

**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 : Khaled Khelifa**

Hicham Mezouar

*Thème*

**Prédiction des paramètres opératoires pour l'abrasion du  
composite polymère renforcé de fibres naturelles**

Soutenue le: /06/2023

Devant le jury :

GUEBAILIA Moussa	MCA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Président
REZGUI Imane	MCA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Encadreur
KHEIREDDINE Abdelaziz	MCB	Université Kasdi Merbah Ouargla	Examineur

Année universitaire : 2022/2023

## *REMERCIEMENT*

*Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant qui nous a donné le courage et la volonté d'atteindre notre objectif.*

*Un grand merci à notre encadreur, Mme **R.Imane**, pour avoir suggéré ce sujet et pour son suivi continu tout au long de l'investigation de cette thèse, et pour n'avoir cessé de nous prodiguer de précieux conseils.*

*Nous tiens aussi à remercier : Mr. **GUEBAILIA Moussa** pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il n'a fait en présidant le jury.*

*Nos remerciements vont également à : Mr. **KHEIREDDINE Abdelaziz** pour s'être intéressé à ce travail et d'avoir bien voulu n'honorer de leur présence dans ce jury.*

*Nous remercions aussi à tous les enseignants, du département de Génie Mécanique, qui ont contribué à notre formation.*

*Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à nos familles pour leur soutien moral et matériel.*

**Merci à tous**

## *DÉDICACES*

*A mes parents aimants, qui ont été mes piliers de soutien tout au long de ce parcours académique, cette mémoire est dédiée. Votre amour inconditionnel, votre amour encouragement constant et vos sacrifices ont été ma source d'inspiration et de motivation. Je suis reconnaissant pour votre soutien indéfectible.*

*A mes mentors et professeurs, qui m'ont guidé et encouragé avec sagesse et expertise, je vous dédie cette mémoire.*

*Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à cette mémoire, je vous exprime ma gratitude sincère. vos idées, vos commentaires et votre appui ont enrichi mon travail et ont contribué à son aboutissement.*

---

# Table des matières

Remerciement.....

Dédicaces .....

Leste des figures .....

Liste des tableaux .....

Nomenclature.....

Introduction générale 1

## Chapitre I Étude bibliographique

I.1 Introduction..... 3

I.2 Définition du matériau composite ..... 3

I.3 Les constituants des matériaux composites ..... 4

    I.3.1 Matrices ..... 4

    I.3.2 Renfort ..... 4

I.4 Diffèrent types de matrices..... 5

    I.4.1 Matrices organiques ..... 5

        [1]. Résines thermoplastiques..... 5

        b. Résines thermodurcissables ..... 5

        c. Résines polyesters ..... 5

        d. Résine époxyde ..... 5

        e. Résine phénolique ..... 6

        f. Résine thermostable ..... 6

        g. Résine vinylesters ..... 6

    I.4.2 Matrices céramiques ..... 7

I.5 Diffèrent types de renforts ..... 8

---

I.5.1 Fibres de verre.....	8
I.5.2 Fibres aramides .....	8
I.5.3 Les fibres de carbone .....	8
I.5.4 Les fibres naturelles .....	9
I.6 Les avantages des matériaux composites .....	9
I.7 Elaboration des matériaux composites .....	10
I.7.1 Moulage au contact .....	10
I.7.2 Moulage par projection simultanée .....	11
I.7.3 Moulage par compression .....	12
I.7.4 Moulage sous vide .....	14
I.8 Caractéristiques mécanique des matériaux composites .....	14
I.9 Conclusion.....	15

## **Chapitre II**

### **Matériaux composites à fibres naturelles**

II.1 Introduction.....	16
II.2 Matériaux composites à matrice polymère .....	16
II.2.1 Matrice .....	16
II.2.2 Composites poly (alcool vinylique)/fibres naturelles .....	17
II.3 Matériaux composites à fibres naturelles .....	18
II.3.1 Fibre Naturelle .....	18
II.3.2 Matières d'origine naturelle.....	18
a. Matières d'origine végétale .....	18
b. Matière d'origine animale .....	19
c. Matières d'origine minérale .....	20
II.4 Les avantages des matériaux composites à fibres naturelles .....	20

---

II.5 Fibres de la gaine d'arec .....	20
II.5.1 Présentation de cette plante .....	20
II.5.2 Extraction de fibres de la gaine d'arec .....	21
II.6 Elaboration des matériaux composites a fibres de la gaine d'arec .....	22
II.7 Paramètres tribologiques des matériaux composites à fibres de la gaine d'arec..	23
II.7.1 Essai d'usure abrasive .....	23
II.7.2 La dureté Barcol.....	25
II.8 Conclusion .....	26

## **Chapitre III**

### **Prédiction des paramètres opératoires pour l'abrasion d'un composite**

III.1 Introduction .....	27
III.2 La Logique floue .....	27
III.2.1 Le principe .....	27
III.2.2 Fonction d'appartenance .....	28
III.2.3 Variables linguistiques .....	28
III.2.4 Structure d'un système de commande floue .....	29
III.3 Données expérimentales.....	29
III.3.1 Système flou.....	31
III.3.2 Modélisation floue.....	31
a. Les variables flous.....	31
b. Les sous-ensembles flous.....	34
III.3.3 Les règles floues .....	38
III.4 Résultats et discussion.....	40

---

III.4.1 Etude de la précision et de l'erreur du système flou.....	40
III.4.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance trapézoïdales et triangulaires.....	41
III.4.3 Représentation schématique des résultats.....	45
III.5 Conclusion.....	50
Conclusion Générale.....	51
Références Bibliographiques.....	52

---

## Liste des Figures

<p style="text-align: center;"><b>Chapitre I</b> <b>Étude bibliographique</b></p>		
Figure I.1	Représentation schématique d'un matériau composite .....	3
Figure I.2	Type de matrice .....	4
Figure I.3	Types de renfort .....	4
Figure I.4	Illustrations de certaines formes commercialisées de fibres de carbone .....	9
Figure I.5	Principe du moulage au contact .....	10
Figure I.6	Principe du moulage par projection simultanée .....	12
Figure I.7	Principe du procédé Carbone Forgé de moulage par compression à chaud et par voie sèche .....	13
<p style="text-align: center;"><b>Chapitre II</b> <b>Matériaux composites à fibres naturelles</b></p>		
Figure II.1	Formule de l'alcool polyvinylique .....	17
Figure II.2	Classement des fibres naturelles .....	18
Figure II.3	Exemples de fibres végétales : (a) Lin, (b) Coton, (c) Areca .....	19
Figure II.4	Exemples de fibres animales : (a) laine, (b) cachemire, (c) soie .....	19
Figure II.5	Plantation de noix d'arec .....	21
Figure II.6	Machine d'essai d'usure Pin-on-disc .....	24
Figure II.7	Impressor Barcol .....	25
<p style="text-align: center;"><b>Chapitre III</b> <b>Prédiction des paramètres opératoires pour l'abrasion d'un composite</b></p>		
Figure III.1	Fonctions d'appartenance régulières .....	28

Figure III.2	Structure de la logique floue comme contrôleur d'un système .....	29
Figure III.3	Système floue pour le composite PVA/AS .....	31
Figure III.4	Variables Linguistiques pour la charge .....	32
Figure III.5	Variables Linguistiques pour la vitesse de glissement .....	32
Figure III.6	Variables Linguistiques pour le Remplissage .....	33
Figure III.7	Variables Linguistiques pour Taux d'usure spécifique .....	33
Figure III.8	Variables Linguistiques pour coefficient de friction .....	34
Figure III.9	Variables Linguistiques pour la Dureté .....	34
Figure III.10	Les fonctions d'appartenance triangulaires (les paramètres d'entrées) (A), (B), (C). .....	35
Figure III.11	Les fonctions d'appartenance triangulaires (les paramètres sortie) (A), (B), (C). .....	36
Figure III.12	Les fonctions d'appartenance trapézoïdales (les paramètres d'entrées) (A), (B), (C). .....	37
Figure III.13	Les fonctions d'appartenance trapézoïdales (les paramètres sortie) (A), (B), (C). .....	38
Figure III.14	Variation de Taux d'usure (trapézoïdale et triangulaire) en Fonction du nombre essais.....	41
Figure III.15	Variation de Coefficient de friction (trapézoïdale et triangulaire) en Fonction du nombre essais.....	42
Figure III.16	Variation de la Dureté (trapézoïdale et triangulaire) en Fonction du nombre essais.....	43
Figure III.17	Variation du Taux d'usure spécifique prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres opératoire de composite PVA/AS.....	46
Figure III.18	Variation du coefficient de frottement prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres opératoire de composite	47

	PVA/AS.....	
Figure III.19	Variation de la dureté de Barcol prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres opératoire de composite PVA/AS.....	49

## Liste des tableaux

<b>Chapitre I</b>		
<b>Etude bibliographiques</b>		
Tableau I.1	Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées .....	6
<b>Chapitre II</b>		
<b>Matériaux composites à fibres naturelles</b>		
Tableau II.1	Propriétés du PVA .....	17
<b>Chapitre III</b>		
<b>Prédiction des paramètres opératoires pour l'abrasion d'un composite</b>		
Tableau III.1	Données expérimentales du composite de PVA/AS .....	30
Tableau III.2	Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour Le système flou composite PVA/AS.....	32
Tableau III.3	Les règles floues pour les fonctions d'appartenance triangulaires .....	39
Tableau III.4	Les résultats du système flou pour le composite PVA/AS.....	44

---

## Nomenclature

Symbol	Unite	Designation
AS		Fibres de La Gaine D'arec
ASTM		Société Américaine Pour Les Essais Des Matériaux
CH	(N)	La Charge
CMC		Computer Mediated Communication
F		Coefficient de Frottement
$F_n$	(N)	La Charge Normale
$F_f$	(N)	La Force de Frottement
GD		Gelcoat Doux
H	(B)	La Dureté
ISO		L'organisation Internationale De Normalisation
PAN		Poly Acrylonitrile
PVA		Poly- Alcool-Vinylique
PVC		Polychlorures de Vinyle
SACMA		L'association des Matériaux Composites Avancés
$S_d$	(m)	La Distance de Glissement
TD		Résine Thermodurcissable
TR	(%)	Taux de Remplissage
UV		Ultraviolet Radiation
VG	(m/s)	La Vitesse de Glissement
$W_s$	(m <sup>3</sup> /Nm)	Le Taux d'usure Spécifique
$\Delta W$	(kg)	La Perte de Poids
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> ).	La Densité du Composite

# *Introduction Générale*

---

# Introduction générale

L'avenir des composites réside dans l'élaboration de pièces performantes à la fois légères et respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte d'écoconception, de nouveaux matériaux écoresponsables sont de plus en plus utilisés pour développer des composites innovants, pouvant remplacer les matériaux petro-sourcés dans de nombreuses applications industrielles. Dans l'industrie des transports ainsi que dans l'industrie du sport et des loisirs, des composites avec renforts synthétiques (notamment les fibres de verre) et résine thermodurcissable (entre autres polyester) pourraient idéalement faire place à des composites renforcés par des fibres naturelles, d'origine minérale et/ou végétale, avec une matrice thermoplastique, biodégradable et/ou recyclable [1].

L'utilisation croissante de fibres végétales comme renforts dans les composites à matrices thermodurcissables ou thermoplastiques fournit des avantages environnementaux très intéressants. Les caractéristiques marquantes de ces fibres sont leur faible coût, faible masse, haut module spécifique. Le défi majeur dans l'utilisation de ces fibres comme éléments de renforcement dans les matériaux composites est de réaliser une bonne liaison entre les fibres et la matrice polymère. Les fibres naturelles sont de nature hydrophile, car elles sont dérivées de la cellulose, qui contient des groupes hydroxyles fortement polarisés. La mauvaise adhérence interfaciale fibre/matrice et les difficultés dans le mélange en raison de mauvais mouillage de la fibre avec la matrice limitent l'utilisation de ces fibres comme matière de renforcement dans les matériaux bio-composites [2].

La recherche de matériaux composites innovants et respectueux de l'environnement est devenue une préoccupation majeure dans de nombreux domaines de l'industrie. Les composites polymères renforcés de fibres naturelles sont une alternative prometteuse aux composites traditionnels, grâce à leurs propriétés mécaniques et leur faible impact environnemental. Cependant, leur utilisation dans des applications industrielles nécessite une compréhension approfondie de leur comportement lors des opérations d'usinage, en particulier lors de l'abrasion.

Les performances tribologiques du polymère et de ses composites sont généralement sensibles aux conditions de fonctionnement et d'essai. Par conséquent, les tests expérimentaux pour prédire le comportement de frottement et d'usure sont complexes en raison des nombreux

paramètres de test qui peuvent affecter les propriétés tribologiques. Cela devrait être attendu en raison de la diversité des paramètres qui dictent les propriétés de frottement et d'usure des polymères, y compris la structure moléculaire du polymère, le traitement et le traitement, les propriétés, le comportement viscoélastique, le caractère de surface, les propriétés de surface de contact, la texture de surface et les conditions environnementales et de fonctionnement [3].

Dans ce contexte, la prédiction des paramètres opératoires est essentielle pour optimiser l'efficacité de l'usinage et minimiser les coûts de production.

Comme l'usure par abrasion représente presque plus de 60 % de tous les coûts dans les secteurs industriels, ce qui en fait un type d'usure important et est devenu un sujet d'attraction pour de nombreux chercheurs [4].

L'objectif principal de tous les chercheurs est d'obtenir de meilleures propriétés tribologiques pour différents mélanges de paramètres de fonctionnement qui peuvent être obtenus en utilisant la combinaison optimale de paramètres de fonctionnement [5].

De nombreux chercheurs ont déjà étudié l'usure par abrasion des composites fibres-polymères, Une faible résistance à l'usure est observée pour les composés avec des tailles de particules et des charges abrasives plus importantes. Notez également que l'usure par abrasion a été considérablement affectée par la charge et la distance de glissement [5].

L'objectif de ce mémoire est de prédire l'effet principal des paramètres de fonctionnement sur l'usure par abrasion des composites a fibres naturelles.

Dans ce but, notre document est articlé sur trois chapitres :

- Dans le **premier chapitre** est présenté généralités sur les matériaux composites
- **Le second chapitre**, Présenté les matériaux composites à fibres naturelles.
- En fin, **le troisième chapitre**, Les résultats de simulation et les discussions du cette étude.

# *Chapitre I*

## *Étude bibliographique*

---

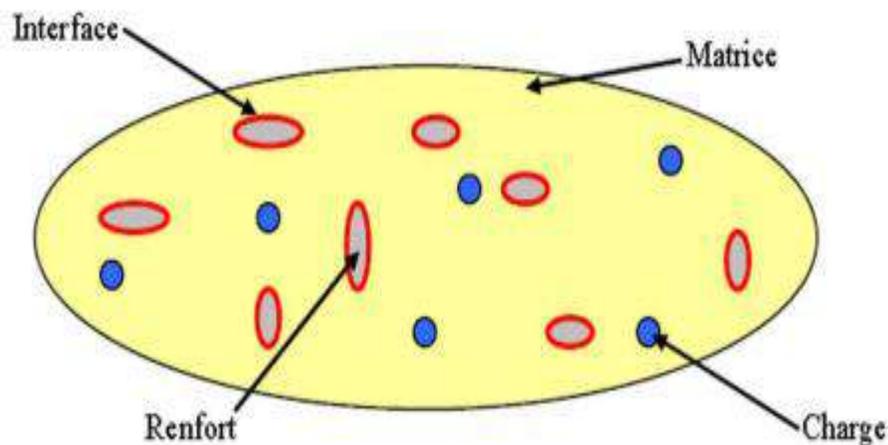
## I.1 Introduction

Les matériaux composites offrent de nombreux avantages, tels que leur haute résistance, leur légèreté, leur résistance à la corrosion, leur faible dilatation thermique et leur capacité à être adaptés à de formes complexes ces caractéristiques les rendent idéaux pour remplacer les matériaux traditionnels, tels que les métaux, dans de nombreuses applications.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les matériaux composites et la plupart de leurs définitions et informations.

