

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB BLIDA 1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT MÉCANIQUE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Génie des Matériaux

Thème :

**ETUDE DU VIEILLISSEMENT THERMIQUE DES
COMPOSITES ESEPOXY/CARBONE : INFLUENCE DE
LA PHASE MAB (Fe_2Alb_2) SUR SES PROPRIÉTÉS
MECANIQUES.**

Encadré par :

Promotrice: Dr S.RAMDOUM

Co-Promoteur: Dr A.BENAMOR

Réaliser Par :

BENAMAR Sofiane

RAHMOUNI Mohamed

2024/2025

Remerciement

Nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et de nous avoir accordé la patience pour achever ce travail.

*Nous remercions tous ceux qui nous ont aidés à faire ce travail. Surtout, Dr S.**RAMDOUM** notre encadreur et le Dr **A.BENAMOR** Co-encadrant, pour leur patience et leur Conseils et leur disponibilité tout au long de cette recherche, son soutien et la pertinence de ces remarques. Nous exprimons également toute notre gratitude à tous nos enseignants du département mécanique qui nous a suivis durant notre parcours universitaire. Un merci à tous ceux dont nous n'avons pas pu citer.*

Nous remercions toute personne qui nous a aidées de près comme de loin pour réaliser ce travail.

Merci à tous.

Dédicace

À ma petite famille,

Source infinie de soutien et d'amour, Je souhaite dédier ce mémoire à chacun de vous, qui avez été à mes côtés tout au long de ce parcours académique. Votre présence inconditionnelle, vos encouragements et votre compréhension ont été essentiels pour me permettre d'atteindre cette étape importante de ma vie. À mes parents, qui m'ont inculqué des valeurs d'effort, de persévérance et d'ambition, je vous suis profondément reconnaissant pour tous les sacrifices que vous avez consentis afin de me donner la meilleure éducation possible. Votre soutien indéfectible et vos encouragements constants m'ont poussé à me dépasser et à croire en mes capacités.

À mes amis

Qui m'ont soutenu et accompagné à travers les moments de stress et de doute, je vous suis reconnaissant pour votre amitié précieuse. Vos encouragements, vos conseils et votre soutien moral ont été une source inépuisable de motivation et de réconfort. Vous avez été mes piliers dans les moments difficiles, et je vous remercie du fond du cœur pour votre présence constante.

BENAMAR Sofiane

Dédicace

Je dédie cet ouvrage à mes parents maman qui m'ont soutenue et encouragé durant ces années d'études.

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes sœurs et frère, mes grands-parents, mes tantes, mes oncles et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

RAHMOUNI Mohamed

SOMMAIR

Résumé	
Remerciements	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
	Page
Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites.	
I Introduction	03
I.1 Historique	03
I.2 Matériaux composites	03
I.3 Pourquoi utiliser des composites	05
I.4 Composants de matériaux	05
I.5 Les Renforts	06
I.6 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts	07
I.7 Matrice	07
I.8 Types de matériaux composites	08
I.9 Matériaux composites (carbone, époxy)	09
I.9.1 Introduction au composite de fibre de carbone	09
I.9.1.1 Fibre de carbone	09

I.9.1.2 Les principales propriétés de ces fibres	09
I.9.1.3 Elaboration de fibre de carbone	10
I.9.1.4 Types de tissages en fibre de carbone	11
I.9.1.4.1 Armure toile	11
I.9.1.4.2 Tissage sergé	11
I.9.1.4.1 Tissage satiné	12
I.9.2 Résine Epoxy	13
I.9.2.1 Définition et structure chimique de la résine époxy	13
I.9.2.2 Propriétés de résine époxy	14

Chapitre II : Élaboration et réalisation

II.1 Introduction	18
II.2 Fabrication des plaques	18
II.2.1 Le renfort	18
II.2.1.1 Tissu en fibres de carbone	18
II.2.2 La matrice	19
II.2.3 Les consommables	19
II.2.3.1 Film de mise sous vide (ou nylon)	20
II.2.3.2 Film séparateur perforé (ou tissu perforé)	20
II.2.3.3 Tissu d'arrachage	21
II.2.3.4 Tissu absorbant (la Watte)	22

II.4 Processus sous vide	23
II.4.1 Nettoyage du moule	23
II.4.2 Protection du moule	23
II.4.3 Application du mastic d'étanchéité	23
II.4.4 Préparation des tissus et films	23
II.4.3.5 Application du tissu et de la résine	23
II.4.3.5 Application de la résine et des tissus	25
II.4.3.6 Dépôt des films et tissus séparateurs	25
II.4.3.7 Installation de la pompe	25
II.4.3.8 Polymérisation	26
II.4.3.9 Démoulage	26
II.4.3.10 Découpage	27
II.5 l'essai de traction	28
II.5.1 Introduction	28
II.5.2 Objectifs d'essai de traction	28
II.6 vieillissement Thermique des plaques	29
II.7 Fabrication des Echantillon	29
II.7.1 Application de la résine et nanomatériau	29
II.7.2 vieillissement Thermique des échantillons	33
II.8 l'essais de Tribologie	34

II.8.1 Introduction	34
II.8.2 Objectifs de la tribologie	35

Chapitre II : Résultats et discussion

III. Résultats et discussion	37
III.1 Essai de traction	37
III.1.1 Effet du vieillissement en fonction de la température	36
III.1.1.1 Augmentation de la température = réduction de la résistance mécanique	36
III.1.1.2 Comportement à 100 °C	37
III.1.1.2.2 Fragilisation due à l'oxydation ou à la réticulation excessive	38
III.1.1.2.3 Applications	38
III.1.1.3.1 Conclusion	37
III.1.1.4 Vieillissement à 140 °C	37
III.1.1.4.1 Conclusion	38
III.1.1.5 Vieillissement à -30 °C	38
III.1.2 Vieillissement thermique prolongé (100 °C)	40
III.2 Essais de tribologie	
III.2.1 Le comportement à l'usure et au frottement	42

III.2.2 Le taux d'usure (WR)	45
III.2.3 Interprétation tribologique	47
III.2.3.1 Effet de la phase MAB sur le taux d'usure (25 C°)	48
III.2.3.1.1 Conclusion	48
III.2.3.2 Influence du vieillissement thermique (100 °C)	48
III.2.3.2.1 Conclusion	48
III.2.3.3 Comparaison globale et comportement tribologique	48
Conclusion générale	50

Liste des tableaux

	Nom des tableaux	Page
Tableau I.1	Les caractéristiques moyennes des fibres et renforts	07
Tableau I.2	Les propriétés mécaniques de la résine époxy	08
Tableau I.3	Domaines d'applications	14
Tableau II.1	Caractéristiques du tissu en carbone	19
Tableau II.2	Caractéristiques du film sous vide	20
Tableau II.3	Caractéristiques du tissu perfore	21
Tableau II.4	Caractéristiques du tissu d'arrachage	22
Tableau II.5	Caractéristiques du feutre de drainage	22
Tableau II.6	Vieillissement Thermique des plaques	29
Tableau II.7	Application de la résine et nanomatériau	29
Tableau II.8	Vieillissement Thermique des échantillons	32
Tableau III.1	Effet du vieillissement thermique sur le comportement mécanique du composite	39
Tableau III.2	Les résultats de taux d'usure	46

Liste des figures

	Nom de figure	Page
Figure I.1	Structure de matériau composite	4
Figure I.2	Constitution d'un matériau composite	6
Figure I.3	Les principaux renforts	6
Figure I.4	Les types de matrice	8
Figure I.5	Procédés d'élaboration	11
Figure I.6	Armure Toile	12
Figure I.7	Tissage sergé	12
Figure I.8	Tissage satiné	13
Figure II.1	Tissu de carbone	19
Figure II.2	Film de mise sous vide.	20
Figure II.3	Film séparateur perforé	21
Figure II.4	Rouleau de tissu d'arrachage.	21
Figure II.5	Rouleau de tissu absorbant la watte.	22
Figure II.6	Dépôt du mastic d'étanchéité sur la périphérie de la surface du moulage	23
Figure II.7	Application de résine	24
Figure II.8	Dépôt de la résine.	24
Figure II.9	Dépôt des films et tissus séparateurs	25
Figure II.10	La pompe de Sous-vide	25
Figure II.11	Polymérisation	26
Figure II.12	Démoulage	26
Figure II.13	Réalisation des plaques	27

Figure II.14	Schéma dimensionnel d'éprouvette	27
Figure II.15	Agitateur	30
Figure II.16	Application de la résine avec Nanomatériau	30
Figure II.17	Finition des échantillons	31
Figure II.18	Schéma d'élaboration un matériau composite	31
Figure II.19	Étuve thermique	33
Figure III.1	Variation Contrainte déformation du composite en fonction de la température.	40
Figure III.2	la variation de coefficient de frottement (T=25C°).	42
Figure III.3	la variation de coefficient de frottement (T=100C°).	44
Figure III.4	Schéma de l'essai tribologique sur le composite carbone/époxy à 8 plis	45
Figure III.5	Histogramme de la variation du taux d'usure en fonction des échantillons.	47

Liste des symboles

Le symbole	Le nom	L'unité
WR	Taux d'usure	(mm ³ /(N.m))
V	Volume	(mm ³)
Sm	Surface	(mm ²)
F	La charge applique	(N)
d	Diamètre	(m)
tr	Amplitude complète	(mm)

ملخص

في هذا البحث، تم دراسة المواد المركبة المصنوعة من راتنج الإيبوكسي وألياف الكربون، حيث تم تصنيع 8 صفائح مكونة من 16 طبقة بألياف موجهة بزاويتين 0 و 90 درجة، بالإضافة إلى مركب مكون من 8 طبقات معزز بمرحلة MAB. تم إجراء تجارب شيخوخة حرارية لتقييم تأثيرها على الخصائص الميكانيكية للمركبات. شمل العمل ثلاثة فصول: الفصل الأول تناول التعريف العام للمواد المركبة، الفصل الثاني ركز على الجانب التجريبي لعملية التصنيع، والفصل الثالث عرض النتائج ومناقشتها. تم إجراء اختبارات الشد على الصفائح ذات 16 طبقة، واختبارات تآكل لدراسة تأثير الشيخوخة والمرحلة المعززة MAB على المركب ذي 8 طبقات. كما تم تنفيذ محاكاة رقمية باستخدام برنامج Abaqus لتحليل سلوك الصفائح. أظهرت النتائج تأثيراً واضحاً للشيخوخة الحرارية والمرحلة المعززة على الأداء الميكانيكي للمركبات.

Abstract

This study focuses on epoxy-carbon fiber composites, where eight 16-ply laminates with fiber orientations of 0° and 90° were fabricated, along with an 8-ply composite reinforced by a MAB phase. Thermal aging tests were conducted to evaluate the effects on mechanical properties. The work is divided into three chapters: the first covers generalities on composite materials, the second details the experimental fabrication process, and the third presents results and discussions. Tensile tests were performed on the 16-ply laminates, while tribological tests assessed the impact of aging and the MAB phase on the 8-ply composite. Numerical simulations using Abaqus were also carried out to analyze the behavior of the epoxy-carbon laminates. The results demonstrate a significant influence of thermal aging and MAB reinforcement on the composite's mechanical performance.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude des matériaux composites à base de résine époxy et de fibres de carbone. Huit plaques composites de 16 plis, avec des orientations de fibres à 0° et 90°, ont été fabriquées, ainsi qu'un composite de 8 plis renforcé par une phase MAB. Des vieillissements thermiques ont été réalisés afin d'évaluer leur impact sur les propriétés mécaniques des matériaux. Le travail est structuré en trois chapitres : le premier présente les généralités sur les matériaux composites, le deuxième détaille la partie expérimentale relative à l'élaboration des plaques, et le troisième expose les résultats et discussions. Des essais de traction ont été effectués sur les plaques de 16 plis, tandis que des tests tribologiques ont permis d'étudier l'effet du vieillissement thermique et de la phase MAB sur le composite à 8 plis. Par ailleurs, une simulation numérique a été réalisée avec le logiciel Abaqus pour modéliser le comportement des plaques époxy-carbone. Les résultats montrent une influence notable du vieillissement thermique et du renforcement par phase MAB sur les performances mécaniques des composite

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, les matériaux composites ont connu un développement considérable en raison de leurs performances supérieures par rapport aux matériaux traditionnels. Les matériaux composites, constitués de deux phases distinctes – une matrice et un renfort – sont largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels grâce à leurs propriétés mécaniques supérieures et leur légèreté. Parmi ces matériaux, les composites à base de fibres de carbone associées à une matrice en résine époxy se distinguent par leur haute performance, notamment en termes de résistance mécanique et de durabilité, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications aéronautiques et industrielles.

Dans le cadre de ce travail, réalisé en collaboration avec Air Algérie et le laboratoire de l'Université Saad Dahlab de Blida- 1-, nous avons élaboré et étudié des plaques composites en époxy/carbone. Huit plaques de 16 plis ont été fabriquées lors d'un stage pratique pour des essais de traction, tandis qu'une série de 25 plaques de 8 plis a été développée pour des essais tribologiques. Parmi ces dernières, vingt plaques ont été renforcées par une phase nanomatériau métallique à base d'aluminium et de bore (MAB), avec des pourcentages variables de 5 %, 10 %, 15 % et 20 %, tandis que cinq plaques ont été réalisées sans renfort nanométrique pour servir de référence est résultat.

L'objectif est d'étudier ses propriétés mécaniques et tribologiques afin de mieux comprendre son comportement sous différentes sollicitations.

Pour cela, notre travail est organisé en trois parties : d'abord, une présentation générale des matériaux composites, de leurs caractéristiques et structures d'un composite parler en renfort est matrice en générale est une généralité spécifique sur la fibre de Carbone les caractéristiques est l'élaboration de fibre, les différents types de fibre est description sur la résine époxy comme une matrice de matériaux.

