



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah – Ouargla
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



Thèse présentée en vue d'obtention du diplôme de

Doctorat Es-Sciences

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Mécanique

Thème

CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION MECANIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE FIBRES NATURELLES

Par : Mehdi KHALFI

Soutenu publiquement le : 23 Juin 2026

Devant le jury :

Président	Mr. Toufik AMEUR	MCA	UKM Ouargla
Encadreur	Mr. Mustapha BOUAKBA	Professeur	UKM Ouargla
Co-encadreur	Mr. Mohammed Salah BENNOUNA	Professeur	UKM Ouargla
Examineur	Mr. Bilel HAMADI	MRA	CRTI Alger
Examineur	Mr. Brahim ISSASFA	MCA	ENSET Skikda
Examineur	Mr. Sofiane CHORFI	MCA	ISTA Constantine 1

En mémoire de ma mère

A mon père

A ma femme Rima

A mes enfants : Abdelouadoud, Abdelghafour et Fadoua

A mes frères et ma sœur et toute ma famille

A mes amis

Remerciements

C'est avec une profonde dévotion que je remercie ALLAH, qui m'a accordé la volonté de surmonter les obstacles pour finaliser cette recherche.

Je voudrais commencer par remercier sincèrement mes directeurs de thèse, "Pr. Mustapha BOUAKBA" et "Pr. Mohammed Salah BENNOUNA", pour m'avoir fait confiance dès le début pour mener à bien cette tâche, ainsi que pour leurs enseignements et leur patience durant ce parcours en recherche scientifique. C'était un plaisir et un privilège pour moi de travailler avec eux.

Je suis également profondément reconnaissant envers les membres de jury, "Mr. Toufik AMEUR", Maitre de Conférence à l'université de Ouargla, "Mr. Bilel HAMADI", Maitre de Recherche au Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) – Alger, "Mr. Ibrahim ISSASFA", Maitre de Conférence à l'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique (ENSET) – Skikda, ainsi que "Mr. Sofiane CHORFI", Maitre de Conférence à l'Institut des Sciences et Techniques Appliquées (ISTA) - Constantine 1 pour leur expertise et leur engagement envers mon travail. Leur temps et leurs efforts consacrés à la révision de ma thèse ont été précieux pour moi et m'ont permis d'améliorer mon travail.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail. Leur soutien et leur encouragement ont été précieux pour moi,

Merci à vous tous.

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux	viii
Nomenclature	ix
Abréviations	x
Résumé	xi
Introduction Générale	1
Chapitre 1 Généralités sur les Matériaux Composites	
1.1 Introduction.....	5
1.2 Définition	6
1.3 Historique.....	7
1.4 Les constituants.....	9
1.4.1 Le renfort	9
1.4.1.1 Architecture des renforts.....	10
1.4.1.2 Type des fibres	13
1.4.2 La matrice	22
1.4.2.1 Résines thermodurcissables	22
1.4.2.2 Résines thermoplastiques.....	25
1.4.2.3 Résines thermostables	27
1.4.2.4 Matrice métallique	28
1.4.2.5 Matrice céramique	28
1.4.3 Les charges et additifs.....	29
1.4.3.1 Les charges.....	29
1.4.3.2 Les additifs.....	30
1.5 Procédés d'élaborations	30
1.5.1 Moulages sans pression.....	30
1.5.1.1 Moulage au contact.....	30
1.5.1.2 Moulage par projection simultanée.....	30
1.5.2 Moulage sous vide	31
1.5.3 Moulage par compression	31
1.5.3.1 Moulage par injection de résine.....	31
1.5.3.2 Moulage par compression de résine.....	32
1.5.3.3 Moulage par injection de mat préimprégné	32
1.5.4 Moulage en continu.....	33

1.5.5	Moulage par pultrusion	34
1.5.6	Moulage par centrifugation	34
1.5.7	Moulage par enroulement filamentaire	34
1.6	Architecture des matériaux composites	36
1.6.1	Les stratifiés	36
1.6.2	Sandwichs	37
1.7	Avantages et inconvénients des matériaux composites	38
1.8	Conclusion	39

Chapitre 2 Revue de la Littérature sur les Biocomposites

2.1	Introduction.....	40
2.2	Biocomposites.....	41
2.2.1	Définition d'un Biocomposite.....	41
2.2.2	Avantages et inconvénients.....	41
2.2.3	Applications des biocomposites.....	42
2.2.4	Avenir des biocomposites	43
2.2.5	Observations expérimentales	43
2.3	Fibres végétales.....	44
2.3.1	Composition d'une fibre végétale	44
2.3.2	Limitations à l'utilisation des fibres naturelles	46
2.3.2.1	Absorption d'humidité et compatibilité avec les polymères	46
2.3.2.2	Dégradation thermique des fibres naturelles.....	46
2.3.2.3	Dépendance à la récolte	47
2.3.3	Modification de la surface des fibres naturelles.....	47
2.3.4	Types de fibres naturelles d'origine végétale	48
2.3.4.1	Fibre d'Abaca.....	49
2.3.4.2	Fibre d'Areca	50
2.3.4.3	Fibre de Bagasse	51
2.3.4.4	Fibre de Bambou.....	52
2.3.4.5	Fibre de Banane	53
2.3.4.6	Fibre de Coir	54
2.3.4.7	Le Coton.....	55
2.3.4.8	Fibre de Lin (Flax).....	56
2.3.4.9	Fibre d'Henequen.....	57
2.3.4.10	Fibres de Jute	57
2.3.4.11	Fibre de Kapok.....	59

2.3.4.12	Fibres de chanvre (Hemp).....	60
2.3.4.13	Fibre de palmier	61
2.3.4.14	Fibre de Ramie	62
2.3.4.15	Sisal.....	63
2.3.4.16	Diss	64
2.3.4.17	Autres.....	67
2.4	Fibres animales	68
2.4.1	La Soie	69
2.4.2	Fibres de laine	69
2.5	Bio-matrices (Biopolymères).....	69
2.6	Conclusion	70
Chapitre 3 Caractérisation du Biocomposite Diss/Epoxy		
3.1	Introduction.....	72
3.2	Matériels et méthodes	73
3.2.1	Préparation des fibres.....	73
3.2.2	Elaboration des éprouvettes pour essai de traction	74
3.2.1	Elaboration des éprouvettes pour essai Charpy	78
3.2.2	Matériel	78
3.3	Résultats et discussion	79
3.3.1	Imagerie MEB de la feuille de Diss	79
3.3.2	Essai de traction	81
3.3.2.1	Comportement général.....	83
3.3.2.2	Impact du taux en fibres sur le module de Young	83
3.3.2.3	Impact du taux en fibres sur contrainte maximale σ_e	84
3.3.2.4	Interprétations mécaniques	84
3.3.3	Essai d'impact Charpy.....	85
3.3.4	Détermination de la masse volumique	89
3.4	Performances comparées avec des composites époxy / fibres naturelles	90
3.5	Optimisation par la méthode de Taguchi	91
3.5.1	Test de traction.....	93
3.5.2	Test de résilience.....	94
3.6	Conclusion	95
Conclusion Générale.....		96
Références		98

Liste des figures

Figure 1.1 : Utilisation des composites dans le bombardier B-2	5
Figure 1.2 : Matériau composite	6
Figure 1.3 : Arc Mongolien traditionnel	8
Figure 1.4 : Types de renfort.....	10
Figure 1.5 : Architecture unidirectionnelle (UD) (à gauche) et nappe unidirectionnelle en fibre de carbone (à droite).....	11
Figure 1.6 : Architecture Toile ou Taffetas (à gauche) et renfort en fibre de carbone en toile (à droite)	11
Figure 1.7 : Architecture Sergé (à gauche) et tissu hybride carbone-kevlar serge (à droite).....	12
Figure 1.8 : Architecture satin (à gauche) et tissu en fibre de carbone 5 harness satin (à droite)	12
Figure 1.9 : Architecture Mat (à gauche) et mat de fibre de verre (à droite)	12
Figure 1.10 : Schéma de la procédure conventionnelle de fabrication des fibres de verre	13
Figure 1.11 : Flux des fibres de verre depuis la douille en platine	14
Figure 1.12 : Fibre de verre S.....	15
Figure 1.13 : Fibre de carbone à base de PAN observée au MEB	16
Figure 1.14 : Réactions chimiques durant l'élaboration des fibres de carbone	17
Figure 1.15 : Principe du procédé de fabrication des fibres de carbone	17
Figure 1.16 : Principe du procédé de fabrication des fibres aramides	20
Figure 1.17 : Coupe transversale d'une fibre SiC montrant les zones de dépôt	21
Figure 1.18 : Classification des matrices	22
Figure 1.19 : Evolution de la production mondiale des polymères entre 2000 et 2019	25
Figure 1.20 : Principales applications des polymères en Europe	26
Figure 1.21 : Synthèse des polymères par polymérisation des monomères.....	27
Figure 1.22 : Moulage sans pression au contact (a), et par projection simultanée (b).....	31
Figure 1.23 : Moulage sous vide	31
Figure 1.24 : Moulage par injection de résine	32
Figure 1.25 : Principe du moulage par compression de résine	32
Figure 1.26 : Moulage par injection de mat préimprégné	33
Figure 1.27 : Moulage en continu de plaques	33
Figure 1.28 : Moulage en continu de panneaux ondulés pour toitures	33
Figure 1.29 : Moulage par pultrusion	34
Figure 1.30 : Moulage par centrifugation	34
Figure 1.31 : Enroulement circonférentiel	35

Figure 1.32 : Enroulement hélicoïdal discontinu	36
Figure 1.33 : Enroulement hélicoïdal continu	36
Figure 1.34 : Structure d'un stratifié	36
Figure 1.35 : Les panneaux sandwichs	38
Figure 2.1 : Microstructure d'une fibre végétale	45
Figure 2.2 : Séchage des fibres d'Abaca	49
Figure 2.3 : Fibres d'Areca	50
Figure 2.4 : Fibres de Bagasse	51
Figure 2.5 : Fibres de Bambou	52
Figure 2.6 : Fibres de Banane	54
Figure 2.7 : Fibres de Coco	55
Figure 2.8 : Tiges de lin en train de rouir à terre.....	56
Figure 2.9 : Séchage d'Henequen au Mexique	57
Figure 2.10 : Fibres de Jute	58
Figure 2.11 : Fibres de kapok	59
Figure 2.12 : Fibres de chanvre	60
Figure 2.13 : Fibres de palmier dattier	61
Figure 2.14 : Fibres de sisal	63
Figure 2.15 : Plante <i>Ampelodesmos mauritanicus</i> (Diss) dans le nord-est de l'Algérie.....	64
Figure 3.1 : Une feuille de Diss enroulée.....	73
Figure 3.2 : Processus de préparation des fibres.....	74
Figure 3.3 : Moule en trois pièces	75
Figure 3.4 : Elaboration des éprouvettes	76
Figure 3.5 : Moule pour quatre éprouvettes de traction	76
Figure 3.6 : Eprouvettes pour essai de traction avec différents pourcentages de poids en fibres Diss (après test)	77
Figure 3.7 : Pièce médiane du moule pour les échantillons d'essai d'impact.....	78
Figure 3.8 : Matériel - a) microscope électronique à balayage PhenomTM ProX, b) machine d'essai de traction EUROTTEST-300 et c) machine d'essai d'impact Charpy KARL FRANK GmbH du type 53565.....	79
Figure 3.9 : Imagerie MEB de la surface des feuilles de Diss	80
Figure 3.10 : Courbes Contrainte-Déformation pour différents taux en fibres de Diss	82
Figure 3.11 : Module d'Young en fonction du taux des fibres de Diss.....	83

Figure 3.12 : Section de rupture avec bonne adhésion fibre-matrice (a) et avec mauvaise adhésion fibre-matrice (b) pour quelques éprouvettes	85
Figure 3.13 : Les éprouvettes de l'essai de résilience avec différents pourcentages en poids de fibre de Diss après avoir été testés.	87
Figure 3.14 : Variation de l'énergie absorbée en fonction de la fraction massique des fibres de Diss.....	87
Figure 3.15 : Processus de détermination de la masse volumique.	89

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Propriétés typiques de quelques fibres de verre	15
Tableau 1.2 : Propriétés typiques des fibres de carbone	18
Tableau 1.3 : Propriétés typiques de quelques fibres aramides.....	20
Tableau 1.4 : Propriétés mécaniques typiques des résines thermodurcissables	24
Tableau 1.5 : Avantages et inconvénients des résine thermodurcissables	24
Tableau 1.6 : Exemples de désignation des stratifiés	37
Tableau 2.1 : Composants minéraux du Diss	65
Tableau 3.1 : Spécifications des échantillons et résultats des essais de traction.....	81
Tableau 3.2 : Résultats de l'essai de résilience Charpy.....	85
Tableau 3.3 : Caractéristiques des composites époxy / fibres naturelles.	91
Tableau 3.4 : Niveaux de fraction massique pour les résultats des limites de résistance élastiques et rapports S/N correspondants.....	93
Tableau 3.5 : Niveaux de fraction massique pour les résultats des modules de Young et rapports S/N correspondants.....	94
Tableau 3.6 : Niveaux de fraction massique pour les résultats des essais d'impact et rapports S/N correspondant.	94

Nomenclature

A	Section transversale de l'éprouvette
E	Module d'Young
E_c	Module d'élasticité en traction estimé du composite
E_f	Module d'élasticité en traction de la fibre
E_m	Module d'élasticité en traction de la matrice
E_P	Energie absorbée lors de l'impact
E_{Pi}	Energie absorbée mesurée pour chaque expérience
F	Force appliquée
L	Longueur inter-mâchoires
L_0	Longueur initial inter-mâchoires
M	Masse de l'éprouvette
M_D	Masse des fibres de Diss
n	Nombre de répétitions
P_c	Poids estimé du composite
V_f	Fraction volumique de fibres
V_m	Fraction volumique de matrice ($V_f + V_m = 1$)
W_D	Fraction massique des fibres de Diss
ρ_f	Masse volumique de la fibre
ρ_m	Masse volumique de la matrice
σ	Contrainte
ϵ	Déformation
$\Delta\sigma$	Variation de la contrainte sur une partie linéaire de la courbe
$\Delta\epsilon$	Variation de la déformation sur la même partie linéaire de la courbe

Abréviations

CMC	Composites à Matrice Céramique
CMM	Composites à Matrice Métallique
CMP	Composites à Matrice Polymère
DSC	Calorimétrie à Balayage Différentiel
EDAX	Analyse des Rayons X à Dispersion d'Energie
FTIR	Spectroscopie Infra-rouge à Transformée de Fourier
MEB	Microscope à balayage électronique
MET	Microscopie Electronique à Transmission
NaOH	Hydroxyde de sodium
OCDE	Organisation de Coopération et Développement Economique
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
PHA	Polyhydroxyalcanoates
pHDPE	Polyéthylène Haute Densité post-consommation
PLA	Acide poly-lactique
TGA	Analyse Thermogravimétrique
UD	Unidirectionnel
UV	Ultra-Violet

Résumé : Contribution à la Caractérisation Mécanique des Matériaux Composites à base de Fibres Naturelles

Cette thèse étudie, à travers une approche expérimentale, le potentiel des fibres de Diss (*Ampelodesmos mauritanicus*) en tant que renfort écologique pour des composites époxy.

L'imagerie par microscopie électronique à balayage (MEB) a révélé que la présence d'épines à la surface des feuilles de Diss est à l'origine de leur rugosité caractéristique. Des composites stratifiés ont été élaborés à partir d'une matrice époxy renforcée par des fibres de Diss longues et unidirectionnelles, avec des fractions massiques variant de 5 % à 30 % afin de déterminer le taux optimal garantissant les meilleures propriétés mécaniques.

Les essais mécaniques (traction, impact Charpy) combinés aux analyses microstructurales mettent en évidence une excellente adhérence interface fibre/matrice, favorisée par la rugosité naturelle des fibres. Les performances optimales sont atteintes pour une fraction massique de fibres comprise entre 25 % et 26 %. Ce composite présente alors un module de Young de 1.30 GPa (soit une amélioration de 128 % par rapport à l'époxy pure), une résistance à la traction dépassant 65 MPa (+160 %) et une résilience aux chocs supérieure à 3 J (contre seulement 0.5 J pour l'époxy non renforcée). Au-delà d'un taux de 28 % de fibres, les propriétés mécaniques chutent en raison de phénomènes d'agglomération.

Mots clés : *Ampelodesmos mauritanicus* ; Caractérisation mécanique ; Développement durable ; Diss ; Fibre naturelle.

ملخص: مساهمة في توصيف الخواص الميكانيكية للمواد المركبة القائمة على الألياف الطبيعية

تدرس هذه الأطروحة، من خلال نهج تجريبي، إمكانات ألياف الديس كعامل تقوية بيئي للمركبات الإيبوكسية.

كشفت الصور الملتقطة بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح وجود أشواك على سطح أوراق نبات الديس وهو السبب وراء خشونتها المميزة. وقد تم تصنيع مركبات طبقية من مصفوفة إيبوكسي معززة بألياف نبات الديس الطويلة والأحادية الاتجاه، بنسب كتلة تتراوح بين 5% و30%، وذلك لتحديد النسبة المثلى التي تضمن أفضل الخصائص الميكانيكية.

أظهرت الاختبارات الميكانيكية (الشد، واختبار شاربي) مقترنةً بالتحليلات المجهرية وجود تماسك ممتاز بين الألياف والمصفوفة، مدعوماً بالخشونة الطبيعية للألياف. وقد تم تحقيق الأداء الأمثل عند نسبة كتلة للألياف تتراوح بين 25% و26%. وبذلك، يبلغ معامل يونغ لهذا المركب $1.30 GPa$ (ما يمثل تحسناً بنسبة 128% مقارنة بالإيبوكسي النقي)، ومقاومة الشد التي تتجاوز $65 MPa$ (+160%)، ومرونة صدمية تزيد عن $3 J$ (مقابل $0.5 J$ فقط للإيبوكسي غير المقوى). وعند تجاوز نسبة الألياف 28%، تنخفض الخصائص الميكانيكية بسبب تكتل الألياف.

الكلمات المفتاحية: ألياف طبيعية؛ تنمية مستدامة؛ توصيف ميكانيكي؛ ديس؛ مركب حيوي.

Abstract: Contribution to the Mechanical Characterization of Composite Materials Based on Natural Fibers

This thesis experimentally investigates the potential of Diss fibers (*Ampelodesmos mauritanicus*) as an eco-friendly reinforcement in epoxy composites.

Scanning electron microscopy (SEM) imaging revealed that the presence of micro-spines on the surface of Diss leaves is the primary source of their natural roughness. Unidirectional, continuous Diss fiber-reinforced epoxy laminates were fabricated with fiber weight fractions ranging from 5 wt. % to 30 wt. % to determine the optimal ratio for maximizing mechanical performance.

Mechanical testing (tensile and Charpy impact tests) combined with microstructural analyses demonstrated excellent fiber/matrix interfacial adhesion, promoted by the natural roughness of the leaves. Peak performance was achieved at a fiber weight fraction between 25 wt. % and 26 wt. %. This optimal composite exhibited a Young's modulus of 1.30 *GPa* (a 128% improvement over neat epoxy), a tensile strength exceeding 65 *MPa* (a 160% increase), and an impact strength of over 3 *J* (compared to just 0.5 *J* for neat epoxy). Beyond 28 wt. % fiber content, mechanical properties degraded due to fiber agglomeration.

Keywords: *Ampelodesmos mauritanicus*; Diss; Natural fibre; Mechanical characterization; Sustainable development.

INTRODUCTION GENERALE

Lorsqu'on parle du plastique, on est au sujet d'une très grande industrie, selon l'Organisation de Coopération et Développement Economique (OCDE) ; la production annuelle mondiale de plastiques est passée de 234 millions en 2000 à 460 millions de tonnes en 2019 [1]. Vue sa durabilité et de sa facilité de fabrication, le plastique est utilisé dans une grande variété d'applications, notamment dans l'emballage (bouteilles, films plastiques, contenants...), l'automobile (tableaux de bord, pièces intérieures...), l'électronique (coques de téléphones portables, ordinateurs...), le secteur médical (dispositifs médicaux, emballages stériles...) et bien d'autres domaines [2].

Cependant, sa lente décomposition a engendré une pollution plastique et des problèmes écologiques conduisant à des préoccupations environnementales, en effet ; 77% de la production annuel de plastique sont des produits à vie courte qui deviennent vite des déchets après une seule utilisation [1], cela a un significatif sur l'environnement à plusieurs niveaux. Voici quelques-uns des principaux effets néfastes du plastique sur l'environnement :

- Sa production à partir de matières premières fossiles générant des gaz à effet de serre et contribuant au réchauffement climatique.
- La fabrication des plastiques utilise beaucoup d'énergie et de ressources non renouvelables, impactant les écosystèmes.
- Certains plastiques libèrent des substances toxiques, polluant sols et eaux.
- Les plastiques se retrouvent dans les océans et se décomposent en microplastiques, menaçant la faune marine.
- Les plastiques mettent des centaines d'années à se décomposer, s'accumulant dans les sites d'enfouissement.
- Les animaux peuvent ingérer ou être piégés par les plastiques, causant des problèmes de santé et des blessures.

En réponse à ces problèmes, il y a eu ces dernières années des efforts pour réduire l'utilisation de plastique à usage unique, promouvoir le recyclage, encourager le développement de plastiques

biodégradables et rechercher des solutions alternatives plus respectueuses de l'environnement [3]. L'une de ces solutions alternatives, très répandue sont les matériaux composites, ces derniers se distinguent par leur résistance remarquable, leur compacité allégée qui réduit la voluminosité des produits finaux tout en maintenant une robustesse structurale, et leur durabilité accrue grâce à une capacité intrinsèque à résister aux chocs et à l'usure, ce qui en fait des solutions privilégiées pour diverses applications telles que l'automobile, l'aéronautique, la marine et les articles de sport, parmi d'autres. Ils sont même considérés comme alternative à certains métaux tels que le fer et l'aluminium.

Les matériaux composites à renfort synthétique, tels que les fibres d'aramide, de carbone et de verre, ont de nombreuses applications dans divers domaines, notamment l'automobile, la construction et l'aéronautique [4]. Parmi ces matériaux, les fibres de verre sont les plus populaires en raison de leurs propriétés mécaniques uniques et de leur faible coût de production [5]. Cependant, l'utilisation de fibres synthétiques peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement (provoquant des problèmes tels que des allergies cutanées et le cancer du poumon) [5].

En faveur de la protection de l'environnement et de la santé publique, de nouveaux composites sont conçus avec une approche écologique visant à réduire l'utilisation de matériaux issus de ressources fossiles. Cette démarche s'inscrit dans une perspective de réduction des émissions de gaz à effet de serre et nécessite des matériaux plus légers et à faible empreinte carbone. En conséquence, il y a un mouvement vers l'adoption de matériaux plus respectueux de l'environnement et plus légers, notamment les biocomposites.

Les chercheurs se concentrent particulièrement sur les composites renforcés de fibres naturelles en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques associées à une faible densité. Ces matériaux offrent divers avantages, notamment en termes de coût, d'utilisation de ressources renouvelables et de biodégradabilité. De plus, un bon nombre de ces composites à base de fibres naturelles présentent des propriétés mécaniques adaptées à des applications spécifiques [6].

L'utilisation de fibres végétales comme renfort dans les composites gagne du terrain dans différents secteurs, notamment dans l'industrie automobile, où les textiles à base de cellulose sont utilisés depuis longtemps pour renforcer les plastiques automobiles en raison de leurs qualités d'isolation exceptionnelles [7,8].

Parmi les fibres naturelles potentiellement prometteuses, les fibres extraites de la plante Diss (*Ampelodesmos mauritanicus*) se démarquent en raison de leurs caractéristiques uniques et de leur adaptabilité aux matrices polymériques.

Ampelodesmos mauritanicus, également connu sous le nom de Diss, est une plante herbacée robuste et vivace, largement répandue dans les régions méditerranéennes. Ses feuilles, dotées d'une texture rugueuse au toucher, présentent des propriétés mécaniques distinctives qui en font un candidat idéal pour le renforcement de matériaux composites. Cette caractéristique particulière pourrait potentiellement influencer l'adhérence entre les fibres naturelles et la matrice polymérique, ouvrant ainsi la voie à des améliorations significatives des propriétés mécaniques globales des composites.

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une caractérisation mécanique approfondie des matériaux composites obtenus à partir de fibres de Diss incorporées dans une matrice en époxy. Notre hypothèse fondamentale repose sur l'idée que la nature distinctive des feuilles de Diss, avec leur texture rugueuse et leurs propriétés mécaniques spécifiques, pourrait contribuer à renforcer l'adhérence entre les fibres et la matrice, conduisant ainsi à une amélioration significative des propriétés mécaniques des composites résultants.

Cette étude vise à combler les lacunes actuelles dans la compréhension des mécanismes sous-jacents à l'adhérence entre les fibres naturelles de Diss et la matrice époxy, ainsi qu'à fournir des données quantitatives pour la conception et l'optimisation de composites à base de fibres naturelles pour diverses applications. En explorant cette hypothèse, cette étude vise à contribuer de manière significative à la connaissance fondamentale des matériaux composites et à ouvrir de nouvelles perspectives pour l'utilisation durable et innovante des fibres naturelles de Diss dans l'industrie des matériaux.

La présente thèse se structure autour d'une série d'expérimentations détaillées visant à caractériser les propriétés mécaniques des composites à base de fibres de Diss, en mettant en lumière l'impact de la nature des feuilles sur l'adhérence et les performances globales du matériau. Cette démarche de recherche contribuera non seulement à une meilleure compréhension de l'effet des fibres naturelles de Diss sur les propriétés mécaniques, mais également à l'élargissement du champ des matériaux composites durables et performants.

Dans ce sens, nous avons poursuivi un plan de travail décomposant le présent manuscrit en trois chapitres : le premier chapitre entame des Généralités sur les matériaux composites, à savoir

leur définition, historique, constituants, classification ... et bien d'autres informations incluant les méthodes de caractérisation mécanique pertinentes.

Au deuxième chapitre, nous nous sommes concentrés sur les composites respectueux de l'environnement avec une Revue bibliographique sur les biocomposites. Cette revue englobe les composites à fibres naturelles ainsi que ceux à matrice d'origine naturel, qui sont bien sûr biodégradable, elle examine des travaux antérieurs en mettant l'accent sur les caractéristiques et les propriétés mécaniques spécifiques des fibres naturelles et des composites correspondants.

La Caractérisation du biocomposite Diss/époxy a fait l'objet du troisième chapitre où nous détaillons sur :

- Les étapes de préparation des fibres de la plante Diss pour assurer leur compatibilité avec la matrice en époxy,
- La confection de l'équipement de moulage,
- Le processus de fabrication des échantillons du biocomposite,
- Le déroulement des essais de caractérisation,
- La présentation des résultats des essais et discussion de la signification des valeurs obtenues pour chaque propriété mécanique,
- Une analyse approfondie en comparant les résultats expérimentaux avec les valeurs de référence pour des composites similaires,
- Identification des facteurs spécifiques qui influencent les propriétés mécaniques du biocomposite.

Une Conclusion générale à la fin de ce document résume ce travail de recherche, en mettant en évidence notre contribution à la détermination des propriétés mécaniques des composites à base de fibres de la plante Diss et de matrices en époxy en mettant l'accent sur les domaines d'application potentiels, et soulignant les prochaines étapes pour approfondir notre recherche.