## I.2 Définition

Le terme « matériau composite » désigne un matériau solide et hétérogène, formé de plusieurs composants distincts, dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants considéré ne possède séparément. La réalisation d'un matériau composite nécessite donc l'association d'au moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser. Pour cela, un agent de liaison, appelé interface, est nécessaire (Figure I.1). Des charges et des additifs peuvent être ajoutés au composite sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, afin de modifier une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, la résistance au feu...) [6].

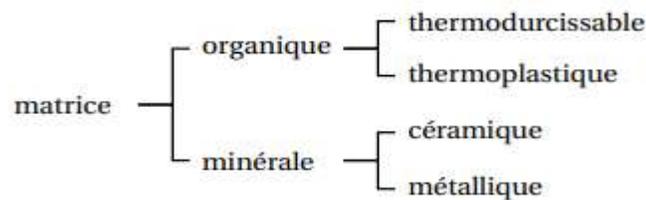


**Figure I.1:** Représentation schématique d'un matériau composite [7].

### I.3 Les constituants des matériaux composites

#### I.3.1 Matrices

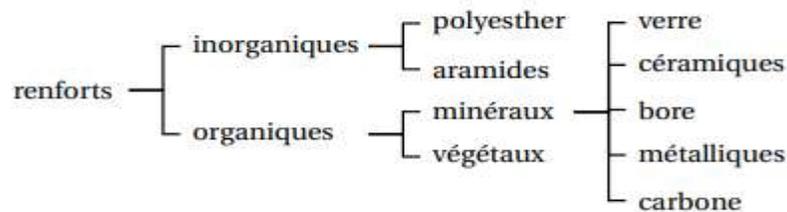
Dans un matériau composite, le terme matrice désigne la matière solide qui entoure les renforts pour former une masse compacte. Le premier rôle de la matrice est de maintenir les renforts dans une forme compacte et de donner la forme voulue au produit final. Elle sert également à protéger les fibres contre l'abrasion et un environnement agressif, contrôler le fini de surface et assurer le transfert de charges entre les fibres. Le solide formant la matrice peut être d'origine métallique, céramique ou polymère [7].



**Figure I.2 :** Type de matrice [8].

#### I.3.2 Renfort

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). La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure I.3 [8].



**Figure I.3 :** Types de renfort [8].

## **I.4 Différent types de matrices**

### **I.4.1 Matrices organiques**

Les deux types de résines qui sont, actuellement, utilisées présentent des propriétés foncièrement différentes :

#### **a. Résines thermoplastiques**

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B [8].

#### **b. Résines thermodurcissables**

Les résines Thermodurcissables (TD) sont, en général, associées à des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se ponte (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. La transformation est irréversible [9].

Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

#### **c. Résines polyesters**

Les polyesters insaturés sont les résines les plus utilisées dans les applications GD. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide plus polyalcool qui se rigidifie sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficiles à stocker [9].

#### **d. Résine époxyde**

C'est la plus utilisée dans l'aéronautique ; elle présente un bon accrochage sur les fibres et de bonnes propriétés mécaniques. Elle possède de bonnes propriétés jusqu'à une température de 170°C mais elle est plus coûteuse que la résine polyesters [9].

### e. Résine phénolique

Les résines phénoliques sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre [9].

### f. Résine thermostable

Polymère présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000 Heures sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques [9].

### g. Résine vinylesters

Les vinylesters sont des dérivés de polyesters et d'acide acrylique ; ils ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles [9].

Les propriétés mécaniques des principaux types de matrices organiques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau I.1** : Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées [9].

	Masse spécifique (kg/m <sup>3</sup> )	Module Elasticité (Gpa)	Résistance Traction (MPa)	Module d'allongement Rupture (%)	Tenue à la Température en Continu (°C)
Polyester	1.2	2.9-3.1	50-60	2-3	120
Epoxyde	1.1-1.4	3	50-120	3-8	150-200
Vinylester	1.1	3.4-3.5	70-85	2-5	100-140
Polyamide	1.4-1.5	4-20	30-40	<1	250-300
Phénolique	1.3	3.8-7	50	1-1.5	120-150

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 [10].

#### **I.4.2 Matrices céramiques**

Les processus de fabrication sont complexes et doivent être soigneusement optimisés en raison de la sensibilité inévitable des propriétés des matériaux aux microstructures contrôlées par les conditions de traitement et les interactions. Une grande partie des travaux récents sur les CMC aux États-Unis, au Japon et en Europe a largement suivi des voies relativement familières en tentant de renforcer les verres (comme les borosilicates) et les vitrocéramiques (comme l'aluminosilicate de lithium ou LAS et l'aluminosilicate de calcium ou CAS) avec des fibres telles que les variétés commerciales Nicalon et Tyranno de carbure de silicium. Des améliorations substantielles des propriétés mécaniques ont été obtenues, par rapport aux premières composites fibres de carbone/verre [11].

Les fibres sont généralement imprégnées d'une bouillie de fine poudre de verre et ensuite pressées à chaud. Si la matrice est une vitrocéramique, la dernière étape de la fabrication est le processus de « céramisation », les traitements thermiques finaux pour convertir le verre en une céramique entièrement dense [11].

Des entreprises comme Corning aux États-Unis proposent de tels matériaux à la vente commerciale. Un contrôle critique des conditions de fabrication est nécessaire pour produire des conditions interfaciales appropriées pour la combinaison optimale de résistance et de ténacité. L'avantage de la voie vitrocéramique est que des températures de traitement relativement modestes sont impliquées bien que même ainsi, une contrainte thermique résiduelle typique de l'ordre de seulement 200 MPa puisse encore être suffisante pour provoquer une fissuration de la matrice dans des composites tels que fabriqués ou légèrement chargés. Une grande partie de la recherche sur les céramiques renforcées par des monofilaments comme les matériaux français SiC/SiC, par exemple, et sur la production de composites carbone/carbone, a été orientée vers l'infiltration chimique en phase vapeur (CVI) et les processus associés. Les quantités commerciales de ces matériaux ont été disponibles depuis un temps considérable, bien que le

CVI soit normalement un processus très lent et que les composants produits de cette manière soient très coûteux [11].

## **I.5 Différent types de renforts**

### **I.5.1 Fibres de verre**

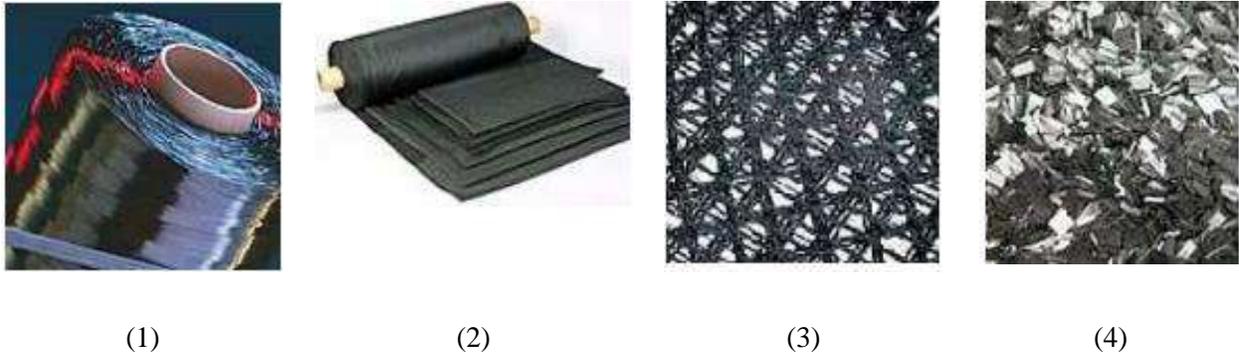
Les fibres de verre sont moins chères que les fibres de carbone et les fibres d'aramide. Par conséquent, les composites en fibres de verre sont devenu la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, tel que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'automobiles. Les modules d'élasticité des fibres sont de 70 à 85 Gpa avec un allongement ultime de 2 à 5 % selon la qualité. Par contre les fibres de verre peuvent avoir des problèmes de relaxation. Elles sont aussi sensibles à l'humidité, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont protégées [12].

### **I.5.2 Fibres aramides**

Appelés aussi polyamide aromatique, une marque bien connue des fibres d'aramide est « kevlar » mais il existe d'autres marques aussi tel que « Twaron », « Techno ra », et « SVM ». Les modules d'élasticité de ces fibres sont de 70 à 200 Gpa avec une haute énergie de fracture et un allongement ultime de 1,5 à 5 % selon la qualité. Les fibres d'aramide sont sensibles aux températures élevées, à l'humidité et aux radiations « ultra-violet » et par conséquent, ne sont pas largement utilisées dans les applications de génie civil. Plus loin, les fibres d'aramide ont des problèmes avec la relaxation et la corrosion, mais avec une bonne résistance au choc et à la fatigue [12].

### **I.5.3 Les fibres de carbone**

Les fibres de carbone sont des fibres synthétiques, de la famille des fibres minérales artificielles (FMA) non siliceuses. Elles sont produites à très haute température (1200°C) par trois types de procédés : carbonisation de rayonne (cellulose régénérée), de brai (goudron de houille ou résidu de pétrole) ou, le plus souvent, de poly acrylonitrile (PAN). Lorsque la pyrolyse est poursuivie (2500-3000°C), on obtient des fibres de graphite [13].



**Figure I.4 :** illustrations de certaines formes commercialisées de fibres de carbone [13].

Les fibres de carbone de renforcement se sont développées principalement à partir de PAN (Dupupet G., 2008). En France, le seul site auditionné producteur de fibres de carbone (Soficar) produit des fibres de carbone à partir de ce précurseur (fibres de carbone ex-PAN). [13]

#### I.5.4 Les fibres naturelles

Ces fibres sont de plus en plus nombreuses sur le marché. Elles peuvent être extraites de matériaux fibreux, comme le chanvre, le lin, le sisal,... et possèdent alors des propriétés de type isotrope transverse. Ces fibres peuvent également être obtenues par polymérisation de chaînes de monomères naturelles telles que la cellulose. Il s'agit alors de reconstituer les fibres par passage dans une filière. Cette dernière solution permet également de lever ce qui reste aujourd'hui encore comme le gros point bloquant de l'utilisation de ces fibres : la variabilité naturelle des dimensions et des propriétés de ces fibres. [14]

#### I.6 Les avantages des matériaux composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- leur légèreté.
- leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.
- La mise en forme des matériaux composites peut avoir lieu par des procédés manuels ou mécanisés. Dans l'ensemble, les outils nécessaires aux procédés mécanisés s'amortissent

en produisant en moyenne et grande série ; c'est pourquoi les procédés manuels sont plus adaptés à la petite série du point de vue économique.

- leur durée de vie : du fait de leur résistance, le matériau est durable et ne s'abîme pas ou peu avec le temps.
- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.

## I.7 Elaboration des matériaux composites

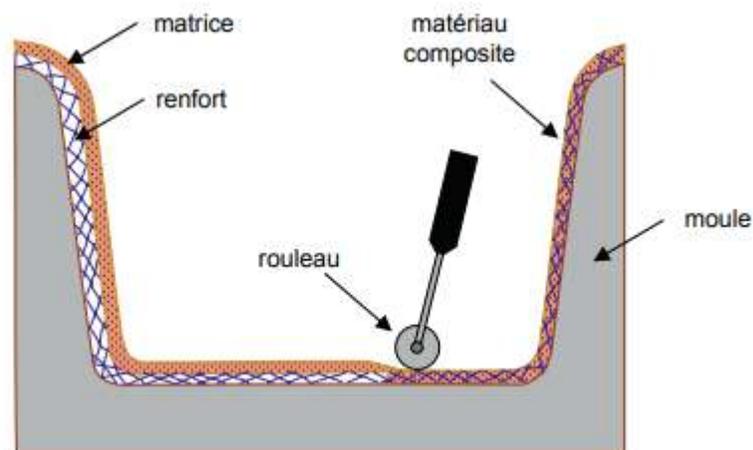
L'élaboration d'un matériau composite consiste en trois opérations indispensables qui sont :

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement du système :
  - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
  - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Le moulage reste le procédé le plus utilisé dans l'élaboration de matériaux composites, mais Il existe d'autres procédés aussi importants :

### I.7.1 Moulage au contact

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée « gel coat » [15].



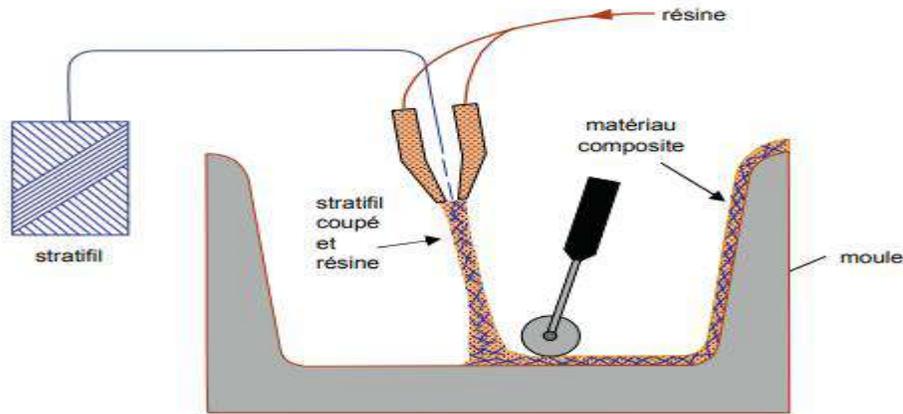
**Figure I.5** : Principe du moulage au contact [15].

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

- Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.
- Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
- Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé.
- Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.
- Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).
- La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).
- Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc. [15].

### **I.7.2 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 stratifil et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'en-semble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine 52 est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé [15].



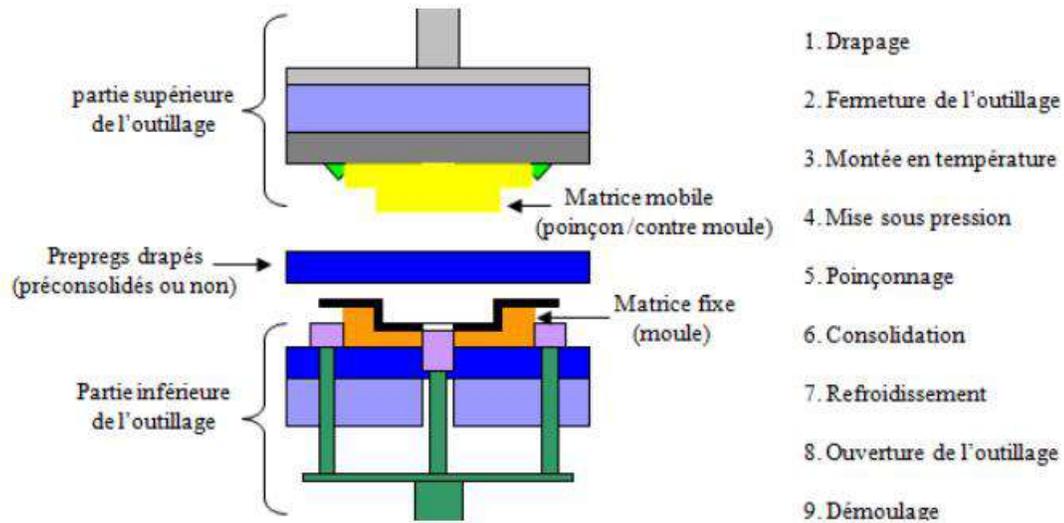
**Figure I.6 :** Principe du moulage par projection simultanée [15].

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes.

Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques [15].