Ensuite, sur chapitre 2 une description détaillée de la démarche expérimentale adoptée pour la réalisation et les essais de la plaque ; enfin, une analyse des résultats obtenus lors des tests de traction et de tribologie, accompagnée d'une discussion sur les performances observées.

À travers cette étude, nous espérons contribuer à renforcer la connaissance et l'utilisation des composites époxy/carbone dans l'aéronautique, un secteur où l'innovation matérielle est essentielle pour relever les défis de demain.

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites.

I Introduction :

Les matériaux composites sont partout autour de nous, souvent invisibles mais essentiels. Ils façonnent notre monde moderne, des avions plus légers et économes en carburant aux prothèses biomédicales qui améliorent la vie des patients. Leur développement est le fruit d'une quête humaine constante : créer des matériaux plus performants, plus durables et mieux adaptés aux défis du quotidien.

I.1 Historique :

Les matériaux composites possèdent une histoire ancienne qui remonte à plusieurs millénaires. Dès 3400 av. J.-C., les Mésopotamiens utilisaient déjà des contreplaqués en collant des bandes de bois sous différents angles pour renforcer leur structure. Dans l'Antiquité, des civilisations comme les Égyptiens et les Mésopotamiens renforçaient leurs briques de boue avec de la paille, tandis que les Mongols, vers le 12^e siècle, ont inventé des arcs composites combinant bois, bambou, os et tendons pour créer des armes puissantes. Au 19^e siècle, la révolution chimique a permis le développement des premières résines synthétiques telles que la bakélite, un thermodurcissable qui a marqué le début des composites modernes [1]. Le 20^e siècle a vu une accélération majeure avec l'apparition des fibres de verre dans les années 1930, suivie des résines polyester et époxy, qui ont permis la fabrication de matériaux composites à haute performance utilisés notamment dans l'aéronautique et l'industrie. Depuis les années 1970, les composites se sont démocratisés dans de nombreux secteurs grâce à leurs propriétés mécaniques et légères, devenant un pilier de la technologie moderne. [2]

I.2 Matériaux composites :

Selon sa classe, chaque type de matériau possède des propriétés et des caractéristiques qui lui sont propres :

- Les métaux sont en général tenaces et ductiles mais leurs masses volumiques sont souvent élevées.
- Les polymères relativement légers, bénéficient de propriétés mécaniques Élastiques moyennes.
- Les céramiques ont des propriétés élastiques élevées mais présentent une grande fragilité.

En combinant divers types de matériaux, on obtient des composites [3]. Ces

composites combinent un matériau de renfort, dispersé sous forme de particules, fibres courtes ou fibres longues, au sein d'une matrice qui les enrobe. Le choix des renforts et de la matrice, de leurs dispositions, de leurs fractions respectives, permet à l'élaborateur du matériau de le concevoir pratiquement « sur mesure », optimisé pour la pièce où il sera utilisé, et même parfois optimisé localement en fonction de la distribution locale des contraintes dans la pièce.[4] Le terme « **composite** » a donc une connotation moderne mais l'usage de fibres très résistantes pour raidir et consolider une matrice en matériau bon marché est plus ancien que la roue ! Depuis 5000 ans, on a utilisé la paille et le crin de cheval pour renforcer des briques de terre. Les composites sont donc très anciens mais l'industrie des matériaux composites est récente. Elle s'est développée rapidement durant les 40 dernières années avec la mise au point des composites fibreux comme les polymères renforcés par des fibres de verre et les Polymères renforcés par des fibres de carbone. [5]

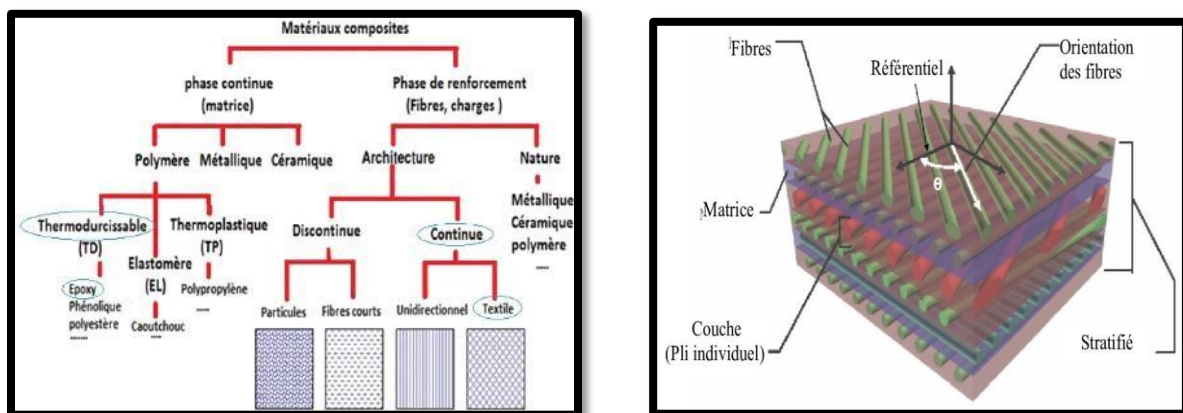


Figure I.1 : Structure de matériau composite.

I.3 Pourquoi utiliser des composites ?

Les matériaux composites sont désormais utilisés dans diverses industries car leurs propriétés sont meilleures que celles des matériaux anciens. L'un de leurs principaux avantages est leur rapport résistance/poids élevé [6], ce qui leur permet d'être utilisés comme matériaux solides mais légers, par exemple dans les industries aérospace et automobile.

De plus, les composites résistent à la corrosion et aux produits chimiques, ce qui améliore leur durabilité même en cas d'exposition à des environnements difficiles. Dans le même temps, ils ont plus de flexibilité dans la conception et pourraient réaliser des formes ou des structures

complexes que les métaux traditionnels ne peuvent pas réaliser ou qui sont trop dures pour eux. En outre, les composites peuvent améliorer les performances et les économies d'énergie ; ces aspects permettent de réduire la consommation de carburant des avions et des voitures par exemple. En outre, ils offrent la possibilité de réduire les coûts de maintenance et d'améliorer les normes de sécurité dans différents domaines.

I.4 Composants de matériaux :

Un matériau composite est constitué de plusieurs composants qui lui confèrent ses propriétés uniques. Voici les principaux éléments :

- **Matrice** : Elle sert de liant et assure la cohésion du matériau. Elle peut être polymère (résine époxy, polyester), métallique ou céramique. [8]
- **Renforts** : Ils apportent la résistance mécanique et peuvent être sous forme de fibres (carbone, verre, aramide) ou de particules (billes de verre, sable). [6]
- **Charges et additifs** : Ils améliorent certaines propriétés comme la résistance aux UV, la conductivité thermique ou la durabilité.

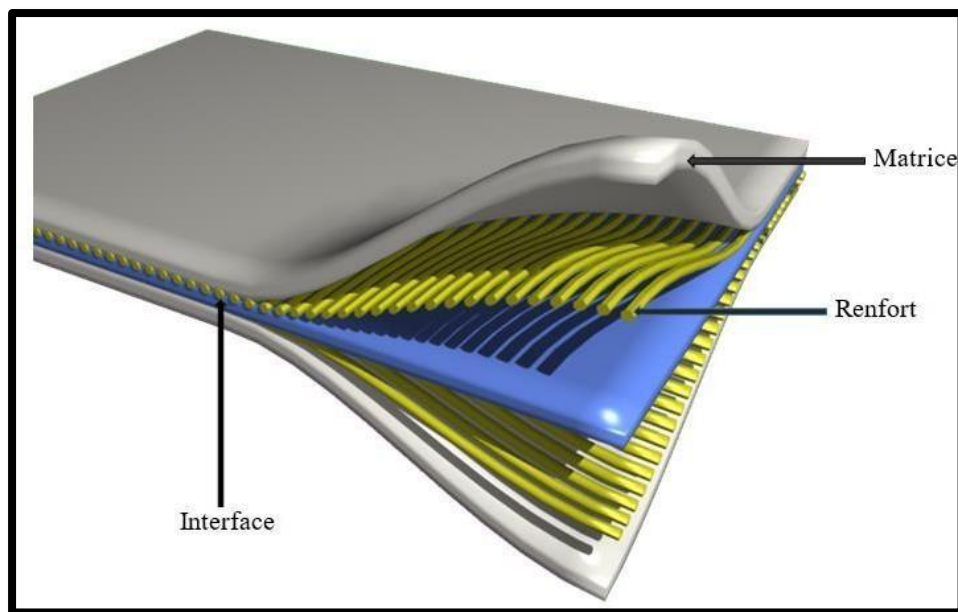


Figure I.2 : Constitution d'un matériau composite.[7]

I.5 Les Renforts :

Un renfort désigne un élément ajouté à une structure ou un matériau pour en améliorer la résistance et la durabilité. Dans le contexte des matériaux composites, les renforts sont

généralement des fibres (carbone, verre, aramide) qui augmentent la rigidité et la solidité du matériau. Ils jouent un rôle essentiel en supportant les contraintes mécaniques et en optimisant les performances globales du composite

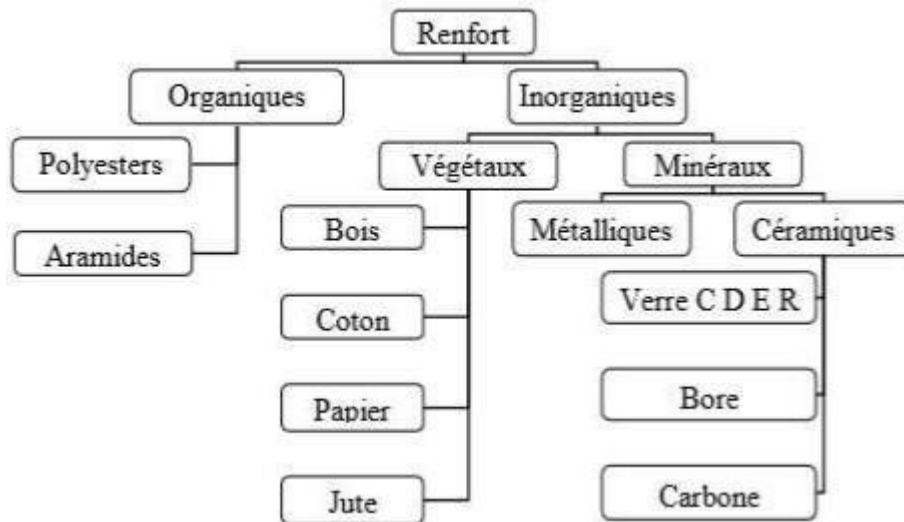


Figure I.3: Les principaux renforts. [9]

I.6 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts :

Tableau (I.1) : Les caractéristiques moyennes des fibres et renfort.

Renforts	Diamètre du filament (µm)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C ⁻¹
	d	?	E	G	?	s _r	A	a
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	0,5*10 ⁻⁵
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	0,3*10 ⁻⁵
Carbone HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	0,08*10 ⁻⁵
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	0,02*10 ⁻⁵
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	-0,2*10 ⁻⁵
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	0,4*10 ⁻⁵
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

I.7 Matrice :

La matrice est un matériau soit organique, minérale ou métallique, mais le plus souvent organique. Elle a pour rôle de :

- Lier les fibres de renfort,
- Répartir les contraintes,
- Apporter la tenue chimique de la structure,
- Donner la forme désirée au produit final.

Les différentes familles de Matrice sont présentées l'organigramme suivant :

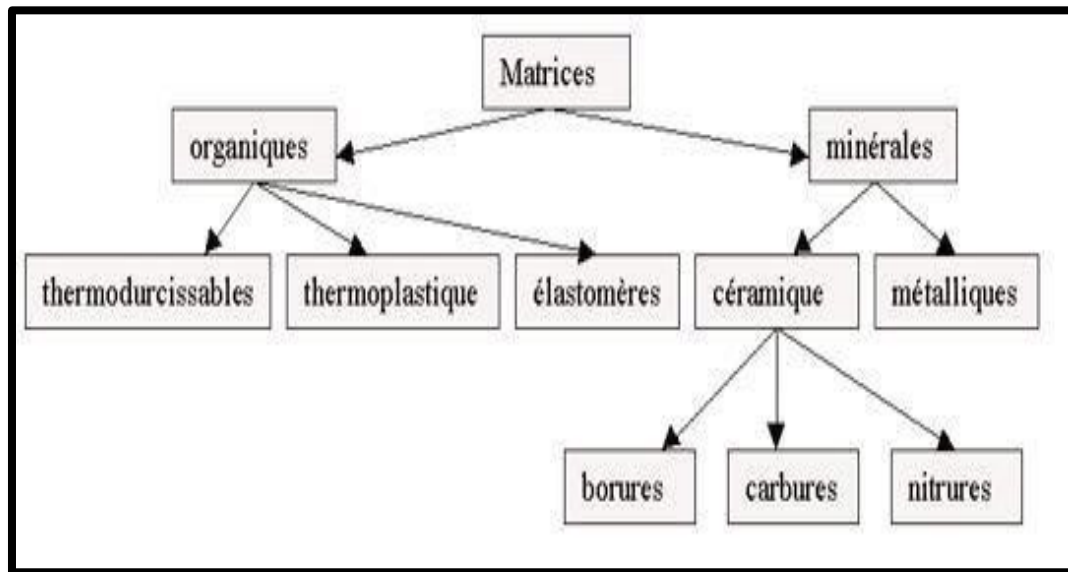


Figure I.4 : Les types de matrice. [15]

Les propriétés globales des matériaux composites sont fortement déterminées par les matériaux de matrice. Ceux-ci maintiennent non seulement les renforts ensemble, mais supportent également les charges et protègent les fibres contre les dommages causés par des facteurs environnementaux ou mécaniques. [16]

I.8 Types de matériaux composites :

Il existe plusieurs types de matériaux composites, chacun ayant des propriétés et des utilisations spécifiques : [17]

- **Composites à matrice polymère (CMP) :** Les deux types de résine qui sont, actuellement utilisées :

-des résines **thermodurcissables** ; polymères thermodurcissables. (Ex. Les résines époxy)

-des résines **thermoplastiques** ; polymères thermoplastiques (ex. Les polycarbonates).[19]

- **Composites à matrice métallique (CMM) :** Composés de fibres ou de particules dispersées dans une matrice métallique. Ainsi, ils sont utilisés dans les applications à haute température. [18]

- **Composites à matrice céramique (CMC)** : la matrice peut être constituée de carbone ou de carbure de silicium. Ces matrices sont déposées soit par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) par densification d'une préforme fibreuse, soit à partir de résines cokéifiables comme les résines phénoliques (dans le cas des matrices de carbone). [19]

I.9 Matériaux composites (carbone, époxy)

I.9.1 Introduction au composite de fibre de carbone :

Le composite de fibre de carbone est un matériau révolutionnaire largement utilisé dans divers secteurs industriels en raison de ses propriétés mécaniques exceptionnelles. Il se compose de fibres de carbone renforcées avec une matrice, généralement une résine époxy, pour créer un matériau composite performant.