Chapitre 1

GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1.1 Introduction

Présentant de hautes performances mécaniques, les matériaux composites continuent à se développer et à être utilisés dans pratiquement tous les domaines mais surtout dans le domaine de transport (aérospatial, aéronautique, automobile ...) où la réduction du poids de la structure reçoit une attention considérable, il s'agit généralement d'une amélioration des performances et d'économies de carburant.

En effet, les composites sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie, par exemple, la cellule de l'Airbus A350 est composée à 53 % de matériaux composites, et le bombardier B-2 (Figure 1.1) est quasiment construit en matériaux composites [9]. Dans le secteur automobile, la 4C Coupé – une voiture de sport d'Alpha Romeo – est basée sur un châssis 100% en fibre de carbone [10]. La Lamborghini Murciélago elle aussi est dotée d'une carrosserie entièrement en carbone/époxy, à l'exception des portes et du toit, en utilisant des composites, son poids est réduit de 34 kg, soit environ 40 %, par rapport à son prédécesseur, la Diablo, dont la carrosserie est entièrement en aluminium [11].

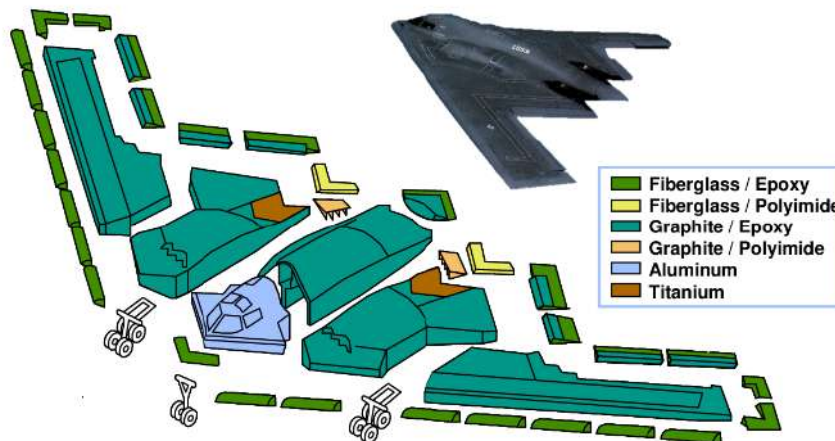


Figure 1.1 : Utilisation des composites dans le bombardier B-2 [9]

Ce chapitre explore l'évolution, la classification et les mécanismes clés de ces matériaux, en insistant sur leur rôle dans l'innovation industrielle.

1.2 Définition

Les matériaux composites englobent une grande variété de combinaisons et d'applications, ce qui rend complexe leur définition en quelques mots. Toutefois, on peut les décrire comme des assemblages de deux composants distincts (généralement une matrice et un renfort) dont les propriétés se conjuguent pour offrir des performances supérieures à celles des matériaux pris individuellement. Cette synergie permet notamment d'améliorer des caractéristiques spécifiques, telles que la résistance mécanique ou la rigidité, selon l'usage visé. Comme illustré dans la Figure 1.2, ces matériaux résultent de l'association de deux phases aux natures différentes, créant ainsi un ensemble aux propriétés optimisées.

La fibre constitue l'élément clé du renforcement, tandis que la matrice joue un rôle de liant en maintenant les fibres ensemble, à la manière d'un adhésif. Elle assure également leur protection en redistribuant les contraintes mécaniques entre les différentes fibres.

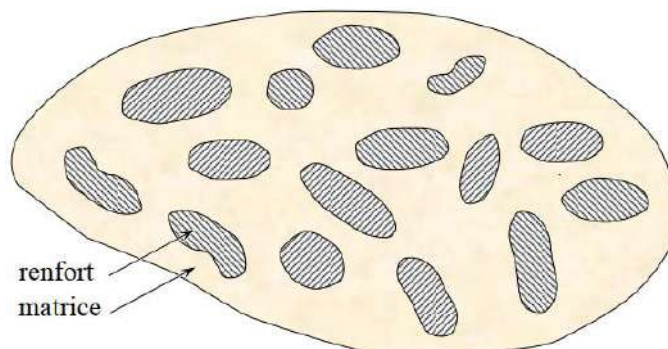


Figure 1.2 : Matériau composite [12]

On distingue deux types de composites :

- Des matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, tels que l'optimisation des coûts par diminution des prix de revient et la simplicité du principe d'obtention (moulage par contact, injection, ...).
- Les composites hautes performances employés en aéronautique répondent à des exigences strictes, nécessitant des propriétés mécaniques exceptionnelles. Ces matériaux intègrent majoritairement des renforts fibreux continus, représentant souvent plus de 50 % de leur composition. Leur fabrication met en œuvre des procédés avancés tels que le drapage sous autoclave, l'enroulement filamentaire ou le moulage par transfert de résine (RTM).

1.3 Historique

L'existence des composites n'est pas nouvelle, d'après Ashby et al., ils existent depuis 10000 av. J.-C. quand la brique de paille était couramment utilisée comme matériau de construction [13].

En Égypte, vers 4000 av. J.-C., des matériaux composites fibreux ont été utilisés pour préparer le matériel d'écriture. Il s'agissait de matériaux d'écriture laminés fabriqués à partir du papyrus. En outre, les Égyptiens fabriquaient des récipients à partir de fibres grossières tirées du verre ramolli par la chaleur [14].

Les composites existaient depuis longtemps dans les applications de la vie quotidienne ; le bois qui est formé de cellulose et de lignine est considéré comme un composite. Sa forme la plus avancée peut être les contreplaqués. En 3400 av. J.-C, les Mésopotamiens collaient des bandes de bois à différents angles pour créer du contreplaqué [15]. Aujourd'hui, ils sont largement utilisés pour fabriquer des meubles et comme matériaux de construction. Entre 2181 et 2055 av. J.-C., les Égyptiens utilisaient du cartonage et des couches de lin ou de papyrus imbibées de plâtre pour fabriquer des masques funéraires [16].

Un autre matériau d'application courante est le béton, ce matériau composite est généralement composé de gravier, de sable et de ciment. Vers 25 avant J.-C., les Dix livres d'architecture décrivent le béton et distinguent les différents types de chaux et de mortiers [17]. Il est intéressant de noter que les recherches démontrent que le ciment décrit est similaire, et à certains égards, supérieur au ciment Portland utilisé aujourd'hui. De nos jours, il est utilisé couramment avec de l'acier pour former des éléments structurels dans la construction, il constitue une autre forme de composite.

Au 13^{ème} siècle, les Mongols ont développé des arcs en composites (voir Figure 1.3), ils utilisaient des cornes et des tendons d'animaux, intégrés à l'arc en bois après des traitements complexes [18]. Les cornes (très flexibles et résistants) étaient bouillies, façonnées et fixées sur l'arc à l'aide de colle de poisson (préparée à partir de la vessie du poisson), tandis que les tendons, séparés en fibres et trempés dans cette même colle, étaient appliqués sur le ventre de l'arc. Après, l'arc était laissé à sécher pendant près d'un an.

Ces arcs composites ont joué un rôle stratégique majeur dans les conquêtes de Gengis Khan, leur puissance et leur précision les établissant parmi les armes les plus redoutables de leur époque jusqu'à la découverte de la poudre à canon, ils étaient si puissants que l'on pouvait tirer les flèches à près de 1,5 km de distance.

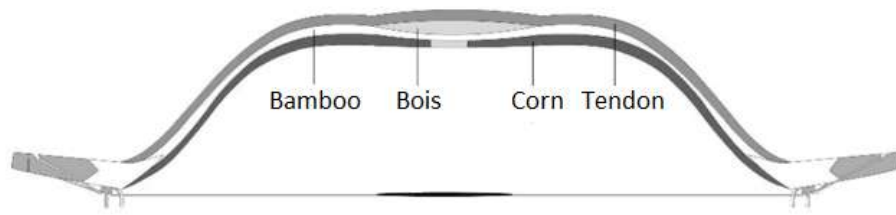


Figure 1.3 : Arc Mongolien traditionnel [19]

Bien plus tard, François Coignet a inauguré l'utilisation du béton armé avec la construction de la première maison en béton armé de fer en 1853 [20]. Ensuite, au début des années 1900, l'architecte américaine Julia Morgan a créé un clocher de 22 mètres appelé El-Campanile à Oakland, en Californie, en béton armé. Cette structure impressionnante a survécu sans dommage au tremblement de terre de San Francisco en 1906, et le béton armé est devenu largement utilisé pour ses performances sismiques et sa résistance au feu.

En 1907, le chimiste belge Leo Baekeland a créé le premier composite à base de fibres, appelé Bakélite, en combinant du plastique avec de la farine de bois ou des fibres d'amiante. Résistante à la chaleur et non conductrice [21]. La bakélite était parfaite pour des articles tels que les ustensiles de cuisine, les boîtiers électriques, les jouets et les disques.

Puis, Vers 1933, Games Slayter a inventé la laine de verre, qui est appelé aujourd'hui : « fibre de verre », comme matériau d'isolation thermique des bâtiments [22]. En 1936, Dupont a mis sur le marché la première fibre de verre en combinant des fibres de verre avec du plastique, offrant ainsi un matériau au rapport poids/résistance élevé qui pouvait remplacer le bois et le métal [23]. Après, la fibre de verre est devenue essentielle pendant la Seconde Guerre mondiale.

Les avions de chasse étaient les instruments de la Seconde Guerre mondiale les plus avancés, demandant des matériaux à la fois légers et résistants. En outre, les radars électroniques nécessitaient des boîtiers en matériaux non métalliques ; c'est ainsi que les plastiques renforcés de fibres de verre ont été utilisés dans ces applications. Sa production a connu une explosion durant les années 1950, cette fibre a été produite en masse pour les bateaux, les navires et les fuselages, ce qui a finalement conduit à la production d'automobiles dans les années 1950.

La course à l'espace des années 1960 a exigé un matériau encore plus léger, plus solide et plus résistant à la chaleur pour les stations spatiales et les navettes ; le composite à matrice métallique était né. La fibre de carbone, brevetée en 1959 [24], et les trichites en céramique, développées dans les années 1960, ont rendu les matériaux composites plus adaptés aux températures élevées.

Les années 1970 ont été marquées par de nouvelles inventions telles que le composite Kevlar, qui utilise un composant de nylon appelé aramide [25]. Les développements des composites dans ces années ont également été motivés par les marchés de consommation tels que l'industrie automobile. Au début des années 1990, l'utilisation des matériaux composites s'est largement répandue grâce aux composites à base de fibres de carbone et de résines époxy. Les techniques de fabrication, telles que le moulage sous vide, ont également été améliorées.

Dans les années 2000, de nouveaux types de composites ont été développés, y compris ceux à matrice métallique et ceux renforcés par des nanomatériaux. Cette période a marqué le début de la prise en compte de la durabilité, avec les premiers efforts pour recycler les composites. Leur utilisation s'est étendue à d'autres domaines comme les infrastructures et l'électronique. Les années 2010 ont été marquées par l'introduction de composites à fibres naturelles et par l'émergence de l'impression 3D de composites. Les composites sont devenus essentiels dans les éoliennes, où ils ont permis de créer des pales plus efficaces.

Depuis 2020, les composites continuent de progresser avec des matériaux encore plus légers, résistants et durables. L'accent est mis sur le recyclage, avec le développement de nouvelles technologies pour améliorer la durabilité et la recyclabilité des composites. Ils trouvent maintenant des applications dans des domaines émergents comme les technologies spatiales, la médecine et l'architecture.

1.4 Les constituants

Comme indiqué à la définition, les principaux constituants d'un matériau composite sont : la matrice, le renfort en plus de charges et/ou additifs.

1.4.1 Le renfort

Le renfort est un élément clé dans la composition des composites, car il confère au matériau ses propriétés mécaniques. Il existe plusieurs types de renforts utilisés dans les matériaux composites, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients. Chaque type de renfort a des caractéristiques spécifiques qui le rendent adapté à certaines applications. Par exemple, les fibres de carbone sont souvent utilisées dans l'aérospatiale pour leur légèreté et leur résistance, tandis que les fibres de verre sont couramment utilisées dans la construction pour leur coût abordable. Le choix du renfort dépend donc des propriétés mécaniques recherchées et du budget alloué au projet.

Le marché propose une diversité de fibres, dont le choix dépend principalement des contraintes économiques liées à la structure à fabriquer. La Figure 1.4 présente une classification des principaux types de renforts utilisés dans l'industrie.

Outre les fibres, il existe d'autres types de renforts, tels que les particules et les tissus. Les particules de renfort, comme le talc ou le mica, sont souvent utilisées pour améliorer les propriétés thermiques et tribologiques des composites. Les tissus, quant à eux, sont constitués de fibres tissées ou tricotées, offrant une plus grande résistance dans plusieurs directions.

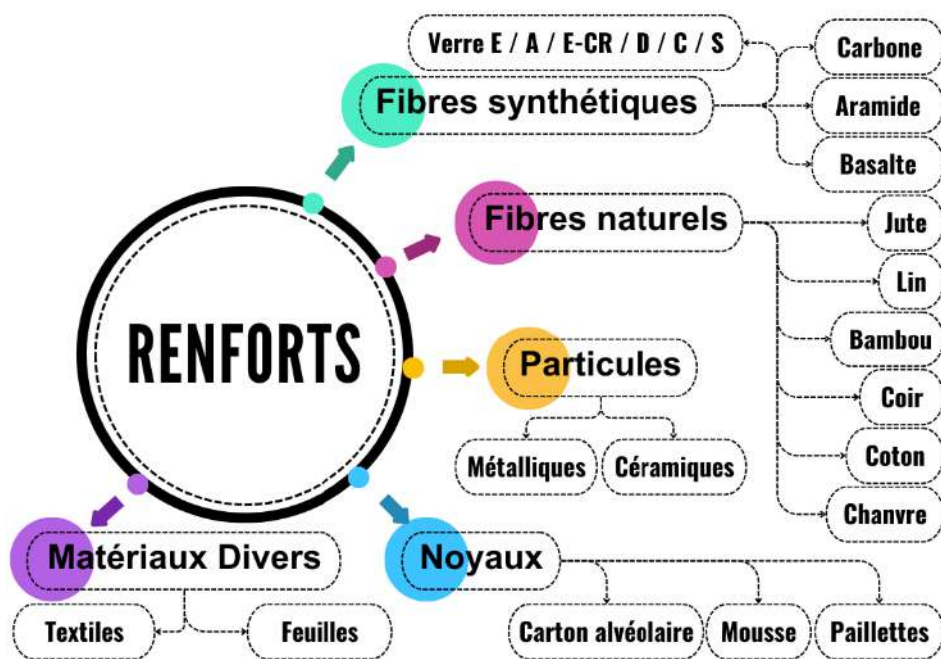


Figure 1.4 : Types de renfort

1.4.1.1 Architecture des renforts

L'organisation des renforts au sein des composites détermine leurs caractéristiques mécaniques et fonctionnelles. En effet, l'agencement et l'orientation des fibres dans un stratifié conditionnent directement les performances du matériau. On distingue plusieurs configurations de renforts : les structures linéaires (fils, mèches), les surfaces planes (tissus, mats) et les architectures multidimensionnelles (tresses, tissages complexes, structures tridimensionnelles ou plus élaborées).

a). Les unidirectionnels (UD)

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

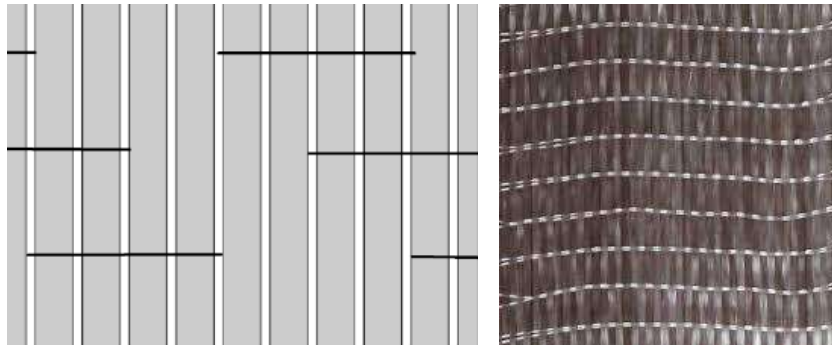


Figure 1.5 : Architecture unidirectionnelle (UD) (à gauche)
et nappe unidirectionnelle en fibre de carbone (à droite)

Les structures stratifiées (section 1.6.1 ci-dessous) sont généralement composées de multiples couches ou plis de tissus unidirectionnels, avec des fibres orientées différemment d'une couche à l'autre.

b). Toile ou taffetas

Le tissu toile (ou taffetas) se caractérise par un entrelacement régulier où chaque fil de chaîne alterne systématiquement au-dessus et au-dessous des fils de trame. Cette structure confère au matériau une excellente planéité et une certaine rigidité, mais limite sa déformabilité lors de la mise en œuvre. La densité élevée des croisements entraîne cependant un embuvage marqué et une diminution des performances mécaniques globales.

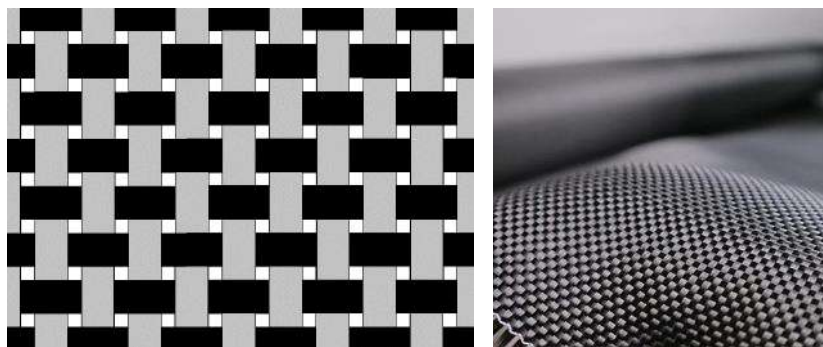


Figure 1.6 : Architecture Toile ou Taffetas (à gauche)
et renfort en fibre de carbone en toile (à droite)

c). Serge

Dans le cas d'un tissu sergé, chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de plusieurs fils de chaîne. L'armure est d'une plus grande souplesse que le taffetas et ayant une bonne densité de fils. La Figure 1.7 présente un sergé 2/2.

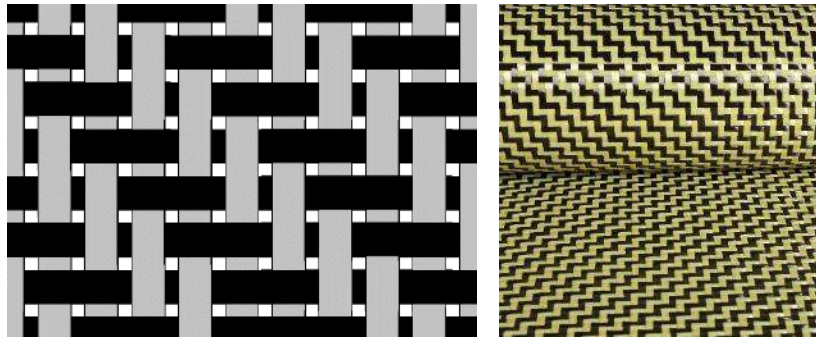


Figure 1.7 : Architecture Sergé (à gauche)
et tissu hybride carbone-kevlar serge (à droite)

d). Satin

Pour le satin, chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs fils de trame et réciproquement. Le tissu a différents aspects de chaque côté et est assez souple et adapté à la mise en forme de pièces à surfaces complexes, il présente aussi une forte masse spécifique.

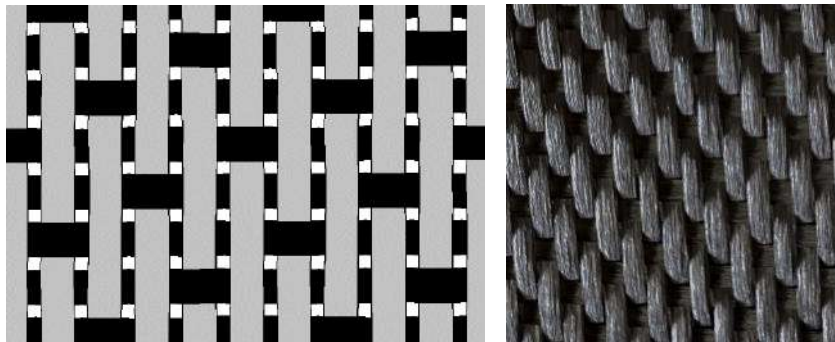


Figure 1.8 : Architecture satin (à gauche)
et tissu en fibre de carbone 5 harnais satin (à droite)

e). Mat

Contrairement aux tissus unidirectionnels et aux nappes tissées, les fibres dans un mat sont généralement courtes, de longueur variable et disposées de manière aléatoire dans différentes directions.

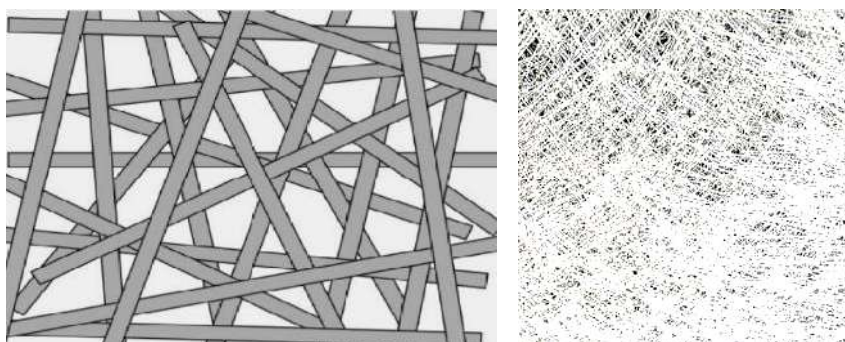


Figure 1.9 : Architecture Mat (à gauche)
et mat de fibre de verre (à droite)

Cette orientation aléatoire confère au composite des propriétés omnidirectionnelles, ce qui signifie que le matériau présente des caractéristiques mécaniques relativement uniformes dans toutes les directions, plutôt que d'être optimisé pour une direction spécifique.

1.4.1.2 Type des fibres

On distingue plusieurs types de fibre, les plus couramment utilisés sont les fibres de verre, de carbone et d'aramide, ces derniers sont appréciés pour leur légèreté et leur résistance aux chocs le temps que les fibres de carbone offrent une résistance et une rigidité exceptionnelles, mais avec un coût plus élevé.

a). Fibre de verre

La procédure conventionnelle de fabrication des fibres de verre est schématisée à la Figure 1.10 ci-dessous. Les matières premières, principalement le sable (silice) mélangé avec divers additifs tels que l'alumine, le carbonate de chaux, la magnésie et l'oxyde de bore sont chauffées dans un four, avec maintien d'une quantité constante de verre fondu dans le réservoir.

Le verre en fusion s'écoule par gravité à travers des douille en platine ou en platine-rhodium, chauffées électriquement et dotées de plusieurs trous (environ 200 par bague). Ces trous forment de fins filaments continus qui sont ensuite rassemblés et enroulés autour d'une pince de serrage en rotation rapide.

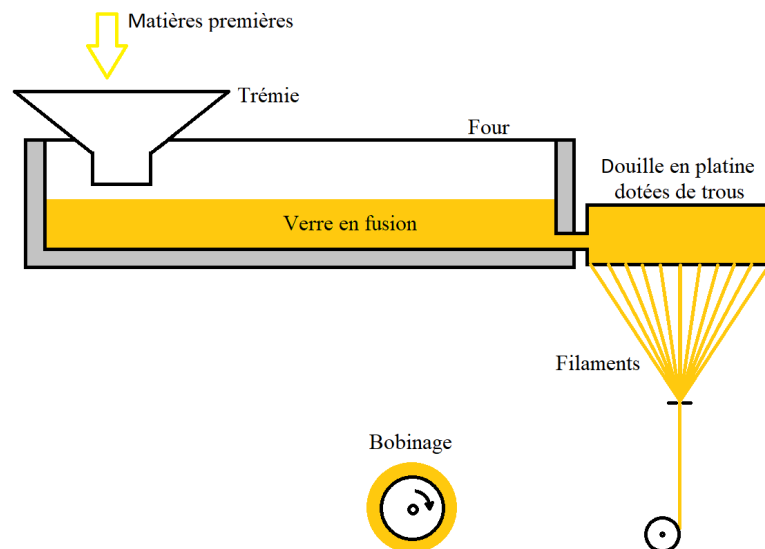


Figure 1.10 : Schéma de la procédure conventionnelle de fabrication des fibres de verre

Les filaments sont étirés à une vitesse de 1 à 2 km/min. Il est crucial de maintenir l'intégrité des filaments, car la rupture d'un seul filament peut entraîner l'égouttage du verre sur les autres, interrompant ainsi l'ensemble du processus d'étirage [26].

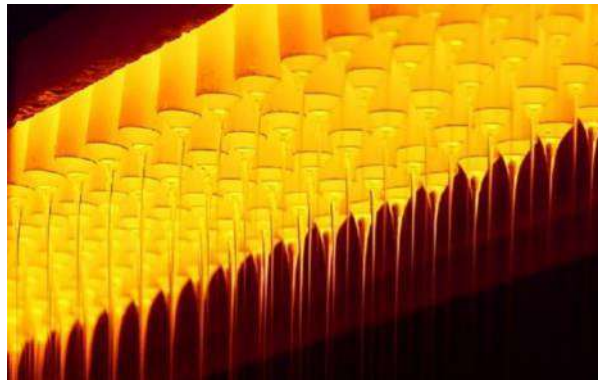


Figure 1.11 : Flux des fibres de verre depuis la douille en platine [27]

En général, les fibres de verre ont un diamètre compris entre 5 et 20 micromètres. Cette dimension confère aux fibres une flexibilité exceptionnelle, facilitant leur manipulation dans les procédés textiles tels que le tissage et le tricotage [26].

Les fibres de verre sont couramment employées dans les composites en raison de leur coût abordable et de leurs excellentes propriétés mécaniques. Il existe plusieurs types de fibres de verre, chacun ayant des caractéristiques spécifiques.

- La fibre de verre A (également connue sous le nom de verre *Alcalin*), qui résiste aux produits chimiques. C'est le type original de fibre de verre, il était utilisé dans le passé dans l'isolation thermique des maisons et bâtiments, ainsi que dans les coques de bateaux, mais a été remplacé par d'autres fibres.
- La fibre de verre E (également appelée verre *Electrique*) est une fibre possédant d'excellentes propriétés d'isolation électrique et thermique, ce qui en fait un excellent choix pour l'électronique et l'isolation thermique. C'est la fibre la plus utilisée, elle convient mieux aux applications requérant solidité et durabilité et est souvent utilisée dans les coques de bateaux, les planches de surf vu sa capacité à résister à la rouille et à la corrosion.
- La fibre de verre S (également appelé verre *Structurel* et connu sous le nom de verre T ou verre R) est réputé pour sa solidité et sa flexibilité ; il est plus solide et plus résistant à l'usure que le verre E et peut supporter des températures plus élevées que le verre E. C'est un bon choix pour la fabrication de matériaux résistants au feu, et le type idéal pour les composants aérospatiaux, les articles de sport et les pales d'éoliennes, ainsi que pour d'autres applications industrielles et commerciales.