### I.7.3 Moulage par compression

Schématisé à la figure I.7, ce procédé est du thermoformage sous presse et à chaud sur le même principe que ceux utilisés pour les métaux (emboutissage, estampage), sauf que les mécanismes de déformation des matériaux sont différents. C'est une technique de grande série puisque l'on part de semi-produits sans apport supplémentaire de matière. Le moulage s'opère selon quatre phases essentielles [16].



**Figure I. 7 :** Principe du procédé Carbone Forgé de moulage par compression à chaud et par voie sèche [16].

- Le chauffage du pré imprégné jusqu'à la fusion de la matrice : le pré imprégné est déposé dans un moule enduit d'un agent de démoulage, puis l'outillage est fermé et le prépare chauffé jusqu'à la température de fusion du polymère.
- La montée en pression s'enclenche peu avant la température de fusion pour la répartition du polymère fondu et un mouillage maximal des fibres. Une fois la résine liquéfiée, le contre moule (partie mobile) vient comprimer le pré imprégné jusqu'à atteindre une pression maximale selon une rampe appropriée.
- Le maintien sous pression et température maximales constantes pour polymérisation, réticulation et gel de la matrice. C'est le palier de consolidation.
- Le refroidissement du moule jusqu'à une température de démoulage (température en dessous de la quelle on observe plus de variations dimensionnelles). Puis le contre moule est ouvert afin d'accélérer le refroidissement.

#### **I.7.4 Moulage sous vide**

Ce procédé est encore appelé moulage sous dépression ou moulage au sac. Comme dans le cas du moulage au contact on utilise un moule ouvert sur lequel sont disposées les couches de renfort imprégné par voie humide ou pré-imprégné de résine. Une feuille de plastique souple vient couvrir le tout hermétiquement grâce à un joint d'étanchéité sur le périmètre de la pièce.

Le vide est fait sous cette feuille de plastique. Il y a alors compactage de la pièce, élimination des bulles d'air, fluage de l'excédent de résine qui est absorbé par un tissu de pompage.

L'ensemble est ensuite soumis à polymérisation soit en étuve pour les pièces de faible épaisseur et où la pression de compactage ne dépassera pas 0.8 bars, soit en autoclave pour les pièces épaisses et de structure et où la pression de compactage est comprise entre trois et sept bars pour les pièces de structure aéronautiques. Lors de cette étape, il faut faire attention à la différence des coefficients de dilatation thermique du moule et de la pièce afin d'éviter d'avoir des pièces coincées dans l'outillage ou déformées après démoulage [17].

#### **I.8 Caractéristiques mécanique des matériaux composites**

Les propriétés mécaniques constituent les principales propriétés étudiées des composites renforcés par des fibres naturelles. Ces propriétés comprennent la résistance, la rigidité, la ténacité, le cisaillement, la compression, la fatigue et le fluage [2].

La résistance mécanique des matériaux composites est évaluée par un certain nombre de méthodes d'essai qui sont mécaniquement simples du point de vue concept mais elles sont extrêmement sensibles à la préparation de l'échantillon et la procédure d'exécution du test [2].

Les tests mécaniques incluent principalement les essais de traction, de compression, de cisaillement, de flexion et de fatigue. Ces méthodes d'essai sont régies par les normes élaborées par la société américaine pour les essais des matériaux (ASTM), l'organisation internationale de normalisation (ISO) et l'association des matériaux composites avancés (SACMA) [2].

**I.9 Conclusion**

L'utilisation des matériaux composites s'est fortement développée en raison de leurs bonnes propriétés du point de vue de la qualité et du prix. Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu des matériaux composites en introduisant leur concept, les composants des matériaux composites, leur importance et le développement procédés des matériaux composites.

## *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 [18].

Dans ce chapitre, nous présentons des informations générales sur les matériaux composites à fibres naturelles, la définition des fibres de la gaine d'arc, la méthode d'extraction de ces fibres, ainsi que des informations générales et leurs propriétés.

## **II.2 Matériaux composites à matrice polymère**

### **II.2.1 Matrice**

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Elles limitent en générale la température d'utilisation du composite. Les résines doivent être compatible avec les fibres et avoir une déformabilité importante. Leur masse volumique faible permet de conserver des caractéristiques spécifiques élevées aux matériaux composites [19].

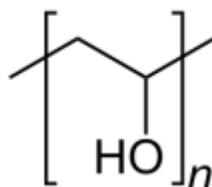
Les deux grandes familles de résine polymère sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques. Ces deux types de résine possèdent la faculté de pouvoir être moulés ou mis en forme, pour donner soit un produit fini, soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée. Après leur utilisation, les résines thermoplastiques peuvent être récupérées et facilement recyclées [19].

De plus ces résines présentent l'aptitude à l'état liquide de se mouler facilement par plasticité. Les résines thermodurcissables quand à elles ont la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. En effet, après polymérisation par apport de chaleur en présence d'un catalyseur, ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique. Ainsi, les résines thermodurcissables possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que les résines

thermoplastiques. De ce fait, elles sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites [19].

### II.2.2 Composites poly (alcool vinylique)/fibres naturelles

Les PVA commerciaux sont des polymères thermoplastiques hydrosolubles à 85°C sous forme d'une fine poudre blanche à jaunâtre selon leur degré d'oxydation. Ils sont obtenus par hydrolyse du poly (acétate de vinyle) par hydrolyse en milieu basique (soude) par un procédé dit en batch [20].



**Figure II.1** : Formule de l'alcool polyvinylique [20].

**Tableau II.1** : Propriétés du PVA [20].

	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Tg (°C)	Viscosité à 20°C (mPa.s)	Masse molaire Moyenne (g/mol)
<b>Alcool polyvinylique</b>	1,29±0,01	85	3-4	13 000 – 23 000

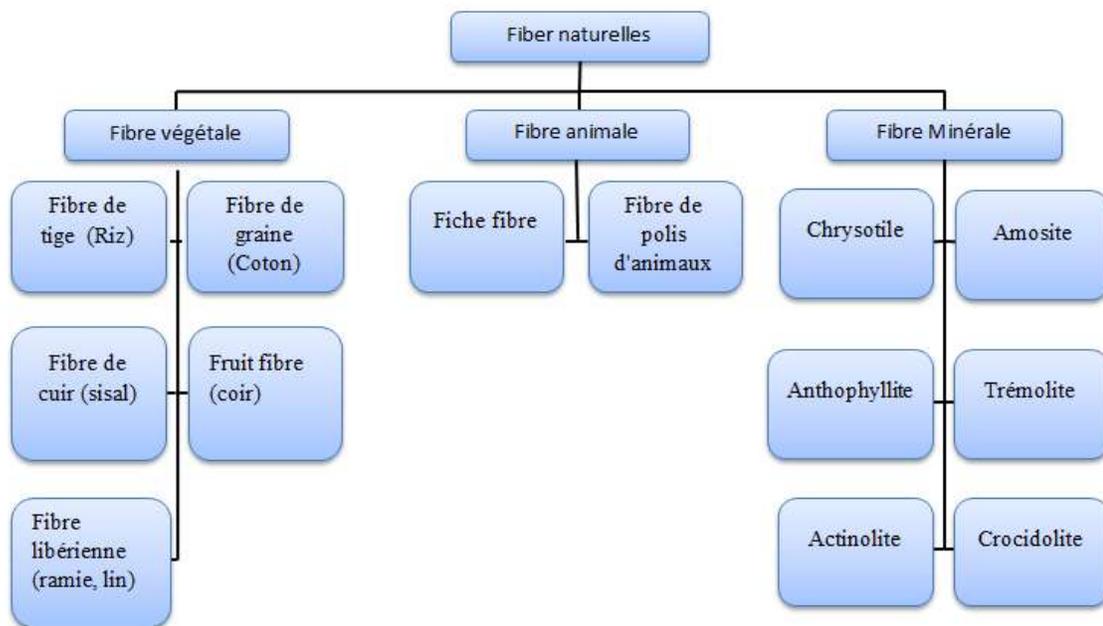
La combinaison de PVA avec des fibres naturelles forme des composites éco-durables. En particulier, leurs nano composites ont acquis une énorme popularité dans le monde entier en raison de leur microstructure unique et des propriétés supérieures. L'interaction ou la compatibilité du renforcement-matrice, la dispersion du renforcement dans la matrice et les propriétés de la matrice et du renforcement sont les quatre facteurs clés qui peuvent affecter la résistance des composites polymères. La présence de groupes -OH dans les fibres naturelles et leur nature hydrophile sont compatibles avec le PVA. Bonne interaction entre les fibres et le PVA a été observé sur de nombreuses micrographies, résultant en de bonnes propriétés composites et

des performances satisfaisantes. Les méthodes de traitement de composites PVA/fibres naturelles et leurs applications dans divers domaines ont été discutées [21].

## II.3 Matériaux composites à fibres naturelles

### II.3.1 Fibre Naturelle

Les matériaux en fibres naturelles sont devenus de plus en plus populaires dans l'industrie manufacturière et ont été étudiés par de nombreux chercheurs. Les fibres naturelles sont divisées en trois catégories, à savoir, à base de cellulose, à base de protéines et à base de minéraux. Les fibres naturelles sont des matériaux durables qui sont disponibles dans la nature et qui présentent des avantages. Les compositions de fibres naturelles peuvent être divisées en trois composants principaux, qui sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. En général, le principal constituant des fibres naturelles est la cellulose, à hauteur de 30 à 80%, suivie de l'hémicellulose à 7-40%, et la lignine à 3-33% [22].



**Figure II.2 :** Classement des fibres naturelles [23].

### II.3.2 Matières d'origine naturelle

#### a. Matières d'origine végétale

Les fibres végétales sont des fibres issues de la biomasse. Elles sont essentiellement composées de cellulose, un polymère naturel ayant de longues chaînes moléculaires de glucose,

d'hémicelluloses, de lignines et de pectines. Beaucoup de végétaux se prêtent à l'extraction de fibres, que ce soit à partir des tiges (lin, jute, chanvre), des feuilles (sisal), des graines (coton, kapok) ou encore des fruits (noix de coco). Ces fibres peuvent être classées en deux catégories : des fibres longues et des fibres courtes. Les fibres courtes sont généralement obtenues des fruits, des fleurs ou des graines de certaines plantes alors que les fibres longues sont extraites de l'écorce ou du liber de la tige ou des feuilles des plantes. Les fibres végétales sont très utilisées pour leur faible densité, leur pouvoir d'isolation thermique, leur propriétés mécaniques et notamment pour leur biodégradabilité. La figure (II.3) représente quelques fibres végétales [24].



**Figure II.3 :** Exemples de fibres végétales : (a) Lin, (b) Coton, (c) Areca [24].

### b. Matière d'origine animale

Les fibres animales sont composées de protéines (kératine s'il s'agit de laine, fibroïne s'il s'agit de soie). Figure (II.4) illustre les fibres animales les plus utilisés. La fibre animale la plus utilisée est la fibre de laine grâce à ses propriétés d'isolation thermique, son bon pouvoir absorbant (16% à 18%) et son importante élasticité (45%) [24].



(a)

(b)

(c)

**Figure II.4 :** Exemples de fibres animales : (a) laine, (b) cachemire, (c) soie [24].

### c. Matières d'origine minérale

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 [25].

## II.4 Les avantages des matériaux composites à fibres naturelles

Les principaux avantages d'un composite en fibres naturelles sont [26] :

- Faible poids spécifique, résultant en une résistance et une rigidité spécifiques supérieures à celles de la fibre de verre.
- C'est une source renouvelable, la production nécessite peu d'énergie et le CO<sub>2</sub> est utilisé tandis que l'oxygène est restitué à l'environnement.
- Productible avec un faible investissement à faible coût, ce qui fait du matériau un produit intéressant pour les pays à bas salaires.
- Usure réduite de l'outillage, conditions de travail plus saines et pas d'irritation de la peau.
- Le recyclage thermique est possible alors que le verre pose problème dans les fours à combustion.
- Bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique.

## II.5 Fibres de la gaine d'arec

### II.5.1 Présentation de cette plante

Areca catechu, une espèce de palmier appartenant à la famille des Arecaceae, pousse principalement dans le Pacifique tropical, en Asie et certaines parties de l'Afrique de l'Est seraient originaires des Philippines. Maintenant des pays comme Taïwan, l'Inde, le Bangladesh, les Maldives, le Sri Lanka, le Cambodge, le Laos, la Thaïlande, le Vietnam, le sud de la Chine (Guangxi, Hainan, Yunnan), la Malaisie, l'Indonésie, la Nouvelle-Guinée, de nombreux les îles de l'océan Pacifique et les Antilles sont les principaux cultivateurs de ces palmiers. La plante est de taille moyenne et peut atteindre 30 m de hauteur et une tige de 10–15 cm de diamètre. Les

feuilles mesurent 1,5 à 2 m de long et les frondes sont même pennées et entourent le tronc et forment un arbre de couronne vert. Areca est l'une des plantes d'intérieur les plus vendues. Il se caractérise par être décoratif et résistant. Facile d'utilisation, il s'adapte bien aux bureaux et aux appartements car il aime les températures proches de 20 degrés Celsius [27].



**Figure II.5 :** Plantation de noix d'arec [27].

### **II.5.2 Extraction de fibres de la gaine d'arec**

Les matériaux fibreux, lorsqu'ils sont introduits dans la matrice polymère, produisent une amélioration spectaculaire des propriétés physiques d'un composite. Le renforcement améliore les propriétés mécaniques globales de la matrice. Une large gamme de fibres coupées de différentes longueurs est utilisée pour fabriquer les composites. La longueur des fibres est de 30 mm. Les feuilles des plantes sont même pennées et mesurent de 1 à 1,5 m de long, la plus longue près de la fronde médiane. La feuille de l'arec est une portion fibreuse dure recouvrant l'endosperme, principalement composé d'hémicelluloses. Les fibres de gaine d'arec contiennent 13 à 24 % de lignine, 35 à 64,8 % d'hémicelluloses, 4,4 % de teneur en cendres et les 8 à 25 % restants de teneur en eau [28].

Les fibres de la gaine d'arec (AS) sont extraites par renforcement ; Les fibres sont trempées dans l'eau pendant 10 jours pour adoucir la surface et faciliter l'extraction des fibres. Ensuite, les fibres brutes sont extraites à l'aide d'une brosse métallique, lavées abondamment à l'eau pour éliminer la saleté, le cas échéant, présente dans les fibres, puis séchées dans un four à 70 °C pour éliminer complètement l'humidité. La fibre ainsi obtenue est appelée fibre non traitée. Ensuite, les fibres de gaine d'arec non traitées sont trempées dans une solution de NaOH à 5 % pendant 1

heure à 80°C. Les fibres sont refroidies à température ambiante (28 °C) et lavées en continu avec de l'eau du robinet pour séparer complètement la solution de NaOH de la surface des fibres. Ces fibres sont ensuite séchées au four à 70 °C pendant 24 heures. Les fibres suivantes sont appelées fibres alcalines prétraitées. Ensuite, ces fibres sont à nouveau trempées dans une solution de NaOH à 10 % et de chlorure de benzyle pendant 15 minutes. Les fibres suivantes ont ensuite été immergées dans de l'éthanol pendant 1 heure pour extraire complètement le chlorure de benzyle de la surface des fibres. Enfin, les fibres sont lavées à l'eau distillée et séchées dans une étuve à 80°C pendant 24 heures [29].

## **II.6 Elaboration des matériaux composites a fibres de la gaine d'arec**

Généralement, les composites plastiques renforcés de fibres naturelles sont fabriqués en utilisant des techniques de fabrication traditionnelles (conçues pour les composites polymères renforcés de fibres conventionnelles et les thermoplastiques). Les techniques de traitement comprennent le compoundage, le mélange, l'extrusion, le moulage par injection, le moulage par compression, le LFT-D sont adaptés et étudiés pour les composites thermoplastiques renforcés de fibres naturelles. D'autre part, le moulage par transfert de résine (RTM) et le SMC sont mis en œuvre avec une matrice thermodurcissable. Outre ces procédés, le moulage par compression thermodurcissable et la pultrusion sont aujourd'hui étudiés avec des composites à fibres naturelles. Jusqu'à présent, les techniques mentionnées ci-dessus ont été bien développées et l'expérience accumulée a prouvé leur succès pour produire des composites avec une qualité contrôlable [30].