Dans ce matériau composite, le renfort utilisé est la fibre de carbone. La matrice utilisée est la résine d'époxy.

La fabrication des composites à base de fibre de carbone implique l'empilement de plusieurs couches de fibres de carbone, souvent dans différentes orientations pour optimiser les propriétés mécaniques. Ces couches sont ensuite imprégnées de résine, qui est durcie à travers un processus de cuisson, solidifiant ainsi le composite. [20]

I.9.1.1 Fibre de carbone :

Les fibres de carbone sont des fibres d'environ 5 à 10 μm de diamètre. Elles sont composées principalement de 90 à 97 % d'atomes de carbone, avec environ 8 à 10 % d'azote, environ 1 % d'oxygène et moins de 1 % d'hydrogène. Elle est fabriquée majoritairement à partir de fibres de poly acrylonitrile (PAN). [10]

I.9.1.2 Les principales propriétés de ces fibres :

- Une forte résistance en traction et en compression
- Un module d'élasticité élevé i.e. une forte rigidité
- Une faible densité
- Une excellente résistance chimique
- Une excellente tenue à la température

- Une bonne conduction électrique

La variation des paramètres de fabrication (température, temps etc.) permet d'obtenir des fibres aux caractéristiques différentes :

Haut module d'élasticité ou module d'élasticité intermédiaire, haute résistance à la traction. [11]

I.9.1.3 Elaboration de fibre de carbone :

Produite à partir de fibre de poly acrylonitrile (PAN). Ces fibres de PAN sont obtenues par polymérisation, filage puis étirage du polymère. Les chaînes polymériques obtenues ont ainsi une orientation dans le sens de l'axe des filaments essentielle pour obtenir les propriétés de la fibre de carbone. [12]

- La première étape du procédé de carbonisation, appelée oxydation, consiste à rendre la fibre de poly acrylonitrile ininflammable. L'oxydation se produit entre 200 et 300 °C. Durant cette étape, la tension du fil permet de garder l'orientation de chaînes polymériques. [13]
- L'étape suivante, appelée carbonisation, consiste à ne conserver que les atomes de carbone. Avec des températures de l'ordre de 1 500 °C, la fibre de poly acrylonitrile oxydée réagit sous atmosphère inerte pour former les plans graphitiques caractéristiques de la fibre de carbone. [14]
- La fibre de carbone peut éventuellement subir un deuxième traitement thermique à des températures supérieures à 2 000 °C. Sous l'effet de la chaleur, la structure cristalline de la fibre de carbone se modifie permettant d'obtenir des fibres de carbone à haut module.
- La fibre de carbone subit ensuite un traitement de surface : une électrolyse chimique. Elle permet de greffer des groupes oxygène à la surface des filaments. Ces groupes réactifs vont ensuite réagir avec l'ensimage. L'ensimage permet à la fibre de réagir avec la matrice polymère du composite. Cette réaction permet une mise en œuvre optimale pour l'application

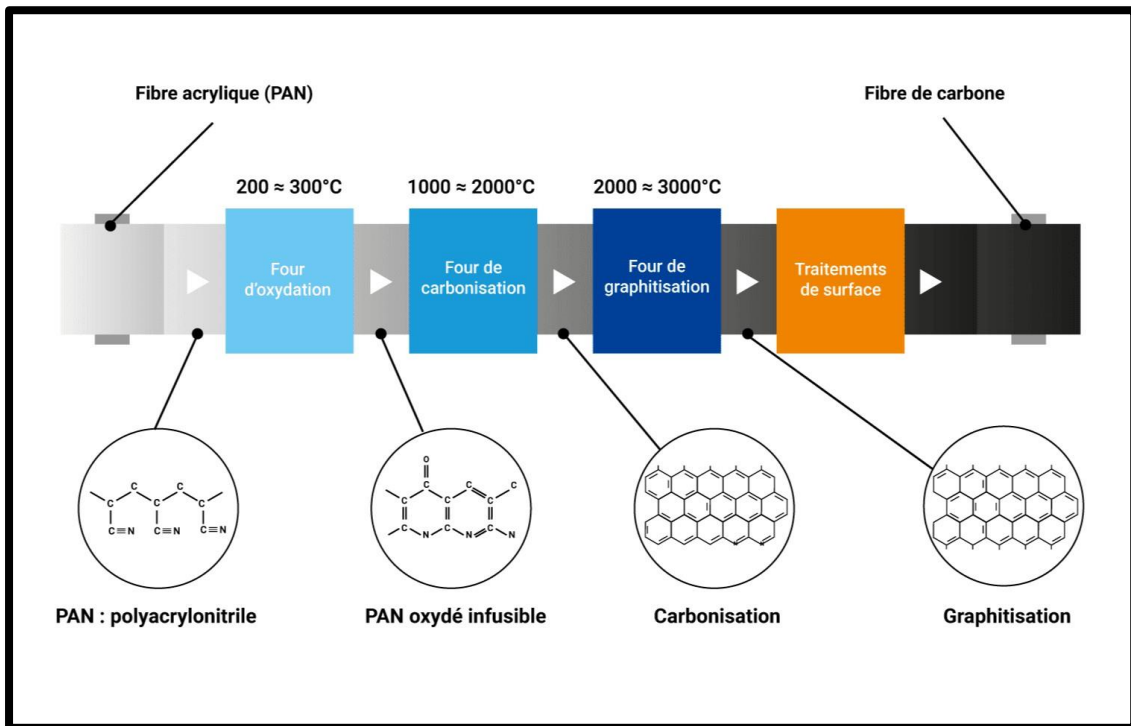


Figure I.5 : Procédés d'élaboration. [14]

I.9.1.4 Types de tissages en fibre de carbone :

La fibre de carbone se présente souvent sous la forme d'un tissu tissé. Le tissu en fibre de carbone a une variété de tissages. Certains types de tissage couramment utilisés sont le sergé, le satin et l'uni.[21]

I.9.1.4.1 Armure toile :

Une feuille de fibre de carbone à armure toile présente une apparence symétrique avec un petit motif en damier. Les câbles sont entrelacés selon un motif dessus/dessous dans ce tissage. La distance étroite entre les entrelacs contribue de manière significative à la stabilité de l'armure toile. La stabilité du tissu fait référence à la capacité d'un tissu à conserver son angle de tissage et l'orientation de ses fibres. En raison de sa stabilité remarquable, le tissage uni ne convient pas de manière optimale aux superpositions aux contours complexes. De plus, il lui manque la souplesse présentée par de nombreux autres tissages. Les tissus à armure toile conviennent généralement aux courbes bidimensionnelles, aux tubes et aux draps plats.

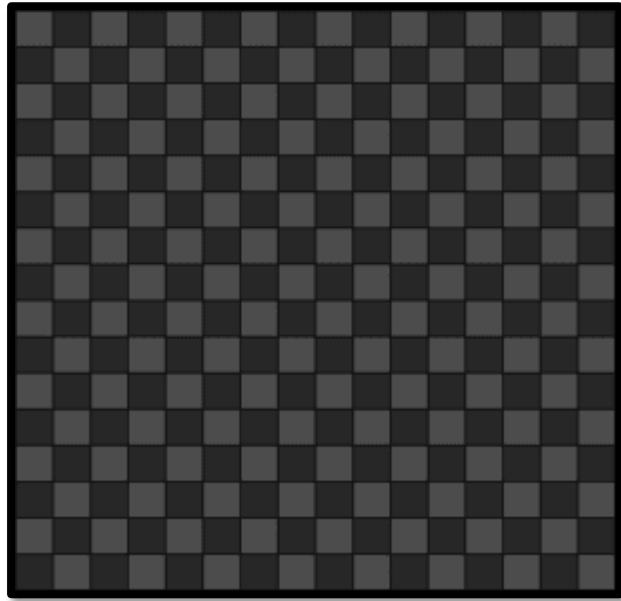


Figure I.6: Armure Toile. [22]

I.9.1.4.2 Tissage sergé :

Le tissage sergé est plus souple et capable de façonner des contours complexes. Il est supérieur au tissage satiné en termes de stabilité du tissu, mais pas aussi bon que le tissage uni. Le suivi d'un brin de câble dans une armure sergée passe par un nombre défini de câbles, puis sous le même numéro. L'application du motif dessus/dessous forme une pointe de flèche diagonale, parfois appelée « ligne sergé ».

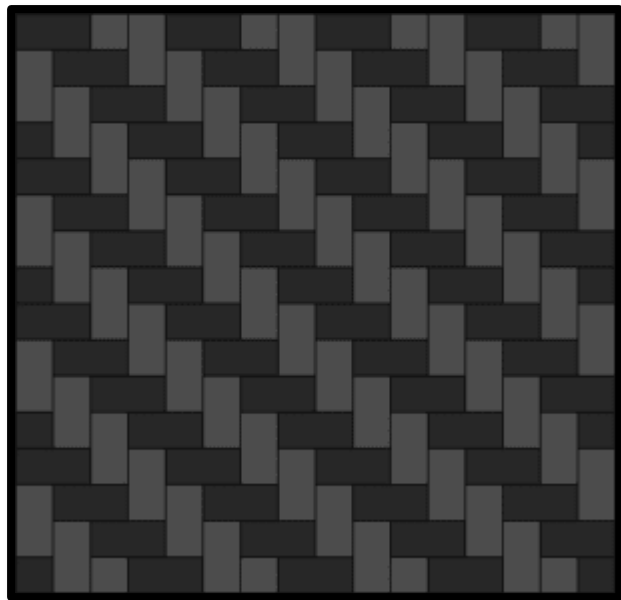


Figure I.7 : Tissage sergé. [22]

I.9.1.4.1 Tissage satiné :

Depuis l'Antiquité, le tissage satin a permis de créer des tissus en soie dotés de caractéristiques de drapé exceptionnelles et d'un aspect lisse et sans couture. La d'amabilité des composites leur permet de former et de s'enrouler facilement autour de contours complexes. Ce tissu a une faible stabilité en raison de sa grande formabilité. Les tissages de satin couramment utilisés dans l'industrie textile sont le satin 4 harnais (4HS), le satin 5 harnais (5HS) et le satin 8 harnais (8HS). La formabilité augmentera à mesure que le nombre de tissages satinés augmentera, tandis que la stabilité du tissu diminuera.

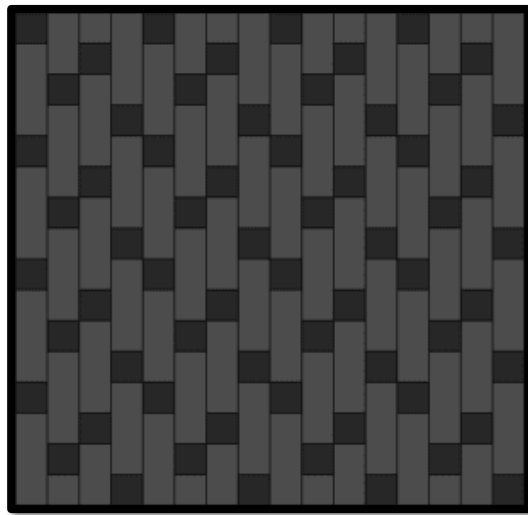


Figure I.8 : Tissage satiné. [22]

I.9.2 Résine Epoxy :

I.9.2.1 Définition et structure chimique de la résine époxy :

L'époxy, souvent appelé résine époxy, est un type de polymère thermodurcissable qui, une fois durci, forme un matériau extrêmement solide, adhérent et durable. C'est un composé organique dont la formule chimique est caractérisée par la présence de groupes époxydes, avec une structure de base qui peut être représentée comme $(C_2H_3O)_2C_6H_2OH$ pour une des molécules les plus simples de cette catégorie.[23] Elle contient au moins deux groupes époxyde(oxirane)très réactifs. Ces groupes sont généralement obtenus par la réaction de l'épichlorhydrine avec un diol, souvent du bisphénol A, pour former un éther glycidylique.[24]

I.9.2.2 Propriétés de résine époxy :

- **Adhérence** : L'époxy a une excellente capacité à adhérer à une variété de surfaces, ce qui le rend idéal pour des applications où une forte liaison est nécessaire.
- **Résistance chimique** : Une fois durcie, la résine époxy résiste à de nombreux produits chimiques, ce qui la rend utile dans des environnements industriels ou corrosifs.
- **Durabilité** : Les composites époxy sont connus pour leur longévité et leur capacité à résister à l'usure, aux chocs et à la déformation.
- **Isolation électrique** : La résine époxy est un excellent isolant électrique, ce qui la rend appropriée pour des applications électroniques.

Tableau (I.2) : Les propriétés mécaniques de la résine époxy.