Figure 1.12 : Fibre de verre S

- La fibre de verre C (également connue sous le nom de verre *Chimique*) est le type de fibre de verre le plus cher. Elle est résistante aux acides et aux produits chimiques et utilisée principalement dans des applications de haute performance, telles que l'aérospatiale, l'automobile et les articles de sport.
- La fibre de verre D est connue pour sa résistance, sa flexibilité et ses propriétés diélectriques, ce qui la rend idéale pour des applications telles que la fabrication de circuits imprimés, des composants aérospatiaux, des articles de sport et dans l'isolation électrique.
- La fibre de verre AR est la fibre de verre la plus solide et la plus durable, ce qui la rend idéale pour les gilets pare-balles. Elle est également utilisée dans la production de composites de haute performance.
- La fibre de verre AE résistante aux alcalis.
- La fibre de verre ECR est similaire à la fibre de verre E avec une résistance accrue à la chaleur et aux acides.

Tableau 1.1 : Propriétés typiques de quelques fibres de verre [28]

Fibre de verre	ρ (g/cm ³)	σ (GPa)	E (GPa)	TF (°C)
E/ECR	2.60–2.65	2.8–3.5	70–85	1180–1282
C	2.53	2.6	65	1217–1238
AR	2.68–2.78	3.2–3.7	73–77	1237–1247
D	2.11– 2.14	2.4–2.5	52–55	1410
R	2.55	4.1–4.5	85–87	1410
S	2.45–2.49	4.7–5.0	87–88	1424–1448

Les fibres de verre sont largement utilisées dans divers secteurs en raison de leur polyvalence. Dans l'industrie automobile, elles sont employées dans des composites à matrice polymère pour des pièces telles que les panneaux de carrosserie et les poutres de pare-chocs, ce qui améliore l'efficacité énergétique en réduisant le poids. Dans l'aviation, les composites à fibres

de verre sont utilisés pour des composants intérieurs non structuraux et des technologies furtives en raison de leur transparence radar. Les applications maritimes comprennent les coques et les ponts de bateaux, où le polyester renforcé de fibres de verre est courant. Dans le secteur de la construction, les fibres de verre sont utilisées dans le ciment et le béton pour renforcer la résistance, avec des fibres spéciales résistantes aux alcalins pour plus de durabilité. Les articles de sport bénéficient également des fibres de verre, comme le montrent les équipements tels que les cadres de vélos et les skis. De plus, les fibres de verre sont essentielles dans les composants électroniques tels que les circuits imprimés et les disjoncteurs industriels [26].

b). Fibre de carbone

Les fibres de carbone sont élaborées par carbonisation d'un polymère de base appelé précurseur, ce dernier peut être l'un d'entre trois matériaux : la rayonne (cellulose régénérée), le brai (dérivé de résidus de houille de pétrole) et le polyacrylonitrile $[(CH_2-CH-CN)_n]$ (PAN). La majorité de la production utilise le PAN comme matériau de base [29].

C'est l'une des formes de carbone les plus recherchées car elle possède des propriétés mécaniques, thermiques et électriques exceptionnelles, elle contient au moins 92% en poids de carbone et ces fibres peuvent être courtes ou continues. Les fibres contenant plus de 99% de carbone sont connues sous le nom de fibres de graphite. Ces types de fibres ont une résistance remarquablement élevée mais un faible rendement de production.

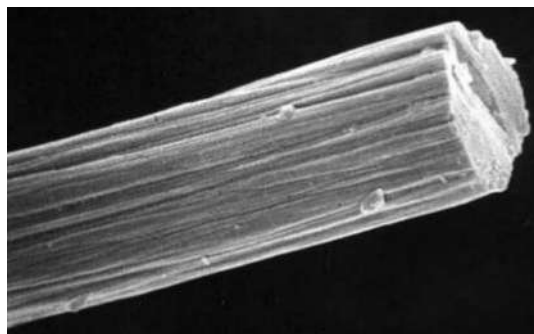


Figure 1.13 : *Fibre de carbone à base de PAN observée au MEB [30]*

Le principe d'élaboration est de faire subir au précurseur une décomposition thermique, sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitisation. Le processus passe par quatre traitements successifs : une oxydation, une carbonisation, une graphitisation et un traitement de surface (Figure 1.14 et Figure 1.15) :

- **L'oxydation** est effectuée en chauffant les fibres à environ 300°C en atmosphère d'oxygène conduisant à une réticulation des chaînes moléculaires.

- La **carbonisation** consiste à chauffer progressivement les fibres réticulées de 300°C à 1100°C environ, en atmosphère inerte. Seuls les carbones sont conservés dans la chaîne.

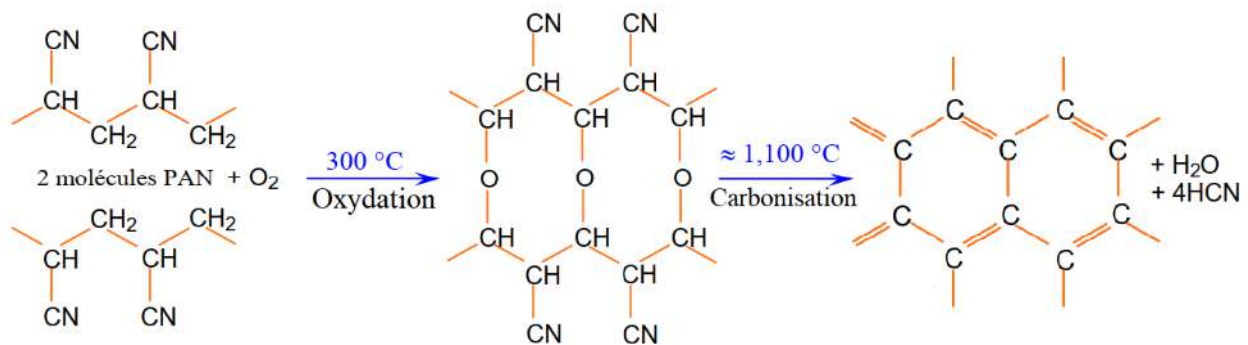


Figure 1.14 : Réactions chimiques durant l'élaboration des fibres de carbone [12]

- Après **traitement de surface** (oxydation ménagée en milieu acide en vue d'améliorer la liaison fibre-résine), des fibres de bonnes caractéristiques mécaniques sont obtenues ; dénommées fibres HR (haute résistance).
- Si la **graphitisation** est utilisée avant le traitement de surface (échauffement jusqu'à 2600°C ou à des températures supérieures en atmosphère inerte), une réorientation des réseaux hexagonaux de carbone suivant l'axe des fibres est provoquée ce qui aboutit à une augmentation du module d'Young, on obtient alors des fibres HM (fibres à haut module) ou des fibres THM (à très haut module).

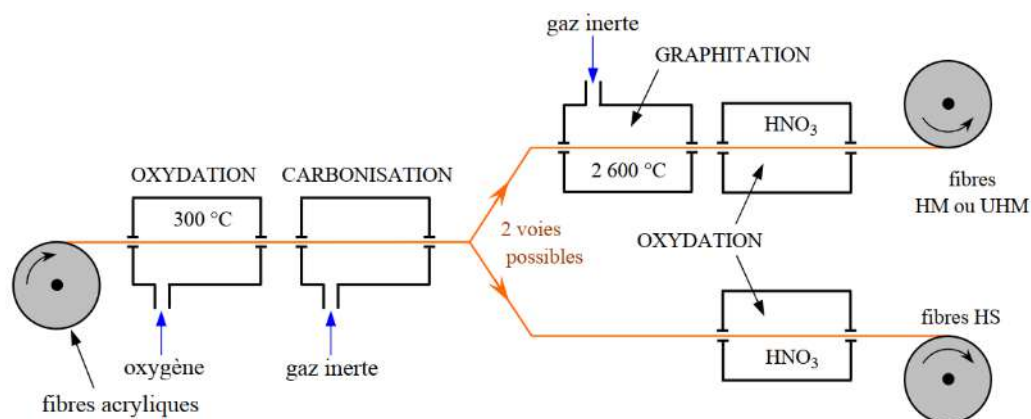


Figure 1.15 : Principe du procédé de fabrication des fibres de carbone [12]

Le brai est avantageux par rapport au PAN si utilisé comme précurseur ; les fibres de carbone produites à base de brai ont :

- Un rendement massique filaments/précurseur élevé de l'ordre de 75 à 90% contre 50% pour le PAN.
- Une vitesse de graphitisation plus élevée.

- Une matière première bon marché, ce qui signifie une diminution notable du prix de revient.

Le Tableau 1.2 présente quelques propriétés typiques des fibres de carbone.

Tableau 1.2 : Propriétés typiques des fibres de carbone [12,31]

Fibre de carbone	ρ (g/cm ³)	σ (GPa)	E (GPa)	Allongement à la rupture (%)
Très Haut Module à base de PAN	1.95	2	600	0.4 – 0.7
Haut Module à base de PAN	1.81	2.8	400	1.3 – 1.6
Haute résistance à base de PAN	1.75	3 – 4	230	3 – 4
Haut Module à base de brai	2.00	2 – 2.4	280	-

Les composites renforcés de fibres de carbone ont des propriétés supérieures : faible densité, légèreté, rigidité élevée, faible coefficient de dilatation thermique, excellente conductivité électrique et stabilité chimique. Ils sont donc utilisés pour concevoir des composants avancés dans diverses applications telles que les avions, les automobiles, les articles de sport et les équipements de défense [32].

Le module élevé et le poids léger des fibres de carbone leur ont permis de remplacer les alliages d'aluminium et de titane traditionnellement utilisés dans les applications aérospatiales.

La production de masse d'automobiles renforcées de fibres de carbone n'est pas encore courante en raison des coûts de production élevés. Toutefois, les voitures haut de gamme, comme les voitures de Formule 1, utilisent des carrosseries renforcées par des fibres de carbone en raison de leur résistance exceptionnelle et pour des raisons esthétiques [11].

Les composites renforcés de fibres de carbone constituent une bonne option pour la fabrication d'équipements sportifs de haute performance tels que les crosses de hockey sur glace, les casques de protection, les raquettes de tennis et les clubs de golf.

Dans les applications de défense, la diminution du poids d'un matériau peut réduire l'énergie nécessaire au transport de l'équipement. Les fibres de carbone peuvent donc constituer un excellent choix pour les applications militaires.

En raison de leur surface supérieure, les fibres de carbone jouent un rôle important dans la purification chimique en absorbant les produits chimiques toxiques. Outre ces applications conventionnelles, les fibres de carbone sont utilisées dans le développement de composites aux caractéristiques avancées. Par exemple, Pereira et al. ont développé un nouveau dispositif

électronique flexible basé sur des fibres de carbone produites à partir de PAN qui peut être utilisé pour des applications telles que les biocapteurs, la production de biocarburants et les dispositifs micro-fluidiques [33].

En outre, les composite en fibre de carbone sont un très bon candidat pour remplacer les armatures métalliques conventionnelles dans le domaine de la prothèse implantaire en raison de leur remarquable rigidité, leur rigidité et leur biocompatibilité [34].

De même, Méjean et ses collègues ont mené des recherches au cours desquelles ils ont mis au point un nouveau matériau absorbant les ondes électromagnétiques, moins dangereux, à partir d'une mousse époxy renforcée par des fibres de carbone. Ce nouveau matériau absorbant peut être un bon substitut à la mousse de polyuréthane renforcée de particules de carbone traditionnellement utilisée [35].

D'autres formes de fibres de carbone telles que les fibres de carbone hélicoïdales, les fibres de carbone de bambou, les fibres de carbone activées et les fibres de carbone recyclées sont utilisées dans des applications telles que le filtrage de l'air, les piles à combustible, les batteries lithium-ion, la sorption d'hydrogène et le support catalytique [36–39].

c). Fibre d'aramide

Selon la Commission fédérale du commerce des États-Unis, une fibre aramide est une fibre dont la substance de formation est un polyamide synthétique à longue chaîne. Sa production implique plusieurs étapes :

- La polycondensation qui se produit entre une diamine (comme la para-phénylènediamine) et un acide dicarboxylique pour former un polyamide aromatique.
- Le polymère aramide est ensuite dissous dans un solvant approprié (souvent une solution de sulfurique ou d'acide chlorhydrique concentré) pour obtenir une solution visqueuse.
- La solution de polymère est ensuite forcée à travers des filières (petits orifices) pour former des filaments.
- Les fibres solidifiés (par passage dans un bain de coagulation ou exposition à l'air) sont lavées, séchées, et stabilisées thermiquement pour garantir que les fibres conservent leur structure et leurs caractéristiques.

Les fibres obtenues sont remarquées par une combinaison unique de légèreté (plus légères que les fibres de verre), d'une résistance exceptionnelle à la chaleur (La dégradation thermique ne commence pas à des températures inférieures à 400°C [40]), d'une résistance à la traction supérieures à celles de l'acier, et de durabilité, ce qui les rend adaptées à une grande variété

d'applications industrielles et de protection, comme exemples : les produits résistants aux flammes, les avions, les automobiles, les gilets pare-balles et les casques de protection.

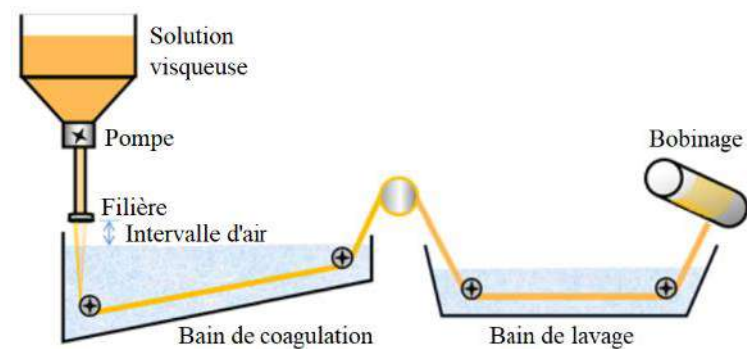


Figure 1.16 : Principe du procédé de fabrication des fibres aramides [41]

Kevlar[®], Technora[®], Heracron[®], Twaron[®], Nomex[®] et Teijinconex[®] sont les noms commerciaux des fibres aramides, dont les quatre premières sont des exemples de para-aramides, tandis que les dernières sont des méta-aramides [42]. Le Tableau 1.3 présente quelques propriétés typiques des fibres aramides.

Tableau 1.3 : Propriétés typiques de quelques fibres aramides [12]

Fibre aramide	ρ (g/cm ³)	σ (GPa)	E (GPa)	Allongement à la rupture (%)
Kevlar [®] 29	1.44	3	60	3.6
Kevlar [®] 49	1.45	3	120	1.9
Kevlar [®] 149	1.47	2.4	160	1.5
Twaron [®]	1.44	2.6	60	3
Technora [®]	1.39	2.8	90	4

Le type d'aramide (para- ou méta-) dépend de la position de la liaison chimique. Des études cristallographiques ont montré que l'axe des chaînes des para-aramides sont alignés dans le sens de la longueur de la fibre [40], tandis que les méta-aramides ont des liaisons en zigzag ; par conséquent :

- Les para-aramides présentent une meilleure résistance mécanique (3 à 7 fois) que les méta-aramides, ainsi qu'une flexibilité et une résistance à l'abrasion élevées.
- Les méta-aramides présentent une résistance supérieure à la chaleur, aux produits chimiques et aux radiations. En outre, ils présentent une bonne dissipation de l'énergie perpendiculaire à la fibre et sont donc utilisées dans les gilets pare-balles [43].

d). Fibre de bore

Les fibres de bore sont obtenues par dépôt chimique en phase gazeuse sur un substrat en tungstène (12 μ m de diamètre), ce dernier traverse un réacteur en verre dont l'entrée et la sortie sont scellées avec du mercure. A l'extérieur, le substrat est chauffé à 1300°C tandis que du trichlorure de bore et de l'hydrogène sont introduits dans le réacteur. Le bore se forme ainsi sur la surface du substrat, résultant un filament de bore en sortie mesurant environ 100 μ m de diamètre. Elles sont des fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures [44].

Actuellement, les fibres faisant l'objet d'une production obtenues par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support sont :

- Les fibres de bore (une couche de bore d'épaisseur environ 40 μ m sur le fil support),
- Les fibres de bore – carbure de bore (B-B₄C) (une couche de 40 μ m de bore et une autre de 4 μ m de carbure de bore sur le fil support),
- Les fibres SiC (fibres avec une couche de carbure de silicium),
- Les fibres BorSiC (avec une couche de bore et d'une autre de carbure de silicium) [12].

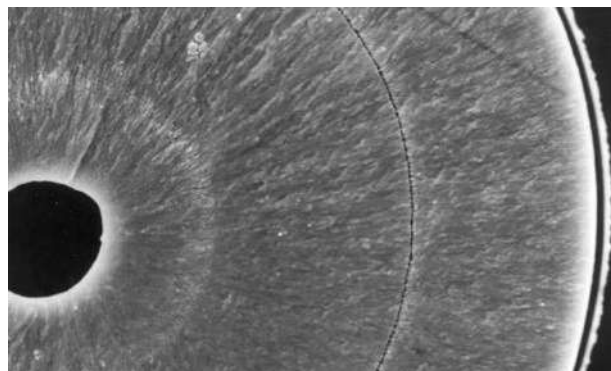


Figure 1.17 : Coupe transversale d'une fibre SiC montrant les zones de dépôt [44]

Les fibres de bore ont un module d'Young de 400GPa et une densité de 2.54g/cm³. Elles supportent des contraintes allant jusqu'à 3.4GPa avec un allongement à la rupture de 15% [44].

e). Fibre de silice (ou de quartz)

Produites par fusion comme le verre, les fibres de silice sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique (1050°C) ce qui convient parfaitement aux domaines de l'aérospatiale et des missiles (tuyères des moteurs de fusée). Elles ont un module d'Young égale à 78GPa et une densité de 2.2g/cm³. Elles se caractérisent par une résistance à la traction de l'ordre de 3.6GPa avec un allongement à la rupture de 4.6% [45].

1.4.2 La matrice

La matrice constitue le liant qui enrobe et solidarise les fibres. Elle remplit une double fonction mécanique et protectrice : d'une part, elle transmet et répartit les contraintes (compression, flexion) à l'ensemble de la structure ; d'autre part, elle isole les renforts des agressions chimiques. Les matrices se catégorisent principalement en trois groupes : les matrices organiques (thermoplastiques, thermodurcissables ou thermostables), les matrices métalliques et les matrices céramiques, également appelées minérales.

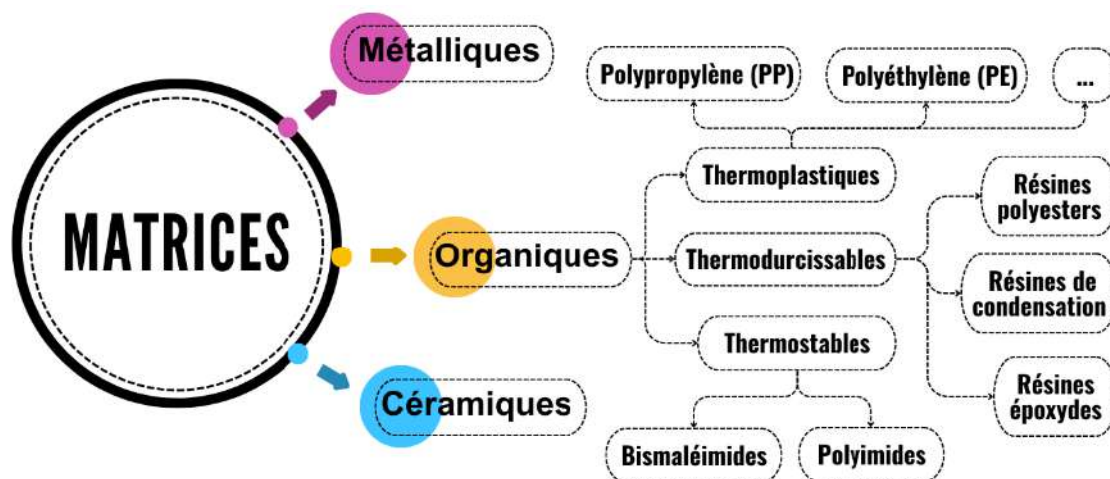


Figure 1.18 : Classification des matrices

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques [12].

1.4.2.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables se caractérisent par une transformation irréversible lors de leur mise en œuvre. Leur polymérisation, activée par la chaleur et un catalyseur, produit une structure moléculaire tridimensionnelle stable qui ne peut être altérée qu'à très haute température. Cette particularité leur confère des performances mécaniques et thermomécaniques supérieures à celles des résines thermoplastiques. Cette famille inclut notamment les résines polyesters insaturées, les résines époxydes et les résines issues de réactions de condensation.

a). Les résines polyesters insaturées

Le développement industriel des résines polyesters insaturées est sans cesse croissant, ceci revient à un faible coût de production, une diversité et de fabrication et de mise en œuvre.

Il existe différentes catégories de polyesters insaturés en fonction de leur structure, chacune a des propriétés physico-chimiques et mécaniques différente, les principales sont :

- Résines orthophtaliques ;
- Résines isophtaliques ;
- Résines DCPD ;
- Résines bisphénol A-fumarate ;
- Résines halogénées.

Elles sont aussi classées en résines souples, semi-rigides et rigides suivant leur module d'élasticité. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont du type rigide.

b). Les résines de condensation

Elles comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques :

- Les résines **phénoliques** sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite. Leurs caractéristiques les rendent utilisables dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température et aux agents chimiques.
- Avec des caractéristiques voisines de celles des résines phénoliques, il est possible d'utiliser les résines **aminoplastes** dans l'alimentaires.
- Les résines **furaniques** durcissent plus rapidement que les résines phénoliques, et ont une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs ce qui conduit à les utiliser dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques (citernes, tuyaux, bacs, etc.).

c). Les résines époxydes

Ce sont les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées, elles ne représentent cependant que 5% du marché composite à cause de leur prix élevé (cinq fois plus que celui des résines polyesters).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances et sont ainsi utilisées dans divers secteurs (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées, toutefois ; pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de cuisson très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100 °C).

d). Caractéristiques mécaniques générales des résines thermodurcissables

Sur les deux tableaux suivants sont représentés des propriétés mécaniques *typiques* des résines thermodurcissables ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Tableau 1.4 : Propriétés mécaniques typiques des résines thermodurcissables [12]

Résine thermodurcissable	ρ (g/cm ³)	σ (GPa)	E (GPa)	Allongement à la rupture (%)
Résines polyesters	1.2	0.05 – 0.08	2.8 – 3.5	2 – 5
Résines de condensation	1.2	0.04	3	2.5
Résines époxydes	1.1 – 1.5	0.06 – 0.08	3 – 5	2 – 5

Tableau 1.5 : Avantages et inconvénients des résines thermodurcissables [12]

Avantages	Résine	Inconvénients
Bonne rigidité et stabilité dimensionnelle Bonne mouillabilité des fibres et tissus Facilité de mise en œuvre Bonne tenue chimique Faible coût de production Bonne résistance chimique aux hydrocarbures à température ambiante	Polyesters	Tenue médiocre en température (>120 °C) Sensibilité à la fissuration Retrait important (8 – 10%) Mauvais comportement à la vapeur d'eau Dégradation à la lumière par les rayons UV Inflammabilité.
Excellente stabilité dimensionnelle Bonne tenue à la chaleur et au fluage Bonne résistance aux agents chimiques Faible retrait Bonnes caractéristiques mécaniques Faible coût	de Condensation	Mise en œuvre sous pression Couleurs foncées des résines Non adaptation à des utilisations alimentaires.
Bonnes propriétés mécaniques par rapport aux polyesters Bonne tenue aux températures élevées (190 °C) Excellente résistance chimique Faible retrait au moulage (0,5 – 1%) Très bonne mouillabilité des renforts Excellente adhérence aux matériaux métalliques	Epoxydes	Temps de polymérisation long Coût élevé Nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre Sensibilité à la fissuration

1.4.2.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques (connue par “plastiques”) possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffages et refroidissements successifs dans un intervalle de température spécifique du polymère. Ces résines peuvent donc être récupérées et facilement recyclées.

À l'échelle mondiale, la production annuelle des résines thermoplastiques a doublé, passant de 234 millions de tonnes (Mt) en 2000 à 460 Mt en 2019 (voir Figure 1.19) [46]. La famille des résines thermoplastiques est très vaste, comme exemples nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS), le polyamide (PA), le polycarbonate (PC), etc.

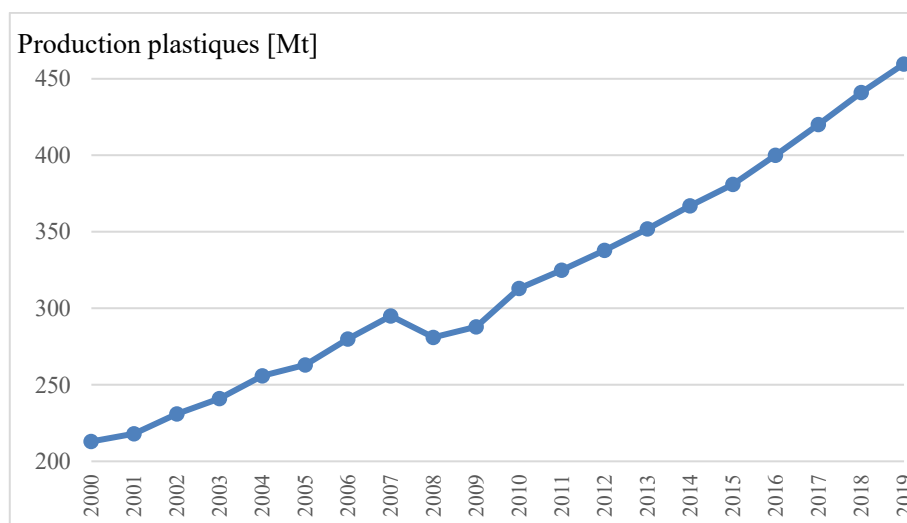


Figure 1.19 : Evolution de la production mondiale des polymères entre 2000 et 2019 [46]

Le polypropylène et le polyéthylène sont les deux polymères dont la consommation est la plus importante par rapport aux autres polymères comme le montre la Figure 1.20 représentant les principales applications des polymères pour le cas de l'Europe

a). Le polyéthylène

Le polyéthylène (symbolisé par PE [47]) résulte de la polymérisation de molécules d'éthylène (C_2H_4), formant ainsi des chaînes macromoléculaires à motif répétitif (CH_2-CH_2), comme illustré en Figure 1.21. Ce polymère trouve de nombreuses applications industrielles grâce à ses multiples avantages : coût de production modéré, excellente aptitude à la transformation, étanchéité remarquable face à l'eau et aux gaz, ainsi qu'une bonne inertie chimique vis-à-vis de l'humidité et de nombreux réactifs. Sa principale limitation réside dans sa température maximale d'utilisation, qui ne peut dépasser 100 °C.

Depuis l'introduction du polyéthylène basse densité en 1940, la résistance, la ténacité, les propriétés thermiques, la transparence optique et les conditions de traitement ont été considérablement améliorées, il en existe aujourd'hui plusieurs types : le polyéthylène à basse densité (LDPE) qui est obtenu par polymérisation sous haute pression, sa densité est de l'ordre de 0,91 à 0,94 g/cm³, en revanche, polyéthylène à haute densité (HDPE) est un polymère linéaire obtenu à basse pression et sa densité est comprise entre 0.94 et 0.986 g/cm³ [48].

