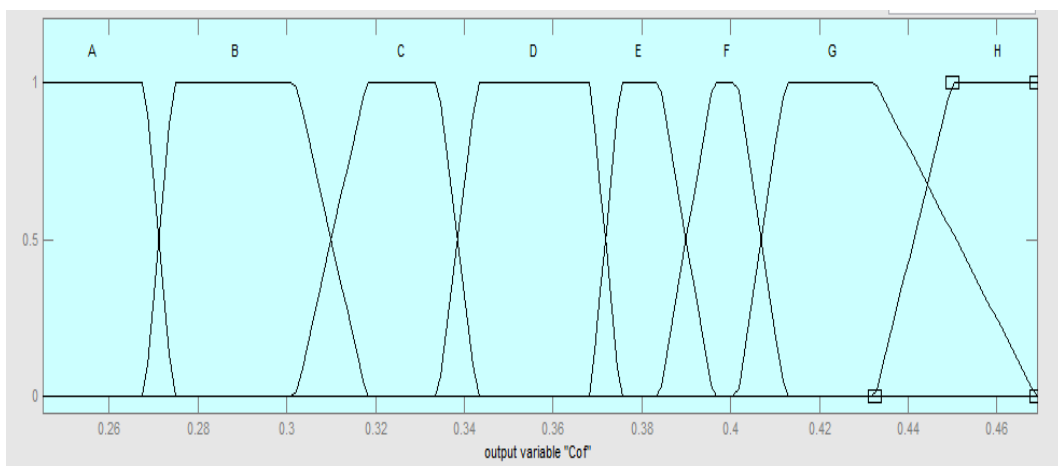


Figure III.18 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour le coefficient de frottement.

III.10 Les règles floues

Les Trente-six règles floues, du tableau III.3, ont été établies en fonction des conditions expérimentales.

Chaque règle prend la forme suivante :

Si FL est (variable linguistique) et CH est (variable linguistique) et DG est (variable Linguistique) **Alors** usure est (variable linguistique) et Cof est (variable linguistique, L'ensemble de règles floues élaborées sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.3 Les règles floues pour des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles

Essai	LF (mm)	CH (N)	DG (m)	Usure(mg)	Cof
1	P	P	P	A	A
2	P	P	M	B	A
3	P	P	G	E	C
4	P	M	P	D	D
5	P	M	M	E	E
6	P	M	G	G	G
7	P	G	P	H	H
8	P	G	M	J	K
9	P	G	G	L	M
10	M	P	P	P	A
11	M	P	M	D	B
12	M	P	G	G	D
13	M	M	P	D	E
14	M	M	M	G	F
15	M	M	G	I	H
16	M	G	P	J	K
17	M	G	M	K	M
18	M	G	G	N	N
19	G	P	P	C	C
20	G	P	M	D	D
21	G	P	G	E	E
22	G	M	P	G	F
23	G	M	M	I	I
24	G	M	G	K	L
25	G	G	P	L	M
26	G	G	M	M	N
27	G	G	G	N	O
28	TG	P	P	C	D
29	TG	P	M	E	E
30	TG	P	G	F	G
31	TG	M	P	G	I

32	TG	M	M	H	J
33	TG	M	G	K	L
34	TG	G	P	L	N
35	TG	G	M	N	O
36	TG	G	G	N	P

III.11 Résultats et discussion

Les résultats de la défuzzification, qui est la dernière étape dans la logique floue, sont obtenus de la conversion des valeurs linguistiques à des valeurs numériques.

III.11.1 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.8).

$$e_i = \left(\frac{|V_{ex} - V_p|}{V_{ex}} \right) \times 100\% \quad (III.8)$$

La précision est calculée en trouvant l'approchement de la valeur prédite à la valeur mesurée. Dans l'équation (III.9), 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

$$A = \frac{1}{N} \sum \left[1 - \frac{|V_{ex} - V_p|}{V_{ex}} \right] \times 100\% \quad (III.9)$$

III.11.2 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.