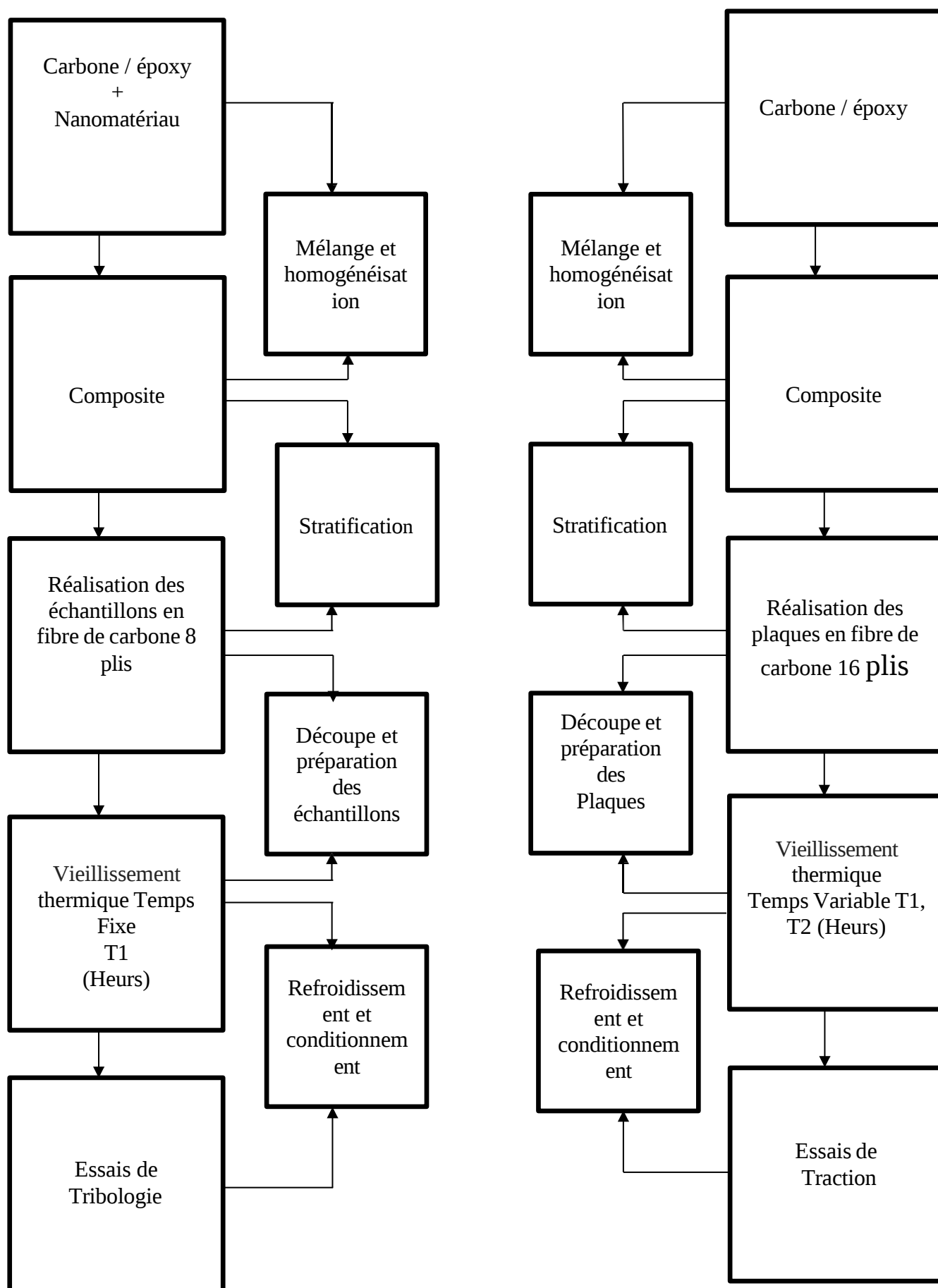
Module d'élasticité [GPa]	Module de cisaillement [GPa]	Coefficient de Poisson [-]	Densité [g/cm ³]
3,4	1,2	0,4	1,10

Utilisation exacte	Exemple concret	Photos de chaque Domaine
Fuselages, ailes, structures internes	Le Boeing 787 Dreamliner utilise des composites pour réduire le poids et améliorer l'efficacité énergétique.	The diagram shows the Boeing 787 Dreamliner's material composition by weight: - Composites: 50% - Aluminum: 20% - Titanium: 15% - Steel: 10% - Other: 5% A comparison note states: "By comparison, the 777 uses 12 percent composites and 50 percent aluminum."
Châssis, carrosserie, composants internes	Les voitures de sport comme la McLaren P1 intègrent des composites pour allier performance et légèreté.	The diagram illustrates the McLaren P1's chassis components, highlighting the use of composites in various parts like the front end, side sills, rear wing, and interior structure.
Pales d'éoliennes, panneaux solaires	Les pales d'éoliennes modernes sont fabriquées en composites pour maximiser leur résistance aux intempéries.	The diagram shows the internal structure of a wind turbine blade, detailing the use of composite materials for the main body and the internal spar cap.
Coques de bateaux, structures internes	Les yachts et bateaux de compétition utilisent des composites pour leur résistance à la corrosion et leur légèreté.	A photograph of a modern racing yacht, showcasing its lightweight and corrosion-resistant composite hull.
Raquettes de tennis, vélos, skis	Les vélos de course en fibre de carbone offrent une meilleure rigidité et un poids réduit.	A photograph of a carbon fiber road bicycle, demonstrating the application of composites in cycling equipment.
Façades, ponts, structures modulaires	Certains bâtiments modernes intègrent des composites pour améliorer l'isolation thermique et la durabilité.	A photograph of a modern building facade constructed from large, modular composite panels, illustrating their use in architecture.
Prothèses, équipements médicaux	Les prothèses en fibre de carbone sont légères et résistantes, offrant un meilleur confort aux patients.	A photograph of a carbon fiber prosthetic limb, showing how composites are used in medical technology for lightweight and durable support.

Chapitre II

Élaboration et réalisation

Partie expérimentale



II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillerons le processus de fabrication et les essais mécaniques des stratifiés composites. Le choix des matériaux, notamment le type de matrice et le renfort, a été fait en fonction de leur disponibilité et de la faisabilité des tests expérimentaux.

L'étude porte sur deux types de stratifiés composites à matrice polymère, qui diffèrent par le renfort utilisé : le premier est constitué de fibres de carbone, tandis que le second est renforcé de fibres.

L'objectif principal est d'analyser le comportement à la rupture de chaque matériau et d'évaluer leurs propriétés mécaniques sous différents types de sollicitations : traction, flexion, compression, fluage et fatigue.

Parmi les matériaux disponibles, ceux utilisés dans cette étude ont été choisis en raison de leur disponibilité au sein d'Air Algérie et de leur utilisation courante dans le domaine aéronautique

II.2 Fabrication des plaques

II.2.1 Le renfort :

Les renforts utilisés sont des tissus bidirectionnels en fibres de carbone.

II.2.1.1 Tissu en fibres de carbone :

Le tissu utilisé est en fibres de carbone avec une architecture taffetas, conforme à la norme BMS. Les caractéristiques du tissu sont détaillées dans le tableau II.1.

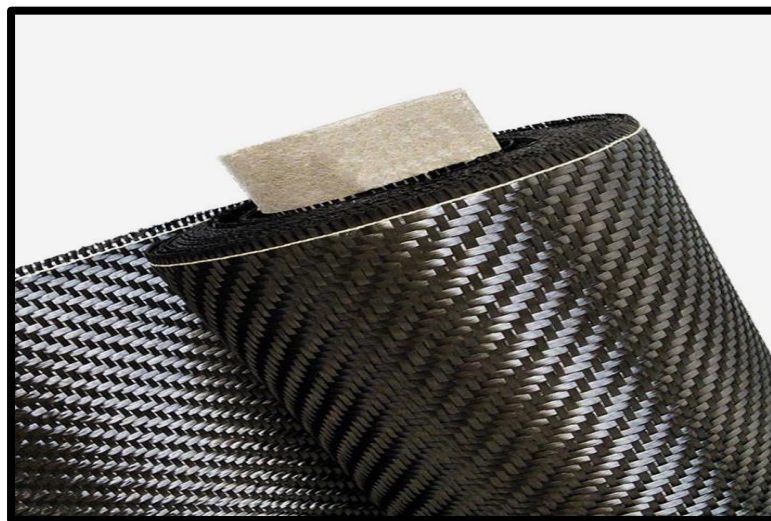


Figure II.1 : Tissu de carbone.

Tableau II.1 : Caractéristiques du tissu en carbone.[39]

Caractéristiques	Valeurs
Norme	BMS 9-8
Architecture	TAFTAS
Géométrie des fibres	Rectangulaire
Epaisseur (mm)	0,2
Densité (g/cm ³)	1,8
Résistance a la traction (N/mm ²)	330
Elongation (%)	1.9
Poids spécifique (g/m ²)	193

II.2.2 La matrice

La matrice est constituée d'un mélange homogène de résine époxyde EPOCAST 50-A1/946 et de durcisseur, préparé selon les instructions du fabricant, qui recommande un ratio de 100g de résine pour 15g de durcisseur.

II.2.3 Les consommables :

Pour la fabrication des éprouvettes, les matériaux suivants sont nécessaires :

II.2.3.1 Film de mise sous vide (ou nylon)

Le film de mise sous vide est utilisé principalement pour protéger la surface du moule, car il est imperméable, ne colle pas à la résine, et peut remplacer un agent démoulant. Il sert aussi à étanchéifier le système et à compacter correctement les tissus pour éviter la formation de vides. Sa résistance chimique et mécanique permet une bonne adaptation à la forme du moule. Les caractéristiques du film sont présentées dans le tableau II.6.



Figure II.2 : film de mise sous vide.

Tableau II.2: Caractéristiques du film sous vide.[39]

Caractéristiques	Valeurs
Référence	518260f
Matière	Nylon 6
Couleur	Vert
Epaisseur standard □m	50
Température maxi (°C)	205
Allongement a la rupture (%)	>350
Résistance a la traction (MPa)	>97
Surface massique (m ² /kg)	17,4
Stockage (%humidité, température °C)	50,20

II.2.3.2 Film séparateur perforé (ou tissu perforé)

Ce film (cf. Figure II.6) est utilisé pour séparer la pièce moulée des autres consommables, et grâce à ses petites perforations, il permet une bonne répartition de la résine. Il empêche également le collage du feutre répartiteur de vide à la pièce. Ses caractéristiques sont résumées dans le tableau II.7.



Figure II.3: Film séparateur perforé

Tableau II.3 : Caractéristiques du tissu perfore.[39]

Caractéristiques	Valeurs
Matière	Polyoléfine
Couleur	Bleu
Géométrie de perforation	Ellipse
Poids nominal (m/m ²)	1
Epaisseur (□m)	25
Température d'utilisation (°C)	125
Allongement a la rupture (%)	>280
Résistance a la traction (MPa)	>75
Stockage (% humidité, température °C)	45,20

II .2.3.3 Tissu d'arrachage

Le tissu d'arrachage présente plusieurs avantages lorsqu'il est utilisé sous vide. Il garantit une surface propre et évite que la plaque ne se colle aux autres tissus. Ses caractéristiques sont données dans le tableau II.8.



Figure II.4 : Rouleau de tissu d'arrachage.

Tableau II.4 : Caractéristiques du tissu d'arrachage.[39]

Caractéristiques	Valeurs
Référence	D300
Matière	Nylon66 (PA)
Couleur	Rose
Epaisseur (mm)	40
Poids nominal (g/m ²)	92
Température d'utilisation (°C)	182
Allongement a la rupture (%)	150
Résistance a la traction (MPa)	> 110
Stockage (% humidité, température °C)	05.200,20

II.2.3.4 Tissu absorbant (la watte)

La watte, un tissu absorbant 100% polyester non tissé, est très souple, ce qui lui permet de prendre la forme du moule. Sa structure poreuse permet une bonne circulation de l'air et facilite l'application uniforme de la pression par la pompe.



Figure II.5 : Rouleau de tissu absorbant la watte.

Tableau II.5 : Caractéristiques du feutre de drainage.[39]

Caractéristiques	Valeurs
Référence	AB 100-60
Matière	Fibres 100% polyester
Couleur	Blanc
Epaisseur (mm)	4
Poids nominal (g/m ²)	150
Température d'utilisation (°C)	205
Température de fusion (°C)	250

II.4 Processus sous vide : Les étapes suivantes résument le processus sous vide :

II.4.1 Nettoyage du moule : Le moule est nettoyé avec du toluène (ou de l'acétone) pour éliminer toute impureté.

II.4.2 Protection du moule : Le moule est recouvert d'un film de mise sous vide pour éviter que la résine n'adhère.

II.4.3 Application du mastic d'étanchéité : Ce mastic est appliqué autour du moule pour créer une zone étanche.



Figure II.6: Dépôt du mastic d'étanchéité sur la périphérie de la surface du moulage.

II.4.4 Préparation des tissus et films : Les tissus et films sont découpés aux dimensions appropriées.

II.4.3.5 Application du tissu et de la résine : Commencer par étaler une couche de résine sur le nylon afin d'assurer un bon positionnement du stratifié. Ensuite, les tissus de fibres sont déposés dans un ordre précis à 0° et 90°, respectant les orientations spécifiques, avec une couche de résine appliquée entre chaque tissu.

Calculer :

Nous avons utilisé 660 g d'époxy et 340 g de durcisseur pour fabriquer une plaque de 500 mm sur 500 mm



Figure II.7 : application de résine.



Figure II.8 : Dépôt de la résine.

II.4.3.5 Application de la résine et des tissus : Une couche de résine est d'abord appliquée, puis les couches de tissus sont déposées avec de la résine entre chaque couche.

II.4.3.6 Dépôt des films et tissus séparateurs : Les films perforés, d'arrachage et de drainage sont installés dans l'ordre spécifié.