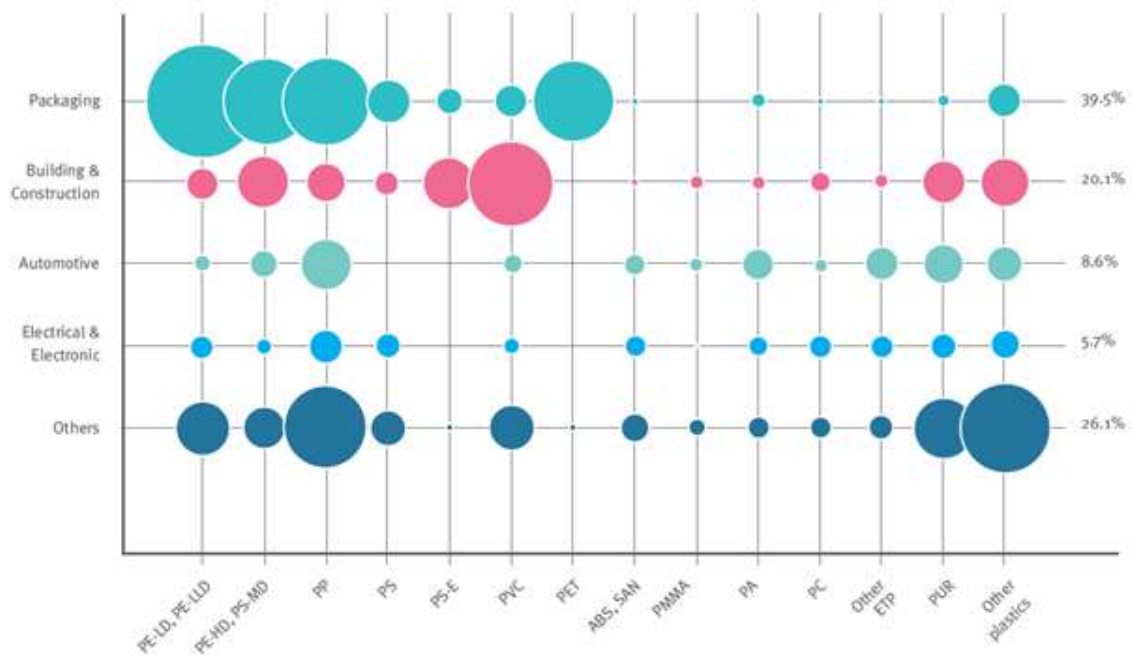


Figure 1.20 : Principales applications des polymères en Europe [49]

b). Le polypropylène

Le polypropylène (PP) présente une importance majeure puisqu'il est parmi les thermoplastiques de consommation courante, le polypropylène possède des propriétés remarquables comme une faible densité ; une bonne résistance à la flexion, à la rayure et à l'abrasion, la possibilité d'être stérilisé, etc. Ces caractéristiques permettent au polypropylène d'être utilisé dans différents domaines, comme des emballages alimentaires, des pièces en plastique et des contenants réutilisables de différentes sortes, des pantalons et chemises thermiques de l'armée, du matériel de laboratoire, des composants automobiles, etc. [50].

Avec tous les avantages décrits ci-dessus auxquels on peut encore ajouter une haute stabilité thermique, une résistance aux substances chimiques, un prix peu élevé et la possibilité d'être recyclé, le polypropylène est un bon candidat comme matrice pour la production de composites thermoplastiques renforcés de fibres.

c). Le polystyrène

Le PS a une densité de 1.05 g/cm^3 et une grande transparence. Il n'est pas adapté à une utilisation à haute température, car il subit un écoulement liquide à environ 100°C . il est en général un polymère peu coûteux et une barrière relativement peu efficace contre la vapeur d'eau et les gaz. Sa réactivité chimique est supérieure à celle du PE et du PP [51].

Le PS est disponible dans les qualités suivantes :

- Le **polystyrène cristal** utilisé lorsque la clarté est requise. Les produits fabriqués avec du PS cristal sont fragiles.
- Le **polystyrène à haute résistance aux chocs (HIPS)** est un matériau opaque auquel on a ajouté du caoutchouc pour améliorer la résistance aux chocs.
- La **mousse de PS** est une forme de PS cristallin traité avec un agent gonflant, généralement un hydrocarbure ou du dioxyde de carbone. C'est un excellent matériau de rembourrage et d'isolation.

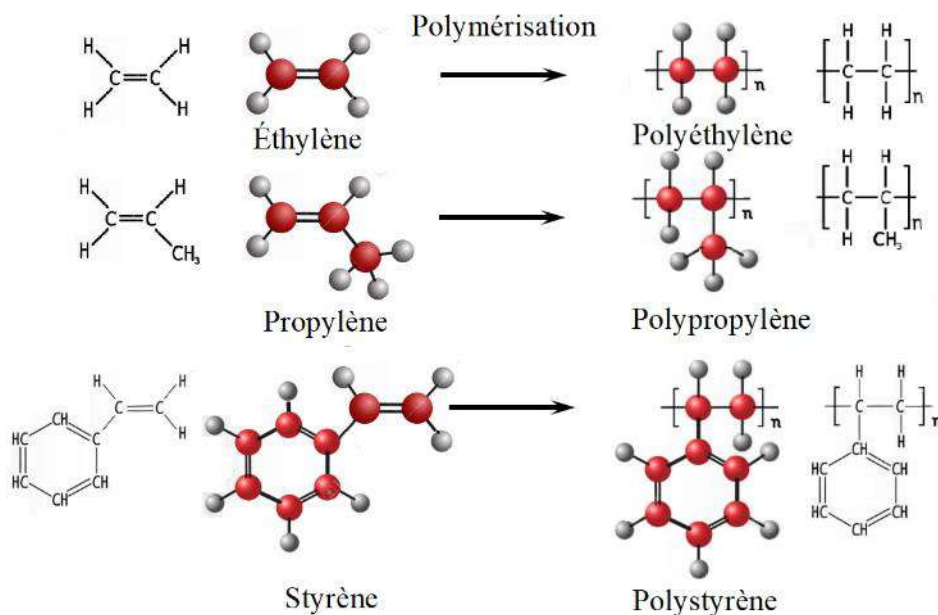


Figure 1.21 : Synthèse des polymères par polymérisation des monomères

1.4.2.3 Résines thermostables

Les polymères thermostables possèdent une température de service continue (CST) supérieure à 150°C (ils conservent au moins la moitié de leurs caractéristiques mécaniques sous une température élevée appliquées de façon continue durant 2000 h), ils sont aussi résistants aux produits chimiques et aux radiations ; et présentent une faible inflammabilité ou sont même auto-

extinguibles. Ce dernier point est particulièrement important pour les applications dans les secteurs de l'aéronautique, de la construction et des télécommunications électriques [52].

Parmi les résines thermostables, les bismaléimides et polyimides sont les plus utilisées :

- Les résines **bismaléimides** sont des résines dont le réseau est élaboré à des températures de 180 à 200 °C. Les procédés de moulage sont identiques à ceux des composites à matrice thermodurcissable de type polyester ou époxyde.
- Les résines **polyimides** sont apparues sur le marché vers 1970. Ce sont des résines à haute résistance thermique, mais de prix très élevé. Ces résines permettent d'obtenir des composites de résistance supérieure, à 250 °C, à la résistance de l'aluminium.

1.4.2.4 Matrice métallique

Les composites à matrice métallique (CMM) associent une phase métallique matricielle avec des renforts métalliques ou céramiques (fibres de carbone, particules de SiC, fils d'acier, alumine). Lorsque le renfort est céramique, on parle spécifiquement de "cermets".

Pour une viabilité technico-économique, ces matériaux doivent concilier performance et légèreté, favorisant ainsi l'usage de matrices en aluminium et ses alliages, suivis par le magnésium et le titane.

Actuellement, les CMM trouvent des applications croissantes dans les secteurs automobile, électronique et des équipements de loisir grâce à leurs propriétés mécaniques adaptatives. Ils surpassent les composites à matrice polymère (CMP) en résistance thermique, comportement au feu et durabilité, bien que leur densité et coût plus élevés constituent des limitations notables.

1.4.2.5 Matrice céramique

Bien que moins courants que les composites à matrice organique en raison de leur coût prohibitif, les CMC trouvent leur niche dans les environnements extrêmes, notamment les applications aérospatiales, militaires et les systèmes de freinage haut de gamme. Leur principal atout réside dans leur exceptionnelle résistance thermique, combinée à une masse réduite et une excellente inertie chimique. Cependant, leur nature intrinsèquement fragile restreint considérablement leur champ d'application.

Les CMC intègrent typiquement des renforts et matrices à base de SiC, C ou Al₂O₃. Bien que le carbone ne soit pas techniquement une céramique, son comportement similaire justifie son inclusion dans cette famille. Contrairement aux composites traditionnels, les CMC présentent souvent une configuration où la matrice est plus rigide que les renforts. L'innovation majeure

réside dans leur conception : plutôt que de simplement combiner des propriétés, ils génèrent de nouvelles caractéristiques mécaniques, notamment une amélioration de la ténacité et de la ductilité.

Un élément clé de leur conception repose sur l'insertion d'une couche intermédiaire fonctionnant comme un fusible mécanique. Cette interface, soigneusement calibrée, guide la propagation des fissures pour protéger les fibres sous-jacentes. Son seuil de rupture doit être précisément ajusté - suffisamment bas pour dévier les fissures, mais assez élevé pour assurer un transfert de charge efficace entre les couches. Cette subtile optimisation permet de contourner la fragilité naturelle des céramiques tout en préservant leurs propriétés mécaniques.

1.4.3 Les charges et additifs

De manière générale, les charges et additifs sont intégrés au composite pour lui conférer de nouvelles caractéristiques, ce qui lui permet d'accomplir une gamme plus étendue de fonctions techniques [12].

1.4.3.1 Les charges

Les charges sont des particules solides que l'on disperse au sein de la matrice (ajoutées en plus des renforts principaux), et qui peuvent être minérales, organiques ou métalliques. Elles sont classées en :

- Charges **renforçantes** dont l'objet est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine (classées eux même suivant leur forme géométrique en charges sphériques ou charges non sphériques)
- Charges non **renforçantes** qui ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines (carbonates, silicates ...), soit d'améliorer certaines de leurs propriétés (charges ignifugeantes, conductrices, antistatiques ...).

On peut citer comme exemples de ces charges :

- Les microbilles de verre creuses, (améliore la tenue en compression et allège la matrice).
- Le noir de carbone (à la fois pigment noir, barrière anti-UV et antioxydant).
- Les particules de silice (améliorent l'isolation thermique, électrique et acoustique).
- Les poudres ou paillettes métalliques (améliorent la conductivité électrique, l'usinabilité, la résistance aux chocs et à l'abrasion).
- Les billes thermoplastiques ajoutées dans les matrices thermodurcissables (améliorent la résistance à la fissuration).

1.4.3.2 Les additifs

Les additifs, présents en quantités minimales, jouent divers rôles dans le traitement des résines, ils interviennent comme :

- **Lubrifiants** qui facilitent le façonnage de la résine lors du processus de moulage.
- **Agents de démoulage** qui limitent l'adhérence de la résine aux moules.
- **Pigments** (substances dispersées dans une pâte) permettant de créer des pâtes colorantes, alors que l'utilisation des colorants est limitée en raison de leur mauvaise tenue chimique et thermique.
- **Agents anti-retrait** : ils réduisent ou éliminent le phénomène de retrait, prévenant ainsi le gauchissement et/ou les microfissures des pièces moulées, tout en améliorant l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage.
- **Agents anti-ultraviolets** absorbant les rayons ultraviolets pour prévenir la détérioration prématurée de la résine, causée par la rupture de liaisons atomiques ou l'excitation des molécules, ce qui pourrait entraîner une oxydation (photo-oxydation).

1.5 Procédés d'élaborations

Il existe une large gamme de procédés pour la mise en forme des matériaux composites, ce qui explique leur succès dans de nombreux domaines d'application. Ces procédés permettent de fabriquer des pièces de tailles et de caractéristiques variées, couvrant ainsi une vaste gamme d'échelles [12].

1.5.1 Moulages sans pression

1.5.1.1 Moulage au contact

Nécessitant un minimum d'équipement et un savoir-faire du mouleur, cette méthode est la plus simple à mettre en œuvre d'où le succès des matériaux composites à fibres de verre dans l'industrie et l'artisanat. C'est une méthode qui permet de réaliser des pièces en petites et moyennes séries, de différentes formes et dimensions dont l'une des faces est lisse.

1.5.1.2 Moulage par projection simultanée

Le moulage est réalisé sur un moule par la projection simultanée de fibres coupées depuis un stratifil et de résine catalysée. La projection est réalisée à l'aide d'un pistolet fonctionnant à l'air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles à l'aide d'un rouleau cannelé. Cette technique permet de produire de grandes séries de pièces

à un coût réduit. Cependant, le renfort est limité aux fibres coupées, ce qui entraîne des caractéristiques mécaniques du matériau de niveau moyen.

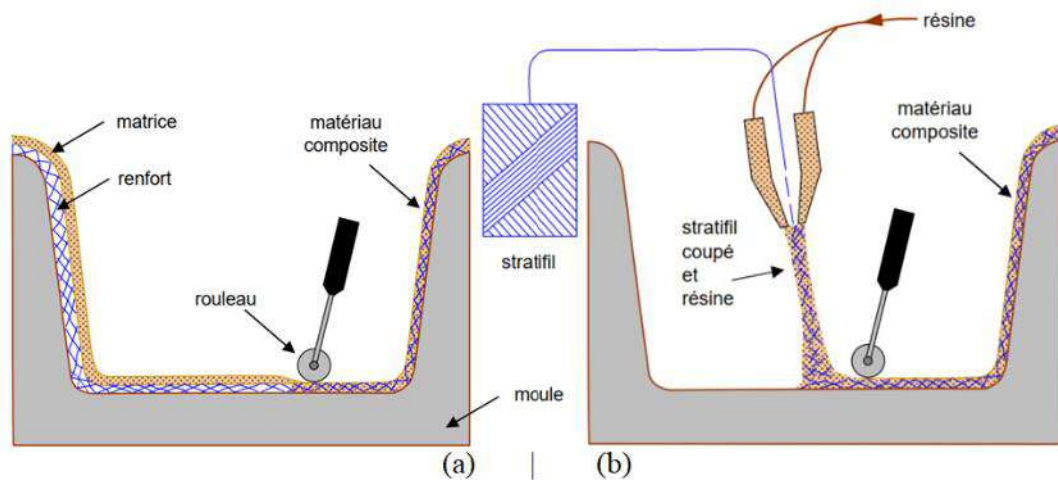


Figure 1.22 : Moulage (a) sans pression au contact, et (b) par projection simultanée.[12]

1.5.2 Moulage sous vide

Il consiste à utiliser la pression atmosphérique pour emboîter un contre-moule poreux, recouvert d'une membrane étanche (qui peut être utilisée seule sans le contre-moule) afin de compresser et débuller la résine. Ce procédé permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air.

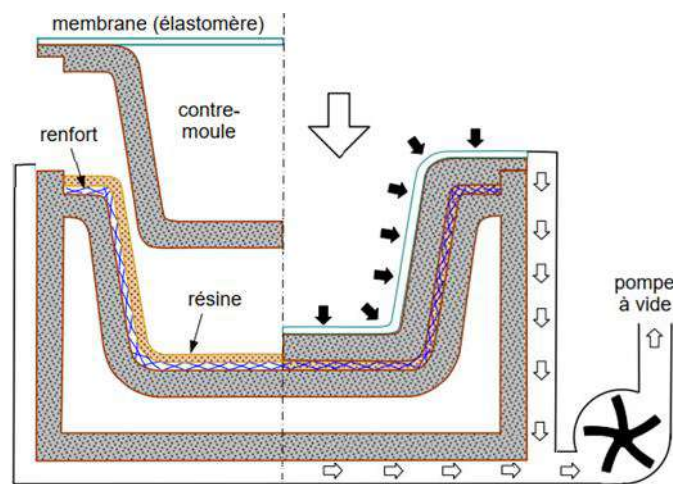


Figure 1.23 : Moulage sous vide [12]

1.5.3 Moulage par compression

1.5.3.1 Moulage par injection de résine

Ce procédé s'effectue par l'injection de la résine à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule, il convient aux pièces de formes compliquées et/ou

profondes. Les pièces obtenues ont des caractéristiques mécaniques élevées vu que la proportion de renfort peut être élevée.

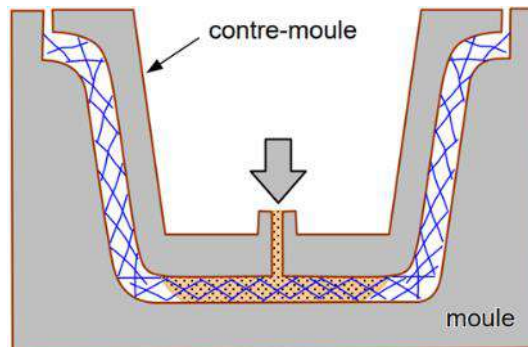


Figure 1.24 : Moulage par injection de résine [12]

1.5.3.2 Moulage par compression de résine

Ce procédé est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4–30 pièces/heure) dont l'aspect de surface est bel sur les deux faces. Il consiste à compresser de l'ensemble moule/contre-moule :

- à basse pression (< 5 bars) sans chauffage du moule,
- à une pression de 10 à 50 bars avec moule chauffé à une température entre 80 et 150°C.

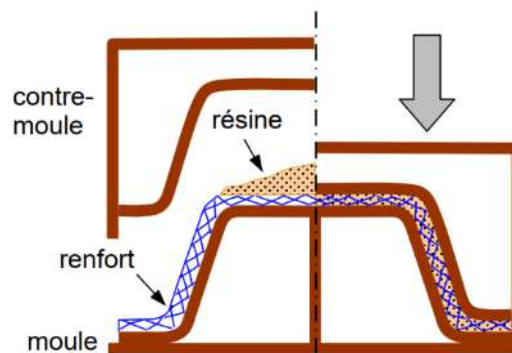


Figure 1.25 : Principe du moulage par compression de résine [12]

1.5.3.3 Moulage par injection de mat préimprégné

Cette méthode est particulièrement adaptée à la production de pièces en très grandes séries et est couramment utilisée pour la mise en œuvre des thermoplastiques renforcés. Elle est effectuée à l'aide des presses conventionnelles employées pour l'injection de résines thermoplastiques. En fonction de la nature des renforts utilisés (fibres courtes, sphères, etc.), la résistance à la rupture et le module d'Young des pièces peuvent être améliorés de 2 à 4 fois.

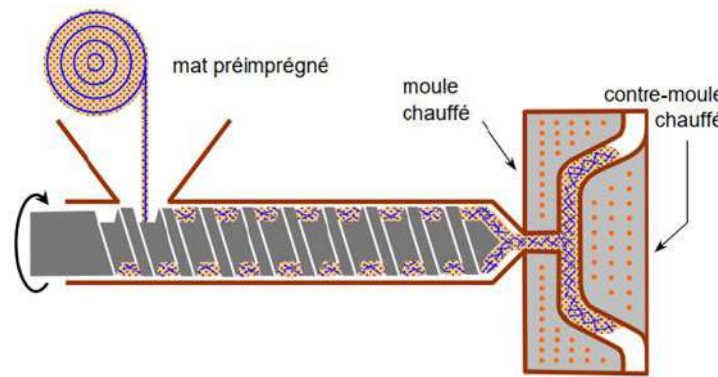


Figure 1.26 : Moulage par injection de mat préimprégné [12]

1.5.4 Moulage en continu

Ce procédé peut être entièrement automatisé, mais nécessitant un investissement très important. Il permet la fabrication de :

- Plaques planes où la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage (Figure 1.27), panneaux sandwichs, plaques nervurées, etc.
- Panneaux ondulés pour toitures mis en forme par l'intermédiaire de rouleaux mobiles (Figure 1.28).

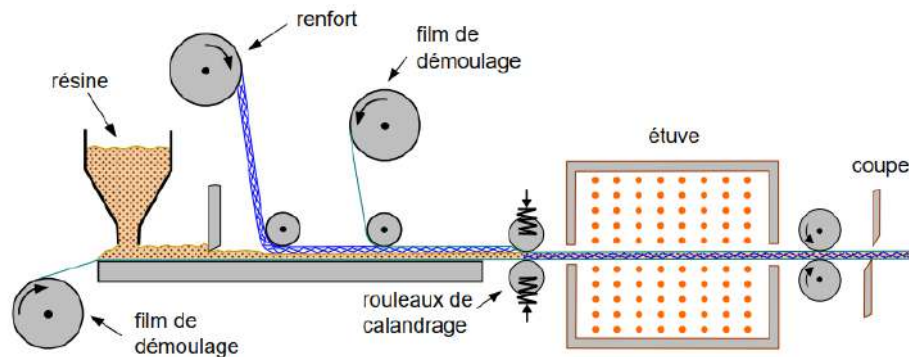


Figure 1.27 : Moulage en continu de plaques [12]

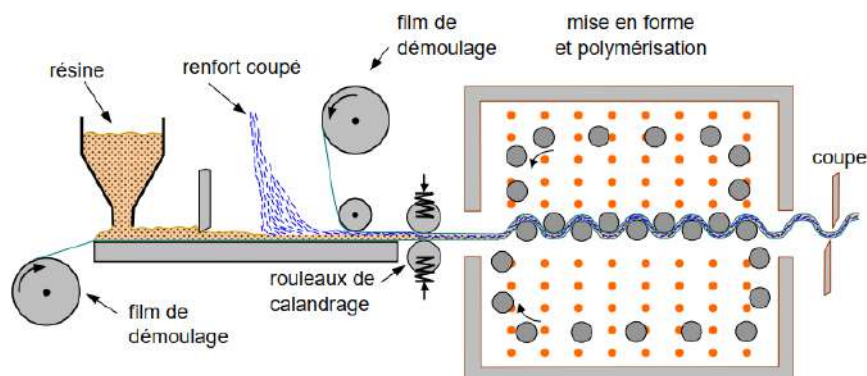


Figure 1.28 : Moulage en continu de panneaux ondulés pour toitures [12]

1.5.5 Moulage par pultrusion

Cette technique est principalement utilisée pour produire des profilés à section constante présentant un renforcement directionnel marqué. Le procédé consiste à imprégner les renforts par passage dans un bain de résine, façonner le composite à travers une filière thermorégulée, puis réaliser simultanément la mise en forme et la polymérisation in situ. L'opération combine ainsi en une seule étape continue l'imprégnation, le formage et la cure du matériau composite.

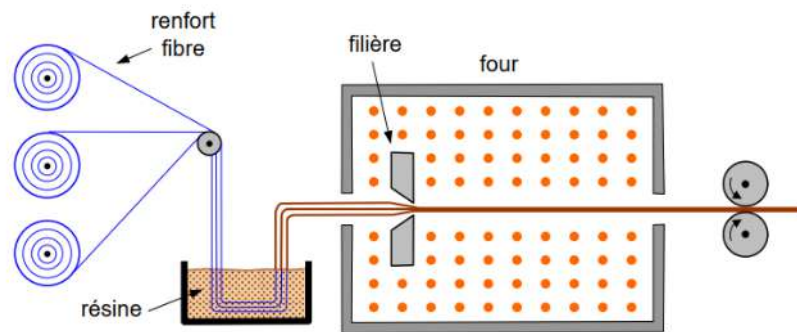


Figure 1.29 : Moulage par pultrusion [12]

1.5.6 Moulage par centrifugation

Cette méthode est particulièrement adaptée à la production de composants axisymétriques tels que réservoirs, conduites et éléments tubulaires. Inspirée des procédés de centrifugation traditionnellement utilisés pour les tuyaux en fonte ou en béton, elle permet d'obtenir des pièces aux dimensions précises (diamètre et épaisseur contrôlés) présentant une excellente finition de surface externe.

1.5.7 Moulage par enroulement filamentaire

Bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, ce type de moulage permet une conception avancée des pièces. Le renfort est enroulé avec une légère tension, permettant d'obtenir des stratifiés avec des proportions élevées en renfort (jusqu'à 80% en volume).

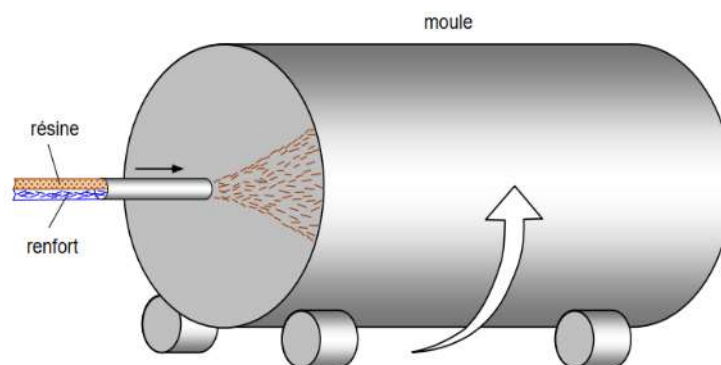


Figure 1.30 : Moulage par centrifugation [12]

Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements sont obtenus, on distingue :

- L'enroulement **circonférentiel** (assez peu utilisé), le bobinage est effectué à 90° par rapport à l'axe du mandrin et confère une résistance tangentielle élevée.
- L'enroulement **hélicoïdal discontinu**, avec direction d'enroulement des fils inclinés par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif du guide-fils (Figure 1.32). Ce type d'enroulement permet de réaliser des couches successives avec des angles différents. L'angle est choisi en fonction du rapport résistance tangentielle/résistance transversale souhaité. Il est adapté à la fabrication des pièces de grandes dimensions (conteneurs, enveloppes de fusées, torpilles, tubes de forage pétrolier, bouteilles de gaz, etc.).
- L'enroulement **hélicoïdal continu** : il permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs.

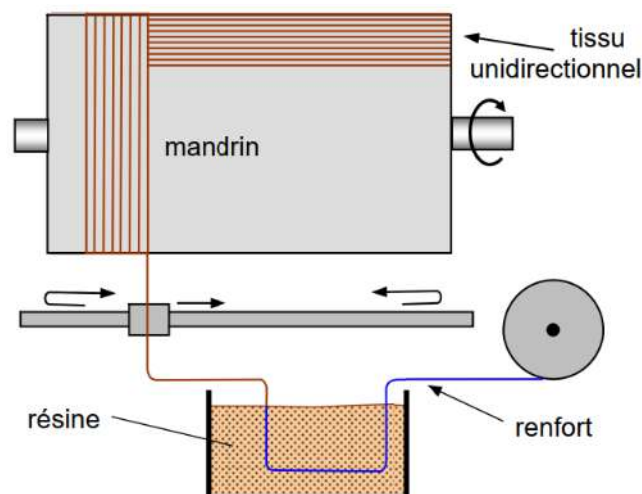


Figure 1.31 : Enroulement circonférentiel [12]

- L'enroulement **polaire** : pouvant être assistée par ordinateur, ce procédé permet de fabriquer des pièces à extrémités sphériques (réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, tuyaux, tubes, réservoirs, bouteilles de gaz, etc.) sans discontinuité de l'enroulement et dont les dimensions sont limitées par le type de machine utilisée. Les pièces peuvent avoir une symétrie de révolution ou non (pales d'hélicoptères et de turbines, réservoirs à sections rectangulaires, etc.).