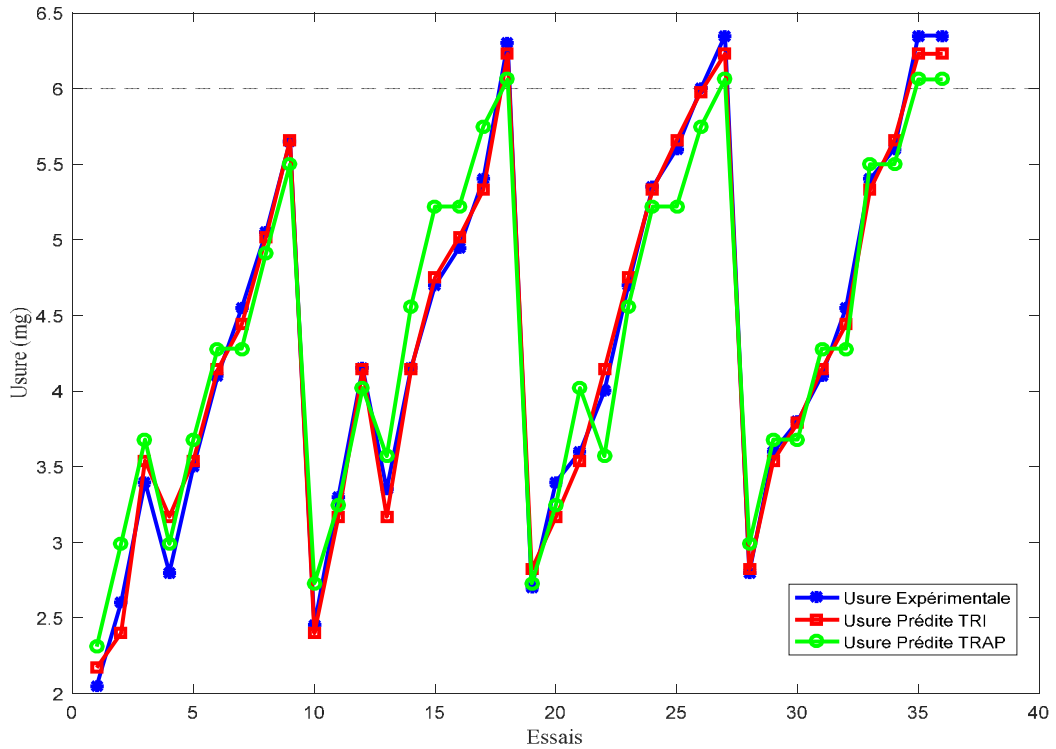


Figure III.19 Variation de la quantité d'usure (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre essais.

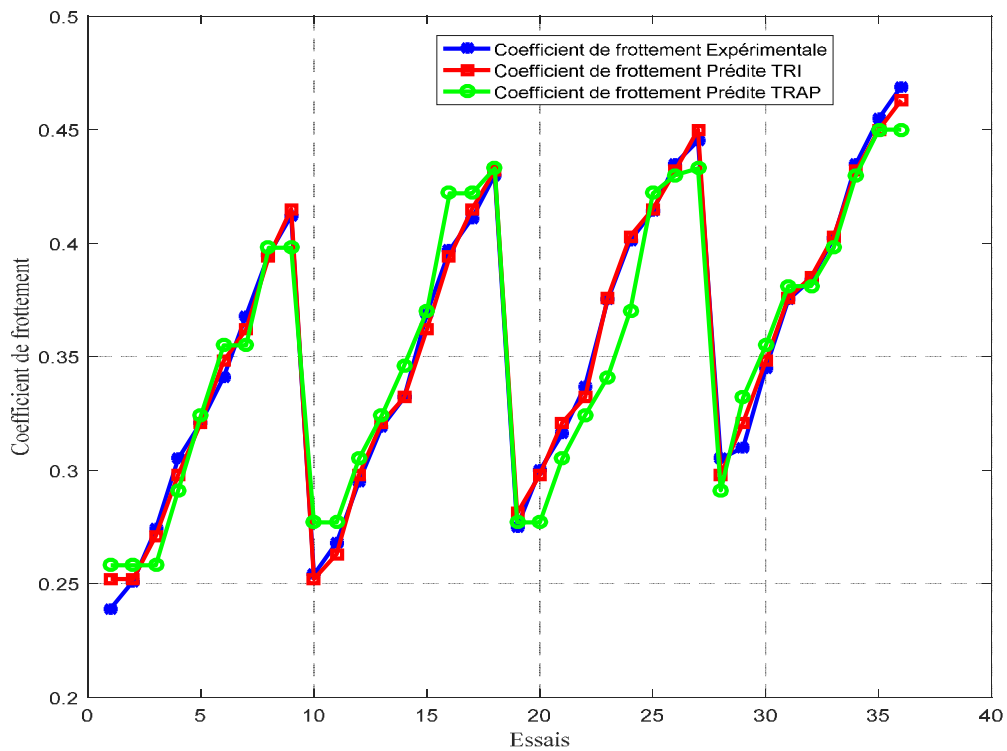


Figure III.20 Variation du coefficient de frottement (trapézoïdale, triangulaire) en fonction du nombre essais.

Les figures (III.19) et (III. 20) montrent que la variation des deux sortie en utilisant les deux types de fonctions d'appartenance est presque la même. Donc, cette représentation ne nous permettons 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 approchés 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.

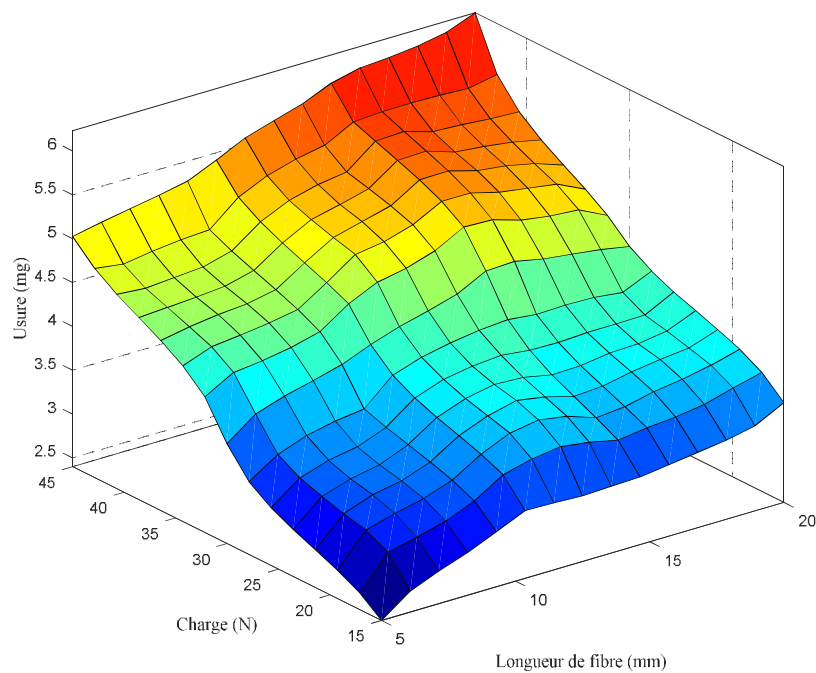
Le tableau III.4 regroupe l'ensemble des résultats obtenus par notre système flou.