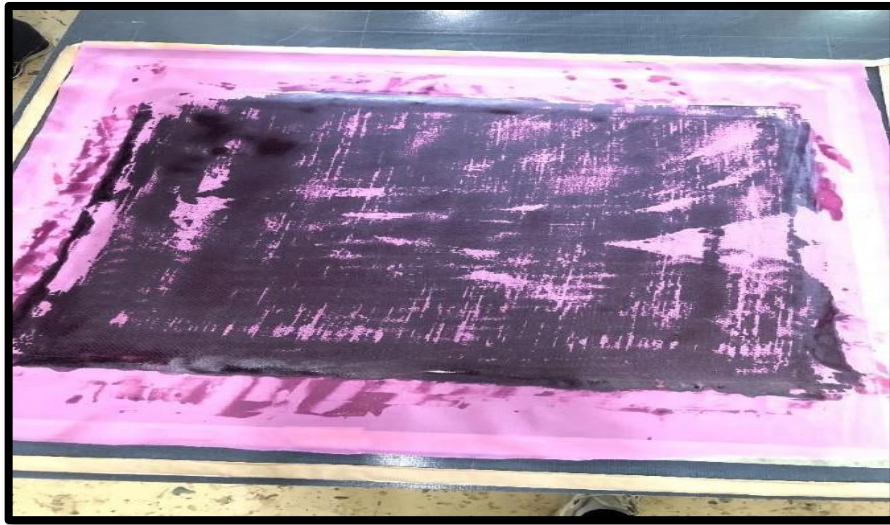


Figure II.9 : Dépôt des films et tissus séparateurs.

II.4.3.7 Installation de la pompe : La pompe est connectée pour créer une pression sous vide.



Figure II.10 : La pompe de Sous-vide

II.4.3.8 Polymérisation : Le stratifié est polymérisé pendant 24 heures à température ambiante (25 C°).

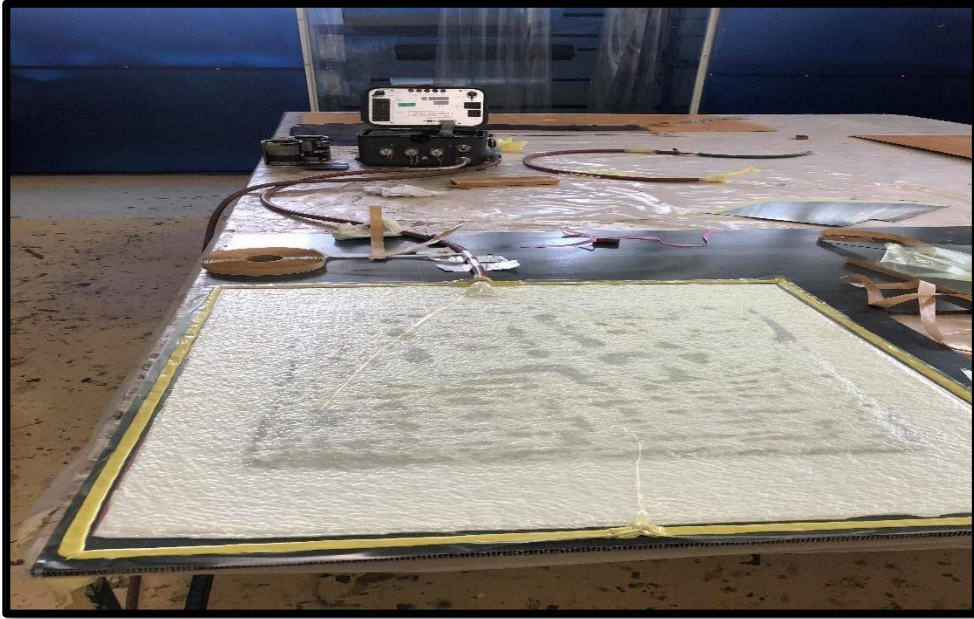


Figure II.11 : Polymérisation.

II.4.3.9 Démoulage : Après polymérisation, le stratifié est démoulé en retirant successivement les films et tissus.



Figure II.12 : Démoulage.

II.4.3.10 Découpage : La découpe des plaques de fibre de carbone nécessite précision et expertise pour garantir des finitions nettes et préserver l'intégrité du matériau.

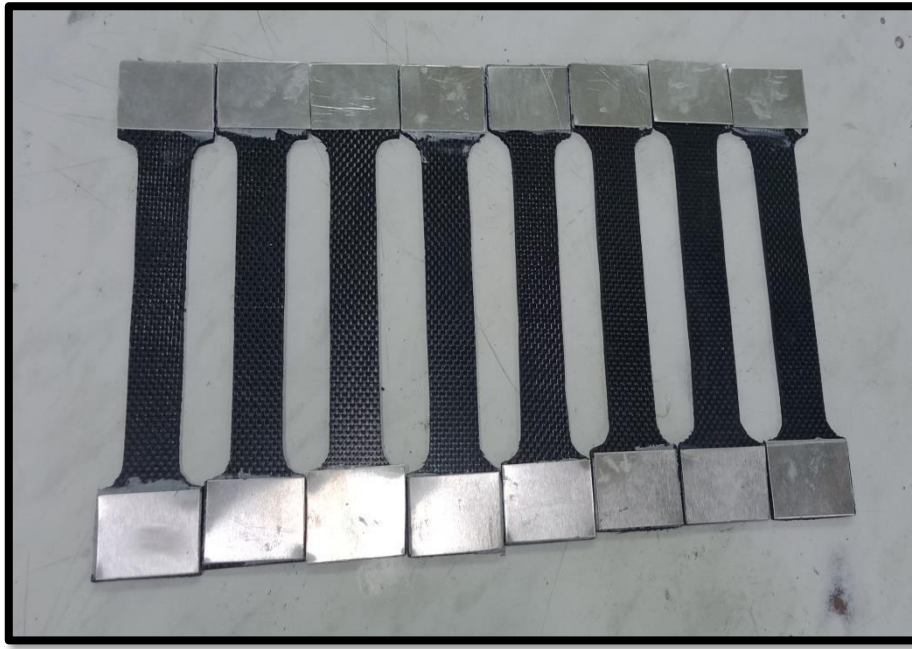


Figure II.13 : Réalisation des plaques.

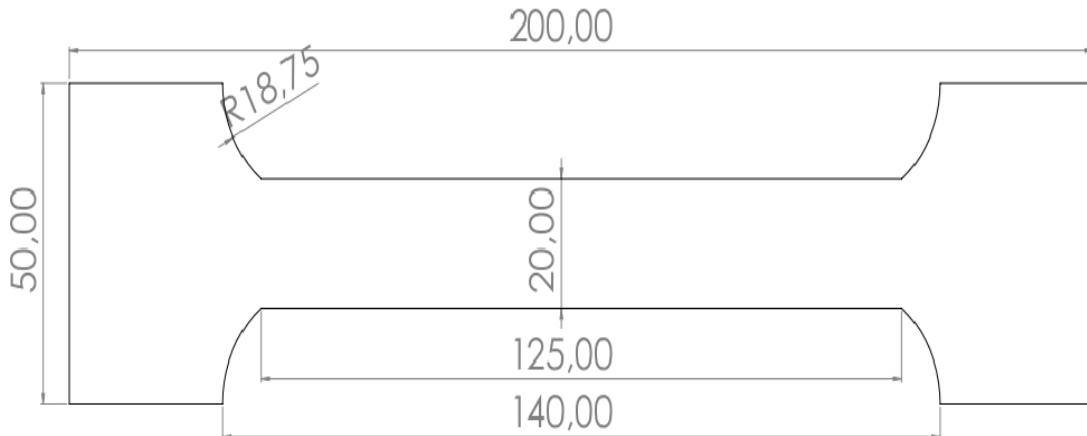


Figure II.14 : Schéma dimensionnel d'éprouvette

II.5 l'essai de traction

II.5.1 Introduction :

Est une méthode fondamentale pour caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau en appliquant une force uni axiale croissante jusqu'à la rupture de l'échantillon.

II.5.2 Objectifs de l'essai de traction :

- Déterminer la résistance maximale à la traction qu'un matériau peut supporter avant rupture. [32] [34]
- Mesurer le module d'élasticité (module de Young) et le coefficient de Poisson pour caractériser le comportement élastique. [30] [31]
- Évaluer l'allongement et la flexibilité du matériau sous charge uni axiale. [32]
- Identifier le point de rupture et analyser les mécanismes de fissuration et de rupture. [32] [33]
- Fournir des données essentielles pour la conception et le dimensionnement des structures en matériaux composites. [30] [33]
- Contrôler la qualité des matériaux et valider leur conformité aux normes internationales (ASTM D3039, ISO 527-4). [30] [31] [33]
- Optimiser le choix des matériaux et des procédés de fabrication dans les secteurs aéronautique, automobile, construction, maritime et énergie. [32] [34].

II.6 vieillissement Thermique des plaques :

Tableau II.6 : vieillissement Thermique des plaques.

Plaque	Températures	Temps (heures)
1	Ambiante (~25°C)	Témoin
2	-30°C	25h
3		97h
4	100°C	25h
5		97h
6	140°C	25 h
7		97 h

II.7 Fabrication des Echantillon :

La méthode de fabrication des plaques a été identique, en maintenant une orientation des fibres à 0° et 90° avec un empilement de 8 plis. Toutefois, l'étape de mise sous vide n'a pas été appliquée pour nos échantillons. Par ailleurs, une autre résine a été utilisée.

II.7.1 Application de la résine et nanomatériau :

Nous avons utilisé 8 g d'époxy et 2,66 g de durcisseur.

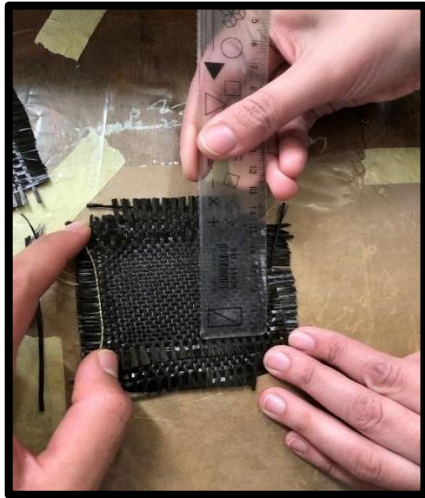
Tableau II.7 : Application de la résine et nanomatériau.

Pourcentage de nanomatériau	Quantité d'époxy +durcisseur (g)	Quantité de nanomatériau (g)
5%	10,66g	0,533g
10%		1,066g
15%		1,599g
20%		2,132g

En mélangeant le nanomatériau avec le durcisseur pendant 5 minutes, puis en ajoutant l'époxy et en laissant le mélange pendant 25 minutes.



Figure II.15 : Agitateur.



(a)

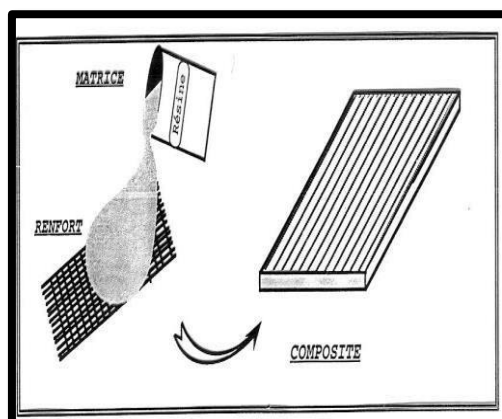


(b)

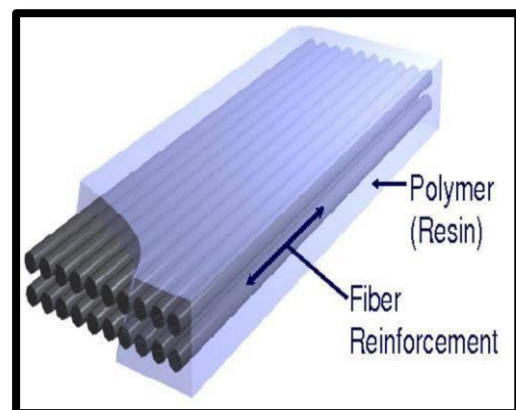
Figure II.16 : Application de la résine avec Nanomatériau.



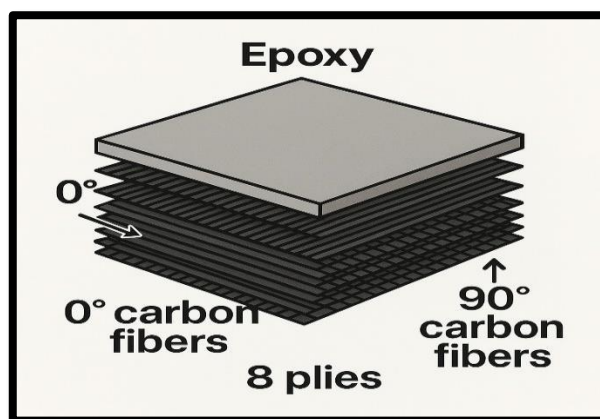
Figure II.17 : Finition des échantillons.



(a)



(b)



(c)

Figure II.18 : Schéma d'élaboration un matériau composite.

II.7.2 vieillissement Thermique des échantillons :

Tableau II.8 : vieillissement Thermique des échantillons.

Échantillon	Température (°C)	Nanomatériau % + sans Nanomatériau
1	-30°C	Sans Nanomatériau
2		5%
3		10%
4		15%
5		20%
6	Ambiante (~25°C) Sans Vieillissement	Sans Nanomatériau
7		5%
8		10%
9		15%
10		20%
11	100°C	Sans Nanomatériau
12		5%
13		10%
14		15%
15		20%
16		Sans Nanomatériau

17	140°C	5%
18		10%
19		15%
20		20%
21	180°C	Sans Nanomatériau
22		5%
23		10%
24		15%
25		20%



Figure II.19 : étuve thermique.