Il y a certains facteurs; tels que le type de fibre, la teneur en fibre, l'orientation de la fibre, la teneur en humidité de la fibre, qui influencent de manière significative le traitement des composites de fibres naturelles ainsi que les propriétés du produit final. Par conséquent, pour sélectionner un processus approprié pour fabriquer des composites de fibres naturelles, les ingénieurs de conception et de fabrication se concentreraient principalement sur un nombre de critères, notamment les propriétés souhaitées, la taille et la forme des composites résultants, les caractéristiques de traitement des matières premières (fibres et polymères : biosourcés ou pétroliers basé), la vitesse de production et le coût de fabrication. En outre, sur la base des techniques de transformation, la fabrication de produits semi-finis ; la production de tapis, les rubans, les fils de fibres, la préparation des fibres (ouverture, mélange et cardage) et la production

de granulés sont les étapes importantes qui doivent être prises en compte pour la production de composites de fibres naturelles [30].

À ce jour, le moulage par injection, l'extrusion, le moulage par compression, le moulage en feuille et le RTM sont les principaux procédés de fabrication des composites plastiques renforcés de fibres naturelles. Mais de nouveaux équipements aval et auxiliaires ont été conçus. Tels que : des systèmes de chauffage uniques et des systèmes de ventilation simples ou doubles pour le séchage en ligne, des réservoirs de refroidissement par pulvérisation à haute intensité, une variété de nouvelles configurations de systèmes d'alimentation (gravimétrique ou bac vertical), des combinaisons d'extrusion-injection ou d'extrusion-compression moulage ainsi que la conception de vis, de matrices et de moules [30].

Bien que la majorité des composites de fibres naturelles soient produits aujourd'hui par les procédés mentionnés ci-dessus, les fabricants améliorent la faisabilité d'utiliser d'autres procédés comme la pultrusion, etc. [30].

Des échantillons composites (AS/PVA) sont préparés par moulage par injection à 170 °C à une vitesse d'injection de 40 mm/sec, en tenant compte de différents pourcentages en poids de fibres traitées au chlorure de benzyle (10, 20, 30 et 40 % en poids) et PVA pur pour test d'abrasion sur deux objets [29].

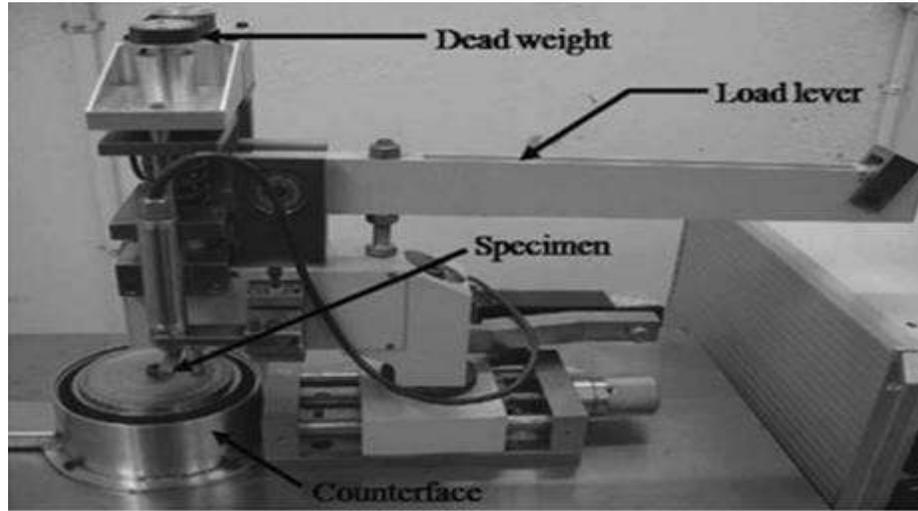
## **II.7 Paramètres tribologiques des matériaux composites à fibres de la gaine d'arc**

Les paramètres tribologiques des matériaux composites à fibres de la gaine d'arc comprennent : le coefficient de frottement, l'usure, la résistance à l'abrasion, la résistance à la rayure, la dureté, la ténacité, la résistance à la fatigue, la résistance au pelage, la résistance au cisaillement, et la résistance à la déchirure. Ces paramètres sont utilisés pour évaluer les performances tribologiques des matériaux composites à fibres de la gaine d'arc et leur aptitude à être utilisés dans des applications industrielles.

### **II.7.1 Essai d'usure abrasive**

La machine d'essai d'abrasion des broches de disque (Fig.II.6) est utilisée pour effectuer un test d'usure par abrasion dans des conditions de quantités multiples conformément à la norme ASTM G99-95. Des échantillons d'usure sont placés sur un disque rotatif plat (diamètre = 120 mm) sur lequel est monté un papier abrasif de grade 400 (granulométrie 23  $\mu$ m). Porte-

échantillon avec échantillonneur fixe (goupille) placé sur un diamètre de trajet donné. L'échantillon de broche est pressé contre le disque à une charge donnée au moyen d'un levier et de poids attachés. La machine d'essai fait tourner le disque autour du centre du disque et la goupille est maintenue continuellement appuyée contre le disque. Un papier abrasif séparé est pris pour chaque test et distance. Le glissement est pris égal à 377 m. [31]



**Figure II.6 :** Machine d'essai d'usure Pin-on-disc. [31]

La force de frottement est mesurée sur une période de 5 secondes à l'aide d'une cellule de charge maintenue sur le palan de charge et le coefficient de frottement ( $\mu$ ) est déterminé à l'aide de l'équation . [31]

$$\mu = F_f / F_n \quad (\text{II.1})$$

Où  $F_f$  est la force de frottement (N) et  $F_n$  est la charge normale (N).

Avant le test, les échantillons ont été lavés à l'acétone et séchés avant de mesurer le poids initial des échantillons. Une balance électronique (AUW. 220D, Shimadzu, Japon) a été utilisée pour mesurer le poids des spécimens avec 0,001 mg au moins. Après avoir mesuré le poids initial, il a été soumis à des conditions de test particulières. Ensuite, la différence de poids avant et après le test a été calculée, ce qui était égal à la perte de poids pour ce test particulier. Le taux d'usure spécifique ( $W_s$ ) a été calculé selon équation (II. 2) [31].

$$W_s = \frac{\Delta W}{\rho F_n S_d} \quad (\text{II.2})$$

Où  $F_n$  est la charge normale (N),  $S_d$  est la distance de glissement (m),  $\Delta W$  est la perte de poids (kg) et  $\rho$  est la densité du composite ( $\text{kg/m}^3$ ).

### II.7.2 La dureté Barcol

La dureté Barcol, également connue sous le nom de test de dureté Barcol ou échelle Barcol, est une mesure de la dureté des matériaux composites. Elle est déterminée à l'aide d'un dispositif appelé impressor Barcol ou testeur de dureté Barcol, qui se compose d'un indenteur pointu qui est pressé dans la surface du matériau à tester.

La valeur de la dureté Barcol est exprimée en unités Barcol (BC), qui vont de 0 à 100. Plus la valeur Barcol est élevée, plus le matériau est dur. La dureté Barcol est souvent utilisée pour évaluer la qualité des matériaux composites tels que les résines, les stratifiés et les composites à matrice métallique. Elle peut également être utilisée pour mesurer la dureté des plastiques, des bois et d'autres matériaux.

Il est important de noter que la dureté Barcol n'est pas équivalente directe à d'autres méthodes de test de dureté telles que la dureté Rockwell ou Brinell. Cependant, elle peut fournir des informations utiles pour le contrôle de la qualité et la sélection des matériaux.



**Figure II.7 :** impressor Barcol.

**II.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux composites à matrice polymère et les matériaux composites à fibres naturelles, la définition des fibres naturelles, leur classification et leur positivité. En outre, un type de fibre naturelle appelée fibre de gaine d'arec a été abordé en présentant cette plante, le procédé d'extraction des fibres de la gaine d'arec et enfin les paramètres tribologiques des matériaux composites à base de fibres de gaine d'arec.

## *Chapitre III*

# *Prédiction des paramètres opératoires pour l'abrasion d'un composite*

---

### **III.1 Introduction**

La logique floue est une méthode qui peut être intégrée dans la plupart des applications actuelles, en prenant en compte les connaissances qualitatives des concepteurs et des opérateurs dans les systèmes d'automatisation. Elle offre la possibilité de représenter et de raisonner sur des informations qualitatives et subjectives, qui ne peuvent pas être facilement exprimées de manière binaire ou précise. En incorporant la logique floue, les systèmes d'automatisation peuvent prendre en considération les expertises et les intuitions des humains, ce qui permet d'obtenir des résultats plus adaptés et plus robustes. Ainsi, la logique floue offre une approche flexible et puissante pour la modélisation et la résolution de problèmes dans de nombreux domaines où les connaissances qualitatives jouent un rôle crucial. Dans ce chapitre, nous utilisons la logique floue pour prédire les paramètres opératoires tels que la charge, la vitesse de glissement et le taux de remplissage dans le contexte de l'abrasion du composite polymère renforcé de fibres naturelles.

### **III.2 La Logique floue**

La logique floue est une extension de la logique booléenne par Lotfi Zadeh en 1965 basée sur la théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie classique des ensembles. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un état autre que vrai ou faux, la logique floue apporte une souplesse de raisonnement très appréciable, qui permet de prendre en compte les imprécisions et les incertitudes [32].

La logique floue est l'un des domaines de recherche les plus importants sur lesquels se concentrent de nombreuses recherches scientifiques, tant dans le domaine grand public (caméras, machines à laver, etc.) que dans le domaine industriel (modification et contrôle de processus complexes liés à l'énergie, au transport, transformation des matériaux, robotique, machines-outils) [32].

#### **III.2.1 Le principe**

La logique floue peut être considérée comme une extension de la logique multivaluée. Ses utilisations et ses objectifs sont cependant assez différents. Ainsi, le fait que la logique floue traite de modes approximatifs plutôt que précis du raisonnement implique que, en général, les chaînes

de raisonnement dans la logique floue sont courtes et la rigueur ne joue pas un rôle aussi important que dans les systèmes logiques classiques. En un mot, en logique floue tout, y compris la vérité, est une question de degré [33].

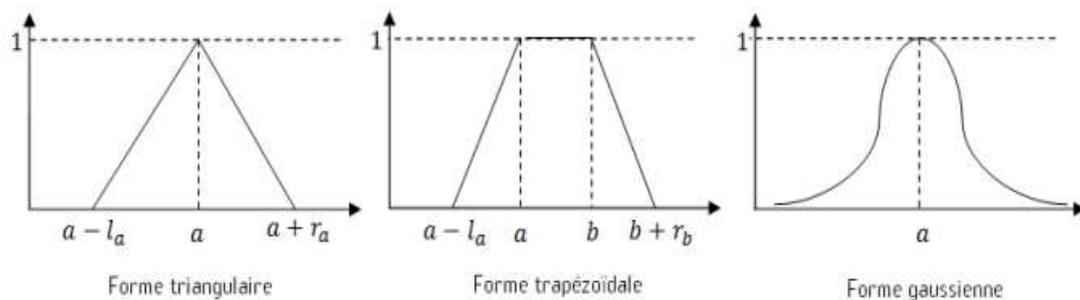
La plus grande puissance expressive de la logique floue provient du fait qu'elle contient comme cas particuliers non seulement les systèmes logiques classiques à deux valeurs et à valeurs multiples, mais aussi la théorie des probabilités et la logique probabiliste [33].

### III.2.2 Fonction d'appartenance

Pour déterminer le degré d'appartenance d'un élément à un sous-ensemble donné, nous introduisons la notion de fonction d'appartenance, notée en général  $\mu_A(u)$ . L'indice  $A$  correspond au sous-ensemble flou étudié et l'argument  $u$  se rapporte à l'élément de  $U$ . [34].

A tout élément  $u \in U$ , nous associons la valeur  $(u)$  telle que  $\mu_A : U \rightarrow \llbracket 0,1 \rrbracket$

Cette fonction d'appartenance peut prendre différentes formes, les plus souvent utilisées étant celles dites « régulières », c'est-à-dire sans ruptures brusques, représentant bien leur caractère graduel et le passage progressif de la non-satisfaction de la propriété à laquelle elles sont associées à sa satisfaction [34].



**Figure III.1** : Fonctions d'appartenance régulières [34].

### III.2.3 Variables linguistiques

Le concept de fonction d'appartenance vu précédemment nous permettra de définir des systèmes flous en langage naturel, la fonction d'appartenance faisant le lien entre logique floue et variable linguistique que nous allons définir à présent [35].

Raisonnement à partir de connaissances imparfaitement définies utilise la logique floue pour pallier les lacunes de la logique classique. Une variable linguistique (floue) est donc une variable

dont les valeurs floues appartiennent à des ensembles flous pouvant représenter des mots en langage naturel. Ainsi, une variable floue peut prendre simultanément plusieurs valeurs linguistiques.

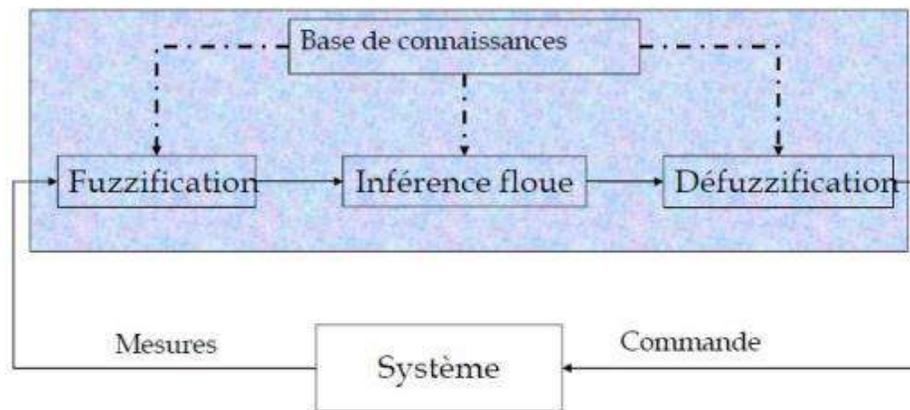
La variable linguistique  $X$  peut être caractérisée par un triplet  $(X, T(X), U)$ , où  $X$  est le nom de la variable linguistique,  $T(X)$  l'ensemble des valeurs linguistiques de  $X$  et  $U$  l'univers du discours. En général, la logique floue utilise la règle suivante : si  $X$  est  $A$ , alors  $Y$  est  $B$  [36].

### III.2.4 Structure d'un système de commande floue

Un modèle LF a une structure prédéfini. Il y a trois grandes parties : fuzzification, inférence floue et defuzzification. Il faut avoir une base de connaissance du système global et du fonctionnement de la LF pour pouvoir bien définir chaque partie. Le modèle doit être capable de prendre différentes mesures, lesquelles il va traiter pour obtenir des valeurs utilisables par le système [37].

On peut distinguer trois parties principales constituant la structure d'un régulateur floue :

- une interface de fuzzification,
- un mécanisme d'inférence,
- et une interface de Defuzzification,



**Figure III.2 :** Structure de la logique floue comme contrôleur d'un système [37].

### III.3 Données expérimentales

Pour prédire les paramètres opératoires pour l'abrasion du composite polymère renforcé de fibres naturelles, nous proposons d'utiliser la méthode de simulation basée sur la théorie de la

logique floue (Mamdani) à l'aide du logiciel MATLAB. Cette approche se fonde sur les données expérimentales regroupées dans le tableau III.1 obtenues depuis la référence [31].