Tableau III.4 Les résultats du système flou pour des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

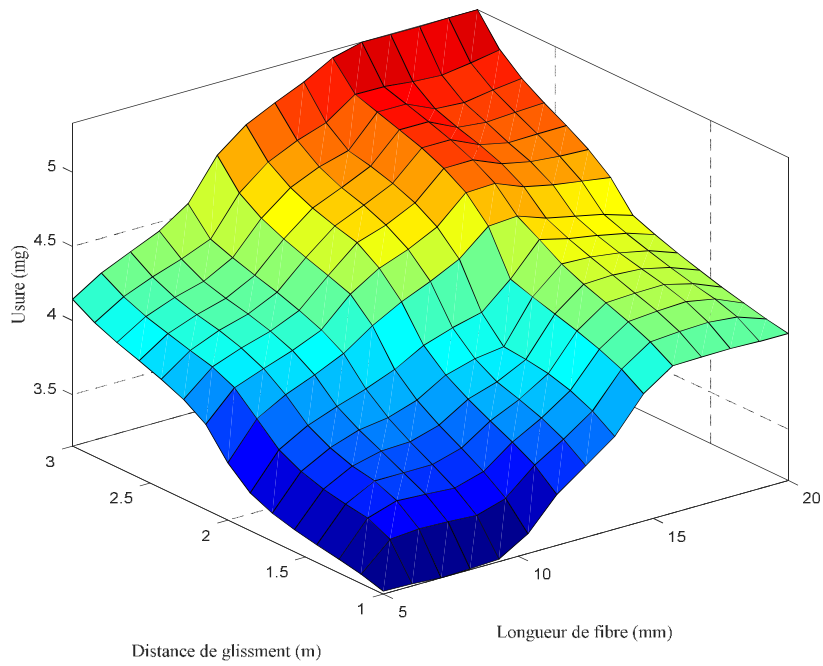
Essais	Usure (exp)	Usure (p)	Erreur (%)	Précision (%)	Cof (exp)	Cof (p)	Erreur (%)	Précision (%)
1	2,05	2,17	5,85366	94,14634	0,239	0,252	5,43933	99,56067
2	2,6	2,14	7,69231	92,30770	0,251	0,252	0,39841	99,60159
3	3,4	3,54	4,11765	95,88235	0,274	0,281	2,55474	97,44526
4	2,8	3,17	13,21429	86,78571	0,305	0,298	2,29508	97,70492
5	3,5	3,54	1,14286	98,85714	0,321	0,321	0,00000	100,00000
6	4,1	4,14	0,97561	99,02439	0,341	0,348	2,05279	97,94721
7	4,55	4,44	2,41758	97,58242	0,368	0,362	1,63043	98,36957
8	5,05	5,02	0,59406	99,40594	0,395	0,394	0,25031	99,74969
9	5,65	5,66	0,17699	99,82301	0,412	0,415	0,72816	99,27184
10	2,45	2,4	2,04082	97,95918	0,245	0,252	2,85714	97,14286
11	3,3	3,17	3,93939	96,06061	0,268	0,263	1,86567	98,13433
12	4,15	4,14	0,24096	99,75904	0,295	0,298	1,01695	98,98305
13	3,35	3,17	5,37313	94,62687	0,319	0,321	0,62696	99,37305
14	4,15	4,14	0,24096	99,75904	0,332	0,332	0,00000	100,00000
15	4,7	4,75	1,06383	98,93617	0,369	0,362	1,89702	98,10298
16	4,95	5,02	1,41414	98,58586	0,397	0,394	0,75567	99,24433
17	5,4	5,33	1,29630	98,70373	0,411	0,415	0,97324	99,02676
18	6,3	6,23	1,11111	98,88889	0,43	0,432	0,46512	99,53488
19	2,7	2,82	4,44444	95,55556	0,275	0,281	2,18182	97,81818
20	3,4	3,17	6,76471	93,23529	0,3	0,298	0,66667	99,33333
21	3,6	3,54	1,66667	98,33333	0,316	0,321	1,58223	98,41777
22	4	4,14	3,50000	96,50000	0,337	0,332	1,48368	98,51632
23	3,7	4,75	1,06383	98,93617	0,375	0,376	0,26667	99,73333
24	5,35	5,33	0,37383	99,62617	0,401	0,403	0,49875	99,50125
25	5,6	5,66	1,07143	98,92857	0,414	0,415	0,24155	99,75845