II.8 Essais de tribologie

II.8.1 Introduction :

C'est la science qui étudie les phénomènes liés au frottement, à l'usure et à la lubrification des surfaces en contact. Elle joue un rôle essentiel dans divers domaines tels que la mécanique, l'ingénierie, la biomédecine et même l'industrie automobile. Son objectif principal est d'optimiser les interactions entre les surfaces afin de réduire l'usure, d'améliorer l'efficacité énergétique et de prolonger la durée de vie des matériaux. [35] [36]

Le test utilisé est de type bille sur plan, effectué sur un tribomètre de marque "Anton Paar", selon un mouvement de glissement réciproque (aller-retour). Une bille (ZrO_2) est mise en contact avec la surface plane de l'échantillon monté sur un disque, sous une charge normale de 20 N. Le glissement s'effectue à une vitesse constante de 10.00 cm/s sur une distance totale de 300 mètres. 11 échantillons ont été testés dans les mêmes conditions pour assurer la fiabilité des résultats. Ce test permet de mesurer le coefficient de frottement et la perte de masse des échantillons, fournissant ainsi des informations essentielles sur la résistance à l'usure du matériau composite renforcé par une phase MAB. Pour ce procédé au sein de laboratoire de recherche études et recherche en technologies industriels département mécanique université blida.

II.8.2 Objectifs de la tribologie :

Prolonger la durée de vie des composants en limitant leur détérioration. Les principaux objectifs de la tribologie incluent :

- **Réduction du frottement Minium** : Minimiser la résistance au mouvement entre les surfaces pour améliorer l'efficacité des systèmes mécaniques.
- **Diminution de l'usure Prolonger**
- **Optimisation de la lubrification** : Utiliser des lubrifiants adaptés pour améliorer la performance des surfaces en contact.
- **Amélioration de la fiabilité des systèmes** : Concevoir des matériaux et des revêtements qui résistent mieux aux contraintes mécaniques.
- **Économie d'énergie** : Réduire les pertes énergétiques dues au frottement dans les machines et équipements industriels. [35] [37]

Chapitre III

Résultats et discussion

III. Résultats et discussions

III.1 Essai de traction

III.1.1 Effet du vieillissement en fonction de la température :

La figure (1) illustre la variation des contraintes déformation de l'effet du vieillissement thermique sur un composite à matrice époxy renforcé par les fibres de carbone, testé après 1 jour à deux températures différentes : 100 °C et 140 °C.

III.1.1.1 Augmentation de la température = réduction de la résistance mécanique :

- À **140 °C (courbe rouge)**, le composite atteint une contrainte maximale plus élevée (~260 MPa) que celui à 100 °C (~190 MPa), mais s'effondre brutalement après le pic. Cela indique un comportement plus fragile.
- Malgré la contrainte plus élevée, la fragilité accrue est signe d'un endommagement plus important à cette température.

III.1.1.2 Comportement à 100 °C

- La courbe montre un comportement plus ductile : après le pic de contrainte, la rupture est plus progressive, traduisant un mode de rupture moins brutal.
- Cela peut indiquer que le vieillissement à 100 °C induit moins de dégradation thermique de la matrice époxy, conservant partiellement sa ténacité.

III.1.1.2.1 Dégradation thermique de la matrice époxy :

- À **140 °C**, on peut atteindre la température de transition vitreuse (T_g) de l'époxy ou s'en approcher, ce qui ramollit la matrice, diminue l'adhérence fibre-matrice, et favorise les fissures interfaciales.
- Le pic de contrainte élevé à 140 °C peut venir de la rigidité temporairement augmentée avant la rupture brutale (effet de durcissement thermique local).

III.1.1.2.2 Fragilisation due à l'oxydation ou à la réticulation excessive :

- À plus haute température, le matériau peut subir une réticulation excessive ou une oxydation, rendant la matrice plus rigide mais aussi plus cassante.
- La chute rapide après le pic à 140 °C traduit une faible tolérance à la fissuration, contrairement à la courbe de 100 °C qui suggère une rupture plus progressive.

- **140 °C** entraîne un comportement plus fragile malgré une résistance initiale accrue → signe d'une dégradation rapide des propriétés mécaniques après vieillissement court terme.
- **100 °C** conserve un comportement plus ductile et tolérant à la fissuration → meilleure stabilité à cette température.
- Le matériau ne supporte pas bien le vieillissement à haute température, même pour une courte durée (1 jour).

III.1.1.2.3 Applications :

- Ces résultats sont cruciaux pour des applications aéronautiques ou automobiles où la température peut varier fortement : il faut éviter un vieillissement prolongé au-delà de 100 °C pour préserver l'intégrité structurelle du composite.

b) Analyse comparative du comportement mécanique (4 jours de vieillissement) :

III.1.1.3 Vieillissement à 100 °C

- Contrainte maximale ~290 MPa : la plus élevée des trois courbes.
- Déformation jusqu'à ~2,9 % avant une rupture brutale.
- Comportement quasi linéaire, suivi d'un pic net : le matériau reste solide et rigide, mais devient plus fragile à la rupture.

III.1.1.3.1 Conclusion :

- à 100 °C, le matériau reste performant après 4 jours, avec une légère augmentation de rigidité mais sans perte significative de résistance.
- À cette température, le processus de vieillissement peut induire une réduction modérée des propriétés mécaniques, des études indiquant une diminution potentielle de la résistance pouvant atteindre 25 % sur de longues périodes

III.1.1.4 Vieillissement à 140 °C

- Contrainte maximale abaissée (~160 MPa).
- Rupture plus précoce et moins nette que celle à 100 °C.
- La chute après le pic montre une fragilisation du matériau.

III.1.1.4.1 Conclusion :

à 140 °C, on observe une dégradation claire des propriétés mécaniques, probablement liée à une réticulation excessive ou une dégradation chimique.

III.1.1.5 Vieillissement à -30 °C

À -32 °C, le composite est soumis à une température bien inférieure à la température de transition vitreuse (T_g) typique des résines époxy, qui est généralement autour de 110 °C à 140 °C. En dessous de la T_g, le matériau est dans un état vitreux, rigide et fragile. Le vieillissement thermique à une température aussi basse est donc peu susceptible d'induire des dégradations chimiques importantes (comme la thermo-oxydation ou la thermolyse) qui sont observées à haute température (au-dessus de la T_g, par exemple le cas du 180 °C)

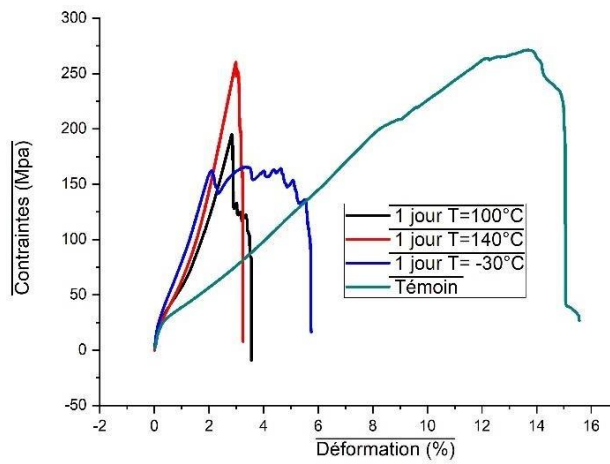
Tableau III.1.1 : Effet du vieillissement thermique sur le comportement mécanique du composite époxy/carbone.

Température	Comportement	Résistance	Ténacité	Dégradation
100 °C	Rigide, cassant à la rupture	Élevée (~290 MPa)	Faible (rupture nette)	Faible
140 °C	Moins rigide, fragilisé	Moyenne (~160 MPa)	Moyenne	Modérée
-30 °C	Ductile mais affaibli	Faible (~120 MPa)	Apparente	Élevée

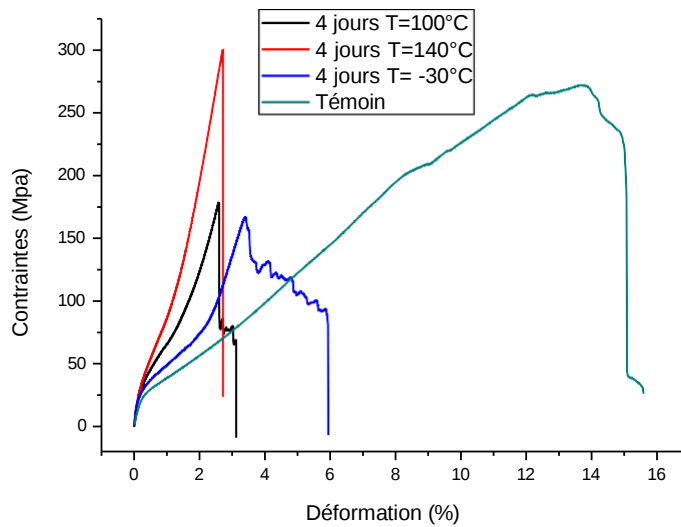
III.1.2 Vieillissement thermique prolongé (>100 °C) modifie significativement les propriétés mécaniques du composite époxy-carbone.

- **100 °C est tolérable** pour un usage prolongé (4 jours), mais au-delà, il y a perte
- Significative de résistance et de cohésion.
- À partir de **140 °C**, le matériau subit des **modifications structurales** importantes (oxydation, désorganisation de la matrice, perte d'adhérence fibre-matrice).
- **140 °C** : Cette température se rapproche de la température de transition vitreuse (T_g)

de la matrice époxy, où se produit une dégradation rapide. Une diminution significative de la force d'environ 30 % peut être observée en quelques heures.



(a)



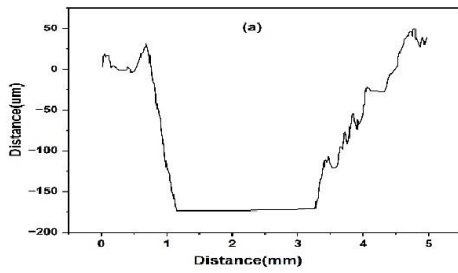
(b)

Figure III.1 : Variation Contrainte déformation du composite en fonction de la température.

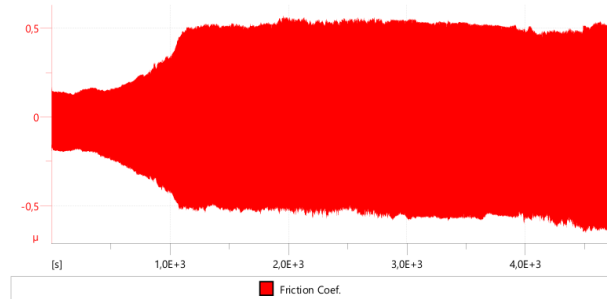
- Vieillissement thermo-oxydatif : Le mécanisme de vieillissement implique la rupture des liaisons chimiques au sein de la matrice époxy, en particulier des liaisons hydroxyle et éther, ce qui peut entraîner une réduction de la résistance à la traction.
- Durcissement secondaire : Le vieillissement initial peut améliorer la résistance au cisaillement inter laminaire en raison des effets secondaires du durcissement, mais une exposition prolongée entraîne une dégradation induite par les contraintes thermiqu

III.2 Essais de tribologie

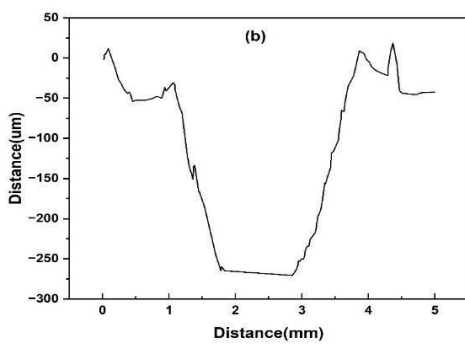
III.2.1 Le comportement à l'usure et au frottement :



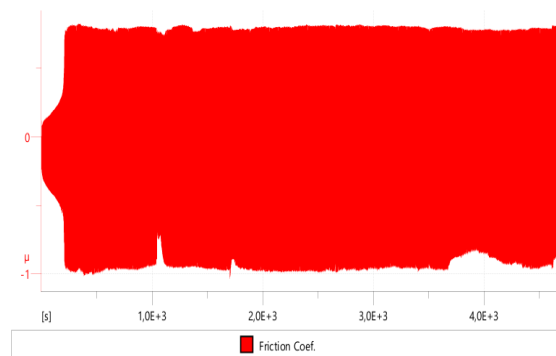
(a)



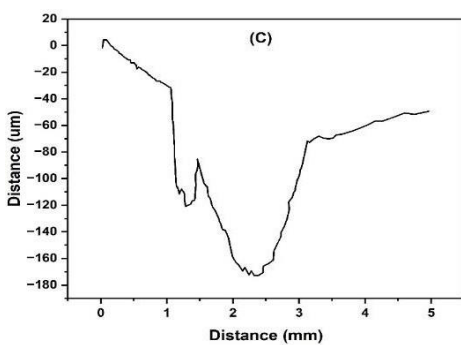
(1)



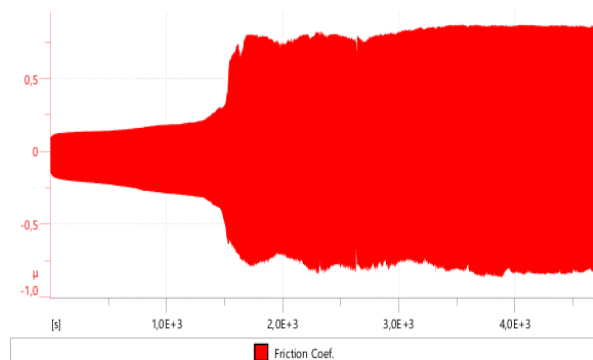
(b)