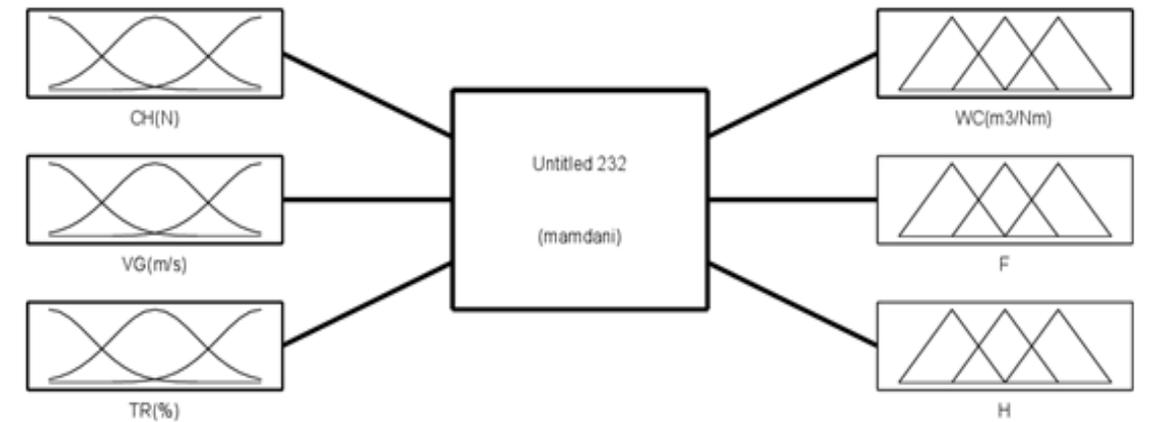
**Tableau III.1** : Données expérimentales de composite PVA/AS [31].

Essai	CH (N)	VG (m/s)	TR (%)	$W_s \times 10^{-11}$ (m <sup>3</sup> /Nm)	F	H (H barcol)
1	5	0.392	10	0.7306	0.27	72
2	5	0.392	20	0.6268	0.26	74
3	5	0.392	30	0.5756	0.25	75
4	5	0.471	10	0.8816	0.3	72
5	5	0.471	20	0.7426	0.28	74
6	5	0.471	30	0.6900	0.26	75
7	5	0.549	10	0.9790	0.31	72
8	5	0.549	20	0.8150	0.29	74
9	5	0.549	30	0.7422	0.27	75
10	10	0.392	10	0.4871	0.22	72
11	10	0.392	20	0.4340	0.21	74
12	10	0.392	30	0.3782	0.20	75
13	10	0.471	10	0.5212	0.23	72
14	10	0.471	20	0.4822	0.22	74
15	10	0.471	30	0.4496	0.20	75
16	10	0.549	10	0.5918	0.24	72
17	10	0.549	20	0.5281	0.24	74
18	10	0.549	30	0.5043	0.22	75
19	15	0.392	10	0.4546	0.15	72
20	15	0.392	20	0.4018	0.14	74
21	15	0.392	30	0.3679	0.12	75
22	15	0.471	10	0.4741	0.16	72

23	15	0.471	20	0.4629	0.15	74
24	15	0.471	30	0.3822	0.13	75
25	15	0.549	10	0.5244	0.18	72
26	15	0.549	20	0.4790	0.16	74
27	15	0.549	30	0.4520	0.13	75

### III.3.1 Système flou

Nous utilisons un système flou pour le composite PVA/AS avec trois (03) entrées : la charge (CH), la vitesse de glissement (VG), le taux de remplissage (TR) et trois variables de sortie : Taux d'usure spécifique (Ws), coefficient de frottement (F), la Dureté (H).



**Figure III.3 :** Système flou pour le composite PVA/AS.

### III.3.2 Modélisation floue

#### a. Les variables floues

Lors de la construction de notre modèle, nous avons choisi comme paramètres d'entrée : la charge, la vitesse de glissement et le taux de remplissage ; Comme variables de sortie, nous avons choisi le taux d'usure spécifique, le coefficient de frottement et la dureté.

**Tableau III.2 :** Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour  
Le système flou du composite PVA/AS.

	Valeur Mini	Valeur Max
<b>Les paramètres d'entrée</b>		
la charge (CH) (N)	5	15
la Vitesse de glissement (VG) (m/s)	0.392	0.549
Taux de remplissage(TR) (%)	10	30
<b>Les paramètres de sortie</b>		
Taux d'usure spécifique (Ws) (m <sup>3</sup> /Nm)	0.3679	0.9790
coefficient de friction (F)	0.12	0.31
la Dureté (H)	72	75

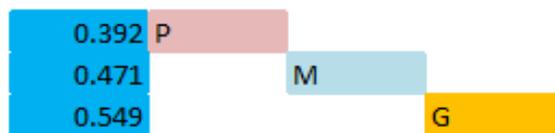
L'ensemble des variables utilisés dans notre étude sont découpée en catégories appelées variables linguistiques. Chaque variable linguistique correspond à un intervalle de donnée numérique.

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



**Figure III.4:** Variables Linguistiques pour la charge.

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



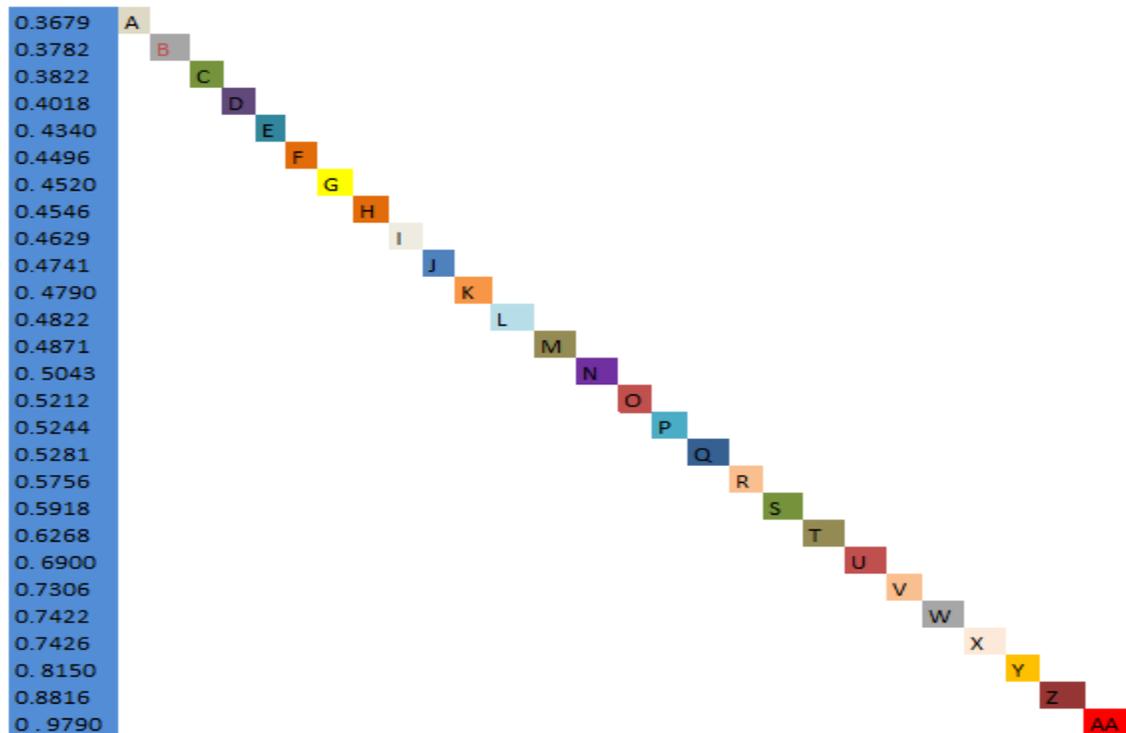
**Figure III.5 :** Variables Linguistiques pour la vitesse de glissement.

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



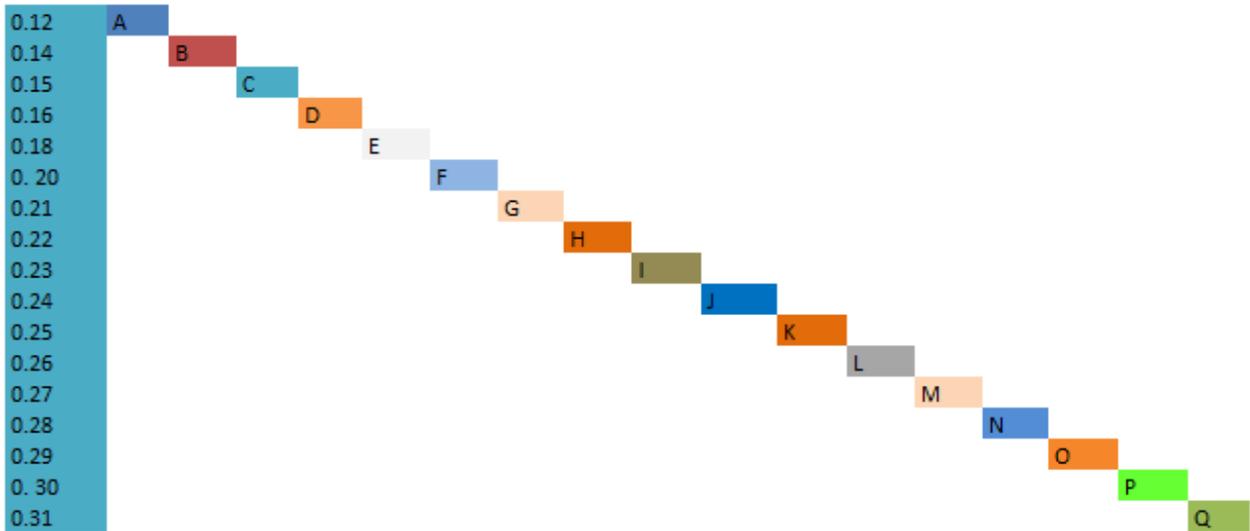
**Figure III.6 :** Variables linguistiques pour le taux de remplissage..

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



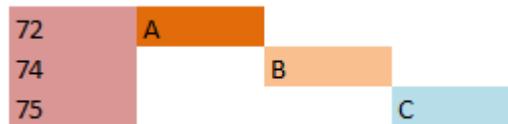
**Figure III.7 :** Variables Linguistiques pour Taux d'usure spécifique.

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (coefficient de frottement) sont présentés comme il est indiqué dans la figure III.7



**Figure III.8 :** Variables Linguistiques pour coefficient de frottement.

Les variables linguistiques pour la troisième sortie (la Dureté) sont présentent comme il est indiqué dans la figure III.8



**Figure III.9 :** Variables Linguistiques pour la Dureté.

### b. 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.

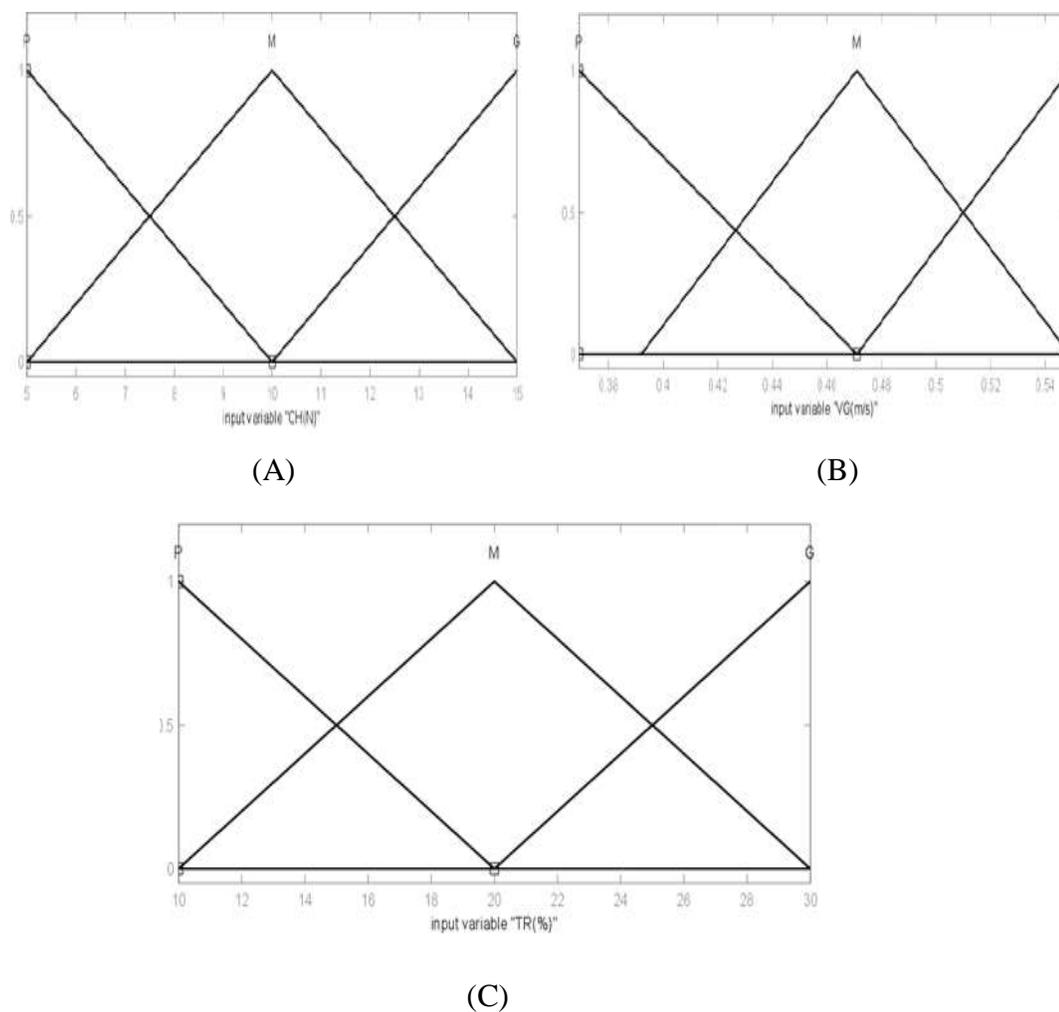
Un ensemble flou est défini à sa fonction d'appartenance, qui correspond à la notation de fonction caractéristique.

Les fonctions d'appartenance se présentent sous différentes formes, notamment triangulaire, trapézoïdale, gaussienne et sigmoïde. Dans cette étude, des fonctions d'appartenance

trigonométriques et trapézoïdales ont été utilisées pour les paramètres d'entrée et les paramètres de sortie.

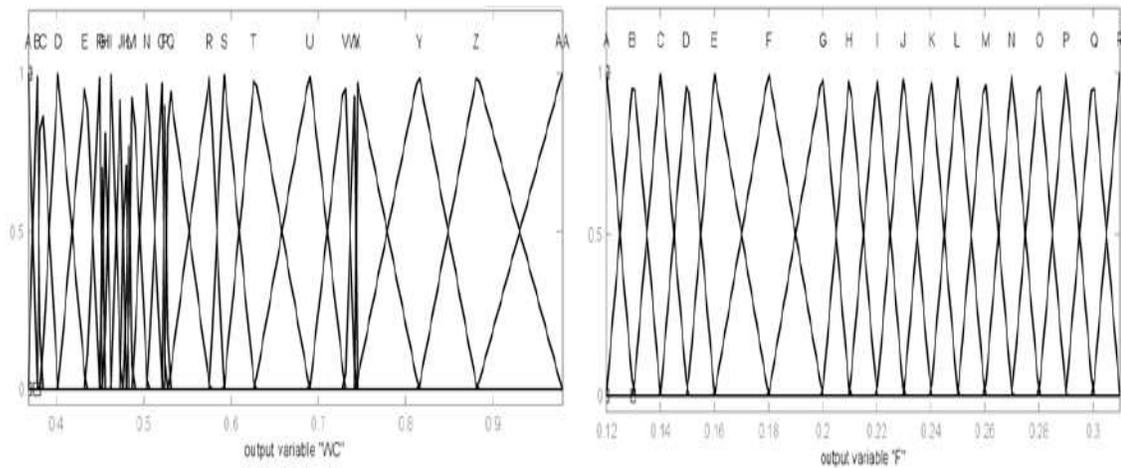
Les fonctions d'appartenance utilisées pour les paramètres d'entrées et sortie sont représentées dans les figures : de III.9, III.10, III.11, III.12.