26	6	5,98	0,33333	99,66667	0,435	0,432	0,68966	99,31034
27	6,35	6,23	1,88976	98,11024	0,445	0,45	1,12360	98,87640
28	2,8	2,82	0,71429	99,28571	0,305	0,298	2,29508	97,70492
29	3,6	3,54	1,66667	98,33333	0,31	0,298	3,54838	96,45162
30	3,8	3,79	0,26316	99,73684	0,345	0,348	0,86957	99,13043
31	4,1	4,14	0,97561	99,02439	0,375	0,376	0,26667	99,73333
32	4,55	4,44	2,41753	97,58242	0,384	0,385	0,26042	99,73959
33	5,4	5,33	1,29623	98,70377	0,402	0,403	0,24876	99,75124
34	5,6	5,66	1,07143	98,92857	0,435	0,432	0,68966	99,31034
35	6,35	6,23	1,88976	98,11024	0,455	0,45	1,09890	98,90110
36	6,35	6,23	1,88976	98,11024	0,469	0,463	1,27932	98,72068
la précision=97,60561				La précision=98,88616				

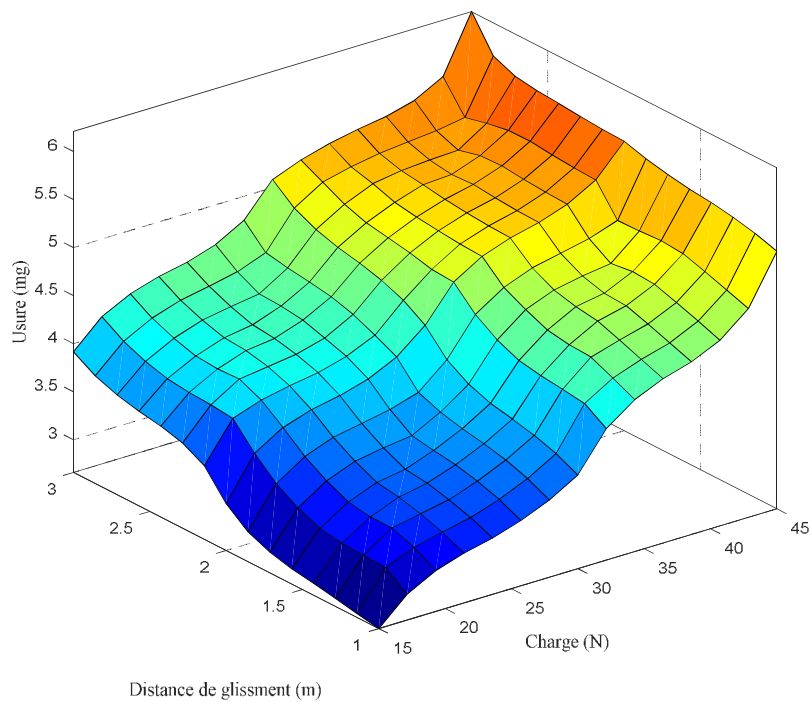
III.11.3 Représentation schématique des résultats



(a)



(b)



(c)

Figure III.21 Variation de la quantité d'usure prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres individuels des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

- Le schéma (a) représente la variation de la quantité d'usure en fonction de charge normale et longueur de fibre,
- Le schéma (b) représente la variation de la quantité d'usure en fonction de la distance de glissement et longueur de fibre,
- Le schéma (c) représente la variation de la quantité d'usure en fonction de la distance de glissement et charge normale.

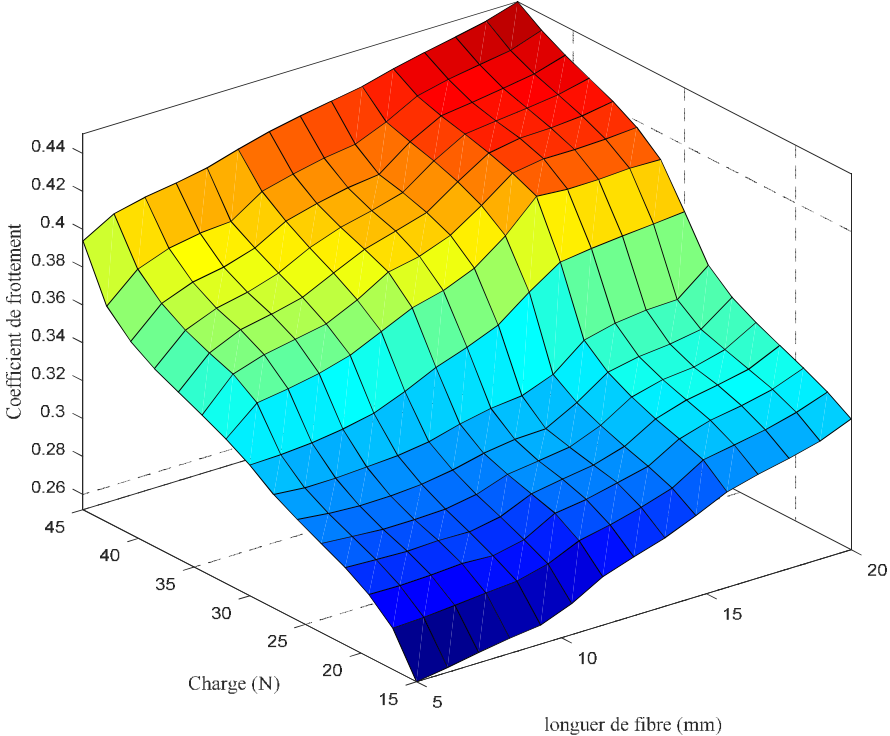
La figure III.21 illustre l'influence des paramètres individuels sur la quantité d'usure des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

De la figure III.21 (a) (b) et (c) on constate que les valeurs de la quantité d'usure deviennent maximales pour des valeurs maximales de la longueur de fibre, la charge normale, et la distance de glissement.