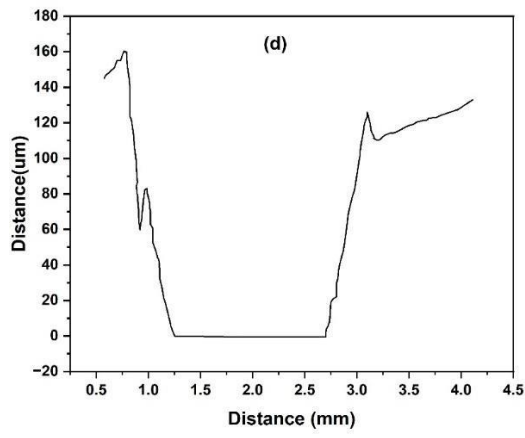
(2)



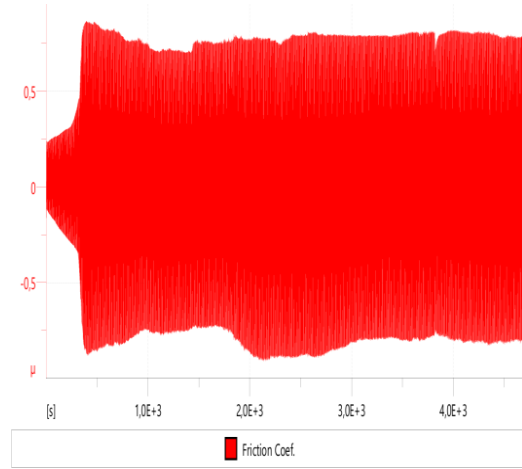
(c)



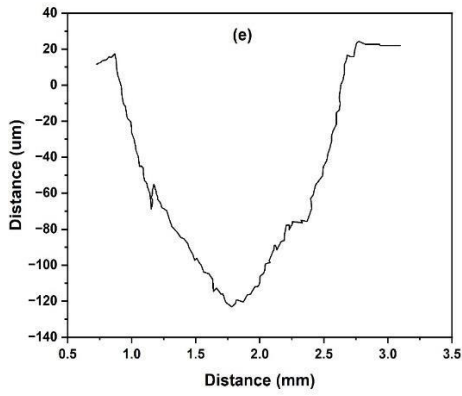
(3)



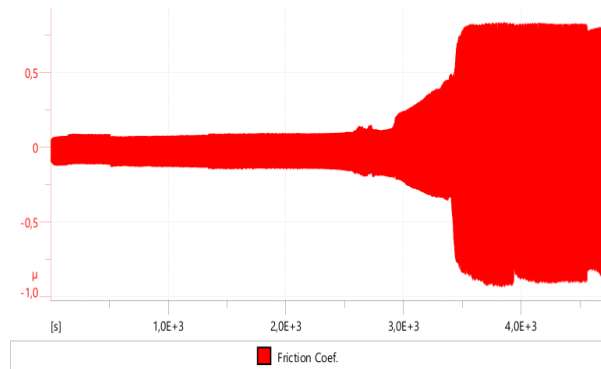
(d)



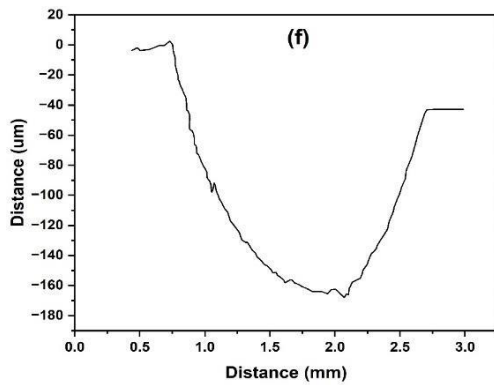
(4)



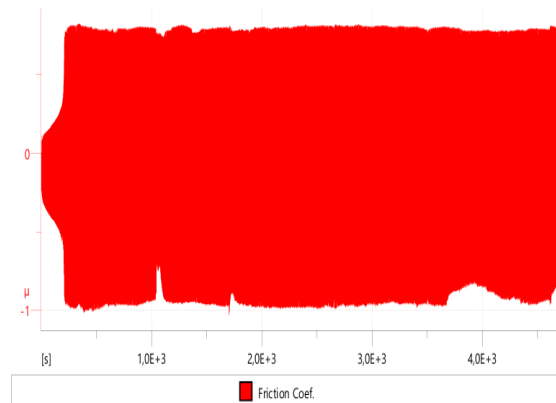
(e)



(5)

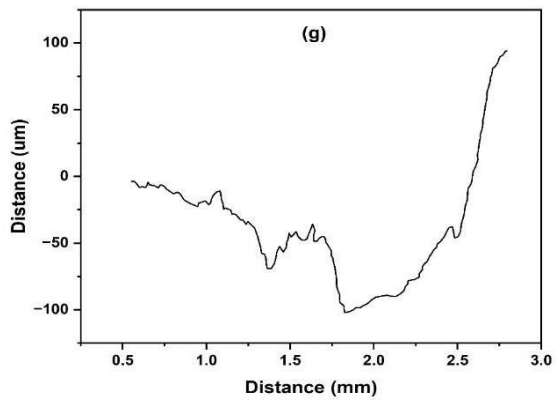


(f)

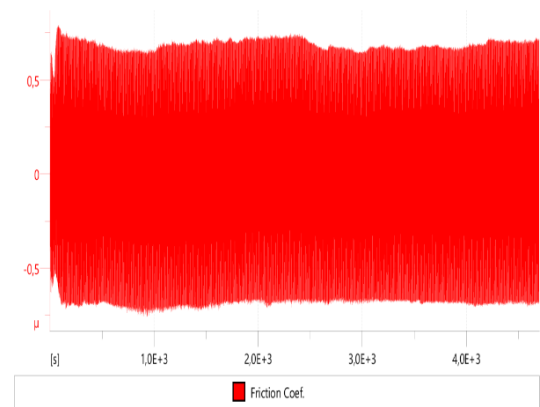


(6)

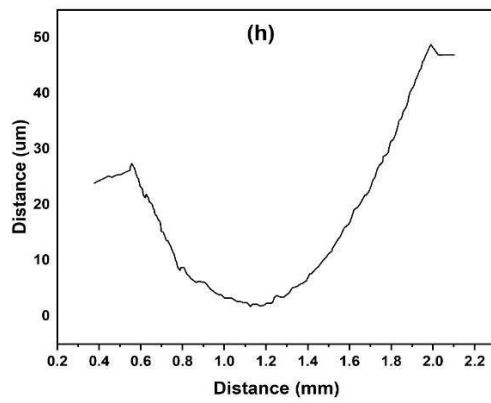
Figure III.2 : a,b,c,d,e,f la variation de coefficient de frottement des échantillons 1,2,3,4,5,6 respectivement ($T=25C^{\circ}$).



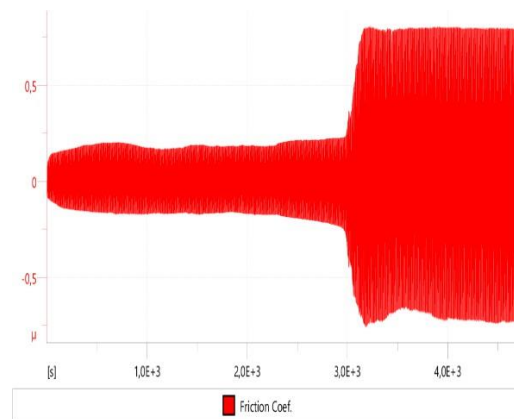
(g)



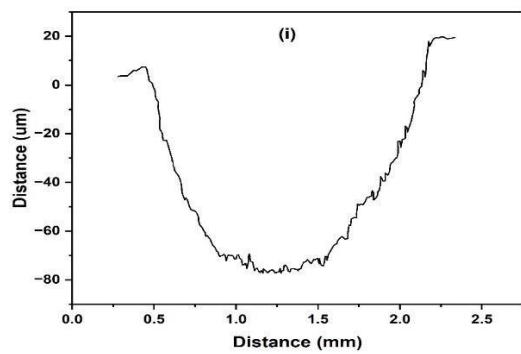
(7)



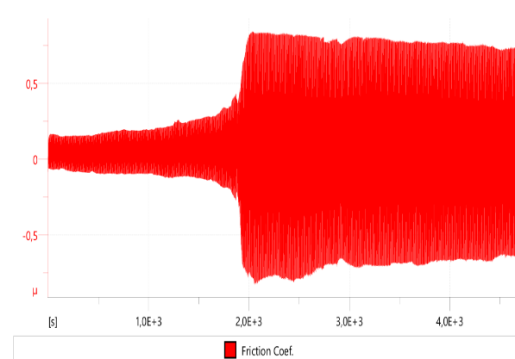
(h)



(8)



(i)



(9)

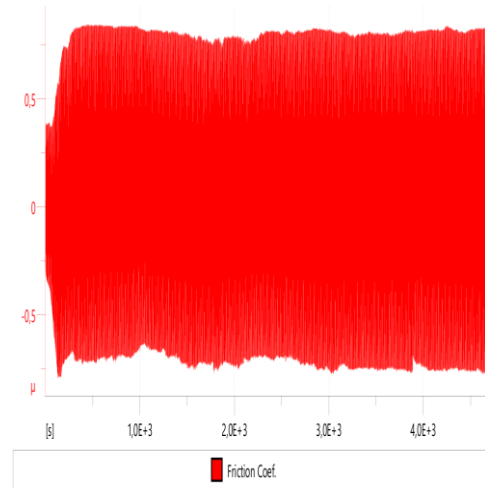
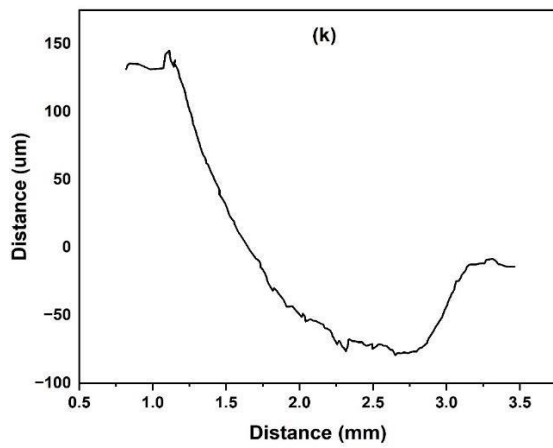
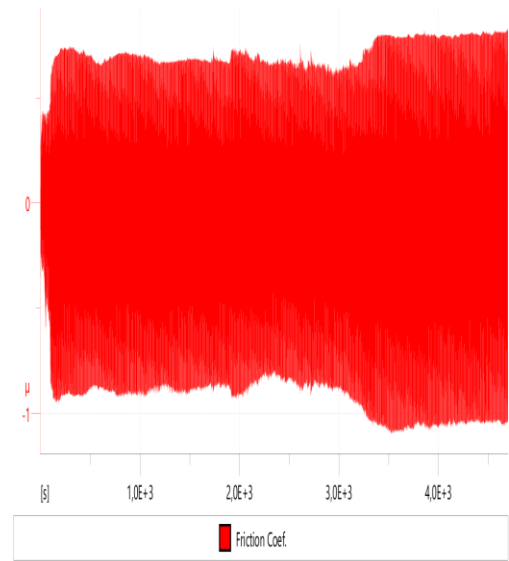
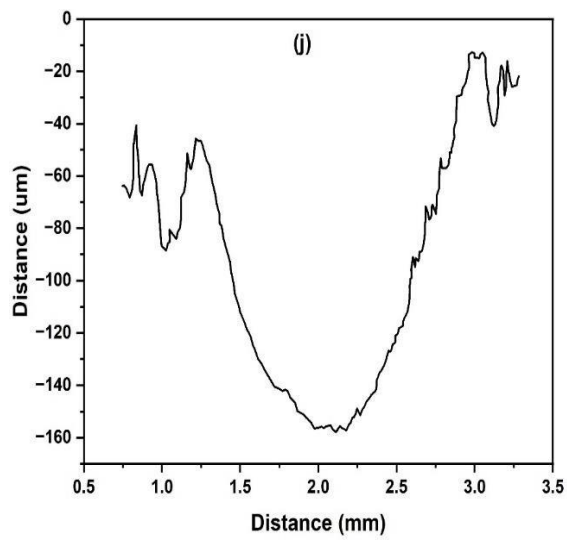


Figure III.3: g,h,i,j,k la variation de coefficient de frottement des échantillons 7,8,9,10,11 respectivement ($T=100^{\circ}\text{C}$).