➤ **Utilisation des fonctions d'appartenance triangulaires (les paramètres d'entrées)**



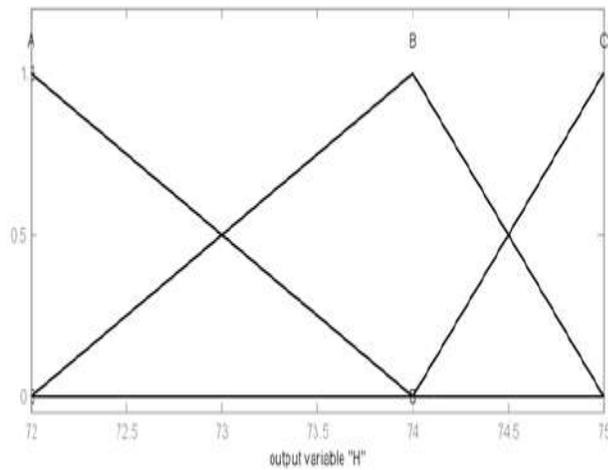
**Figure III.10 :** Les fonctions d'appartenance triangulaires (les paramètres d'entrées) (A), (B), (C).

➤ **Utilisation des fonctions d'appartenance triangulaires (les paramètres sortie)**



(A)

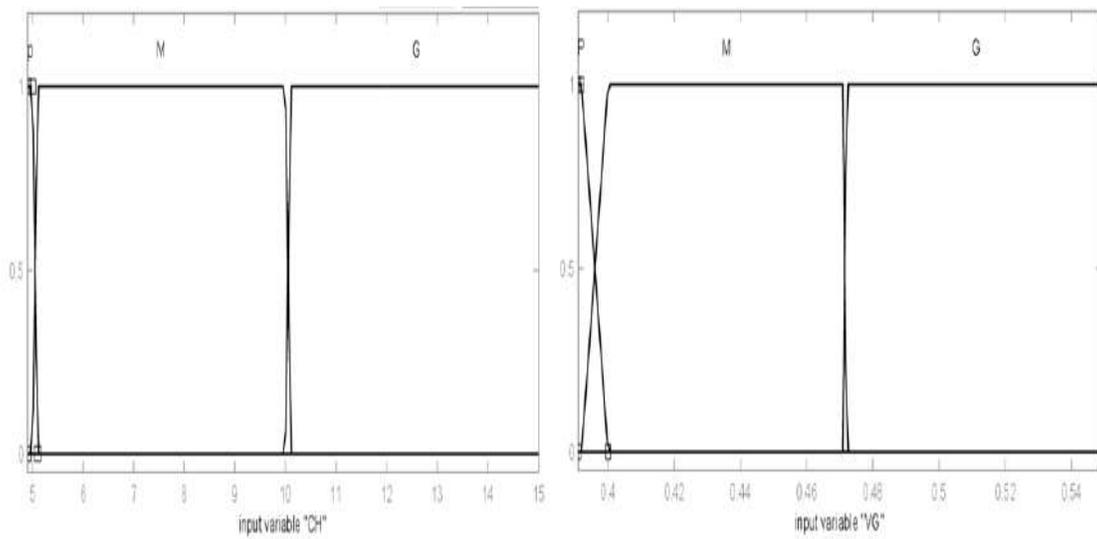
(B)



(C)

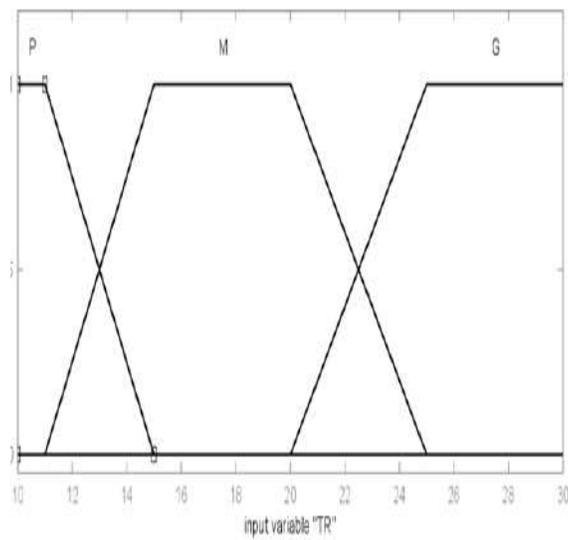
**Figure III.11 :** Les fonctions d'appartenance triangulaires (les paramètres sortie) (A), (B), (C).

➤ **Utilisation des fonctions d'appartenance trapézoïdales (les paramètres d'entrées)**



(A)

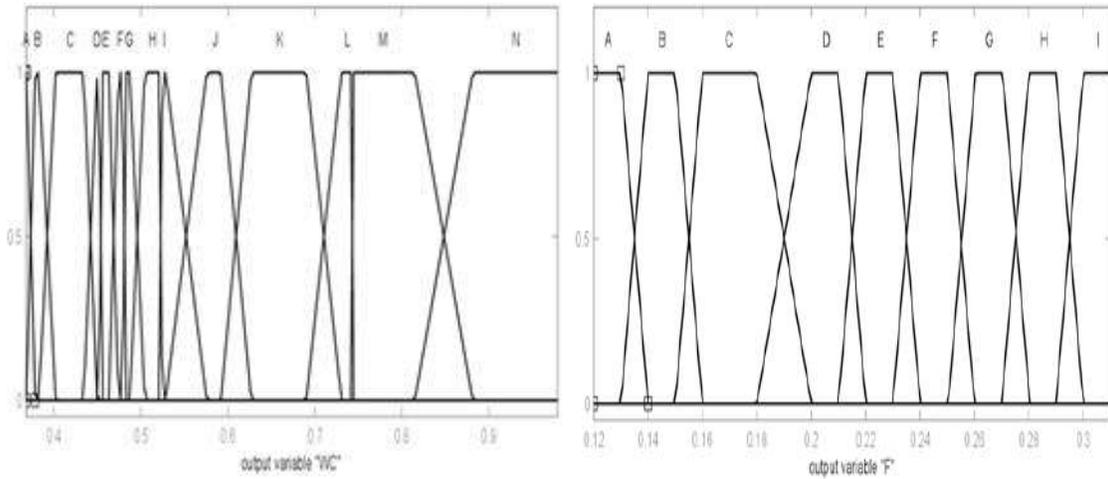
(B)



(C)

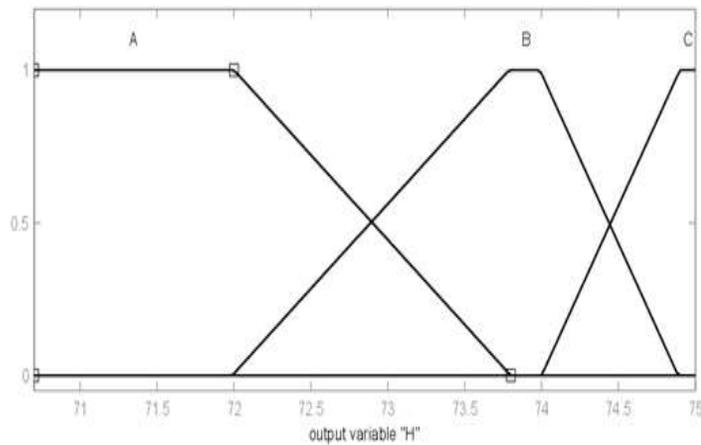
**Figure III.12 :** Les fonctions d'appartenance trapézoïdales (les paramètres d'entrées) (A), (B), (C).

➤ Utilisation des fonctions d'appartenance trapézoïdales (les paramètres sortie)



(A)

(B)



(C)

**Figure III.13 :** Les fonctions d'appartenance trapézoïdales (les paramètres sortie) (A), (B), (C).

**III.3.3 Les règles floues**

Vingt-sept (27) règles floues ont été établies en fonction des conditions expérimentales indiquées dans les tableaux : III.1 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 TR est (variable linguistique) Alors Ws est (variable linguistique) et F (variable linguistique) et H est (variable linguistique).

L'ensemble de règles floues élaborées sont regroupées dans le tableau III.2.

**Tableau III.3 :** Les règles floues pour le composite PVA/SA.

Essai	CH(N)	VG (m/s)	TR(%)	Ws(m <sup>3</sup> /Nm)	F	H
1	P	P	P	V	N	A
2	P	P	M	T	M	B
3	P	P	G	R	L	C
4	P	M	P	Z	Q	A
5	P	M	M	X	O	B
6	P	M	G	U	M	C
7	P	G	P	AA	R	A
8	P	G	M	Y	P	B
9	P	G	G	W	M	C
10	M	P	P	M	I	A
11	M	P	M	E	H	B
12	M	P	G	B	G	C
13	M	M	P	O	J	A
14	M	M	M	L	I	B
15	M	M	G	F	G	C
16	M	G	P	S	K	A
17	M	G	M	Q	K	B
18	M	G	G	N	I	C
19	G	P	P	H	D	A

20	G	P	M	D	C	B
21	G	P	G	A	A	C
22	G	M	P	J	E	A
23	G	M	M	I	D	B
24	G	M	G	C	B	C
25	G	G	P	P	F	A
26	G	G	M	K	E	B
27	G	G	G	G	B	C

### III.4 Résultats et discussion

Les résultats sont obtenus à partir la dernière étape dans la logique floue (défuzzification). Cette étape dernière consiste à transformer la valeur linguistique issue de régulateur flou en valeur numérique.

#### III.4.1 Etude de la précision et de l'erreur du système flou

Les erreurs ont été calculées en mesurant l'écart entre la valeur mesurée et la valeur prédite. Les erreurs peuvent être calculées à l'aide de l'équation III-1. Le pourcentage d'erreurs individuelles a été obtenu en divisant la différence absolue de la prédiction par la valeur de mesure.

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

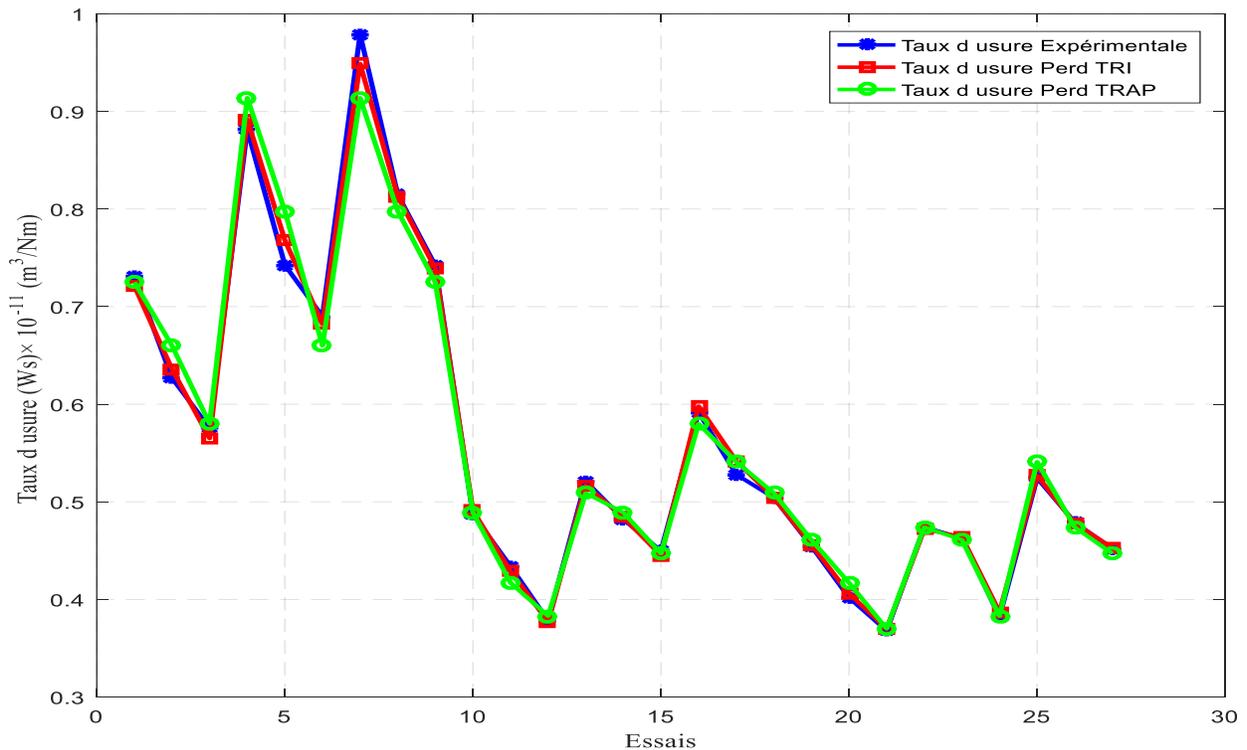
La précision est calculée en trouvant l'approchement de la valeur prédite à la valeur mesurée. Dans l'équation III-2, A est la précision du modèle et N est le nombre total de jeux de données testés. La précision du modèle est la précision individuelle moyenne.

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

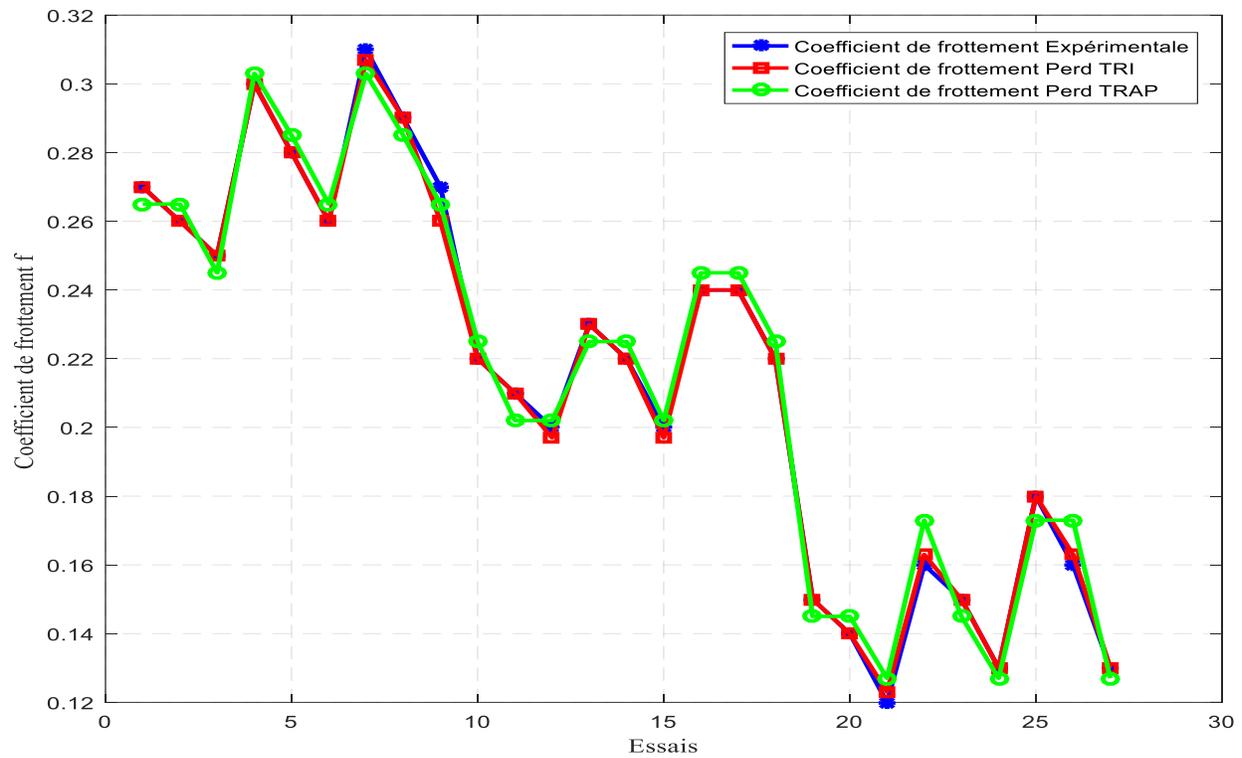
### III.4.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance trapézoïdales et triangulaires

Pour la comparaison entre les résultats obtenus en utilisant des fonctions d'appartenance: triangulaire et trapézoïdale nous à permet de choisir le type de fonctions la plus approprié de notre problème.