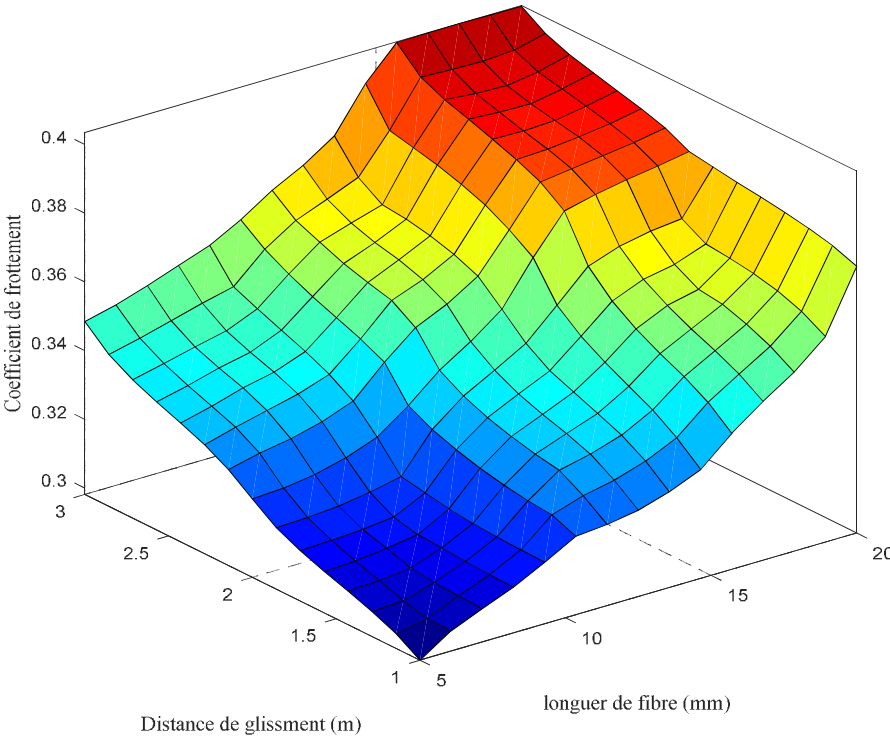
Dans les conditions des charges normales, une pénétration moindre avec la surface a été observée, ce qui a entraîné une usure moindre. Au fur et à mesure que la charge augmente, la quantité d'usure augmente proportionnellement et peut être vue dans la figure III.21. Cela est dû à la plus grande quantité de pénétration et aux rainures plus profondes créées, entraînant une élimination élevée de matière.

La longueur de fibres de 5 mm a produit de meilleures performances d'usure en raison d'une forte liaison inter faciale entre la matrice et la fibre. L'échantillon avec une longueur de fibre de 20 mm a une perte de poids environ 3 fois supérieure à celle d'une longueur de fibre de 5 mm dans des conditions de fonctionnement similaires. L'augmentation de la longueur des fibres de 5 à 20 mm a augmenté la quantité d'usure.

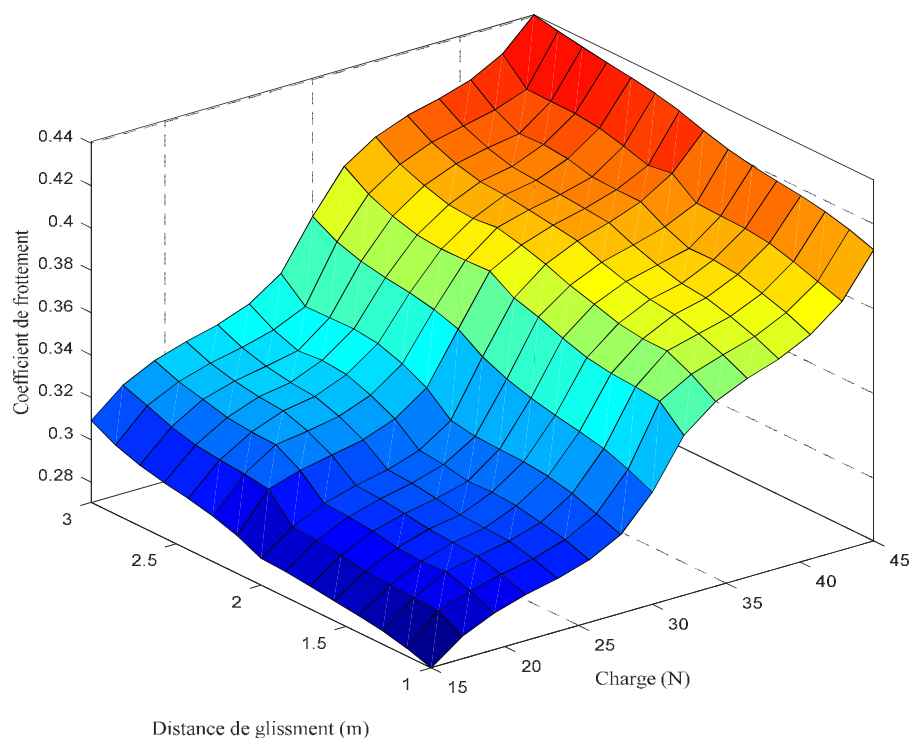
À une distance de glissement particulière, la quantité d'usure augmente avec l'augmentation de la longueur de fibre et de la charge normale en raison respectivement d'une liaison faible et d'une pénétration élevée.