Figure III.4 : Schéma de l'essai tribologique sur le composite carbone/époxy à 8 plis

III.2.2 Le taux d'usure (WR) :

Les résultats du taux d'usure (WR) sont présents dans le tableau suivant :

$$WR = \frac{V}{F.d}$$

$$V = S_m \times tr$$

$$F(N) = 20 \quad d(m) = 300 \quad tr(mm) = 6$$

Tableau III.2 : les résultats de taux d'usure

Échantillon	Composition	Temperature	MAB%	WR (mm ³ /(N.m))	Observation
1	Époxy/carbone, côté carbone	25 C°	0%	5,624×10 ⁻⁴	Référence brute, forte usure
2	Époxy/carbone, côté époxy		0%	4,225×10 ⁻⁴	Égarement mieux que (a), mais encore faible performance

3	Époxy/carbone + MAB, 5 %, côté carbone		5%	$1,784 \times 10^{-4}$	Ajout MAB améliore nettement la résistance
4	Époxy/carbone + MAB, 10 %, côté carbone		10%	$2,576 \times 10^{-4}$	Bonne, mais moins bonne que (c)
5	Époxy/carbone + MAB, 15 %, côté carbone		15%	$1,598 \times 10^{-4}$	Meilleur comportement sans vieillissement
6	Époxy/carbone + MAB, 20 %, côté carbone		20%	$1,932 \times 10^{-4}$	Légère dégradation : surcharge probable
7	Époxy/carbone,	100 C°	0%	$1,881 \times 10^{-4}$	Vieillessement améliorer paradoxalement un peu ce matériau
8	Époxy/carbone + MAB, 5 %,		5%	$0,5828 \times 10^{-4}$	Bonne tenue avec vieillissement thermique
9	Époxy/carbone + MAB, 10 %,		10%	$0,1097 \times 10^{-4}$	Meilleure résistance globale à l'usure
10	Époxy/carbone + MAB, 15 %,		15%	$1,244 \times 10^{-4}$	Moins performant que (i), mais encore très correct
11	Époxy/carbone + MAB, 20 %,		20%	$1,704 \times 10^{-4}$	Toujours fonctionnel, mais retour de l'usure à la hausse

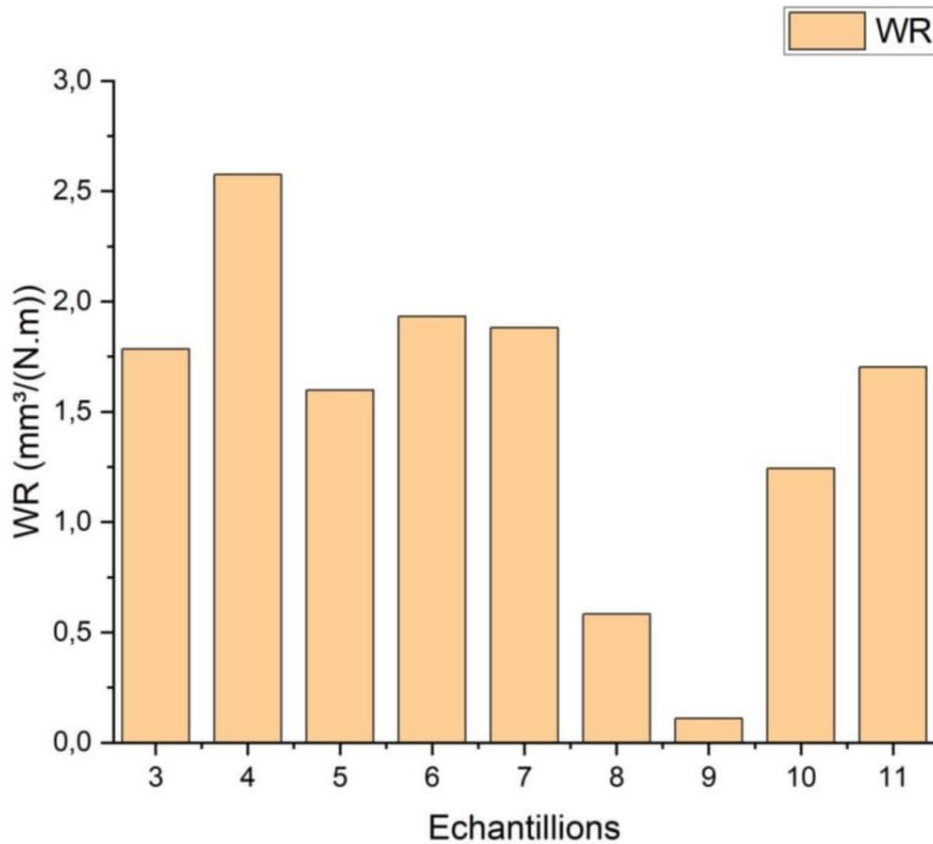


Figure III.4 : Histogramme de la variation du taux d'usure en fonction des échantillons.

III.2.3 Interprétation tribologique sous une charge de 20 N avec bille en ZrO₂

III.2.3.1 Effet de la phase MAB sur le taux d'usure (25 C°)

L'ajout de la phase MAB à la matrice époxy-carbone influence directement le comportement à l'usure :

- Sans MAB (échantillons a et b), les taux d'usure sont relativement élevés :
 - **(a)** $5,624 \times 10^{-4}$ (côté carbone)
 - **(b)** $4,225 \times 10^{-4}$ (côté époxy)
- Avec introduction de la phase MAB à 25 °C :
 - Le taux d'usure diminue progressivement jusqu'à 15 % MAB (échantillon e à $1,598 \times 10^{-4}$), indiquant un effet protecteur optimal.

- Au-delà (20 % MAB – échantillon f), le taux remonte légèrement, suggérant une concentration critique au-delà de laquelle la dispersion n'est plus homogène ou le matériau devient plus fragile.

III.2.3.1.1 Conclusion :

Une teneur optimale de 10–15 % MAB améliore significativement la résistance à l'usure.

III.2.3.2 Influence du vieillissement thermique (100 °C)

- En comparant les échantillons non vieillis (a–f) aux échantillons vieillis (g–k), on observe une dégradation globale des propriétés tribologiques après vieillissement, surtout sans MAB :
- Par exemple, **(j)** (15 % MAB, vieilli) présente un taux d'usure de $1,244 \times 10^{-4}$ contre $1,598 \times 10^{-4}$ pour **(e)** (même composition, non vieilli) → légère amélioration.
- Mais **(i)** (10 %, vieilli) montre $0,1097 \times 10^{-4}$ le meilleur résultat global, confirmant l'effet bénéfique du MAB même après vieillissement.

III.2.3.2.1 Conclusion :

Le vieillissement thermique révèle la stabilité des composites enrichis en MAB, en particulier à 10 %, qui présentent une excellente tenue au frottement malgré l'exposition à la température.

III.2.3.3 Comparaison globale et comportement tribologique

- Composites sans MAB : Usure importante, sensible au vieillissement.
- Composites avec 5–15 % MAB : Bonne résistance, performances optimales à 10 %.
- Composites à 20 % MAB : Léger recul des performances, peut-être dû à une surcharge ou mauvaise dispersion.
- Vieillissement thermique à 100 °C : Détériorant globalement les performances sauf pour les formulations enrichies en MAB.

Conclusion générale

- Ces résultats sont cruciaux pour des applications aéronautiques ou automobiles où la température peut varier fortement : il faut éviter un vieillissement prolongé au-delà 54 de 100 °C pour préserver l'intégrité structurelle du composite.
- À 140 °C, on peut atteindre la température de transition vitreuse (T_g) de l'époxy ou s'en approcher, ce qui ramollit la matrice, diminue l'adhérence fibre-matrice, et favorise les fissures interfaciales.
- Le vieillissement thermique d'un composite époxy/carbone à -32 °C pendant 4 jours entraîne principalement un état de rigidification et de fragilisation de la matrice époxy sans dégradation chimique notable. Les effets observés sont donc plutôt liés à des contraintes mécaniques internes et à une modification physique de la matrice (état vitreux renforcé) qu'à une dégradation thermique classique (thermolyse, oxydation) qui se produit à des températures bien plus élevées. Ce type de vieillissement peut affecter temporairement la résistance aux chocs et la durabilité mécanique, mais n'entraîne pas une perte significative des propriétés structurelles ou électriques du composite sur cette courte période.
- L'introduction progressive de la phase MAB dans les composites époxy-carbone a permis d'améliorer significativement la résistance à l'usure sous une charge constante de 20 N. Le taux optimal se situe autour de 10 %, où les résultats tribologiques sont les plus performants, même après un vieillissement thermique à 100 °C. Au-delà de cette concentration, l'effet devient moins bénéfique voire instable. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt de la phase MAB comme renfort complémentaire pour les applications nécessitant une forte résistance à l'usure et à la température.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Zhendi. (2025, mai 8). Historique des matériaux composites. Dinuofrp. <https://fr.dinuofrp.com/info/history-of-composite-materials-74691939.html>
- [2] Wikipedia. (2004, janvier 6). Matériau composite. https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite
- [3] Baïlon, J.-P. (2000). Des matériaux / Jean-Paul Baïlon, Jean-Marie Dorlot.
- [4] Dupeux, M. (2008). Aide-Mémoire De Science Des Matériaux. Dunod.
- [5] Ashby Michael F., Courbon Joël, & Dupeux Michel. (2008). Matériaux. 2, Microstructures, mise en œuvre et conception / Michael F. Ashby,... David R. H. Jones,... ; Traduit de l'anglais par Joël Courbon,... Michel Dupeux,... (3e édition [entièrement refondue]). Dunod.
- [6] BS Decolletage.(2024,juillet 30).Matériaux composites:quels avantages pur l'industrie?
- [7] **ACHOUR, Toufik**. Etude des techniques de réparation des structures composites endommagées. 117 p. Mémoire de magister. Département de génie mécanique, faculté des sciences de l'ingénieur, université Mentouri, Constantine : 2011
- [8] Le cours gratuit.(2025).Comprendre les matériaux composites:Analyse des types de matrices et de leurs propriétés.
- [9] **BERTHELOT, Jean-Marie**. Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures. 5eme édition. Paris : Tec & Doc, 2012. 633 p. Lavoisier. ISBN : 978-2-7430-1450-6.
- [9] L'Élémentarium. (2025, mai 7). Fibres de carbone. <https://lelementarium.fr/product/fibres-de-carbone/>
- [10] Institut National de Recherche et de Sécurité(INRS).(n.d).es Fibres de Carbone et de Graphite PDF.
- [11] Delhaes, P., & Olry, P. (2006). Fibres de carbone et matériaux composites. L'actualité chimique, (295-296), 42-47.
- [11] echniques de l'Ingénieur. (2019, mars 14). Propriétés des fibres de carbone. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/materiaux-composites-presentation-et-renforts-42142210/fibres-de-carbone-am5134/proprietes-des-fibres-de-carbone-am5134niv10002.h>
- [12] Toray CFE. (s.d.). Qu'est-ce que la fibre de carbone ? <https://toray-cfe.com/quest-ce-que-la-fibre-de-carbone/>

- [13] Wikipédia. (2005, janvier 22). Fibre de carbone. https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_de_carbone
- [14] Formlabs. (2024, novembre 13). Comment fabriquer des pièces en fibre de carbone. <https://formlabs.com/fr/blog/stratification-fibres-carbone-materiaux-composite/>
- [15] **BERTHELOT, Jean-Marie**. Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures. 5eme édition. Paris : Tec & Doc, 2012. 633 p. Lavoisier. ISBN : 978-2-7430-1450-6.
- [16] Chrétien, G. (1986). Matériaux composites à matrice organique. Technique et Documentation.
- [17] Demeyer, F. (2019). Élaboration d'un matériau composite à matrice carbone/hétéroélément métallique par MOCVD/MOCVI (Thèse). Université de Bordeaux. <http://www.theses.fr/2019BORD0359>
- [18] Davim, J. P. (2012). Machining of metal matrix composites. Springer-Verlag London.
- [19] Dupont, J. (2020). Matériaux composites : composants, propriétés et applications Diaporama. SlidePlayer. <https://slideplayer.fr/amp/14006302/>
- [20] Formlabs. (2024, novembre 13). Comment fabriquer des pièces en fibre de carbone. <https://formlabs.com/fr/blog/stratification-fibres-carbone-materiaux-composite/>
- [21] Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). (2002). Les fibres de carbone et de graphite (document pour le Médecin du Travail, N°92).
- [22] LeadRP. (s.d.). Types of carbon fiber materials and common applications. Récupéré le 14 juin 2025, de <https://leadrp.net/fr/blog/types-of-carbon-fiber-materials-and-common-applications/>
- [23] Matériel propriétés. (2023). *Epoxy: Formule, propriétés et application*. Récupéré 3 Juin, 2025. From Material properties.
- [24] Wikipédia. (s.d.). Polyépoxyde. Wikipédia. Consulté le 14 juin 2025, à l'adresse <https://fr.wikipedia.org/wiki/Poly%C3%A9poxyde>
- [25] Cherifi, Z. et Belkacemi, F. (2022). *Élaboration et caractérisation des composites stratifiés à matrice époxy* [Mémoire, École Nationale Polytechnique d'Alger]. [https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/10550/1/CHERIFI.Zineeddi ne_BELKACEMI.Fodhil.pdf](https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/10550/1/CHERIFI.Zineeddi%20ne_BELKACEMI.Fodhil.pdf)

- [26] Wikipédia.(2024). *Matériau composite* . https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite
- [27] Maagtechnique. (sd). *Matériaux composites* . Récupéré le 14 juin 2025, de https://maagtechnic.ch/content/dam/ch/pdf/kunststofftechnik/Composites_f.pdf
- [28] Thébault, P. (2006). *Les composites carbone/carbone* . Société Chimique de France. <https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/2019/12/2006-295-296-mars-avr-Thebault-p.47.pdf>.
- [29] Koanda, M. M. L. (2012). Optimisation des propriétés physiques d'un composite carbone époxy fabriqué par le procédé RFI Mémoire, École Polytechnique de Montréal.
- [30] ZwickRoell. (2019). *ASTM D3039 : Essai de traction composites* . Récupéré de <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/composites/astm-d3039-essai-de-traction-composites/>
- [31] ZwickRoell. (sd). *OIN 527-4 | ISO 527-5 Essai de traction composites renforcés de fibres* . Récupéré de <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/composites/iso-527-4-iso-527-5-essai-de-traction-composites-renforces-de-fibres/>
- [32] Dévotrans. (sd). *Qu'est-ce que l'essai de traction des composites ?* Récupéré de <https://devotrans.com/fr/qu-est-ce-que-c-est/qu-est-ce-que-l-essai-de-traction-des-composites.html>
- [33] Laboratoire STEP. (sd). *Essai de traction* . Récupéré de <https://step-lab.com/fr/essai-traction/>
- [34] Zaidi, A. (2019). *Essais mécaniques sur matériaux composites* [Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou]. <https://www.ummtto.dz/dspace/bitstream/handle/ummtto/1036/Zaidi%20Ali.pdf>
- [35] Smith, J. (2021). *Principes de tribologie*. Springer
- [36] Brown, R. et Lee, M. (2020). *Tribologie dans les applications d'ingénierie*. Wiley
- [37] Jones, T., Martin, P., et Zhang, Y. (2019). *Lubrification et science de l'usure*. Elsevier
- [38] Williams, K. (2022). *Efficacité énergétique et tribologie*. Taylor & Francis

[39] AMIROUCHE.E . Etude du comportement mécanique des stratifier
Carbone/époxy et verre/époxy et comparaison. Université SAAD DAHLAB Blida 1,2016