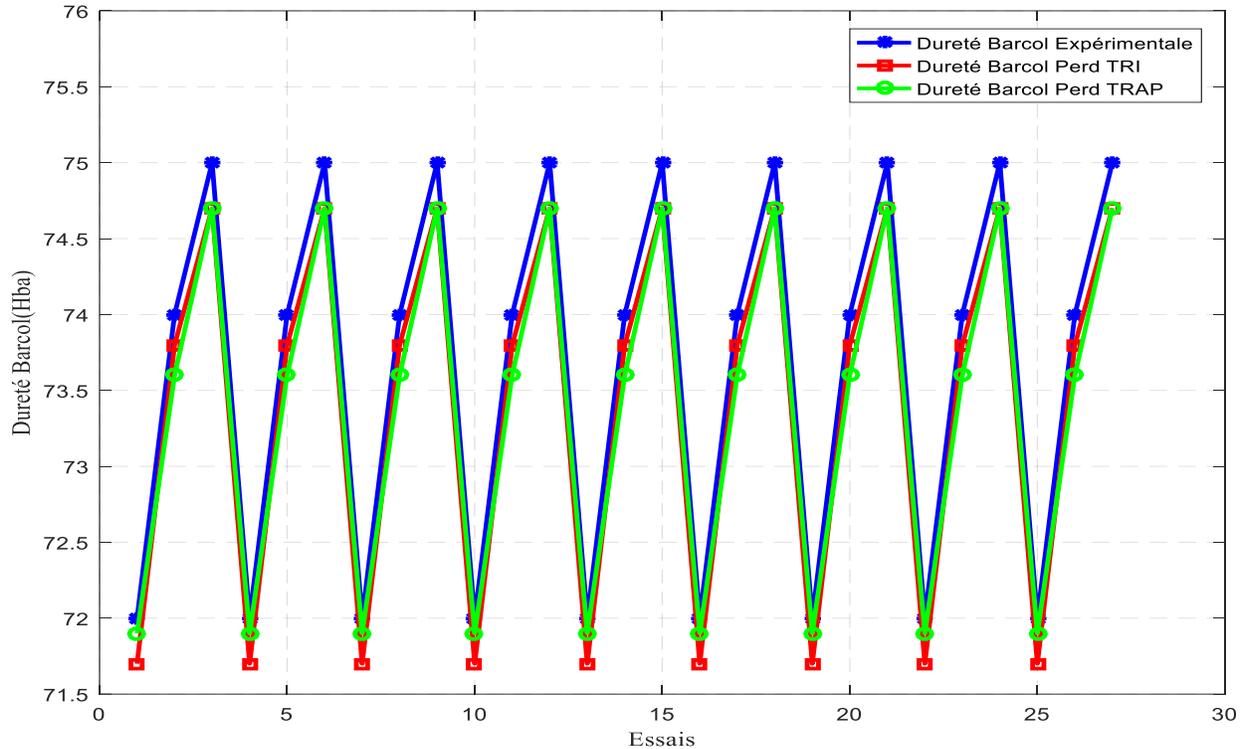
La figure ci-dessous montre une comparaison directe des résultats obtenus avec les deux types de fonctions d'appartenance.



**Figure III.14 :** Variation de Taux d'usure (trapézoïdale et triangulaire) en Fonction du nombre essais.



**Figure III.15 :** Variation de Coefficient de frottement (trapézoïdale et triangulaire) en Fonction du nombre essais.



**Figure III.16 :** Variation de la Dureté (trapézoïdale et triangulaire) en Fonction du nombre essais.

Les figures (III.14) ,(III.15) et (III.16) montrent que la variance des trois sorties en utilisant les deux types de fonctions d'appartenance est presque la même. Cette représentation ne permet donc 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 le composite PVA/AS

Essai	Ws $\times 10^{-11}$ (m <sup>3</sup> /Nm)	Wsp $\times 10^{-11}$ (m <sup>3</sup> /Nm)	Précision %	F	Fp	Précision %	H(B)	Hp(B)	Précision %
1	0.7306	0.721	98.68	0.27	0.27	100	72	71.7	99.58
2	0.6268	0.636	98.53	0.26	0.26	100	74	73.8	99.72
3	0.5756	0.565	98.15	0.25	0.25	100	75	74.7	99.6
4	0.8816	0.892	98.82	0.3	0.3	100	72	71.7	99.58
5	0.7426	0.768	96.57	0.28	0.28	100	74	73.8	99.72
6	0.69	0.682	98.84	0.26	0.26	100	75	74.7	99.6
7	0.979	0.949	96.93	0.31	0.307	99.03	72	71.7	99.58
8	0.815	0.813	99.75	0.29	0.29	100	74	73.8	99.72
9	0.7422	0.739	99.56	0.27	0.26	96.29	75	74.7	99.6
10	0.4871	0.491	99.199	0.22	0.22	100	72	71.7	99.58
11	0.434	0.429	98.84	0.21	0.21	100	74	73.8	99.72
12	0.3782	0.377	99.68	0.2	0.197	98.5	75	74.7	99.6
13	0.5212	0.517	99.19	0.23	0.23	100	72	71.7	99.58
14	0.4822	0.484	99.62	0.22	0.22	100	74	73.8	99.72
15	0.4496	0.445	98.97	0.2	0.197	98.5	75	74.7	99.6
16	0.5918	0.598	98.95	0.24	0.24	100	72	71.7	99.58
17	0.5281	0.542	97.36	0.24	0.24	100	74	73.8	99.72
18	0.5043	0.504	99.94	0.22	0.22	100	75	74.7	99.6
19	0.4546	0.456	99.69	0.15	0.15	100	72	71.7	99.58
20	0.4018	0.406	98.95	0.14	0.14	100	74	73.8	99.72
21	0.3679	0.37	99.42	0.12	0.123	97.5	75	74.7	99.6
22	0.4741	0.472	99.55	0.16	0.163	98.12	72	71.7	99.58
23	0.4629	0.464	99.76	0.15	0.15	100	74	73.8	99.72
24	0.3822	0.387	98.74	0.13	0.13	100	75	74.7	99.6
25	0.5244	0.527	99.50	0.18	0.18	100	72	71.7	99.58

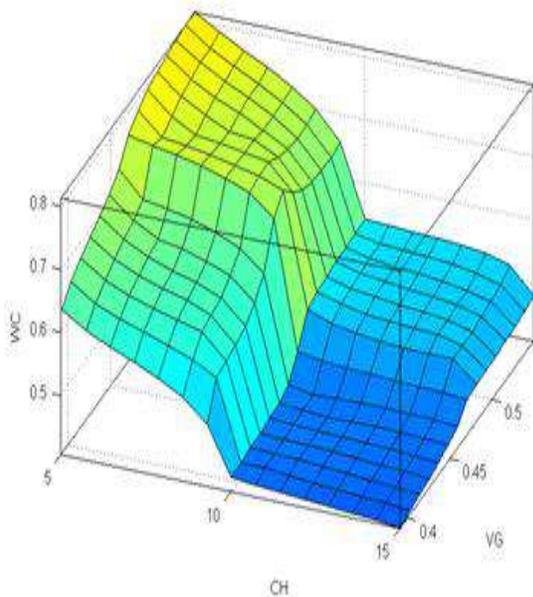
26	0.479	0.478	99.79	0.16	0.163	98.12	74	73.8	99.72		
27	0.452	0.453	99.77	0.13	0.13	100	75	74.7	99.6		
La précision			98.99549767	La précision			99.484391	La précision			99.637688

### III.4.3 Représentation schématique des résultats

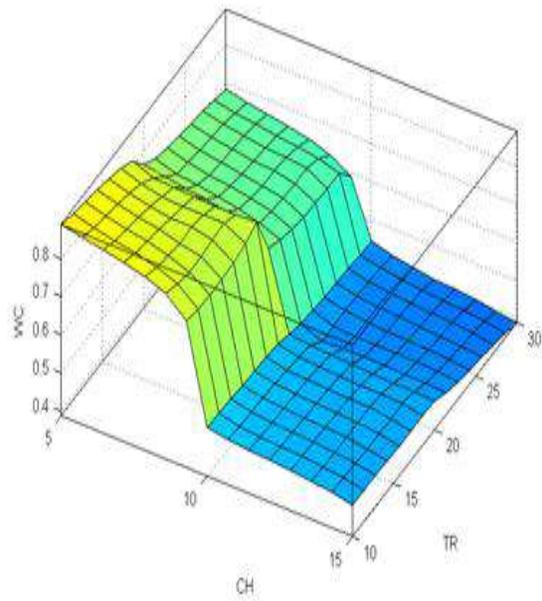
#### ➤ Pour le taux d'usure spécifique

La figure III.17 représente les fonctions obtenues en utilisant une simulation par logique floue comme suite :

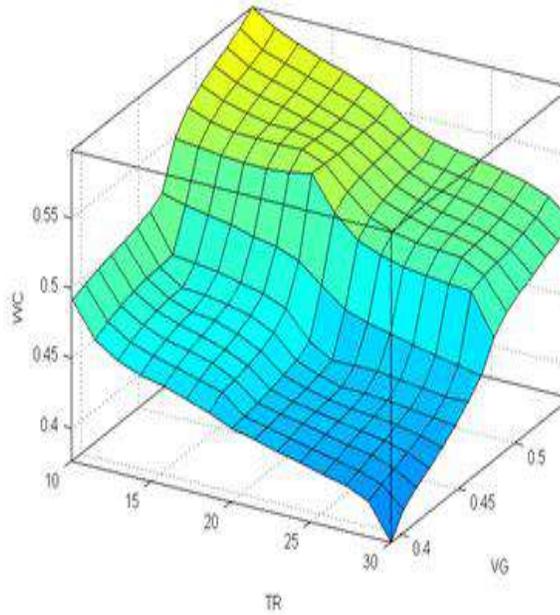
- La surface (A) représente la variation de taux d'usure spécifique en fonction de la charge et la vitesse de glissement pour le taux de remplissage TR= 20%.
- La surface (B) représente la variation de taux d'usure spécifique en fonction de la charge et le taux de remplissage pour la vitesse de glissement VG=0,471m/s
- La surface (C) représente la variation de taux d'usure spécifique en fonction du taux de remplissage et la vitesse de glissement pour la charge CH=10N



(A)



(B)



(C)

**Figure III.17 :** Variation du Taux d'usure spécifique prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres opératoire de composite PVA/AS.

La figure III.17 illustre l'influence des paramètres opératoire (la charge, la vitesse de glissement et le taux de remplissage) sur le taux d'usure spécifique de composite PVA/AS.

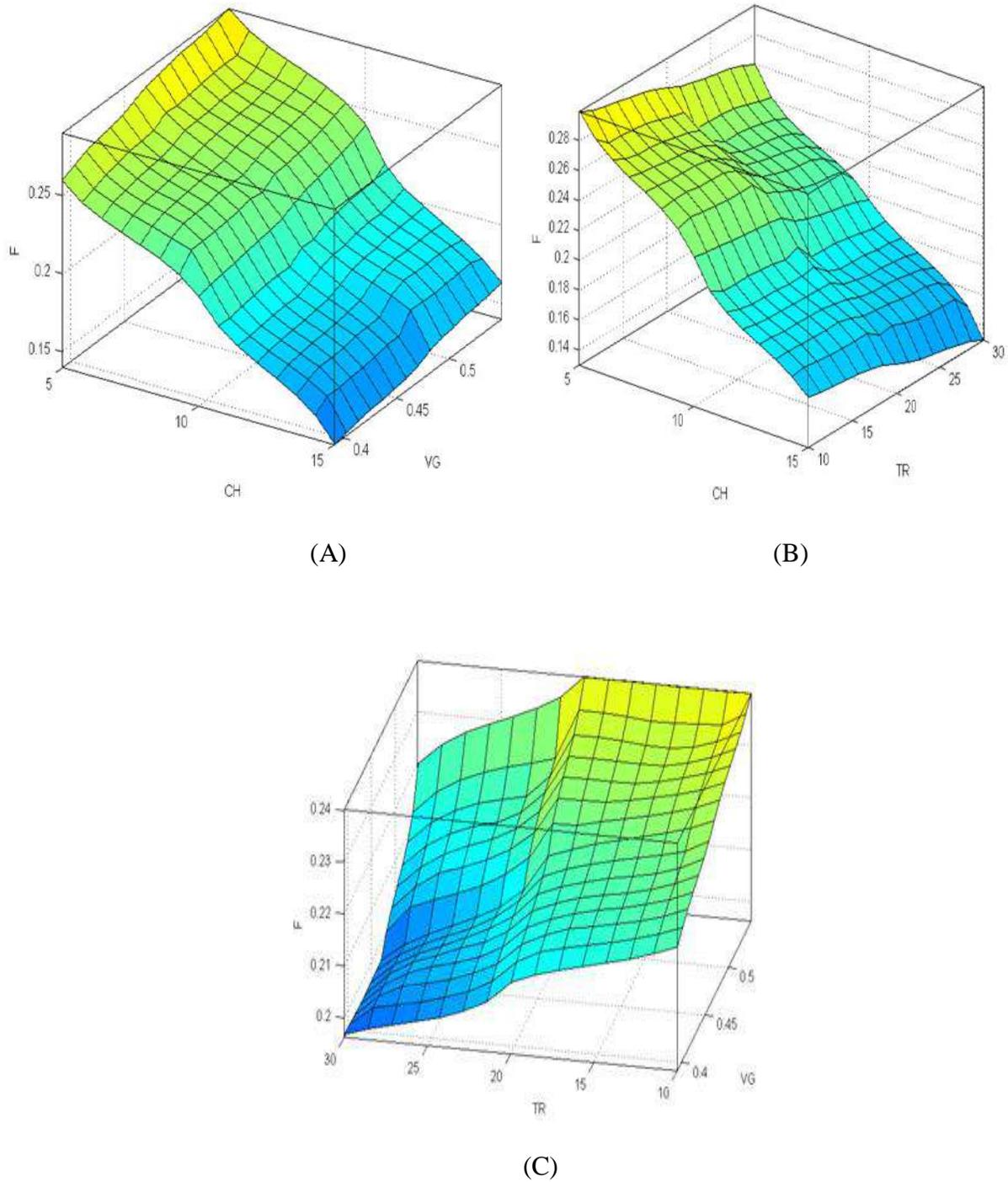
De la figure III.17 (A) on constate que la valeur de taux d'usure spécifique devienne minimale pour des valeurs maximales de la charge et des valeurs minimales de la vitesse de glissement.

De la figure III.17 (B) on constate que la valeur de taux d'usure spécifique devienne minimale pour des valeurs maximales de la charge et des valeurs maximales de taux de remplissage.

De la figure III.17 (C) on constate que la valeur de taux d'usure spécifique devienne minimale pour des valeurs minimales de la vitesse de glissement et des valeurs maximales de taux de remplissage.

D'après la Figure III.17, il est clair qu'indépendamment des vitesses de glissement, le taux d'usure spécifique du composite PVA/AS diminue avec l'augmentation de la charge et le taux de remplissage de fibre.