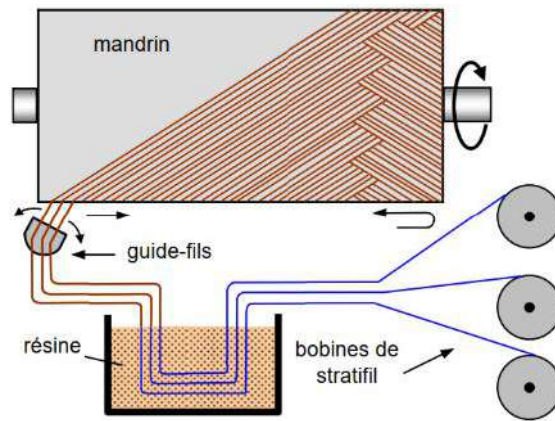


Figure 1.32 : Enroulement hélicoïdal discontinu [12]

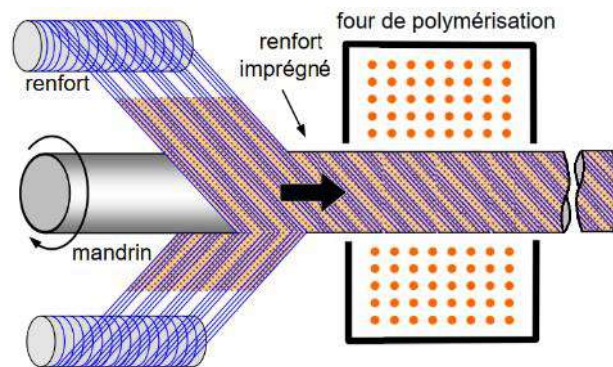


Figure 1.33 : Enroulement hélicoïdal continu [12]

1.6 Architecture des matériaux composites

1.6.1 Les stratifiés

Les stratifiés sont constitués de couches (plis) successives de renforts imprégnés de résines et orientés à différents angles (Figure 1.34) de façon optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure. Un stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement, le Tableau 1.6 représente quelques exemples de désignation.

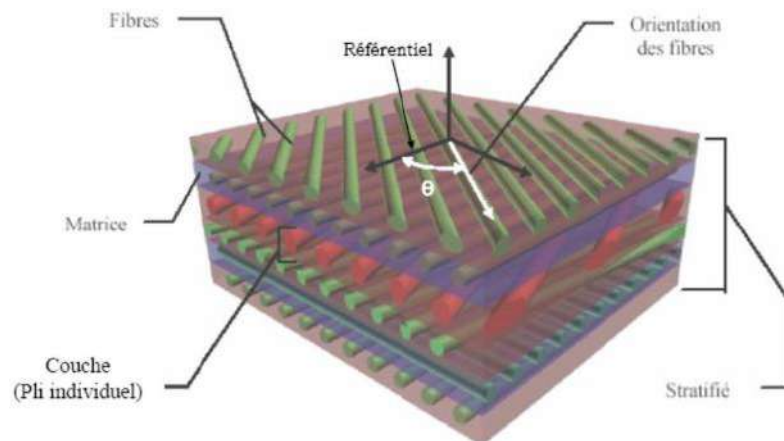


Figure 1.34 : Structure d'un stratifié [53]

Tableau 1.6 : Exemples de désignation des stratifiés

Stratifié	Séquence	Désignation
Angles positifs et négatifs	$40^\circ/-40^\circ/-30^\circ/30^\circ/0^\circ$	$[\pm 45/\mp 30/0]$
Séquence de plis répétés	$0^\circ/45^\circ/90^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ$	$[(0/45/90)_2]$
Symétrique (Nombre paire de plis)	$0^\circ/45^\circ/90^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ$	$[0/45/90]_s$
Symétrique (Nombre impaire de plis)	$0^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ$	$[0/45/90/\overline{45}]_s$
Hybrides (V: Verre, C: Carbone et K: Kevlar)	$0^\circ V/45^\circ C/-45^\circ C/90^\circ K/-45^\circ C/45^\circ/0^\circ$	$[0_V/\pm 45_C/\overline{90_K}]_s$

Contrairement aux matériaux homogènes qui peuvent être décrites simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, chaque élément des composites, joue un rôle différent et les caractéristiques du composite sont l'association des propriétés des éléments. Cert que les caractéristiques du matériau final sont une interaction complexe entre le renfort et la matrice, mais il est possible de les estimer à l'aide de la loi des fractions volumiques :

$$P_c = \rho_c \cdot V_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad (1-1)$$

Avec :

- V_f fraction volumique de fibres
- V_m fraction volumique de matrice ($V_f + V_m = 1$)
- P_c poids estimé du composite
- ρ_f masse volumique de la fibre
- ρ_m masse volumique de la matrice

Le module d'élasticité en traction peut être estimé en se basant sur les modules respectifs de la fibre et de la matrice.

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (1-2)$$

Avec :

- E_c module d'élasticité en traction estimé du composite
- E_f module d'élasticité en traction de la fibre
- E_m module d'élasticité en traction de la matrice

1.6.2 Sandwichs

Les structures sandwich associent une âme centrale à deux peaux composites, le tout assemblé par collage avec une résine adaptée. Les âmes couramment employées présentent des architectures variées : géométrie en nid d'abeille, profil ondulé ou matériau mousse. Quant aux peaux, elles sont typiquement réalisées sous forme de stratifiés multicouches.

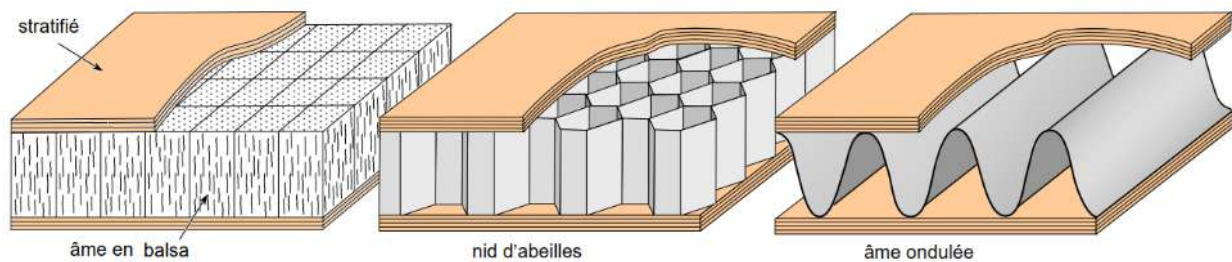


Figure 1.35 : Les panneaux sandwichs [12]

1.7 Avantages et inconvénients des matériaux composites

Intuitivement, on pense que le remplacement d'une structure métallique par une structure composite permet de gagner du poids. Cependant, l'avantage peut résider dans la résistance à la fatigue, comme dans le cas des hélicoptères, qui souffrent souvent de fatigue.

Les matériaux composites sont donc choisis comme alternatives aux matériaux conventionnels pour un ou plusieurs des avantages suivants [54] :

- Réduction du poids et des coûts des systèmes.
- Une résistance et une rigidité spécifiques élevées.
- Une grande ténacité (résistance aux chocs).
- Un meilleur amortissement du bruit et des vibrations mécaniques par rapport à l'acier.
- Une résistance élevée à la fatigue (amélioration de la durée de vie en fatigue)
- Possibilité d'adapter les propriétés mécaniques et thermiques en fonction de la configuration de la stratification des fibres.
- Coefficient de dilatation thermique (CTE) faible et contrôlable (c'est-à-dire bonne stabilité dimensionnelle).
- Idéal pour l'isolation thermique et/ou électrique (conductivité faible ou nulle).
- Résistance à la corrosion.
- Consolidation des pièces et réduction de l'usinage : permet de réduire le nombre d'assemblages et de fixations.
- Possibilité de fabriquer des formes complexes et des pièces uniques à partir d'un outillage à faible coût.
- Les structures endommagées peuvent être réparées (par stratification ou par collage).
- Attrait visuel.

D'autre part, la majorité des composites sont basés sur des polymères thermodurcissables, ce qui rend leur recyclage difficile. Cette contrainte va à l'encontre du développement durable,

montrant un manque de respect à l'environnement qui est un parmi d'autres inconvénients de l'utilisation des matériaux composites ; à savoir [55] :

- Bien que peu fréquentes, les réparations sont difficiles et complexes.
- En raison de leur développement relativement récent, leurs techniques d'élaboration ne sont bien connues que des spécialistes.
- Leur résistance à la chaleur est nettement inférieure à celle des métaux, étant généralement limitée à environ 100 °C, sauf si l'on utilise des résines spécifiques comme le PEEK ou les polyimides, qui peuvent supporter des températures proches de 250 °C.

1.8 Conclusion

Les composites sont une technologie essentielle depuis le début de la civilisation humaine et continueront d'être la clé de développements dans les technologies du XXI^e siècle. Ils intègrent différents éléments afin de dépasser les caractéristiques des matériaux traditionnels. Ce chapitre a analysé en profondeur l'évolution historique des matériaux composites, leur classification, ainsi que les divers types, avec un accent sur leurs applications dans les divers domaines.

L'importance croissante de ces matériaux dans plusieurs industries illustre leur rôle fondamental dans les avancées technologiques futures. Actuellement, de nouvelles recherches sont axées sur les biocomposites notamment avec des fibres issues de plantes car ils sont biodégradables, et contribuent ainsi au respect de l'environnement. Dans ce sens, le chapitre suivant est consacré à une étude bibliographique sur les biocomposites.

Chapitre 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LES BIOCOMPOSITES

2.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, les résines synthétiques ont dominé le marché des plastiques, souvent dérivées de produits pétroliers. Cependant, l'impact environnemental de ces plastiques, incluant la pollution des sols et des océans ainsi que les problèmes liés à leur élimination, devient de plus en plus préoccupant. L'épuisement des espaces de décharge renforce l'urgence de trouver des matériaux plus écologiques, notamment biodégradables.

Les biocomposites émergent comme une solution innovante face à ces défis environnementaux. En fournissant une alternative durable aux composites traditionnels basés sur le pétrole, ces matériaux permettent de réduire significativement l'empreinte carbone des produits manufacturés. Cette prise de conscience écologique croissante a conduit les chercheurs à explorer des composites renforcés par des matériaux naturels, offrant ainsi une meilleure compatibilité environnementale.

Les recherches récentes dans ce domaine se concentrent sur le développement de biocomposites innovants en explorant diverses méthodes et matériaux, dans le but de maximiser leur performance et leur impact environnemental positif. Elles traitent deux axes principaux :

- L'utilisation de fibres naturelles et de déchets agricoles comme renforts, réduisant ainsi la dépendance aux ressources pétrolières et l'empreinte carbone.
- L'intégration de matrices en polymères biodégradables, comme l'acide polylactique (PLA), pour rendre les biocomposites entièrement respectueux de l'environnement.

Cette tendance reflète l'engagement croissant de la recherche pour des matériaux durables et écologiques. Le reste de ce chapitre proposera une revue des recherches actuelles sur fibres naturelles de renforcement des biocomposites ainsi que les matrices biodégradables.

2.2 Biocomposites

2.2.1 Définition d'un Biocomposite

Les biocomposites sont des matériaux composites qui combinent des fibres ou des particules naturelles avec une matrice afin d'améliorer leurs propriétés. Ils se distinguent par l'utilisation de fibres naturelles, comme le chanvre, le lin ou le jute, ou l'utilisation de résines biodégradables, ou la combinaison des deux. Il est important de noter que l'utilisation de fibres naturelles seule ne garantit pas une biodégradabilité totale du composite ; la biodégradabilité dépend également de la matrice employée, pour qu'un biocomposite soit entièrement biodégradable, il est essentiel que non seulement les fibres naturelles mais aussi la matrice soit biodégradable [56].

Les composites biodégradables consistent à renforcer les fibres naturelles d'origine végétale et animale par des biopolymères naturels. Ils utilisent des méthodes d'adhésion pour le renforcement telles que la liaison mécanique, l'attraction électrostatique, la liaison chimique, l'interdiffusion et l'adsorption. Les biocomposites intéressent les fabricants en raison de leur flexibilité pendant le traitement des composites, de leur faible coût et de leur résistance spécifique élevée [57].

2.2.2 Avantages et inconvénients

L'un des principaux avantages des biocomposites est leur nature renouvelable. Les fibres naturelles telles que le jute, le chanvre et le lin sont abondantes et peuvent être facilement obtenues, contrairement aux combustibles fossiles limités. En utilisant ces ressources renouvelables, les fabricants peuvent réduire leur dépendance à l'égard des matériaux non renouvelables et contribuer à un avenir plus durable [58].

En plus d'être renouvelables, les biocomposites sont également biodégradables. Contrairement aux composites conventionnels dont la décomposition peut prendre des centaines d'années, les biocomposites se décomposent naturellement, ce qui minimise l'impact sur l'environnement. Cette caractéristique fait des biocomposites une option intéressante pour les industries qui cherchent à réduire les déchets et à promouvoir une économie circulaire [59].

En outre, les biocomposites offrent des propriétés mécaniques comparables à celles des composites traditionnels, ce qui en fait une alternative viable pour un large éventail d'applications. Ces matériaux sont légers, mais solides et durables, ce qui permet de les utiliser dans les secteurs de l'automobile, de la construction et de l'emballage [59].

Malgré que sont durables et potentiellement recyclables, les biocomposites sont sensibles à l'humidité et à la température par rapport aux composites à base de fibres synthétiques [60] ; Ces problèmes doivent être résolus pour améliorer la compétitivité des biocomposites par rapport aux composites à base de fibres synthétiques.

2.2.3 Applications des biocomposites

La préoccupation croissante pour l'environnement renforce la recherche de matériaux durables et respectueux de l'environnement pour diverses applications. Les biocomposites peuvent être une réponse à cette recherche [61]. Ils sont de plus en plus reconnus pour leurs diverses applications dans différents secteurs en raison de leurs propriétés uniques, notamment leur biodégradabilité, leur capacité de renouvellement et leur résistance mécanique. Leur polyvalence leur permet d'être adaptés à des applications spécifiques dans de nombreux secteurs tout en offrant des avantages fonctionnels par rapport aux matériaux traditionnels.

Dans l'industrie automobile, les biocomposites sont utilisés principalement pour réduction du poids : leur légèreté permet d'améliorer le rendement énergétique et de réduire les émissions de carbone. Les applications comprennent des composants intérieurs courantes tel que les tableaux de bord, les sièges et les panneaux intérieurs [58]. Des entreprises comme BMW et Daimler explorent les biocomposites pour des objectifs de durabilité, principalement pour réduire l'impact environnemental de la production.

Dans le domaine biomédical, les biocomposites servent d'échafaudages qui favorisent la croissance cellulaire et la régénération des tissus. Ils peuvent aussi être conçus pour libérer des médicaments de manière contrôlée dans l'organisme et même utilisés dans des applications médicales qui interagissent directement avec les tissus humains (comme les pansements) vu leur biocompatibilité [58,59].

Les biocomposites sont de plus en plus utilisés dans les solutions d'emballage en raison de leur biodégradabilité qui contribue à la réduction des déchets plastiques. En plus, les emballages en biocomposites peuvent offrir des qualités de barrière améliorées et prolonger la durée de conservation par rapport aux matériaux conventionnels [58].

Les biocomposites trouvent des applications dans divers produits de consommation comme le mobilier, les jouets et les ustensiles de cuisine en raison de leur attrait esthétique. Mais en générale, c'est leurs propriétés mécaniques les destinent à des applications à faible charge telles que les panneaux de fenêtres, les objets décoratifs, les coussins, les cannes à pêche, les parties internes d'un avion, les abat-jours, les plateaux de nourriture et les panneaux intérieurs, etc. Ces

composites peuvent donc remplacer les matériaux les plus conventionnels dans ces applications et améliorer la qualité globale du produit [62].

Dans une étude menée par Scaffaro et al. (2021), les chercheurs ont exploré la possibilité d'imprimer un composite à base d'acide polylactique (PLA) renforcé par des déchets agricoles et marins (cladodes d'*Opuntia ficus indica* et feuilles de *Posidonia oceanica*). Ces matériaux ont été préparés à l'aide de la modélisation par dépôt fondu (FDM). Les résultats montrent qu'il est possible d'imprimer ce biocomposite en 3D [63], ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour les applications des biocomposites. Cette étude est un témoin que les recherches en cours continuent d'élargir le potentiel d'utilisations de biocomposites, en particulier dans les environnements à hautes performances.

2.2.4 Avenir des biocomposites

L'avenir des biocomposites semble prometteur grâce à leur intégration croissante dans divers secteurs industriels ; ils sont en train de transformer plusieurs secteurs grâce à leurs propriétés écologiques et mécaniques. Ceci est soutenue par l'innovation technologique et une prise de conscience accrue des enjeux environnementaux. Les recherches actuelles mettent en avant leur potentiel non seulement comme alternatives durables mais aussi comme solutions innovantes pour répondre aux besoins contemporains en matière de matériaux.

Les biocomposites offrent des bénéfices environnementaux considérables ; leur capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre est un atout majeur dans le cadre des efforts mondiaux pour lutter contre le changement climatique. L'utilisation de matériaux biosourcés contribue également à diminuer la dépendance aux ressources fossiles, favorisant ainsi une économie circulaire [64,65].

C'est un avenir promoteur soutenu par des recherches approfondies et des innovations technologiques. Cependant et malgré leur potentiel, les biocomposites doivent encore surmonter plusieurs défis, notamment en termes de coût de production et d'optimisation des chaînes d'approvisionnement. La recherche continue est essentielle pour développer des méthodes de production plus efficaces et rentables, afin d'assurer une adoption plus large dans l'industrie.

2.2.5 Observations expérimentales

Les propriétés du biocomposite peuvent être déterminées par :

- Des essais mécaniques, notamment des essais de traction, de flexion et d'impact ;

- Des essais thermiques, notamment l'analyse mécanique dynamique (DMA), la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et l'analyse thermogravimétrique (TGA) ;
- La caractérisation des matériaux, notamment la microscopie électronique à balayage (MEB), la microscopie électronique à transmission (MET) et l'analyse des rayons X à dispersion d'énergie (EDAX) :
 - Le MEB utilise un faisceau d'électrons de forte intensité pour produire une image à haute résolution de la fibre permettant la caractérisation morphologique des fibres (rugosité de la surface, structure de la paroi cellulaire, ...),
 - La structure cristallographique, la taille des cristaux et l'indice de cristallinité de la fibre sont examinés par diffraction des rayons X.
- La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est utilisée pour analyser qualitativement et quantitativement la structure moléculaire des fibres ainsi que les liaisons chimiques.
- Le diamètre exact des fibres est révélé par les micrographies TEM utilisées pour étudier les aspects les plus infimes des fibres. Elles permettent d'examiner les dimensions transversales des nombreuses sous-couches qui composent une paroi cellulaire.

2.3 Fibres végétales

Les fibres naturelles sont une ressource durable considérée comme renouvelable et biodégradable. Deux catégories principales peuvent être utilisées pour décrire les fibres naturelles, à savoir les fibres végétales et les fibres animales. Plusieurs fibres végétales ont été étudiées pour renforcer les polymères, comme par exemple le lin, le chanvre, le palmier, le jute, etc. La structure, la dimension des cellules, la densité, la composition chimique et les qualités mécaniques sont des aspects importants qui affectent leurs performances globales.

2.3.1 Composition d'une fibre végétale

La structure des fibres végétales se révèle complexe et se compose principalement de trois éléments essentiels qui influencent leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles :

- **Cellulose** : ce polysaccharide principal constitue la base des parois cellulaires. La cellulose est organisée en microfibrilles, formées par des chaînes de glucose, et sa cristallinité a un impact significatif sur les propriétés mécaniques des fibres. La cellulose est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé, soit plus de 150GPa (à titre d'exemple, celui de la fibre de verre est de 75GPa) [66].

- **Hémicellulose** : ce polysaccharide, plus complexe que la cellulose, se lie à elle et contribue à la flexibilité et à la résistance des fibres. Les hémicelluloses jouent également un rôle dans la liaison entre les microfibrilles de cellulose.
- **Lignine** : ce polymère aromatique renforce les parois cellulaires et est crucial pour la protection contre la décomposition et les agents pathogènes.

Sur le plan cellulaire, les fibres sont constituées de cellules allongées, appelées cellules fibreuses, dont la taille et la forme varient selon les espèces végétales. Les parois cellulaires des fibres se divisent généralement en trois couches : la paroi primaire, la paroi secondaire et une couche plus interne.

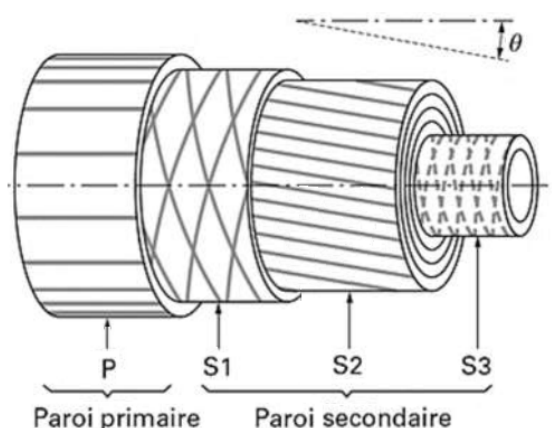


Figure 2.1 : Microstructure d'une fibre végétale [67]

La paroi primaire est la couche externe, avec une épaisseur variante entre 0.1 et 0.5 μm . Elle est poreuse et élastique, ce qui permet à la cellule de croître. Cette paroi est principalement constituée de microfibrilles de cellulose orientées de manière aléatoire [68].

La paroi secondaire, plus épaisse (environ 10 μm), représente la majorité du volume de la fibre et contient une proportion plus élevée de cellulose. Dans cette couche, les fibrilles de cellulose sont orientées parallèlement, formant un angle microfibrillaire d'environ 10° par rapport à l'axe longitudinal de la fibre [67].

Les trois couches de la paroi secondaire, désignées S1, S2 et S3, se distinguent par leur composition biochimique, leur épaisseur et leur arrangement interne. La couche S2 est la plus épaisse, occupant environ 80% de l'épaisseur totale de la paroi, et conditionne donc le comportement global de la fibre. Cette structure multicouche confère aux fibres végétales un caractère anisotrope [69], les défauts structurels, tels que des fissures ou des irrégularités, peuvent également altérer les propriétés mécaniques des fibres [70].

2.3.2 Limitations à l'utilisation des fibres naturelles

Les fibres naturelles présentent plusieurs limitations majeures qui entravent leur développement et leur application. Parmi ces défis figurent la faible compatibilité avec les matrices polymères, l'absorption d'humidité excessive, la stabilité thermique limitée et la dépendance vis-à-vis la région et moment de récolte. Chacune de ces problématiques a été étudiée, et des efforts considérables ont été déployés pour trouver des solutions.

2.3.2.1 Absorption d'humidité et compatibilité avec les polymères

Les fibres naturelles présentent une capacité d'absorption de l'humidité supérieure à celle des fibres synthétiques en raison de leur nature hydrophile, principalement attribuée à leur composition chimique, riche en cellulose. Leur teneur en cellulose est importante, ce qui renforce leur capacité à absorber l'humidité. Par exemple, la teneur en cellulose des fibres de coton varie de 80 à 94 %, tandis que d'autres fibres naturelles comme les fibres de feuilles d'arec et d'ananas contiennent également des quantités considérables de cellulose [71].

La cellulose contient de nombreux groupes hydroxyles (-OH) qui sont polaires et capables de former des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau, ce qui entraîne une absorption accrue d'eau. Ce phénomène est considéré comme une limitation dans les applications où la résistance à l'humidité est essentielle, car il peut entraîner une instabilité dimensionnelle et une réduction des propriétés mécaniques [72,73]. Pour pallier cette absorption d'eau, des traitements de surface, comme le traitement au silane, ont été proposés. Ces modifications améliorent l'adhésion entre la matrice et la fibre, ce qui est essentiel pour stabiliser les composites polymères.

Wang et al. (2023) ont résumé dans un article comment l'absorption d'eau dans les composites à base de fibres végétales affecte leurs propriétés mécaniques. Ils ont discuté de diverses méthodes pour atténuer l'absorption d'eau, en mettant l'accent sur la relation entre le contenu en humidité et les performances mécaniques (propriétés de traction et de flexion) [74].

2.3.2.2 Dégradation thermique des fibres naturelles

Les fibres naturelles présentent une stabilité thermique limitée en raison de la dégradation de leurs principaux composants (cellulose, hémicellulose et lignine) lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées. L'hémicellulose commence à se dégrader à environ 200°C, tandis que la cellulose et la lignine se dégradent à des températures plus élevées, généralement entre 300°C et 450°C. Ceci entraîne une perte des propriétés mécaniques et thermiques, ce qui rend les fibres naturelles moins adaptées aux applications à haute température [75,76].

La recherche indique que la stabilité thermique des fibres naturelles peut être améliorée par divers traitements qui éliminent les hémicelluloses et la lignine. Ce processus augmente la cristallinité de la fibre et réduit la présence de composants volatils, ce qui peut améliorer les performances à la chaleur [75,77]. Toutefois, certains traitements peuvent affaiblir involontairement la stabilité thermique en modifiant la structure de la fibre [75].

Thomason et al. (2021) ont examiné la dégradation thermique des fibres de palmier et de coco en utilisant l'analyse thermogravimétrique (TGA). Ils ont constaté qu'une exposition prolongée à des conditions de vide éliminait efficacement l'humidité et modifiait les propriétés thermiques des fibres, entraînant une dégradation structurelle importante. Ils ont aussi noté que le comportement thermique était influencé par la présence d'hémicellulose et de lignine [77].

Kabir et al. (2021) ont examiné les effets des traitements chimiques (alcali et acétyle) sur les fibres de chanvre. L'étude a révélé que ces traitements éliminaient efficacement l'hémicellulose et la lignine, améliorant ainsi la liaison interfaciale dans les composites à matrice polyester. Les propriétés thermiques ont été évaluées à l'aide de la calorimétrie à balayage différentiel (DSC), montrant que les niveaux de traitement appropriés amélioraient la stabilité thermique des composites [78].

2.3.2.3 Dépendance à la récolte

Les recherches sur l'influence du temps de récolte sur les propriétés des fibres naturelles montrent des résultats significatifs, les résultats d'une étude de Grégoire (2021) a montré que les performances mécaniques des fibres de chanvre (notamment la résistance à la traction) varient en fonction du moment de la récolte [79]. Pickering et al. (2007) ont observé une augmentation de la résistance à la traction des fibres de chanvre entre 99 et 114 jours de croissance, atteignant une résistance optimale à 114 jours [80].

Des études antérieures, comme celle de Das et al. (1983), ont établi que le jute atteint sa performance maximale après 120 jours ; au-delà de cette période, une diminution significative de la résistance à la traction a été notée [81].

2.3.3 Modification de la surface des fibres naturelles

Les fibres de cellulose sont incompatibles avec les polymères hydrophobes. Or, la qualité de l'interface fibre-matrice est importante pour l'utilisation des fibres naturelles comme fibres de renfort pour les polymères. Il est donc très souvent nécessaire de modifier la surface des fibres pour optimiser cette interface.

La recherche s'est concentrée dernièrement sur l'amélioration de la compatibilité des fibres naturelles avec les matrices polymères grâce à diverses techniques de modification de la surface. Les méthodes de modification sont différemment efficaces en ce qui concerne l'adhésion entre la matrice et les fibres. Les plus fréquemment décrites dans la littérature sont le traitement à la soude en premier lieu souvent suivi par une silanisation ou une acétylation ou encore l'addition d'un compatibilisant.

Wu et al. (2018) ont démontré que le traitement des fibres de Kenaf avec une solution alcaline à 5 % en poids suivie d'une modification à l'hydroxyde de magnésium (MH) augmentait considérablement la résistance à la traction et la compatibilité interfaciale avec la résine de polyester. Le traitement a également réduit l'absorption d'eau [82].

Sullins et al. (2017) ont mis en évidence le MAPP comme un compatibilisant efficace pour les composites chanvre-PP. Leur étude a montré que le traitement au MAPP a conduit à de meilleures propriétés mécaniques que les fibres uniquement traitées aux alcalins, soulignant l'importance de la modification de la matrice pour une meilleure adhésion interfaciale [83].