(a)



(b)



(c)

Figure III.22 Variation du coefficient de frottement prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres individuels des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

- Le schéma (a) représente la variation du coefficient de frottement en fonction de charge normale et longueur de fibre,
- Le schéma (b) représente la variation du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement et longueur de fibre,
- Le schéma (c) représente la variation du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement et charge normale.

La figure III.22 illustre l'influence des paramètres individuels sur le coefficient de frottement des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

De la figure III.22 (a) (b) et (c) on constate que les valeurs du coefficient de frottement deviennent maximales pour des valeurs maximales de la longueur de fibre, la charge normale, et la distance de glissement. Au fur et à mesure que la charge appliquée augmentait de 15 à 45 N, le coefficient de frottement du composite époxy augmente proportionnellement en raison de l'augmentation des forces de frottement à l'interface. Lorsque la longueur des fibres augmente le coefficient du composite époxy augmente également. L'augmentation du

coefficient du matériau composite avec l'augmentation de la longueur des fibres peut être attribuée à la ténacité du matériau composite. La ténacité du matériau composite à fibres naturelles augmente avec l'augmentation de la longueur des fibres. Lorsque la distance de glissement est passée de 1 à 3 m, le coefficient de frottement du composite époxy a également augmenté.

III.11.4 Validation des résultats

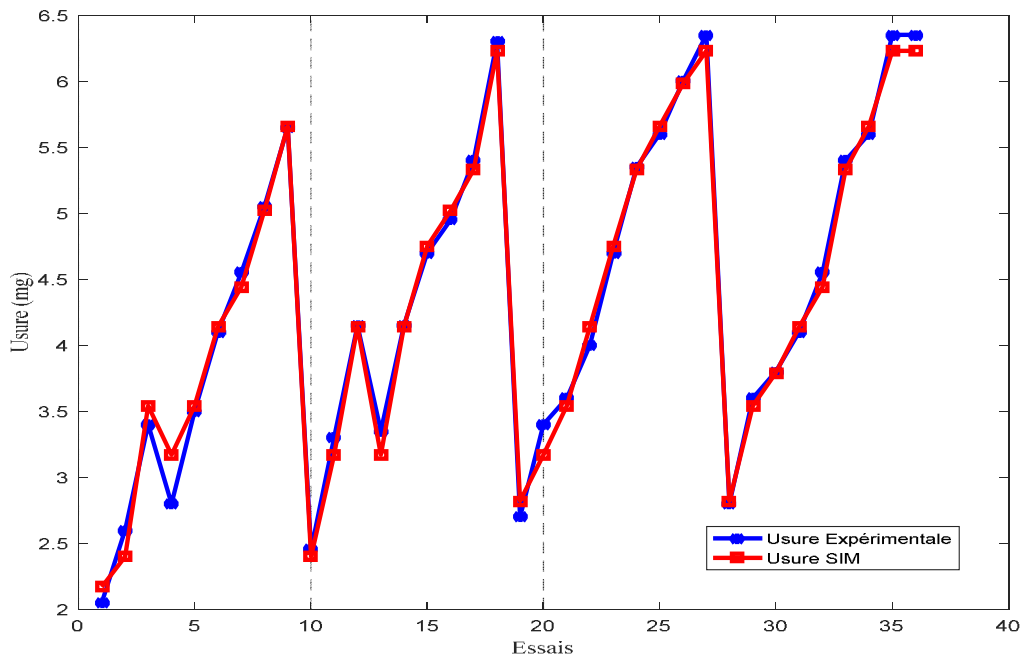


Figure III.23 Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux de quantité d'usure des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