➤ Pour le coefficient de frottement



**Figure III.18 :** Variation du coefficient de frottement prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres opératoire de composite PVA/AS.

La figure III.18 représente les fonctions obtenues en utilisant une simulation par logique floue comme suite :

- La surface (A) représente la variation de coefficient de frottement en fonction de la charge et la vitesse de glissement pour le taux de remplissage  $TR= 20\%$ .
- La surface (B) représente la variation de coefficient de frottement en fonction de la charge et le taux de remplissage pour la vitesse de glissement  $VG=0,471m/s$
- La surface (C) représente la variation de coefficient de frottement en fonction du taux de remplissage et la vitesse de glissement pour la charge  $CH=10N$

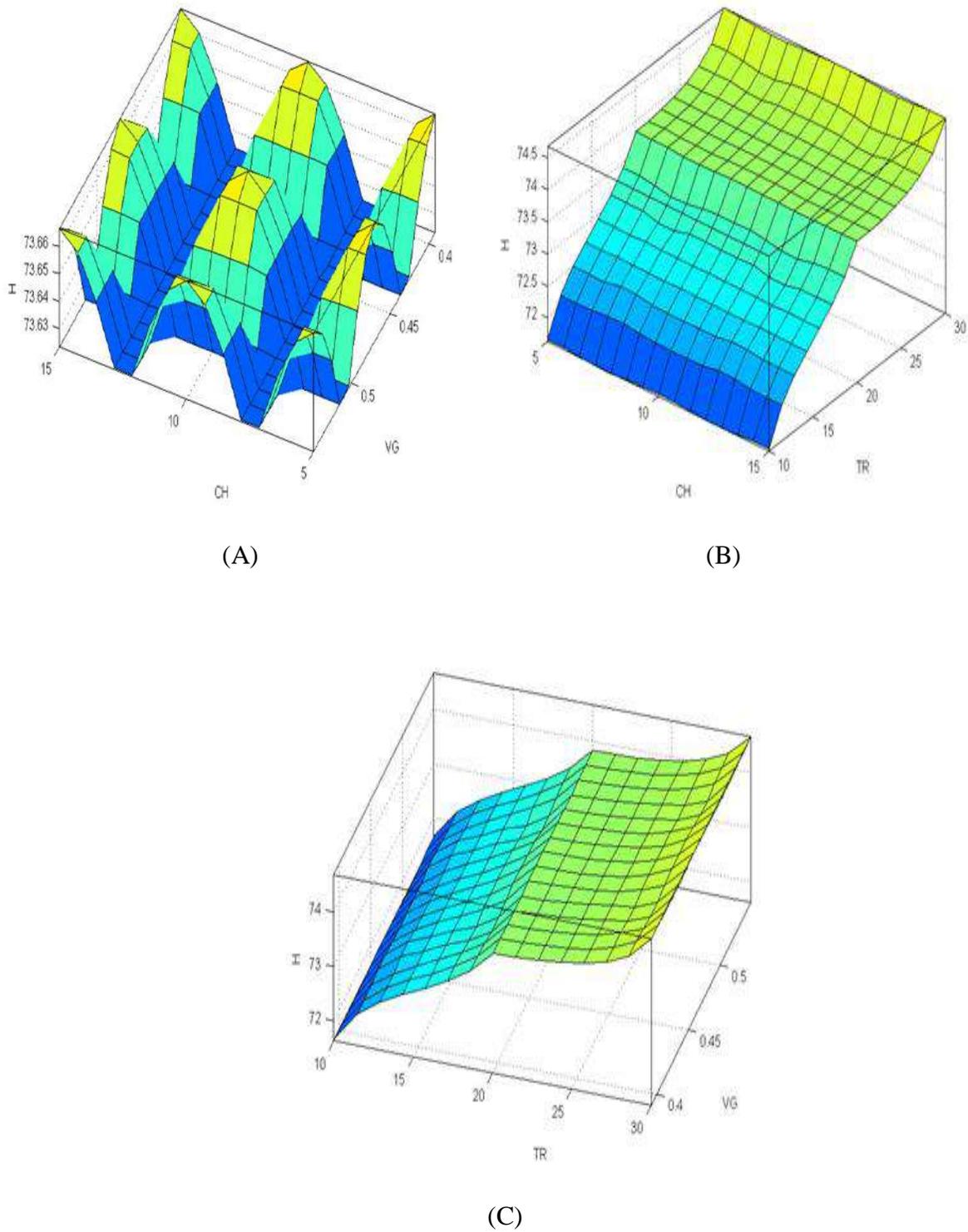
La figure III.18 illustre l'influence des paramètres opératoire (la charge, la vitesse de glissement et le taux de remplissage) sur le coefficient de frottement de composite PVA/AS.

De la figure III.18 (A) on constate que la valeur de coefficient de frottement devienne minimale pour des valeurs maximales de la charge et des valeurs minimales de la vitesse de glissement. D'autre part le coefficient de frottement présente une tendance à la baisse avec l'augmentation de la charge. Cette tendance peut être attribuée au fait que, lorsque la charge augmente, la rugosité de la surface et les débris d'usure augmentent également, ce qui peut entraîner une diminution du coefficient de frottement.

De la figure III.18 (B) on constate que la valeur de coefficient de frottement devienne minimale pour des valeurs maximales de la charge et des valeurs maximales de taux de remplissage.

De la figure III.18 (C) on constate que la valeur de coefficient de frottement devienne minimale pour des valeurs minimales de la vitesse de glissement et des valeurs maximales de taux de remplissage.

## ➤ Pour la Dureté de Barcol



**Figure III.19 :** Variation de la dureté de Barcol prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres opératoire de composite PVA/AS.

La figure III.19 illustre l'influence des paramètres opératoire (la charge, la vitesse de glissement et le taux de remplissage) sur la dureté de Barcol de composite PVA/AS.

L'étude de la Figure III.19 (A, B, C) révèle que la charge et la vitesse de glissement n'ont aucun effet sur la dureté de Barcol, mais cette dernière est associée à la valeur de taux de remplissage. Ainsi, on observe que la dureté de Barcol augmente avec des valeurs de taux de remplissage plus élevées.

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents résultats d'un modèle flou basé sur les travaux expérimentaux de S.Nayak, et J.Mohanty [31]. Les résultats trouvés montrent clairement l'effet des paramètres opératoires sur l'abrasion du composite polymère renforcé de fibres naturelles

# *Conclusion Générale*

## Conclusion Générale

L'objectif de ce travail est de prédire l'effet principal des paramètres de fonctionnement sur l'usure par abrasion des composites à fibres naturelles.

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

- ✓ Le contrôle des valeurs des paramètres de fonctionnement (la charge, la vitesse de glissement et le taux de remplissage) joue un rôle nécessaire dans l'influence principale sur l'usure par abrasion des composites à fibres naturelles.
- ✓ Le taux d'usure spécifique et le coefficient de frottement des composites PVA/AS diminuent avec l'augmentation de la charge et le taux de remplissage.
- ✓ Le modèle flou utilisé, pour prédire l'influence principale des paramètres d'usage sur l'usure abrasive des composites PVA/AS, a montré un bon accord entre la simulation et les résultats expérimentaux.
- ✓ Les valeurs prédites obtenues à l'aide du modèle flou correspondent à une erreur moyenne de 1,004% pour le taux d'usure spécifique, 0,515% pour le coefficient de frottement et 0,362% pour la dureté de Barcol.

## Références Bibliographiques

- [1]. M. Francesca Pucci. Etudes de surface et interface pour les matériaux composites : apport aux procédés d'élaboration et aux propriétés induites. JNC22 - 22e Journées Nationales sur les Composites, Jun 2021, Conférence virtuelle, France.
- [2]. Jérémie Aucher. Etude comparative du comportement composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable. Autre. INSA de Rouen, 2009. Français  
<http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/20724>
- [3]. Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Ecole d'ingénieur. 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.12.014>
- [4]. Medalia AI (1980) on structure property relations of rubber. In: Proceedings of the international conference, Kharagpur, p 13.
- [5]. Navin Chand, Ajay Naik, Somit Neogi, Three-body abrasive wear of short glass fibre polyester composite. Regional Research Laboratory (Council of Scientific and Industrial Research), Hoshangabad Road, Near Habibganj Naka, Bhopal 462 026, India  
[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00398-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00398-7)
- [6]. M. JONES ROBERT, MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS, Taylor & Francis, Inc. 325 Chestnut Street Philadelphia, PA 19106.
- [7]. J.Aucher, Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable, Autre. INSA de Rouen, 2009, Français.
- [8]. L.Gornet, Généralités sur les matériaux composites, Ecole d'ingénieur, 2008.
- [9]. L.Merad, Etude par Spectroscopie Raman et Modélisation d'une Résiné Composite RTM.Physique [physics], Université de Metz, 2010, Français.
- [10]. L.Gendre, Les grandes familles de matériaux composites, ENS Cachan-Université Paris-Saclay, 2011.
- [11]. B.Harris, et al, Engineering composite materials. 1999.
- [12]. R.Benzaid, and N.-E. Chikh, Contribution à l'etude des materiaux composites dans le renforcement et la reparation des éléments structuraux linéaires en béton, 2017.

- [13]. DE L'AFSSET, Avis. Fabrication et usinage des matériaux composites à base de fibres de carbone, France, 2010.
- [14]. D.Chandramohan and K.Marimuthu, A review on natural fibers, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2011. 8(2): p. 194-206.
- [15]. J.-M. Berthelot., Matériaux composites. Comportement mécanique et analyse des structures, 1999. 4
- [16]. G.Bertrand and K.Somoh, Conception et caractérisation mécanique des pièces en matériaux composites moulées par compression. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013.Français.
- [17]. : Boon Khoon Tan, Yern Chee Ching, Sin Chew Poh, Luqman Chuah Abdullah, and Seng Neon Gan. A Review of Natural Fiber Reinforced Poly (Vinyl Alcohol) Based Composites: Application and Opportunity [https://www.intermines.org/docs/2011061083645\\_ArticleTASSIN.pdf](https://www.intermines.org/docs/2011061083645_ArticleTASSIN.pdf)
- [18]. Vi Vi Do Thi 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.
- [19]. L.Lasri, Modélisation macromécanique et micromécanique de l'usinage des composites à matrice polymère et fibres longues, Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers Paris Tech, 2009. Français.
- [20]. L.Floch, Développement de matériaux composites à résistance et réaction au feu améliorée pour application dans le nautisme, Matériaux. IMT - MINES ALES - IMT - Mines Alès Ecole Mines -Télécom, 2021. Français.
- [21]. B.K.Tan, A review of natural fiber reinforced poly (vinyl alcohol) based composites: Application and opportunity, Polymers, 2015. 7(11): p. 2205-2222.
- [22]. M.Azman, et al., Natural fiber reinforced composite material for product design: A short review. Polymers, 2021. 13(12): p. 1917.
- [23]. M.Milosevic, P.Valášek, and A.Ruggiero, Tribology of natural fibers composite materials: an overview. Lubricants, 2020. 8(4): p. 42.

- [24]. XX, M, Valorisation des fibres de kénaf dans des applications textiles et para textiles, Université de Monastir.
- [25]. A.Nenonene, Élaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bio adhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage, 2009.
- [26]. D, Chandra Mohan, and K, Marimuthu, A review on natural fibers. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2011. 8(2): p. 194-206.
- [27]. G.Sunny, and T.P.Rajan, Review on areca nut fiber and its implementation in sustainable products development. Journal of Natural Fibers, 2022. 19(12): p. 4747-4760.
- [28]. M.Chethan, et al., Study on tensile analysis of untreated chopped natural areca sheath fiber reinforced polymer matrix bio-composites. International Journal of Engineering Research and Advancement Technology, 2016. 2: p. 338-93.
- [29]. S.Nayak, and J.Mohanty, Two-body abrasive behavior of areca sheath fibre reinforced polyvinyl alcohol composites. Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR), 2019. 44(2): p. 205-209.
- [30]. O.Faruk, et al., Progress report on natural fiber reinforced composites, Macromolecular Materials and Engineering, 2014. 299(1): p. 9-26.
- [31]. S.Nayak, and J.Mohanty, Optimization of operating parameters for abrasion of areca sheath reinforced polymer composite: grey based Taguchi approach. International Journal of Plastics Technology, 2018. 22: p. 26-40.
- [32]. F.Dernoncourt, Introduction to fuzzy logic. Massachusetts Institute of Technology, 2013. 21: p. 50-56.
- [33]. L.A.Zadeh, Fuzzy logic, in Granular, Fuzzy, and Soft Computing2023, Springer. p. 19-49.
- [34]. Cynthia Bazoge & Alexandre Dias Lopes, Apport de la logique floue dans la modélisation des management actions en non-vie, Centre d'Études Actuarielles <https://www.institutdesactuaire.com/docs/mem/b48c5576c382c01406e08e60daaea156.pdf>
- [35]. F.Dernoncourt, Introduction à la logique floue. Développez. com., 2011.
- [36]. R.RANDRIANANTENAINA, et al., Study of Anomalies and Modeling of the Maximum Temperature by the Fuzzy Logic Method in the Boeny Region of Madagascar.

[37]. Davins-Valldaura, Joan, Algorithme de décision avec la logique floue, 2012

[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17858/rapport\\_final\\_biblioteca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17858/rapport_final_biblioteca.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**Résumé**

Cette étude présente l'utilisation de la logique floue pour prédire l'influence des paramètres opératoires sur l'abrasion d'un composite polymère renforcé de fibres naturelles. Le composite étudié est un mélange d'alcool polyvinylique et de fibres d'arec. Les résultats obtenus ont démontré une excellente concordance entre les valeurs prédites par le modèle flou et les résultats expérimentaux. Les erreurs étaient minimales, avec une précision de 98,99 % pour le taux d'usure, de 99,84 % pour le coefficient de frottement et de 99,63 % pour la dureté. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité de la logique floue pour prédire et optimiser les propriétés tribologiques de ce type de composite. Cette approche offre des perspectives intéressantes pour améliorer la durabilité et les performances de ces matériaux dans diverses applications industrielles.

**Mots clés :** la logique floue, l'abrasion, composite polymère, fibres naturelles.

**Abstract**

This study presents the use of fuzzy logic to predict the influence of operating parameters on the abrasion of a natural fiber reinforced polymer composite. The composite studied is a mixture of polyvinyl alcohol and areca fibers. The obtained results demonstrated an excellent agreement between the values predicted by the fuzzy model and the experimental results. The Errors were minimal, with an accuracy of 98.99% for the wear rate, 99.84% for the coefficient of friction and 99.63% for the hardness. These results highlight the effectiveness of fuzzy logic in predicting and optimizing the tribological properties of this type of composite. This approach offers interesting perspectives for improving the durability and performance of these materials in various industrial applications.

**Keywords:** fuzzy logic, abrasion, polymer composite, natural fibers

**ملخص**

تعرض هذه الدراسة استخدام المنطق الضبابي للتنبؤ بتأثير معلمات التشغيل على تآكل مركب البوليمر المقوى بالألياف الطبيعية. المركب المدروس هو خليط من كحول البولي فينيل وألياف الأريكا. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها توافق ممتاز بين القيم التي تنبأ بها النموذج الضبابي والنتائج التجريبية. كانت الأخطاء ضئيلة، حيث بلغت الدقة 98.99% لمعدل التآكل، 99.84% لمعامل الاحتكاك و 99.63% للصلابة. تسلط هذه النتائج الضوء على فعالية المنطق الضبابي للتنبؤ بالخصائص الترابولوجية لهذا النوع من المركبات وتحسينها. يقدم هذا النهج وجهات نظر مثيرة للاهتمام لتحسين متانة وأداء هذه المواد في مختلف التطبيقات الصناعية.

**الكلمات المفتاحية:** المنطق الضبابي، كشط، مركب بوليمر، ألياف طبيعية

---