Lu et al. (2012) ont étudié les effets des traitements alcalins et silaniques sur les fibres de chanvre, concluant que les deux méthodes éliminaient efficacement les composants non cellulodiques, améliorant ainsi les propriétés mécaniques et la stabilité thermique. Les fibres traitées à l'alcali ont présenté une stabilité thermique supérieure à celles traitées au silane [84].

Oh et al. (2012) ont modifié des fibres de chanvre en utilisant des solutions alcalines et des huiles végétales (soja et maïs), et ont constaté que les températures de traitement optimales amélioraient les performances des fibres. Cependant, ils ont averti que des températures supérieures à 100°C pourraient conduire à la dégradation de la cellulose, ce qui aurait un impact négatif sur la résistance à la traction [85]. Islam et al. (2011) ont également étudié les effets du traitement alcalin, notant des améliorations de la propreté des fibres et de la stabilité thermique, mais une réduction de la résistance à la traction due à la dégradation de la chaîne de cellulose à des températures plus élevées [86].

2.3.4 Types de fibres naturelles d'origine végétale

Afin d'améliorer leurs performances et d'élargir leurs applications, de nombreux chercheurs ont expérimenté des fibres naturelles d'origine végétale telles que l'Abaca, l'Areca, la Bagasse, le Bambou, le Bananier, le Coir, le Coton, le Lin, le Chanvre, le Henequen, le Jute, le Kapok, le Kenaf, le Palmier à huile et le Palmier dattier, l'Ananas, la Ramie, la Coque de riz, le Sisal, le Soja, le Bois, etc. [60,87–90].

Les fibres sont extraites de différentes parties des plantes, telles que la tige, la feuille, le liber, la fleur et les fruits. Parmi les différentes parties de la plante, ce sont principalement les feuilles qui sont rejetées comme déchets dans la plupart des cas. En effet, les fibres extraites des feuilles ont une résistance équivalente à celle des fibres extraites des autres parties de la plante [87].

2.3.4.1 Fibre d'Abaca

La fibre d'abaca, également connue sous le nom de chanvre de Manille, est dérivée de la plante "Musa textilis", une espèce de bananier originaire des Philippines. Cette fibre est très appréciée pour sa solidité, sa flexibilité et sa résistance aux eaux salées, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications marines telles que les cordes et les lignes de pêche. La fibre peut atteindre jusqu'à 3 mètres de long et est naturellement flottante [91].



Figure 2.2 : Séchage des fibres d'Abaca [92]

Une étude approfondie de Sinha et al. (2021) a mis en évidence les propriétés mécaniques, structurales et thermiques des composites polymères renforcés par des fibres d'abaca. Elle souligne l'importance des traitements des fibres, tels que les traitements alcalins et au chlorure de benzène, qui améliorent considérablement la liaison interfaciale et les performances mécaniques globales [93].

Seculi et al. (2023) ont évalué la résistance de l'interface entre les fibres d'abaca et le polyéthylène biosourcé, concluant que la liaison interfaciale joue un rôle crucial dans les propriétés de traction des composites. Une meilleure adhésion a été notée avec des modifications de surface, ce qui peut conduire à de meilleures performances dans les applications [94].

Araya-Gutiérrez et al. (2023) ont indiqué que les composites à base de fibres d'abaca sont plus performants que d'autres composites à base de fibres naturelles, comme le jute et le lin, en

termes de résistance à la flexion et de propriétés d'amortissement. La charge optimale de fibres s'est avérée être d'environ 40 % pour obtenir des performances mécaniques maximales [95].

2.3.4.2 Fibre d'Areca

La fibre d'Arec provient du palmier d'Arec (*Areca catechu*), une espèce de palmier appartenant à la famille des Arecaceae/Palmae. Le palmier d'Arec pousse verticalement jusqu'à une hauteur de 10 à 20m, avec une tige droite, solitaire et mince de 10 à 15cm de diamètre. Les fibres d'areca sont principalement extraites de l'enveloppe du fruit, mais aussi des tiges et des frondes [96].



Figure 2.3 : Fibres d'Areca [97]

La fibre d'arec possède une résistance à la traction modérée et peut être utilisée comme renfort potentiel dans les composites [98]. Elle présente de bonnes propriétés mécaniques telles que la résistance aux chocs et la dureté lorsqu'il est utilisé pour renforcer les composites à base de résine époxy [99].

Banagar et al. (2021) ont examiné en détail les effets de différents paramètres, tels que l'âge du palmier d'Arec et le traitement chimique sur les feuilles d'Arec. L'étude a révélé que la résistance à la traction s'améliorait avec l'âge de l'arbre, et que le traitement alcalin améliore les propriétés de surface des fibres en éliminant les résidus et en améliorant l'adhérence, ce qui a contribué à améliorer les performances mécaniques [100].

Une autre étude de Praveena et al. (2022) a révélé que les propriétés mécaniques des composites époxy renforcés par des fibres de noix d'Arec s'améliorent avec l'augmentation de la teneur en fibres, les composites à 50% de fibres présentant le module d'élasticité, la résistance à la traction, à la flexion, et aux chocs les plus élevés. D'après l'étude, ces composites répondent aux critères des applications automobiles, avec une résistance à la traction de 44.6MPa, un module d'Young de 1900MPa et une résistance aux chocs de 34.1kJ/m². Elle a montré aussi (par des

images MEB) que la présence de vides entraîne une réduction des propriétés mécaniques, c'est pourquoi le processus de fabrication doit être contrôlé afin de minimiser les vides, et par conséquent, obtenir des performances optimales [101].

2.3.4.3 *Fibre de Bagasse*

La fibre de bagasse, provenant du résidu de canne à sucre après extraction du jus, est une ressource précieuse riche en fibres. Elle est utilisée dans l'industrie du papier, des matériaux composites et de l'emballage, ainsi que dans la fabrication de produits écologiques et biodégradables. Son extraction implique des traitements mécaniques et chimiques pour optimiser ses propriétés.

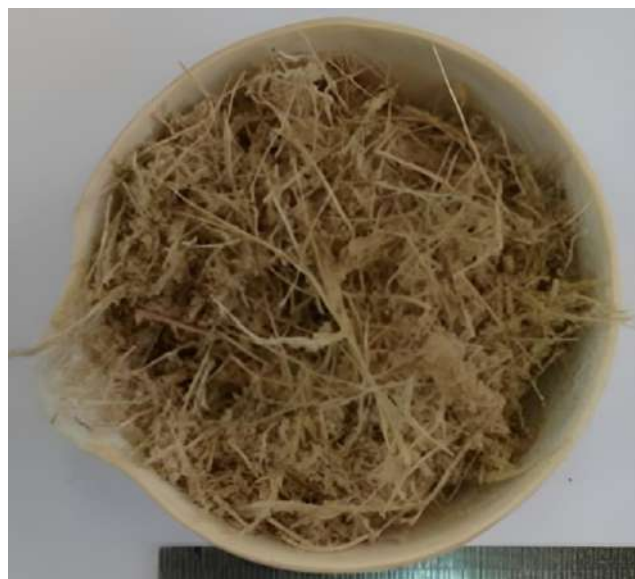


Figure 2.4 : *Fibres de Bagasse* [102]

Ndengue et al. (2021) ont effectué des essais de flexion à trois points sur des échantillons composites de bagasse de canne à sucre en utilisant une technique de moulage par compression à froid pour en déduire le module d'Young. Les tests révèlent le comportement fragile des échantillons. Le module d'Young diminue lorsque le taux de charge des résidus fibreux augmente, quelle que soit la taille des fibres [103].

Chen et al. (2022) ont étudié l'influence de la modification des fibres légères et des charges en fibres (5 – 15% en poids) sur les propriétés thermiques, mécaniques et physiques des biocomposites à base de polyéthylène haute densité post-consommation (pHDPE) et de bagasse de canne à sucre (SB). Ils ont constaté que la rigidité du bio-composite augmentait linéairement avec la charge en fibres. Les résultats expérimentaux montrent que le module d'Young a atteint 515.5MPa alors que celui du pHDPE n'est que de 302.2MPa [104].

2.3.4.4 Fibre de Bambou

La fibre de bambou devient de plus en plus populaire dans les matériaux biocomposites en raison de ses propriétés mécaniques impressionnantes et de ses avantages environnementaux. Avec une résistance à la traction atteignant 600MPa , la fibre de bambou rivalise avec les fibres de verre traditionnelles, ce qui améliore considérablement les performances des biocomposites [105]. Ces composites renforcés de fibres de bambou présentent également une résistance à la flexion remarquable, avec des valeurs avoisinant les 101.4MPa [106]. Leur durabilité et leur bonne résistance aux chocs en font des matériaux bien adaptés aux applications dans les secteurs de l'automobile et de la construction.



Figure 2.5 : *Fibres de Bambou* [107]

La légèreté des biocomposites à base de fibres de bambou les rend idéaux pour diverses pièces automobiles, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique. En outre, les fibres de bambou sont utilisées dans les textiles pour leurs propriétés antibactériennes et d'évacuation de l'humidité, ce qui les rend parfaites pour les vêtements et les textiles d'intérieur. En outre, les composites à base de fibres de bambou sont avantageux pour des articles tels que les meubles, les équipements sportifs et les matériaux d'emballage, offrant une alternative durable aux options synthétiques.

Une étude de Gao et al. (2022) s'est penchée sur les propriétés mécaniques des composites en polypropylène renforcés par des fibres de bambou. Les chercheurs se sont concentrés sur l'optimisation de la charge en fibres et des processus de traitement afin d'améliorer la liaison interfaciale. Ils ont constaté que le traitement alcalin améliorait la résistance à la traction et le module de flexion jusqu'à 30%, soulignant le potentiel des fibres de bambou en tant qu'alternative durable dans les applications automobiles nécessitant des matériaux légers et très résistants [105].

Zhang et al. (2023) ont étudié des composites hybrides combinant des fibres de bambou avec de la jute et du chanvre. Cette recherche visait à créer un composite léger avec des propriétés mécaniques améliorées pour des applications structurales. L'étude a révélé que les composites hybrides présentaient des résistances à la traction et à la flexion supérieures à celles des composites

à fibre unique. La combinaison optimale bambou-jute a permis d'obtenir une résistance à la traction de 75MPa , adaptée à la construction et à la fabrication de meubles, soulignant les avantages de l'hybridation des fibres naturelles.

Une étude d'analyse du cycle de vie réalisée par Kumar et al. (2023) a évalué l'impact environnemental des composites à base de fibres de bambou par rapport aux composites à base de fibres de verre. Les chercheurs ont évalué des facteurs tels que l'empreinte carbone, la consommation d'énergie et la biodégradabilité. Les résultats indiquent que les composites en fibres de bambou ont un impact environnemental inférieur de 50% lors de la production et de l'élimination, soulignant l'importance de l'adoption des fibres de bambou dans les biocomposites comme solution durable favorisant une fabrication respectueuse de l'environnement.

Ces travaux démontrent les progrès de la recherche sur les fibres de bambou, en se concentrant sur les performances mécaniques, l'hybridation des fibres naturelles et la durabilité environnementale, renforçant ainsi le potentiel des fibres de bambou dans les applications biocomposites.

2.3.4.5 Fibre de Banane

La fibre de banane est une matière naturelle dérivée des feuilles de bananiers, souvent considérées comme des déchets agricoles. Cette fibre se distingue par ses atouts écologiques, tels que sa biodégradabilité, sa résistance et sa longévité. Son extraction se fait généralement par des méthodes mécaniques associées à des traitements chimiques, notamment avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH), afin d'améliorer ses caractéristiques en éliminant les impuretés et en renforçant son adhésion à divers matériaux.

Les propriétés notables de la fibre de banane incluent une grande résistance à la traction, une bonne élasticité, une résistance aux chocs, ainsi que des propriétés antiseptiques et antibactériennes. Récemment, la recherche s'est focalisée sur les propriétés mécaniques de cette fibre et ses applications dans les composites. Par exemple, Fan et al. (2023) ont examiné l'extraction et la modification de la fibre pour divers usages, comme les textiles et les biocomposites, soulignant l'efficacité du traitement alcalin pour en améliorer la qualité et son potentiel en remplacement des matériaux synthétiques dans des applications durables [108].



Figure 2.6 : Fibres de Banane [109]

Nguyen et al. (2022) se sont concentrés sur l'intégration de fibres de banane dans des composites à base de PLA, en optimisant le traitement au NaOH pour renforcer l'adhésion et les propriétés mécaniques. Leur étude a montré que des composites contenant 20% de fibres de banane offraient des gains significatifs en résistance à la traction (52.57MPa) et en résistance à la flexion (70.35MPa), prouvant l'efficacité de la fibre comme matériau de renforcement [110]. Une autre étude par Nguyen et al. (2021) a également démontré que l'incorporation de 20% de fibres de banane améliore la résistance à la traction et à l'impact tout en conservant une bonne stabilité thermique, rendant ces composites appropriés pour diverses applications en ingénierie [111].

Motaleb et al. (2021) ont exploré l'influence des prétraitements et des post-traitements sur les fibres de banane utilisées dans les composites polymères non tissés. Leur recherche a révélé que les fibres traitées peuvent significativement améliorer les propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux, élargissant ainsi leur champ d'application dans les textiles et l'emballage [112]. Ces études, parmi d'autres, soulignent l'intérêt croissant pour la fibre de banane comme alternative durable dans les matériaux composites.

2.3.4.6 Fibre de Coir

La fibre de coco, ou coir, est extraite de l'enveloppe extérieure des noix de coco. Elle est largement utilisée dans la fabrication de composites en raison de ses propriétés : résistance à la traction, biodégradabilité et faible conductivité thermique.

Plusieurs études ont exploré l'utilisation de la fibre de coco dans le développement de composites, Hasan et al. (2021) ont examiné les propriétés mécaniques des panneaux composites multicouches fabriqués à partir de fibres longues et courtes de Coco traitées avec une solution d'hydroxyde de sodium. Les résultats ont montré que l'ajout de fibres de coco améliore

considérablement les résistances à la traction et à la flexion des composites, ce qui les rend adaptés à des applications structurelles [113].



Figure 2.7 : Fibres de Coco [113]

Onukwuli et al. (2022) ont mis en évidence le potentiel des composites à base de fibre de coco dans l'industrie automobile. Ils ont démontré que ces composites peuvent remplacer efficacement les matériaux synthétiques dans diverses applications, notamment comme matériaux d'isolation et composants intérieurs [114].

2.3.4.7 Le Coton

Le coton est une fibre naturelle dérivée des graines du cotonnier (espèce *Gossypium*). Il est largement reconnu pour sa douceur, sa respirabilité et sa capacité d'absorption, ce qui en fait un produit de base de l'industrie textile. Cependant, des recherches récentes ont mis en évidence le potentiel des fibres de coton dans le développement de biocomposites.

Silva et al. (2024) ont développé un biocomposite combinant des fibres de coton avec de l'acide poly-lactique (PLA) et de l'amidon thermoplastique. Les interactions entre les fibres de coton et la matrice ont été caractérisées à l'aide de diverses techniques analytiques. L'étude a démontré que ces composites présentaient des propriétés mécaniques et des caractéristiques d'absorption d'eau améliorées, ce qui les rend viables pour les applications d'emballage à courte durée de conservation [115].

Une étude de Reza et al. (2023) a exploré l'utilisation des déchets de filtres de coton comme matériau de renforcement dans les biocomposites à base d'amidon de maïs. La recherche a indiqué que l'incorporation de jusqu'à 50% de déchets de coton améliorerait considérablement la résistance à la traction et la ténacité, faisant de ces composites des alternatives appropriées pour les applications d'emballage et d'isolation [116].

Kamble et al (2021) ont travaillé sur des composites verts renforcés par des fibres de coton usagées. L'augmentation des performances d'une matrice époxy avec renfort indique que les fibres de coton usagées sont une alternative écologique et économique aux composites renforcés par des fibres synthétiques [117].

2.3.4.8 Fibre de Lin (Flax)

Le lin (*Linum usitatissimum* L.) est une plante cultivée principalement pour ses fibres, qui sont utilisées dans divers domaines, notamment le textile, mais également dans d'autres applications tels que les composites. Le lin se distingue par plusieurs caractéristiques avantageuses, en effet ; les composites en lin sont marqués par une légèreté, une résistance mécanique élevée comparable à celle des fibres synthétiques, ils absorbent efficacement les vibrations et les chocs et sont bien sûr renouvelable, recyclable, et biodégradable [118].



Figure 2.8 : Tiges de lin en train de rouir à terre [119]

Une étude récente de Dal Pont et al. (2023) a exploré les propriétés mécaniques des composites de lin renforcés par des résines époxy. Les résultats ont montré que ces nouveaux composites présentent une rigidité comparable à celle des composites traditionnels en époxy-verre, tout en étant plus légers [120].

Mak et Fam (2019) ont examiné l'impact des cycles de gel-dégel sur les propriétés de traction des composites renforcés de fibres de lin. Ils ont soumis des échantillons de composites à des tests de gel-dégel pour simuler les conditions environnementales extrêmes. Les résultats ont montré une dégradation significative des propriétés mécaniques après plusieurs cycles, en particulier une diminution de la résistance à la traction et du module d'élasticité [121].

2.3.4.9 Fibre d'Henequen

L'henequen, ou *Agave fourcroydes*, est une plante originaire du sud du Mexique et du Guatemala, elle est particulièrement connue pour ses longues feuilles en forme d'épée, qui peuvent atteindre jusqu'à 1,8 mètre de longueur. Les fibres extraites de ses feuilles sont généralement utilisées pour fabriquer des cordes bien que leur qualité soit inférieure à celle du sisal [122].



Figure 2.9 : Séchage d'Henequen au Mexique [123]

Espinach et al. (2022) ont évalué les performances des fibres d'henequen en tant que matériau de renforcement dans les composites en polypropylène, en mettant en évidence les effets d'un agent de couplage sur la résistance à la traction et la qualité de l'interface. Les résultats suggèrent que les fibres d'henequen peuvent remplacer efficacement les fibres de verre dans les matériaux composites [124].

Une étude sur un composite tissé de fibres d'henequen et de bio-époxy par Torres et al. (2022) a suivi le comportement de durcissement. Le composite instrumenté a ensuite été testé mécaniquement en flexion. Des micro-déformations ont été détectées comme conséquence des contraintes résiduelles de durcissement [125].

2.3.4.10 Fibres de Jute

Les fibres de jute sont obtenues à partir des espèces de *Corchorus*, principalement *Corchorus olitorius* et *Corchorus capsularis*. Elles sont connues pour leur texture longue, grossière et brillante. Souvent appelé « fibre d'or », le jute est l'une des fibres naturelles les plus abordables, largement

utilisée dans diverses applications telles que l'emballage, les textiles et les matériaux composites en raison de ses propriétés écologiques et de sa grande résistance à la traction.



Figure 2.10 : *Fibres de Jute* [126]

La recherche scientifique récente s'est concentrée sur l'amélioration des propriétés des fibres de jute en vue de leur utilisation dans les matériaux composites. Flores et al. (2024) ont étudié l'effet des traitements chimiques (hydroxyde de sodium, peroxyde d'hydrogène) sur les composites tissus de jute brésilien/résine de polyester. Les résultats ont montré une amélioration de la résistance à la flexion et de la résistance à la poutre courte sans changements significatifs dans les propriétés de traction, soulignant le potentiel d'amélioration des performances dans les applications structurelles [127].

Haq et al. (2024) ont étudié les effets de diverses méthodes de traitement sur les fibres de jute, y compris les traitements alcalins et silaniques, afin d'améliorer leur liaison interfaciale avec les matrices polymères. Les résultats démontrent que les fibres de jute traitées améliorent significativement la résistance à la traction, la résistance à la flexion et la stabilité thermique des composites par rapport aux fibres non traitées [128].

Arya et al. (2023) ont examiné le comportement mécanique de stratifiés composites de jute traités au plasma. Ils ont constaté que le traitement améliorait le rapport rigidité/poids, faisant du jute une option viable pour les composants automobiles [129].

Majumder et al. (2022) ont étudié les propriétés mécaniques, la durabilité et les avantages environnementaux de l'incorporation de fibres de jute dans les mélanges de béton. La recherche révèle que l'ajout de fibres de jute améliore la résistance à la traction et la ductilité du béton, tout en réduisant son poids total [126].

Shahinur et al. (2022) ont exploré les applications innovantes des fibres de jute dans les technologies d'impression 3D. Ils ont montré comment le jute peut être utilisé pour créer des

produits durables tout en maintenant l'intégrité structurelle grâce à des techniques de traitement efficaces [130].

2.3.4.11 Fibre de Kapok

Les fibres de kapok sont des fibres naturelles obtenues à partir des gousses du kapokier (*Ceiba pentandra*). Elles se caractérisent par leur légèreté, leur texture duveteuse et leurs propriétés hydrophobes, ce qui les rend adaptées à diverses applications, notamment l'isolation et le remplissage de produits tels que les matelas et les oreillers. Les fibres de kapok ont une structure creuse unique, qui contribue à leur flottabilité et à leur capacité d'isolation thermique.



Figure 2.11 : Fibres de kapok [131]

Baraniak et al. (2023) ont étudié l'utilisation des fibres de kapok comme matériau de renforcement durable dans les applications composites. Ils ont souligné les propriétés mécaniques, la stabilité thermique et les avantages environnementaux des fibres de kapok par rapport aux alternatives synthétiques. L'étude souligne le potentiel des fibres de kapok pour améliorer les performances des polymères biodégradables et la résistance aux chocs dans diverses applications. Dans l'ensemble, elle préconise l'intégration des fibres de kapok dans les matériaux composites afin de promouvoir des pratiques respectueuses de l'environnement dans le domaine de la science des matériaux [132].

Zerga et Tahir (2022) ont exploré les diverses applications des fibres de kapok, en mettant l'accent sur leurs propriétés uniques telles que la flottabilité et la porosité. Ils ont souligné leur potentiel dans le domaine des énergies renouvelables en tant que co-catalyseurs pour la production d'hydrogène et la réduction du CO₂, ainsi que leur efficacité dans l'assainissement de l'environnement grâce à l'absorption des contaminants [131].

Sangalang (2021) donne un aperçu complet des fibres de kapok. Il met l'accent sur les caractéristiques de légèreté, de flottabilité et d'isolation des fibres de kapok, ce qui les rend aptes à diverses utilisations, y compris les textiles et les matériaux composites. L'étude aborde également

les avantages environnementaux des fibres de kapok, en soulignant leur biodégradabilité et leur durabilité par rapport aux fibres synthétiques [133].

2.3.4.12 Fibres de chanvre (Hemp)

Les fibres de chanvre sont des fibres naturelles obtenues à partir des tiges du chanvre (*Cannabis sativa*). Elles se caractérisent par leur grande résistance à la traction, leur durabilité et leur biodégradabilité, ce qui les rend adaptées à un large éventail d'applications, notamment les textiles, les biocomposites et les matériaux de construction.



Figure 2.12 : *Fibres de chanvre [134]*

Xanthopoulou et al. (2023) ont évalué les propriétés mécaniques de composites de polyéthylène haute densité (PEHD) recyclé renforcés par des fibres de chanvre. Les résultats indiquent que l'incorporation de fibres de chanvre peut augmenter le module d'élasticité de près de trois fois [135].

Stelea et al. (2022) se sont concentrés sur les propriétés thermiques et mécaniques des composites en polypropylène renforcés par des fibres de chanvre. La recherche a montré que les fibres de chanvre améliorent significativement la cristallinité et la stabilité thermique des composites. Les performances mécaniques optimales ont été observées avec une teneur en fibres de chanvre de 30 à 50 % [136].

Kausar et Ahmad (2023) et Deshmukh (2022) explorent la structure et les propriétés des fibres de chanvre, en mettant l'accent sur l'impact des traitements de surface sur leurs performances mécaniques pour des applications composites dans les industries de l'automobile et de la construction. Ces études soulignent non seulement l'amélioration des propriétés thermiques et mécaniques, mais aussi les avantages écologiques des fibres de chanvre, tels que le faible impact environnemental et la teneur élevée en cellulose [137,138].

2.3.4.13 Fibre de palmier

Les fibres de palmier sont des fibres naturelles dérivées des feuilles et des troncs de palmiers, en particulier d'espèces comme le palmier dattier. Ces fibres sont connues pour leur légèreté et leur biodégradabilité, ce qui les rend adaptées à diverses applications, notamment les matériaux de construction, les textiles et les composites.

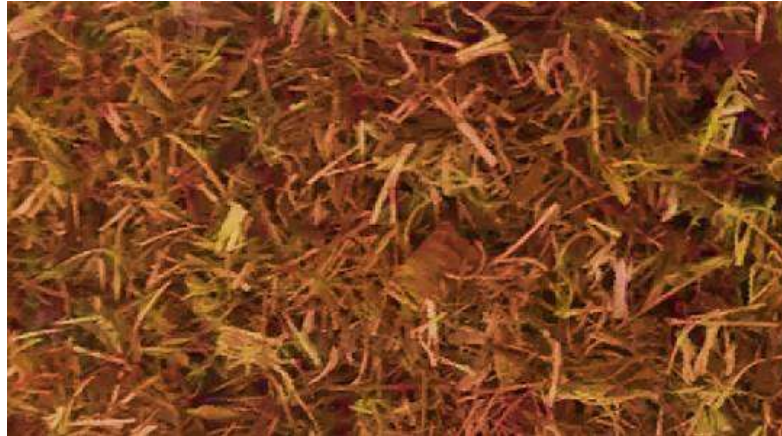


Figure 2.13 : Fibres de palmier dattier [139]

Bendahane et al. (2023) se sont concentrés sur l'utilisation des fibres de palmier dattier et de palmier à huile pour améliorer l'endommagement de l'interface dans les composites de ciment. La recherche met en évidence le potentiel de ces fibres naturelles pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux à base de ciment [140].

Boubaaya et al. (2023) ont examiné comment différents pourcentages de fibres de palmier dattier affectent l'isolation thermique et les performances mécaniques des mortiers. L'étude conclut que si l'incorporation de fibres améliore les propriétés d'isolation, elle peut réduire la résistance à la compression [139].

Bahrain et al. (2022) ont étudié l'effet d'intégration des fibres de palmier à sucre dans du silicone, ils se sont concentrés sur leurs propriétés morphologiques, physiques et mécaniques. La recherche démontre que l'incorporation de ces fibres améliore considérablement la rigidité du biocomposite, les performances mécaniques optimales étant atteintes à une teneur en fibres de 16 % en poids. En outre, les biocomposites présentent une densité accrue, un comportement élastique amélioré ainsi qu'une absorption favorable de l'humidité [141].

Guettatfi et al. (2022) ont étudié comment l'inclusion de fibres de palmier dattier affecte la résistance à la compression des adobes lorsqu'ils sont combinés avec de la chaux vive et du ciment. Les résultats indiquent que si les fibres peuvent améliorer certaines propriétés, elles peuvent avoir un impact négatif sur la durabilité dans des conditions spécifiques [142].

Benaniba et al. (2020) ont étudié un matériau bio-composite fabriqué à partir de fibres de palmier dattier, de ciment et de sable. L'étude évalue comment la variation de la teneur en fibres (jusqu'à 30 %) influence les propriétés d'isolation thermique et les performances mécaniques. Les résultats révèlent que l'augmentation de la teneur en fibres réduit la conductivité thermique mais diminue également la résistance à la flexion et à la compression [143].