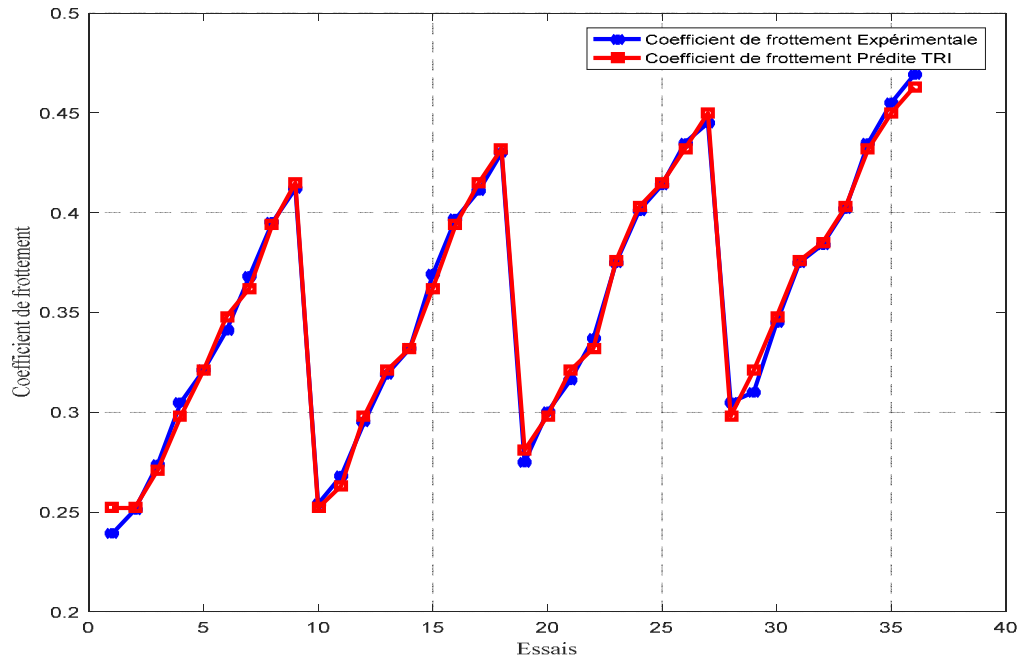


Figure III.24 Comparaison de la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats expérimentaux du coefficient du frottement des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

Les figures III.23 et III.24 montrent que le modèle proposé est capable de prédire avec précision la quantité d'usure et du coefficient de frottement des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles. 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 la quantité d'usure et du coefficient de frottement des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles pour une plage spécifique de paramètres.

III.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé un modèle mathématique pour la modélisation prédictive du comportement tribologique des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles en se basant sur le travail expérimental [23]. Les valeurs prédites sont en bon accord avec les valeurs expérimentales réelles avec une précision de 97,60% pour la quantité d'usure et de 98,88% pour le coefficient de frottement des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif de notre travail a été de prédire le comportement tribologique des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles

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

- La quantité d'usure et le coefficient de frottement ont augmenté avec l'augmentation de la charge normale, la longueur de fibre et de la distance de glissement.
- La charge normale a un impact plus important sur les caractéristiques tribologiques que la distance de glissement et la longueur de fibre
- La longueur de fibre de 5 mm a produit de bons résultats tribologiques que ceux de 10, 15 et 20 mm. Par conséquent, une longueur de fibre de 5 mm peut être considérée comme la meilleure longueur de fibre parmi les longueurs de fibre de 5 à 20 mm pour les meilleures performances tribologiques
- Le modèle flou utilisé, pour la prédiction du comportement tribologique des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles, 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 97,60% pour la quantité d'usure et de 98,88% pour le coefficient de frottement des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. 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 Faculté des Sciences et de la Technologie, 2016.
- [2]. K. Rouam, Elaboration, Caractérisation Mécanique et Hygrothermique d'un Stratifié Renforcé par des Fibres Naturelles, Université M'hamed Bougara – Boumerdes, Faculté des Sciences de l'ingénieur, 2014.
- [3]. A. Debouze, A. Kelaiaia, Commande Floue des Machines Electriques, Université 8 Mai 1945 – Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Electrotechnique et Automatique , 2019.
- [4]. F. Neghar, Etude des Propriétés Thermiques d'un Matériau Composite à Matrice Polymère, Université de Mohamed Seddik Ben Yahia-Jijel, Faculté des Sciences Exactes et Informatique Département de physique, 2020.
- [5]. M.Tahar, Etude de l'endommagement dans un Composite Stratifié, Université Abdel-Hamid Ibn Badis de Mostaganem Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Mécanique, 2012.
- [6]. W. Toumi, Optimisation de la Configuration des Tubes en Matériaux Composites sous Pression , Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des sciences et de la technologie Département de Génie Mécanique, Année universitaire : 2019.
- [7]. G.Laurent, Généralités sur les Matériaux composites. Engineering school. 2008. cel-00470296v1.
- [8]. 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, Faculte de Genie de la Construction Département de Génie Mécanique.