Gallala et al. (2020) ont développé un biocomposite utilisant des déchets de fibres de palmier dattier combinés à du plâtre. Ils soulignent les propriétés mécaniques et thermiques améliorées par l'ajout de fibres, suggérant sa viabilité en tant que matériau d'isolation thermique dans la construction [144].

2.3.4.14 Fibre de Ramie

Les fibres de ramie sont dérivées de la plante *Boehmeria nivea*, obtenues à partir de l'écorce interne des tiges de la plante. Elles se caractérisent par un aspect blanc lustré et d'excellentes propriétés d'absorption de l'humidité. Historiquement, la ramie est utilisée depuis des milliers d'années et est appréciée pour sa résistance à la moisissure et aux bactéries.

Prabangkara et Susilo (2023) se sont concentrés sur le développement de composites renforcés par des fibres de ramie comme substitut aux matériaux synthétiques. Leur recherche souligne qu'un composite avec une fraction volumique de 5 % et une orientation des fibres de 30° a atteint la plus grande résistance à la flexion de 471,1 MPa et une résistance à l'impact de 26,56 MPa, ce qui indique le potentiel de la ramie dans des applications durables comme les prothèses médicales [145].

Prasad et al. (2023) ont étudié les propriétés mécaniques des composites hybrides fibres de ramie / fibres de verre. L'étude a révélé que la variation des séquences d'empilement influençait de manière significative la résistance à la traction, le composite le plus performant atteignant une résistance à la traction de 114 MPa [146].

Wulandari et al. (2023) ont étudié les effets de l'acide citrique sur les fibres de ramie afin d'améliorer leur résistance à la traction. Les résultats ont montré que la résistance à la traction augmentait considérablement, atteignant jusqu'à 1290.63 MPa [147].

Wang et al. (2023) ont examiné comment l'absorption d'humidité affecte les propriétés mécaniques des composites polymères renforcés de fibres de ramie à différents niveaux d'humidité. L'étude a conclu que l'augmentation de l'humidité entraîne une dégradation

significative des propriétés mécaniques, soulignant l'importance de la gestion de l'humidité dans les applications composites [148].

Sun et al (2022) se sont concentrés sur le développement de composites renforcés par des fibres de ramie et ont examiné leurs propriétés mécaniques, leur stabilité thermique et leurs applications potentielles. Les résultats révèlent que le renforcement par des fibres de ramie améliore considérablement la résistance à la traction et à la flexion des composites, surpassant les fibres synthétiques traditionnelles. En outre, les composites présentent une stabilité thermique remarquable, ce qui indique qu'ils conviennent aux applications à haute température [149].

2.3.4.15 Sisal

Les fibres de sisal sont des fibres naturelles dérivées des feuilles de la plante *Agave sisalana*, principalement cultivée dans les régions tropicales et subtropicales. Connues pour leur résistance et leur durabilité, les fibres de sisal sont couramment utilisées dans diverses applications, notamment les cordes et comme renfort dans les matériaux composites en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur biodégradabilité.



Figure 2.14 : *Fibres de sisal [150]*

Une étude de Silva et al. (2024) a évalué comment les fibres de sisal affectent les propriétés physiques des mortiers. Bien que la résistance à la compression ait diminué, les caractéristiques d'absorption d'énergie se sont améliorées, ce qui suggère des applications bénéfiques dans la construction rurale [151].

Bintoro et al. (2023) ont étudié les caractéristiques mécaniques de biocomposite fabriqués à partir de fibres de sisal, de ramie et de carbone. Les résultats indiquent que le composite peut atteindre des résistances supérieures à 300 MPa, soulignant le rôle du sisal dans l'amélioration de la ductilité parallèlement à la résistance de la fibre de carbone [152].

Raslan et al. (2023) se sont intéressés aux composites fabriqués à partir de déchets de polyéthylène et de bagasse renforcés par des fibres de sisal. L'étude a examiné comment l'irradiation gamma affecte les propriétés mécaniques, révélant que les fibres de sisal contribuent positivement aux performances des composites [153].

Pathan et al. (2023) ont évalué la durabilité des mélanges de béton incorporant des fibres de sisal. Les résultats indiquent que le béton renforcé par des fibres de sisal est plus performant que les mélanges conventionnels en termes de résistance et de durabilité [154].

Une étude de Santos et al. (2017) a examiné l'impact des différentes températures de séchage sur les propriétés mécaniques des fibres de sisal, constatant des effets minimes sur la résistance à la traction, mais des implications importantes pour le traitement [155].

2.3.4.16 Diss

Ampelodesmos mauritanicus, également connu sous le nom de Diss (Figure 2.15), est une plante monocotylédone que l'on trouve au nord du territoire algérien et qui ne nécessite qu'une très petite quantité d'eau pour pousser. Il s'agit d'une matière première intéressante qui peut pousser sur des terres peu fertiles ou marginales, nécessitant une gestion modeste des parasites et des maladies [156]. Il s'agit d'une plante herbacée robuste et pérenne, aux feuilles rugueuses, qui peut atteindre 2 à 3 m de hauteur [157]. Elle pousse à l'état sauvage autour de la Méditerranée, en Afrique du Nord et dans les zones sèches de Grèce et d'Espagne [158].



Figure 2.15 : Plante *Ampelodesmos mauritanicus* (Diss)
dans le nord-est de l'Algérie.

Le nom générique *Ampelodesmos* est formé à partir de deux racines grecques : *ampelos*, « vigne », et *desmos*, « lien », en référence à son utilisation ancienne comme une sorte de ficelle pour attacher la vigne. Il était également utilisé comme matériau de construction en raison de ses qualités mécaniques et hydriques [158].

Chenah et Amrani (2018) ont utilisé la microscopie électronique à balayage (MEB), l'infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), la diffraction des rayons X (DRX), l'analyse thermogravimétrique (TGA) ainsi que la fluorescence des rayons X (FRX) pour caractériser la composition chimique et la morphologie du Diss. Leur étude a montré une teneur élevée en cellulose avec 46%, 25% de lignine et 26% d'hémicelluloses. La teneur en minéraux est estimée à 8,6 % avec différentes concentrations de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O et K_2O [159].

De sa part, Maghchiche (2017) a caractérisé les fibres de Diss en se basant sur la mesure de la structure morphologique, l'analyse chimique, la spectroscopie infrarouge, la diffractométrie des rayons X et l'analyse thermique. Le Tableau 2.1 résume le résultat de l'étude et montre que la plante Diss a une composition minérale très variable avec une très forte présence de silice [157].

Tableau 2.1 : Composants minéraux du Diss [157].

Eléments	SiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3
%	72.25	4.50	1.45	3.60	0.70	2.31

Le Diss a attiré l'attention dans le domaine des matériaux composites en raison de son potentiel en tant qu'agent de renforcement, les suivants sont quelques travaux qui explorent ses propriétés et ses applications.

Remila et al. (2024) ont étudié l'impact des modifications chimiques sur la surface des fibres de Diss utilisées comme renforcement dans les biocomposites à base de poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate) (PHBV). En utilisant trois traitements chimiques distincts (alcalin, alcalin/péroxyde et alcalin/silane) l'étude a évalué les changements dans la morphologie, les propriétés mécaniques et le comportement thermomécanique à un rapport de poids de 80/20 entre le PHBV et les fibres de Diss. Les résultats du MEB ont indiqué une amélioration de l'adhésion fibre-matrice après la modification, avec des augmentations significatives des propriétés de traction, en particulier du module de Young, observées dans les échantillons traités à l'alcali-silane [160].

Abdelouahed et al. (2023) ont étudié l'utilisation des fibres de Diss comme alternative durable dans l'écoconstruction, remplaçant partiellement le sable conventionnel dans le mortier. Les résultats ont indiqué que les mortiers contenant des fibres de Diss étaient plus légers et plus maniables, améliorant la résistance à la flexion mais ont un impact négatif sur la résistance mécanique et l'absorption d'eau en raison de la porosité accrue des composites [161].

Nouri et al. (2023) ont étudié le renforcement du polypropylène (PP) avec des fibres provenant de la plante Diss, en utilisant des fibres non traitées et traitées (acide acétique, silane,

NaOH, thermique). La phase initiale a évalué une teneur en fibres de 10 %, révélant que les différents traitements amélioreraient les propriétés mécaniques des composites. Notamment, les fibres traitées au NaOH (NPP-10%) ont permis d'obtenir une augmentation remarquable de 30% du module de traction, de 22% du module de flexion et de 9% de la contrainte de flexion. Une phase d'optimisation a indiqué que l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à 20% améliorerait encore le module de traction, tandis que l'analyse microstructurale a révélé une structure multicouche bénéfique contribuant à l'amélioration de l'adhérence mécanique [162].

Moussaoui et al. (2023) ont examiné le potentiel des fibres de Diss en tant que matériau de renforcement dans les composites polymères, en tenant compte de leur nature hydrophile par le biais de divers traitements. Les fibres ont été extraites à l'aide d'une méthode chimique impliquant 2% de NaOH pendant 48h, puis modifiées par acétylation, mercerisation et traitement aux micro-ondes. Les techniques de caractérisation ont confirmé un indice de cristallinité de 52.4% pour les fibres. En particulier, le traitement par micro-ondes à 550W a considérablement augmenté leur densité de 1.00 à 1.55g/cm³, et a augmenté le module de Young et la résistance à la traction de 11.0 à 18.6GPa et de 155 à 290 MPa, respectivement [163].

Karek et al (2022) ont évalué le comportement mécanique lors de l'essai d'impact d'un biocomposite formé d'une matrice d'amidon et de glycérol à 40% renforcée par des fibres de Diss. Il a été constaté que le biocomposite avec 5% de renforcement en fibres Diss (SG40/RF5) avait de meilleurs résultats que les autres combinaisons ; l'énergie d'impact absorbée était d'environ 31.25KJ/m², ce qui est 2.1 fois plus élevé que la matrice SG40 seule et 1.3 fois plus élevé que le renforcement par 10% de fibres [164].

Touam et Derfouf (2021) ont examiné l'amélioration des propriétés mécaniques d'un biocomposite en fibres de Diss intégrés dans une matrice de résine polyester. Des tests de traction et de dureté ont été réalisés pour différentes fractions volumiques (de 5% à 20%) de fibres courtes de Diss. L'augmentation de la teneur en fibres et leur traitement ont amélioré les caractéristiques mécaniques du composite [165].

Dans leur étude, Touati et al. (2021) ont étudié la valorisation des fibres Diss dans les biocomposites à base de polyéthylène basse densité recyclé (rLDPE) et de polypropylène (PP). Différents traitements des fibres Diss ont été évalués (non traitées, traitées thermiquement et traitées chimiquement). Les biocomposites, préparés avec une matrice PP/rLDPE (75/25) et des nanoparticules de Si, présentaient des propriétés mécaniques et une adhésion interfaciale améliorées, en particulier avec les fibres traitées thermiquement. Les techniques de caractérisation,

notamment FTIR, TGA et SEM, ont confirmé que la stabilité thermique des composites restait intacte malgré l'incorporation des fibres [166].

Nouri et al. (2020) ont étudié la caractérisation hygrothermique et l'effet des traitements sur le comportement des fibres de Diss. Des tests d'absorption ont été réalisés sur des fibres traitées chimiquement (alcalines, silane et acide acétique) et par traitement thermique. Les résultats ont montré que ces fibres ont absorbé presque 40% d'eau par rapport à leur masse sèche, et que les traitements ont réduit cette nature hydrophile des fibres [167].

Nouri et al. (2019) ont caractérisé les fibres de Diss non traitées et traitées par des méthodes chimiques (soude, silane, acide acétique) et thermiques, en se concentrant sur leur état de surface, leur composition chimique, leurs propriétés mécaniques et leur stabilité thermique. L'étude a impliqué l'extraction manuelle des fibres. Les résultats ont révélé plusieurs avantages, notamment un petit diamètre de fibre ($89 \pm 22\mu m$), une texture de surface rugueuse avec des épines, une faible densité ($0.93g/cm^3$) et une résistance à la traction allant jusqu'à $270MPa$. Les traitements ont renforcé la fibrillation (réduction du diamètre jusqu'à 40%), amélioré les conditions de surface et augmenté de manière significative la stabilité thermique et les propriétés mécaniques : le module d'Young augmentant de 60% et la résistance à la traction de 15% [168].

Bourahli et Osmani (2013) ont étudié les propriétés physico-chimiques et mécaniques des fibres naturelles de Diss après traitement. Les fibres sont principalement constituées de 44,1% de cellulose, 27% d'hémicelluloses, 16.8% de lignine, 9% d'extractibles et 3.1% de cendres. Le traitement alcalin a conduit à une réduction de 5% de la densité spécifique ($0.89g/mL$). Les essais mécaniques ont révélé un module élastique moyen de $9.3GPa$, une résistance à la traction de $149MPa$ et un allongement à la rupture de 1.72% pour une longueur de 20 mm. Le traitement avec 5% de NaOH pendant 2 h a permis d'améliorer la résistance à la traction d'environ 37%, les durées de traitement plus longues n'apportant que des avantages supplémentaires minimales, tout en conservant une résistance supérieure à celle des fibres non traitées [169].

2.3.4.17 Autres

D'autres travaux ont étudié le renforcement des composites par des fibres de soya, de bois, d'ananas, de kraft, de kenaf, ..., et même hybrides combinant deux ou plusieurs types de fibres. Zahidul et al. (2024) explorent les propriétés mécaniques des composites polyester hybrides renforcés par des fibres de jute et de chanvre, abordant ainsi le défi commun de la faible performance des composites à base de fibres naturelles. En variant les charges de fibres (30%, 50% et 70% en volume) et en traitant les fibres avec des solutions de NaOH à 3% et 5%, ils ont

considérablement amélioré l'adhérence interfaciale. Leurs résultats montrent que la charge de fibres à 50% avec un traitement à 3% de NaOH a donné les meilleurs résultats, atteignant une résistance à la traction de 26.6MPa et une résistance à la flexion de 62.7 MPa [170].

Alane et al. (2022) ont étudié la composition chimique et la stabilité thermique des fibres extraites de la plante *Opuntia ficus indica* Cladodes. En outre, l'effet des fibres végétales sur le comportement à la traction des biocomposites à base de PHBV préparés par mélange à l'état fondu à une teneur en charge de 20 % en poids a également été étudié. Les résultats ont montré une augmentation significative des propriétés de traction des biocomposites PHBV/OFIF par rapport au PHBV vierge [171].

Lekrine et al. (2022) ont également étudié le comportement mécanique, thermique et physique de biocomposites HDPE renforcés de fibres de *Washingtonia Filifera* avec différents rapports de masse de fibres WF produits par une technique de moulage par injection. Ces nouveaux biocomposites ont été caractérisés à l'aide d'équipements de pointe tels que DSC-TGA, FTIR, XRD, MEB, machine d'essai universelle et testeur Izod. Les résultats montrent que l'ajout de fibres WF au PEHD pur améliore les propriétés de traction et de résistance aux chocs, mais réduit légèrement la résistance aux chocs [172].

Legrand et al. (2020) ont étudié la capacité d'absorption d'eau, la teneur en humidité, la densité réelle, la porosité, la composition chimique, la structure chimique et le comportement thermique de la fibre extraite de l'écorce de la plante *Cola Lepidota*, cultivée dans la flore de la partie sud du Cameroun. Il a été découvert que la nouvelle fibre a une teneur en humidité relativement faible et une capacité d'absorption de l'eau similaire à celles d'autres fibres naturelles étudiées telles que le lin, le sisal, la noix de coco, le chanvre et le jute. En outre, sa porosité a été jugée appropriée pour la production de composites, et la fibre s'est avérée thermiquement stable jusqu'à 230°C [173].

2.4 Fibres animales

Les fibres animales sont principalement composées de protéines. Par rapport aux fibres végétales, les fibres animales possèdent une meilleure flexibilité, une grande rugosité de surface et une faible nature hydrophile. Ceux utilisées dans le renforcement des matériaux composites comprennent principalement la soie et certaines fibres de laine.

2.4.1 La Soie

La soie est une fibre animale obtenue à partir de larves de papillons et d'araignées. Elle est reconnue pour son allongement à rupture très élevé et sa capacité d'absorption d'énergie, ce qui lui confère des avantages par rapport aux fibres synthétiques. Elle est principalement composée de fibroïne, qui lui confère une bonne résistance en traction et une faible densité, ce qui la rend attrayante pour les applications composites. Bien que son utilisation industrielle dans les composites soit limitée, la soie peut améliorer les propriétés mécaniques des matériaux lorsqu'elle est intégrée dans des matrices polymères [174].

2.4.2 Fibres de laine

Les fibres de laine, bien que moins couramment utilisées que la soie, présentent également des propriétés intéressantes pour le renforcement des composites. Elles sont naturellement résistantes à l'eau et possèdent des capacités d'isolation thermique et acoustique [174].

2.5 Bio-matrices (Biopolymères)

Les biopolymères sont synthétisés à partir de matières premières naturelles largement accessibles (provenant de plantes, d'animaux et de bactéries). Ils rencontrent actuellement une popularité accrue. Certains d'eux sont bien connus et leur utilisation est largement acceptée (comme l'acide polylactique PLA, l'amidon, la lignine, les résines furaniques, ...), tandis que d'autres sont encore en voie de développement et méconnues [175].

L'**Amidon**, polymère glucidique d'origine végétale, est utilisé comme matrice bioplastique dans les matériaux composites en raison de ses avantages environnementaux. Sierra Montes et al. (2024) ont développé des composites biodégradables en utilisant de l'amidon de manioc renforcé par des fibres de Topinambur, montrant une amélioration des propriétés mécaniques et de la biodégradabilité [176]. Ribba et al. (2021) ont examiné des composites d'amidon thermoplastique mélangés à des polyesters biodégradables, révélant de bonnes propriétés mécaniques tout en conservant la biodégradabilité, ce qui les rend viables pour l'emballage écologique [177]. Darwish et al. (2021) ont exploré des composites à base d'amidon et de fibres de banane pour des applications biomédicales, trouvant une biocompatibilité et une résistance mécanique adéquates pour des implants médicaux [178].

La **Gélatine**, biopolymère dérivé du collagène, est appréciée pour sa biocompatibilité, sa biodégradabilité et sa capacité à renforcer les propriétés mécaniques des composites. Zhang (2019) a montré que les composites à base de gélatine sont adaptés pour des applications en médecine,

alimentation et cosmétiques [179]. Zeng et al. (2022) ont intégré des nanotubes de carbone modifiés par gélatine dans des composites renforcés par des fibres de carbone, constatant une amélioration significative de la résistance interfaciale et des performances mécaniques. Cela démontre le potentiel de la gélatine dans l'optimisation des matériaux composites avancés [180].

Le **Polyhydroxyalcanoates** (PHA) est produit par fermentation microbienne et est reconnu pour sa biodégradabilité et sa biocompatibilité, ce qui le rend idéal pour des applications dans les dispositifs médicaux et les composites d'emballage alimentaire. Nazaruddin et Jamari (2021) ont observé que l'ajout de 2% de nanocellulose (NCF) améliore certaines propriétés thermiques des composites PHA, bien que l'impact global sur le comportement thermique reste limité [181]. Spiesz et al. (2019) ont étudié des composites inspirés de la nacre, produits par des bactéries, soulignant un compromis entre durabilité et performance mécanique, ces composites ayant des propriétés inférieures à celles des matériaux naturels [182]. Cecen (2023) a montré que l'incorporation de PHA dans le PLA via impression 3D améliore la flexibilité et l'imprimabilité, ouvrant des perspectives pour des applications nécessitant résistance et biodégradabilité [183].

L'**acide polylactique** (PLA) est un thermoplastique biodégradable issu de ressources renouvelables, largement utilisé dans les emballages, l'impression 3D et les matériaux composites. Brunšek et al. (2023) ont étudié sa biodégradation dans le sol, révélant que l'hydrolyse chimique et l'attaque microbienne compromettent sa résistance mécanique au fil du temps [184]. Brancewicz-Steinmetz et Sawicki (2022) ont mis en avant des techniques d'impression 3D qui améliorent les performances mécaniques des composites PLA, suggérant que l'innovation dans la fabrication additive peut surmonter certaines limites du matériau [185]. Jałbrzykowski et al. (2022) ont évalué des composites PLA intégrant des déchets végétaux, constatant une résistance à la traction améliorée tout en maintenant la biodégradabilité, soulignant ainsi le potentiel des sous-produits agricoles comme charges durables [186].

D'autres polysaccharides et protéines (Algues, Soja, Soie, Albumine, Dextran, Xanthane, Chitine, Chitosan, Levure, Pullulan, ...) sont aussi utilisés comme biopolymères dans diverses applications, y compris comme matrices dans les matériaux composites.

2.6 Conclusion

En raison de la diminution des ressources pétrolières et de l'augmentation des risques environnementaux, un désir accru dans le monde moderne en matériaux plus respectueux de l'environnement a conduit les chercheurs à se concentrer sur les fibres naturelles, ces dernières remplacent les fibres synthétiques progressivement et avec succès dans diverses utilisations.

Plusieurs formes de fibres naturelles et leur utilisation ont été abordées, les études montrent que le comportement et les qualités de renforcement du matériau ont un impact significatif sur les performances des composites polymères renforcés de fibres naturelles. Il a été aussi constaté que les traitements chimiques et de surface pouvaient améliorer les caractéristiques thermochimiques et mécaniques des fibres naturelles.

L'avantage des biocomposites réside en leurs biodégradabilité, légèreté, d'être renouvelable et non corrosif. Ils sont convenables pour divers domaines comme l'aérospatiale, l'automobile, la construction, le biomédicale, Cependant, l'absorption d'humidité, la dépendance à la récolte, la variabilité des propriétés et les coûts de production sont des difficultés qui doivent être résolus pour améliorer les performances des fibres naturelles ainsi que leur rentabilité dans le but de faire des biocomposites une solution prometteuse pour des pratiques de fabrication durables, avec un impact réduit sur l'environnement.

Chapitre 3

CARACTERISATION DU BIOCOMPOSITE DISS/EPOXY

3.1 Introduction

Les fibres naturelles issues de plantes locales représentent une alternative prometteuse aux renforts synthétiques dans les matériaux composites, combinant performance mécanique et durabilité environnementale. Dans cette étude, nous nous intéressons particulièrement aux fibres extraites de la plante Diss (*Ampelodesmos mauritanicus*), dont la microstructure rugueuse observée au microscope électronique (MEB) suggère une adhérence renforcée avec les matrices polymères. Nous formulons l'hypothèse que cette rugosité de surface favorisera l'ancrage mécanique des fibres dans une matrice époxy, conduisant à un biocomposite aux propriétés améliorées, tout en restant biodégradable et renouvelable.

Ce chapitre présente la méthodologie complète de fabrication et de caractérisation mécanique de ce nouveau matériau. Des éprouvettes biocomposites, avec des fractions massiques variables de fibres de Diss, ont été produites par moulage. Leurs propriétés ont été évaluées via :

- Des essais de traction pour déterminer le module d'Young et la résistance mécanique,
- Des tests d'impact Charpy pour quantifier la ténacité et le comportement sous choc,
- Des mesures de densité pour évaluer le compromis poids/performance.

L'objectif est de corrélérer la microstructure des fibres aux propriétés macroscopiques du composite, en identifiant notamment le taux optimal de renfort. Les résultats obtenus seront comparés aux composites conventionnels et à d'autres biocomposites décrits dans la littérature, afin de positionner ce matériau innovant dans le paysage des solutions durables.

3.2 Matériels et méthodes

3.2.1 Préparation des fibres

Le protocole de préparation des fibres de Diss suit une séquence d'étapes mécaniques simples, excluant tout apport chimique, conformément à une approche de chimie verte.

1. **Nettoyage préliminaire :** Les feuilles fraîchement récoltées sont débarrassées de leurs impuretés superficielles (poussières, débris végétaux, insectes) par un rinçage soigneux à l'eau tiède ($\sim 35^\circ\text{C}$). Cette opération permet également d'éliminer une partie des cires cuticulaires sans altérer la structure interne de la fibre.
2. **Séchage naturel :** Les feuilles sont ensuite disposées à plat, à l'air libre, à température ambiante ($30\text{--}38^\circ\text{C}$), à l'abri de l'ensoleillement direct, pendant les mois d'avril, mai et juin. Cette période correspond à un taux d'humidité relative modéré ($30\text{--}35\%$), favorable à un séchage lent et homogène, qui limite les contraintes mécaniques internes. La durée totale de séchage est d'environ 10 à 15 jours, jusqu'à obtention d'une teneur en eau résiduelle inférieure à 10 %.
3. **Enroulement spontané :** Sous l'effet de la perte d'eau et des différences de retrait entre les ses deux faces, les feuilles sèches s'enroulent naturellement sur elles-mêmes (Figure 3.1). Elles adoptent une morphologie tubulaire, la face rugueuse se trouvant à l'intérieur du rouleau, tandis que la face lisse demeure à l'extérieur.



Figure 3.1 : Une feuille de Diss enroulée.

4. **Découpe longitudinale :** Les rouleaux ainsi formés sont découpés manuellement, dans le sens de la longueur, manuellement et à l'aide d'un cutter, en bandelettes d'une largeur inférieure à 1 mm (typiquement 0.5–0.8 mm). Cette finesse permet d'obtenir des fibres individuelles aux dimensions compatibles avec une matrice polymère.

Les fibres sont regroupées en faisceaux parallèles (Figure 3.2), prêts à être utilisés comme renfort dans une matrice époxyde.

Aucun traitement chimique n'est appliqué à ces fibres à aucun stade du processus. Cette particularité présente trois bénéfices notables :

- Suppression totale des effluents toxiques et des résidus de solvants, réduisant l'empreinte environnementale du biocomposite.
- Diminution significative des coûts de production (pas de réactifs, ni d'étapes de neutralisation).
- Absence de composés dangereux pour les opérateurs (pas de risques d'inhalation ou de contact cutané avec des produits corrosifs).

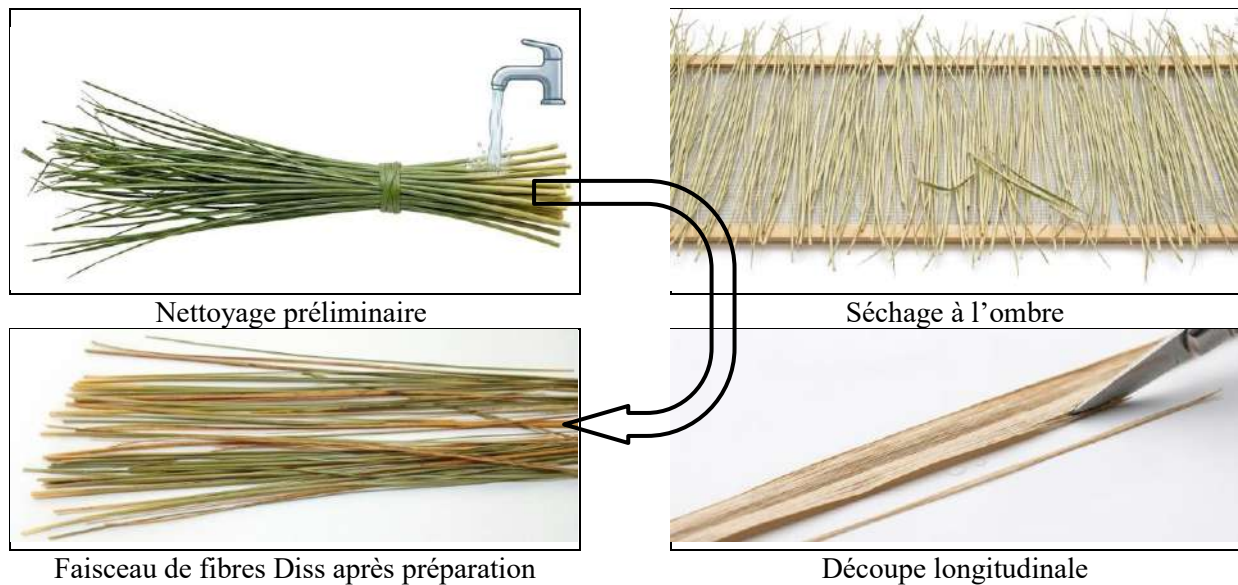


Figure 3.2 : *Processus de préparation des fibres.*

3.2.2 Elaboration des éprouvettes pour essai de traction

L'élaboration des spécimens a été réalisée en premier lieu en utilisant un moule en trois pièces en fer plat de $50 \times 5\text{mm}$ et d'une longueur de 200mm superposées l'une sur l'autre et dont la pièce médiane contient un trou oblong où les fibres sont déposées après imprégnation dans l'époxy. Les spécimens produits de cette façon ont 180mm de long et une section transversale équivalente à : $A = 20 \times 5 = 100\text{mm}^2$. Pour faciliter le démoulage ; les parties supérieure et inférieure sont recouvertes de film d'aluminium (voir Figure 3.3). Pendant la préparation, la pièce médiane est maintenue en place sur la partie inférieure du moule à l'aide de ruban adhésif.