- [9]. N.Mahmoudi., Etude et modélisation du comportement mécanique des matériaux composites, Université de Mostaganem Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Mécaniques, 2010.
- [10]. R. Zenaseni, "Influence du vieillissement hygrothermique sur le comportement à la rupture des composites à matrice thermoplastique", thèse de doctorat; Université des Sciences et de la Technologie Oran.
- [11]. F.Baala, N. Ouhnane , Matériaux Composites , Filière de licence fondamentale Science de la Matière Physique , 2018.
- [12]. G.Yaich, Z.Chahud Jillali, Rapport à propos les composites et nanocomposites, Université Hassan II Faculté des Sciences et Techniques Mohammedia, 2019.
- [13]. Y.Ben Mlik, Valorisation des fibres de kénaf dans des applications textiles et paratextiles, Université de Monastir Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir.
- [14]. I.idir, Boucherguine. Amazigh, Préparation et caractérisation des composites à base d'un renfort végétale méditerranéen, Université Abderrahmane Mira-BEJAIA Faculté de Technologie Département de Génie des Procédés, 2019.
- [15]. L.Kherbouche, Introduction aux modalisations et aux méthodes de calcul des matériaux composites, université mouloud Mammeri Tizi-Ouzou Faculté de Génie de la construction Département génie Mécaniques, 2010.
- [16]. ViVi Do Thi. Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non. Alimentation et Nutrition. Université de Grenoble; Université des Sciences Naturelles d'Ho Chi Minh Ville, 2011. Français. NNT: 2011GRENA012. tel-00652477.
- [17]. H.Pulikkalparambil,S.MavinkereRangappa,S.Siengchin1, and Jyotishkumar. Parameswaranpillai, 1King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Department of Mechanical and Process Engineering, The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering (TGGS).
- [18]. F.Bendourou, Evaluation de la faisabilité de l'utilisation de différents types de fibres cellulosiques traités Enzymatiquement pour la valorisation de l'acide poly-lactique (pla), université du québec institut national de la recherche scientifique centre eau terre environnement, 2018.
- [19]. I.Ali Soucha, W.Bouziane., Etude et caractérisation d'un matériau composite à base de fibre végétal, Université Mohamed Boudiaf – M'sila, 2020.

- [20]. M.Habibi, Développement et caractérisation de nouveaux composites hybrides ud lin/ papier et ud lin/mat lin, l'université du québec à trois-rivières, janvier 2016.
- [21]. L.Yahiaoui, Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss), Universite Ferhat Abbas-Setif- Ufas (Algerie), 2011.
- [22]. D.Kouidri, M.Madani, L'étude de l'effet alcalin sur les propriétés des fibres naturelles, University of M'sila, 2019 / 2020.
- [23]. R.Egala, GV.Jagadeesh,S.Gangi SETTI, Experimental investigation and prediction of tribological behavior of unidirectional short castor oil fiber reinforced epoxy composites, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Raipur, Chhattisgarh 492010, India Department of Mechanical Engineering, Gudlavalleru Engineering College, Gudlavalleru, Andhra Pradesh 521356, India Received: 14 March 2019 / Revised: 07 May 2019 / Accepted: 28 September 2019.
- [24]. K K. Basumatary, N.Mohanta,S K. Acharya. Effect of fiber loading on abrasive wear behaviour of Ipomoea carnea reinforced epoxy composite. Int J Plast Technol 18(1): 64–74.
- [25]. B F.Yousif, Lau S T W, Mc William S. Polyester composite based on betelnut fibre for tribological applications. Tribol Int 43(1–2): 503–511 (2010).
- [26]. <https://franck-dernoncourt.developpez.com/tutoriels/algo/introduction-logiqufloue/>
- [27]. C.PAGANI, A.SADAoui, S.CHABOT, Introduction à la logique floue, université de technologie compiègne, 2011.
- [28]. F. Malika, Commande par logique floue type -2-appliquée à la machine asynchrone, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA , JUIN 2016.
- [29]. I.Bouba, R.Ounis, Commande de la température d'eau d'un bain par un contrôleur à Logique Floue, Université Larbi Ben Mhidi Oum el Bouaghi Faculté des sciences et technologie Département d'électronique, 2009/2010.
- [30]. s. Boukaka, Réalisation d'une bibliothèque de lois de commande adaptative pour msap, Université du québec, septembre 2015.
- [31]. A. Bouraiou, diagnostic de Défauts par logique floue, universite Badji mokhtar annaba, Année 2010.

- [32]. M.Skendraoui., S.Sehad., Commande floue basée sur le mode glissant d'un Pendule inversé, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2015.

Résumé

Le spectre d'application des composites époxydes renforcés de fibres naturelles a considérablement augmenté en raison du comportement tribologique amélioré. Un modèle d'inférence flou à été élaboré afin d'étudier le comportement tribologique des composites époxydes renforcés par des fibres naturelles. Les valeurs prédites, avec ce modèle flou, sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, avec une précision de 97,60% pour la quantité d'usure et de 98,88% pour le coefficient de frottement

Mots clés : composites époxydes, fibres naturelles, comportement tribologique, modèle flou.

Abstract

The application spectrum of epoxy composites reinforced with natural fibers has increased significantly due to improved tribological behavior. A fuzzy inference model has been developed to study the tribological behavior of epoxy composites reinforced with natural fibers. The predicted values, with this fuzzy model, are in good agreement with the experimental values, with an accuracy of 97.60% for the amount of wear and 98.88% for the coefficient of friction.

Keywords: epoxy composites, natural fibers, tribological behavior, fuzzy model

ملخص

زاد طيف استخدام مركبات الايبوكسي المقواة بالألياف الطبيعية بشكل ملحوظ بسبب تحسن السلوك الترابيولوجي. تم تطوير نموذج الاستدلال الغامض لدراسة السلوك الترابيولوجي لمركبات الايبوكسي المقواة بالألياف الطبيعية. تتوافق القيم المتوقعة مع هذا النموذج الضبابي مع القيم التجريبية بدقة 97.60% لمقدار التآكل و 98.88% لمعامل الاحتكاك.

الكلمات المفتاحية: مركبات الإيبوكسي ، ألياف طبيعية ، سلوك ترابيولوجي ، نموذج ضبابي