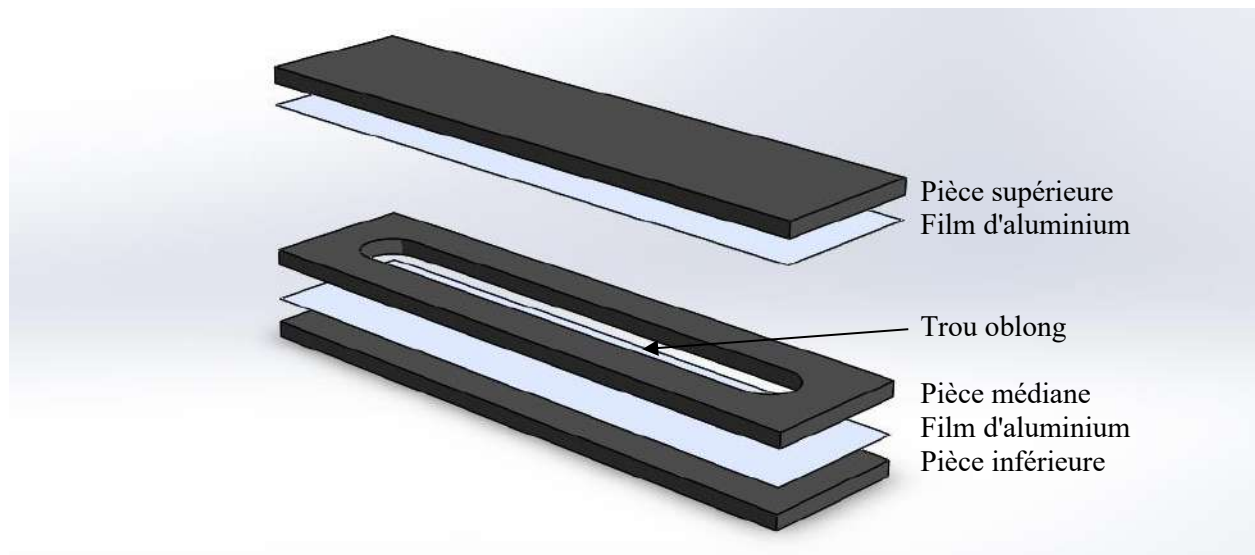


Figure 3.3 : Moule en trois pièces

Pour les premiers spécimens, le trou oblong du moule a été rempli avec un maximum de fibres longues de Diss coupées à la longueur appropriée, ce maximum correspondait à un poids de $6g$. Après la réalisation de quelques spécimens à ce taux maximal, la quantité de fibres a été réduite à $5g$ pour d'autres spécimens, puis réduite une nouvelle fois à $4g$ pour la fabrication d'autres spécimens supplémentaires. Ceci avait comme objectif d'étudier l'impact du taux de fibres sur les propriétés du matériau.

L'époxy est préparée en mélangeant, selon les besoins, une quantité d'époxy pré-accélééré avec 1% de durcisseur. Les fibres sont ensuite immergées dans l'époxy et disposées dans le moule de manière à obtenir autant que possible une distribution homogène des fibres. Le reste du moule est ensuite rempli d'époxy. Recouvert par la partie supérieure du moule, l'échantillon est ensuite pressé pour éliminer l'excès d'époxy puis extrait quatre heures avant d'être durci et laissé sur une surface plane pour durcir totalement.

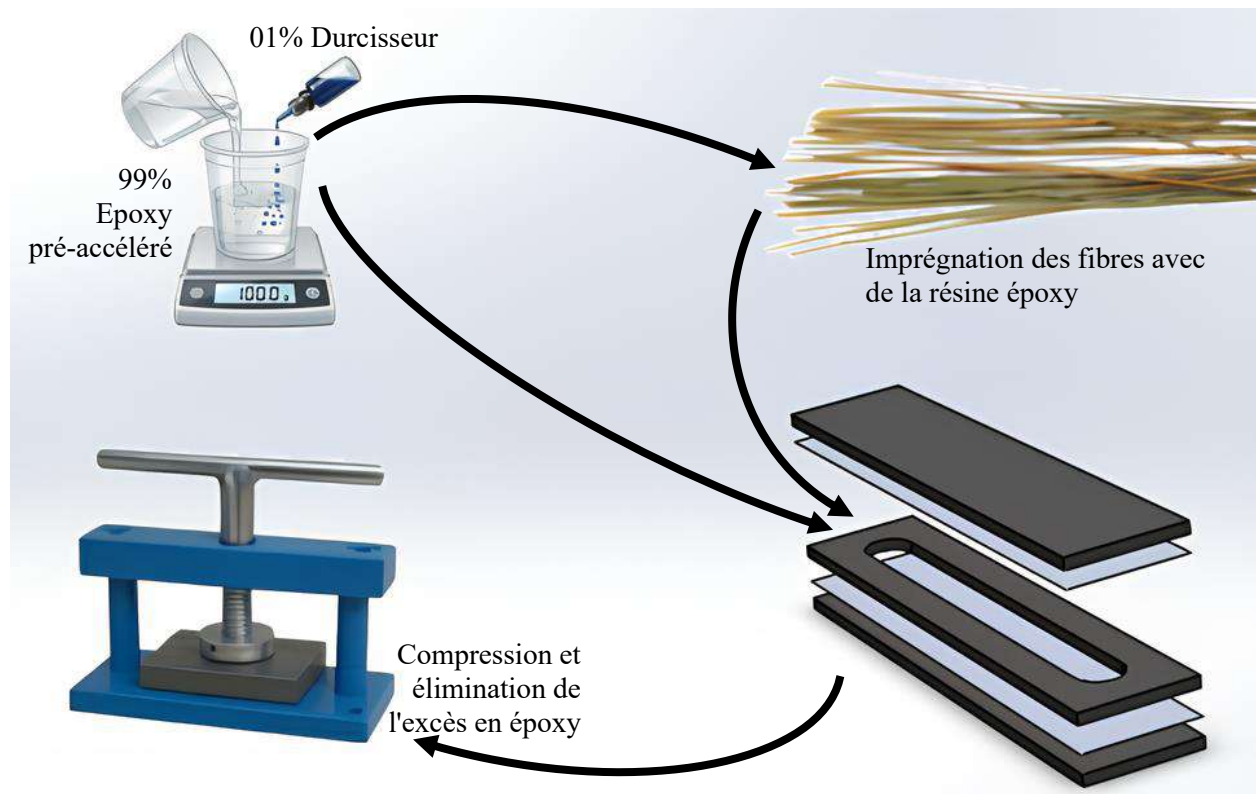


Figure 3.4 : *Elaboration des éprouvettes*

Ce protocole progressif a permis de produire des séries d'échantillons avec des ratios de fibres variés, offrant une base pour analyser l'influence directe de la quantité de fibres sur le comportement mécanique des spécimens.

Ce processus permettait de produire seulement un spécimen à la fois mais a aussi conduit à un contrôle précis des paramètres de production. Le processus a été ensuite accéléré par le remplacement du premier moule par un deuxième (voir Figure 3.5), composé lui aussi de trois pièces mais dont la pièce médiane contient quatre trous oblongs permettant l'élaboration de quatre spécimens à la fois chacun a une section transversale équivalente à : $20 \times 4 = 80 \text{ mm}^2$ et une longueur de 150mm.



Figure 3.5 : *Moule pour quatre éprouvettes de traction*

Pour ce dernier moule, la quantité maximale de fibres Diss pouvant être remplie dans chacun des quatre trous oblongs était de $4g$, ainsi, et en variant le taux des fibres de Diss, sont élaborés des échantillons avec $4g$, $3g$, $2g$ et $1g$ de fibres Diss (4 échantillons pour chaque taux), ainsi que quatre autres échantillons sans renforcement (époxy seule, pour examiner sa rigidité). Comme on s'attend à une amélioration de la résistance avec l'augmentation de la densité des fibres ; des spécimens en plus de $4g$ de fibres Diss ont été élaborés.

La Figure 3.6 montre quelques échantillons des spécimens élaborés.



Figure 3.6 : Éprouvettes pour essai de traction avec différents pourcentages de poids en fibres Diss (après test)

Ces éprouvettes ont été soumises à des essais de traction réalisés conformément à la norme ASTM D 3039/D 3039M - 00 [187]. Les mâchoires de la machine d'essai se déplacent à une vitesse très lente l'une par rapport à l'autre égale à $0,0042 \text{ mm/s}$ approximativement. Cette vitesse d'étirement faible est typique pour les matériaux composites, car ces derniers nécessitent un étirement lent pour bien observer leur comportement mécanique, de plus, elle permet une meilleure redistribution des contraintes et réduit les effets d'inertie ou de dissipation thermique dans le cas des matériaux ductiles, le temps qu'elle minimise les effets dynamiques, comme l'initiation prématurée des fissures en cas de matériaux fragiles.

Pour chaque éprouvette, un point de mesure indiquant force F (en kN) et course L (en mm) est relevé chaque $0.04s$. Les résultats sont donc organisés en trois colonnes (Temps, Force et Course) d'où on tire les contraintes et déformations correspondantes.

Rappelons que les contraintes σ et les déformations ϵ sont calculées selon les équations suivantes :

$$\sigma = F/A \quad (3-1)$$

Avec : σ contrainte
 F force appliquée
 A section transversale

et
$$\epsilon = L/L_0 \quad (3-2)$$

Avec : ϵ déformation
 L longueur inter-mâchoires
 L_0 longueur initial inter-mâchoires

à savoir que la longueur initial inter-mâchoires est : $L_0 = 50mm$ et que la section transversale des éprouvettes $A = 100mm^2$ pour les éprouvettes 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19 et 20, le temps qu'elle est seulement $80mm^2$ pour le reste des éprouvettes.

3.2.1 Elaboration des éprouvettes pour essai Charpy

Pour les éprouvettes d'essai d'impact, la pièce médiane du moule est remplacée par une autre permettant la production de 8 éprouvettes de dimensions $55 \times 12 \times 10mm$ (Figure 3.7). L'entaille V est réalisée manuellement après le durcissement des éprouvettes.



Figure 3.7 : Pièce médiane du moule pour les échantillons d'essai d'impact.

3.2.2 Matériel

Les images macroscopiques sont prises à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) Thermo Fisher Scientific (USA) PhenomTM ProX au laboratoire de Dynamique, Interaction et Réactivité des Systèmes (DIRS) de l'université de Ouargla. Les essais de traction ont été réalisés au CRM (Centre de Recherche en Mécanique, Constantine) sur la machine d'essai de traction EUROTTEST-300 de la marque IBERTEST (Espagne), une machine universelle d'une capacité de traction de $300kN$ commandée par ordinateur. Les essais d'impact ont été réalisés sur une machine d'essai d'impact Charpy KARL FRANK GmbH du type 53565 (Allemagne) du

laboratoire du département de génie mécanique de l'Université Kasdi Merbah - Ouargla. Les deux machines d'essai sont illustrées à la Figure 3.8.

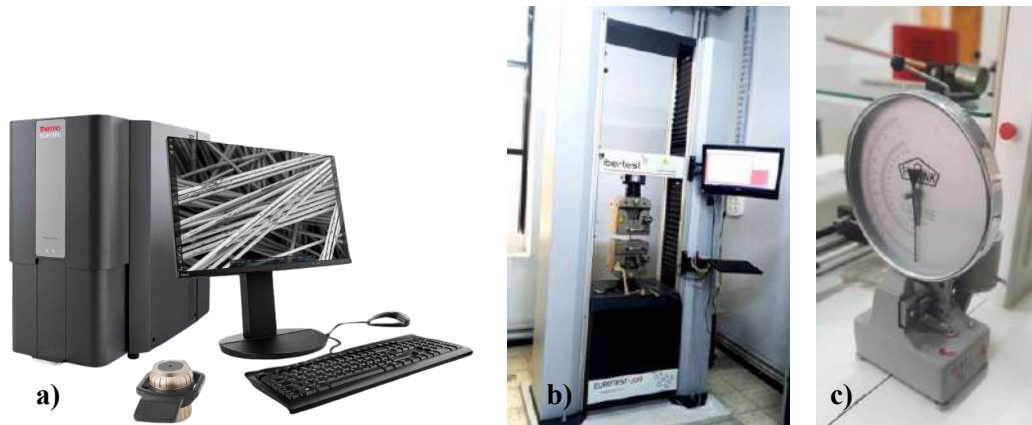


Figure 3.8 : Matériel - a) microscope électronique à balayage PhenomTM ProX, b) machine d'essai de traction EUROTEST-300 et c) machine d'essai d'impact Charpy KARL FRANK GmbH du type 53565

3.3 Résultats et discussion

3.3.1 Imagerie MEB de la feuille de Diss

La Figure 3.9 montre des images prises avec un microscope électronique à balayage (MEB) Thermo Fisher Scientific (USA) PhenomTM ProX à trois niveaux de grossissement ($97\times$, $280\times$ et $420\times$) pour observer les caractéristiques de surface des feuilles de Diss. Le premier grossissement ($97\times$) montre une vue globale de la surface des feuilles. On peut observer des stries longitudinales qui semblent suivre l'orientation naturelle des fibres de la feuille. Les rugosités visibles à cette échelle sont assez généralisées et semblent être réparties uniformément sur la surface.

Avec un grossissement plus élevé ($280\times$), des structures spécifiques apparaissent clairement, notamment des protubérances ou des épines visibles sur la surface. Ces épines semblent alignées avec les stries observées dans l'image précédente, ce qui suggère qu'elles font partie intégrante de la structure naturelle de la feuille. La distribution des épines semble irrégulière, avec des tailles et des formes variées.

À un grossissement encore plus détaillé ($420\times$), les épines sont plus distinctes, révélant des contours précis. On peut observer que ces épines ont une surface lisse et sont bien intégrées dans la matrice de la feuille. Leur densité et orientation semblent jouer un rôle important dans la rugosité globale de la surface de la feuille.

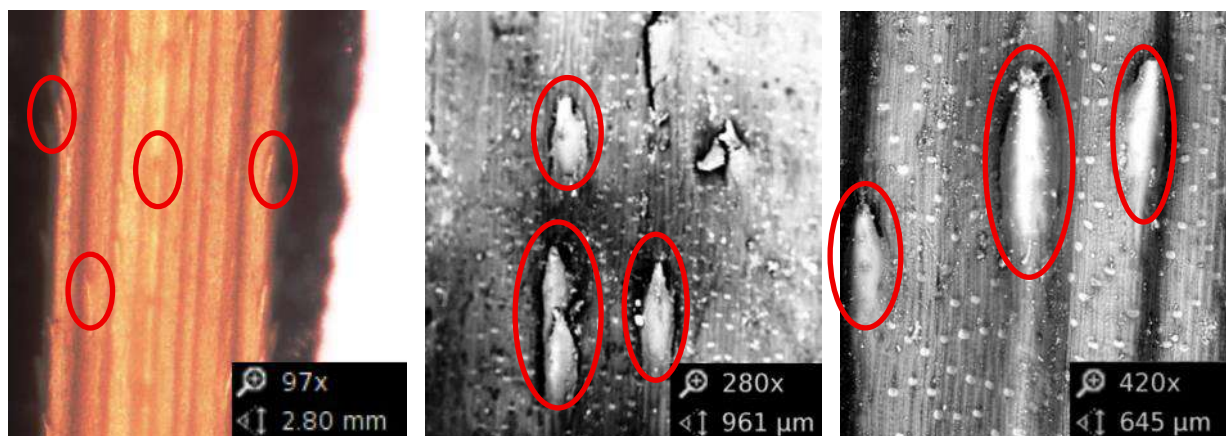


Figure 3.9 : Imagerie MEB de la surface des feuilles de Diss

De ces observations, on peut dire que l'utilisation des fibres de Diss doit conduire à :

- **Une amélioration de l'adhérence fibre-matrice :** Les épines observées à la surface des feuilles de Diss joueront certainement un rôle essentiel dans l'amélioration de l'adhérence mécanique entre les fibres de Diss et une matrice en époxy. En effet, ces structures augmentent la surface de contact disponible pour l'interaction avec la résine époxy, ce qui favorise une meilleure interconnexion. Cela contribue à réduire les défaillances au niveau de l'interface fibre-matrice, un des principaux défis dans les composites.
- **Un effet de verrouillage mécanique :** Les épines agissent comme des ancrages mécaniques dans la matrice polymère. Lors de la polymérisation de l'époxy, la résine peut pénétrer autour et entre ces structures, créant un effet de verrouillage ce qui limite le délaminage et améliore la cohésion interne du matériau composite.
- **Une augmentation de la résistance globale :** En augmentant l'adhérence fibre-matrice, les épines participent à une meilleure distribution des contraintes mécaniques dans le composite. Cela permet de limiter les concentrations de contraintes à certains points critiques, augmentant ainsi la résistance à la traction, à la flexion et à l'impact des biocomposites Diss/époxy. La texture rugueuse créée par ces épines peut également contribuer à ralentir la propagation des fissures dans le composite en créant des obstacles naturels à leur progression. Cela améliore la durabilité des biocomposites soumis à des cycles de charge répétés ou à des conditions environnementales sévères.

En résumé, la présence de ces épines va nécessairement conférer un avantage significatif aux biocomposites à base de Diss, elles offrent une fonctionnalité unique sans nécessiter de traitement chimique ou physique supplémentaire pour améliorer l'adhérence fibre-matrice. Cela rend les biocomposites basés sur les fibres de Diss particulièrement attractifs d'un point de vue écologique et économique, en réduisant les coûts de modification des fibres tout en restant alignée avec les

principes de durabilité et d'efficacité des ressources. Dans ce qui suit, nous allons essayer de valider ces hypothèses au moyen de différents essais et simulations.

3.3.2 Essai de traction

Sur le Tableau 3.1, on a résumé les résultats des essais de traction à savoir celles de calcul du module d'Young (estimé des pentes des courbes), les déformations ainsi que les limites élastiques. Sont aussi indiqués : la masse des fibres de Diss et celle de de l'éprouvette, d'où on obtient des fractions massiques W_D par calcul, et est indiqué aussi les sections transversales des éprouvettes.

Tableau 3.1 : Spécifications des échantillons et résultats des essais de traction.

N	A [mm ²]	M [g]	M _D [g]	W _D [%]	σ _e [MPa]	ε [%]	E [GPa]
1	80	14.82	0.00	0.00	25.0463	4.76	0.4646
2	80	14.89	0.00	0.00	23.1638	4.83	0.4397
3	80	14.91	0.00	0.00	26.6963	4.82	0.5036
4	80	15.70	1.00	6.37	39.1088	4.89	0.7625
5	80	15.46	1.00	6.47	38.8650	5.20	0.7174
6	80	15.18	1.00	6.59	42.7913	5.04	0.7789
7	80	15.59	2.00	12.83	43.4288	3.58	1.0757
8	80	15.53	2.00	12.88	53.8388	5.11	0.9905
9	80	15.49	2.00	12.91	43.8338	3.93	1.0497
10	80	15.04	2.00	13.30	50.1600	5.31	0.8905
11	100	23.09	4.00	17.32	44.3190	3.99	1.0324
12	100	22.06	4.00	18.13	48.2820	5.20	0.9191
13	100	21.91	4.00	18.26	47.0970	4.41	1.0465
14	80	15.96	3.00	18.80	58.6763	4.72	1.0229
15	80	15.43	3.00	19.44	55.2225	4.74	1.0892
16	100	23.77	5.00	21.03	53.8950	4.51	1.1217
17	100	23.18	5.00	21.57	50.4240	4.64	1.0789
18	100	23.12	5.00	21.63	60.6150	4.94	1.1851
19	100	23.20	6.00	25.86	53.8170	4.85	1.0899
20	100	22.96	6.00	26.13	61.8060	5.27	1.1504
21	80	15.25	4.00	26.23	67.4738	6.34	1.0031
22	80	14.73	4.00	27.16	70.2375	6.14	1.0904
23	80	14.72	4.00	27.17	62.2013	6.06	0.9608
24	80	14.62	4.00	27.36	63.9863	6.32	0.9068
25	80	14.44	4.00	27.70	50.8463	4.75	1.0294
26	80	14.20	4.00	28.17	59.6138	5.24	1.0908

Suite aux calculs employant les équations 3.1 et 3.2, il devient possible de générer les courbes contrainte-déformation pour toutes les éprouvettes comme représentés à la Figure 3.10, ceci permet d'estimer le module d'élasticité en analysant la pente de la partie linéaire des courbes contrainte-déformation de la même figure, donc :

$$E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon \quad (3-3)$$

Avec : $\Delta\sigma$ variation de la contrainte sur une partie linéaire de la courbe
 $\Delta\epsilon$ variation de la déformation sur la même partie linéaire de la courbe

D'autre part, la fraction massique : $W_D = M_D / M \quad (3-4)$

Avec : M_D masse des fibres de Diss
 M masse de l'éprouvette

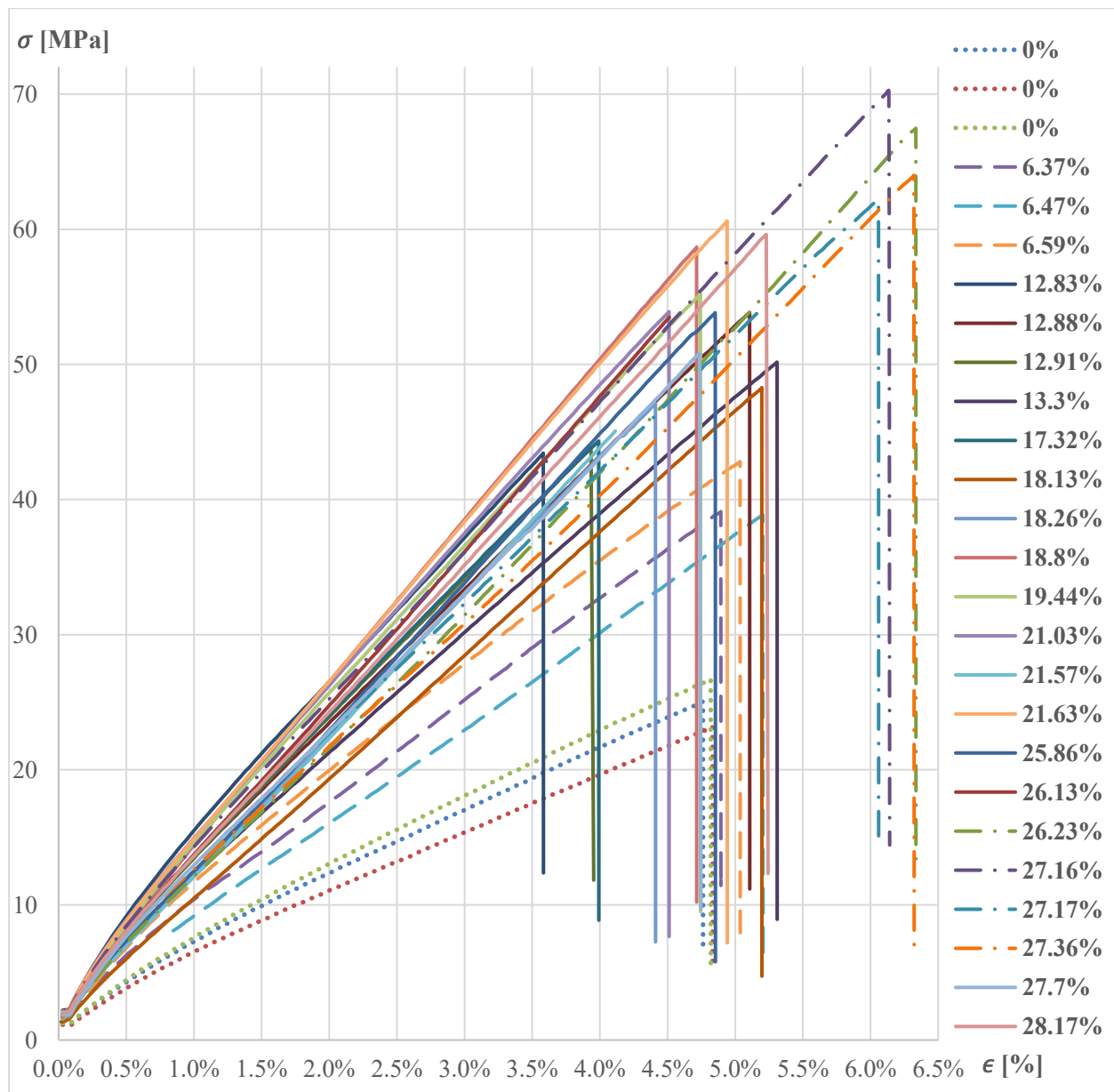


Figure 3.10 : Courbes Contrainte-Déformation pour différents taux en fibres de Diss

3.3.2.1 Comportement général

En ce qui concerne le comportement général, les courbes représentés à la Figure 3.10 montrent une relation contrainte-déformation majoritairement linéaire jusqu'à une limite proche de la rupture, suivi par une chute brutale après un point de contrainte maximal, ce qui indiquant que le matériau suit un comportement élastique avec une rupture fragile dû peut être à une faible ductilité de ce biomatériau. Quant à la rigidité ; les courbes se dispersent en fonction des pourcentages de fibres, indiquant que la rigidité varie avec le taux en fibres.

3.3.2.2 Impact du taux en fibres sur le module de Young

La Figure 3.11 représenté la variation du module l'élasticité en fonction de la fraction massique W_D des fibres de Diss. On remarque que le module d'élasticité varie en fonction du taux de renfort (fibre de Diss). On observe une tendance croissante initialement, où le module atteint un maximum de 1.1851GPa pour $W_D = 21.63\%$, avant de diminuer légèrement à des taux plus élevés.

En effet, pour une fraction massique de seulement 6% en fibre de Diss, le module d'élasticité c'est amélioré de 60% passant de 0.4693GPa en moyenne pour les éprouvettes sans renforcement (les trois courbes en pointillé) à 0.7529GPa en moyenne pour les éprouvettes avec approximativement 6% de renfort (les trois courbes en traits discontinus).

Au-delà d'un taux de 25% en fibre de Diss, le module de Young tend à diminuer légèrement, indiquant une saturation ou un effet négatif des fibres en excès dû probablement à un défaut d'adhérence entre la matrice et les fibres.

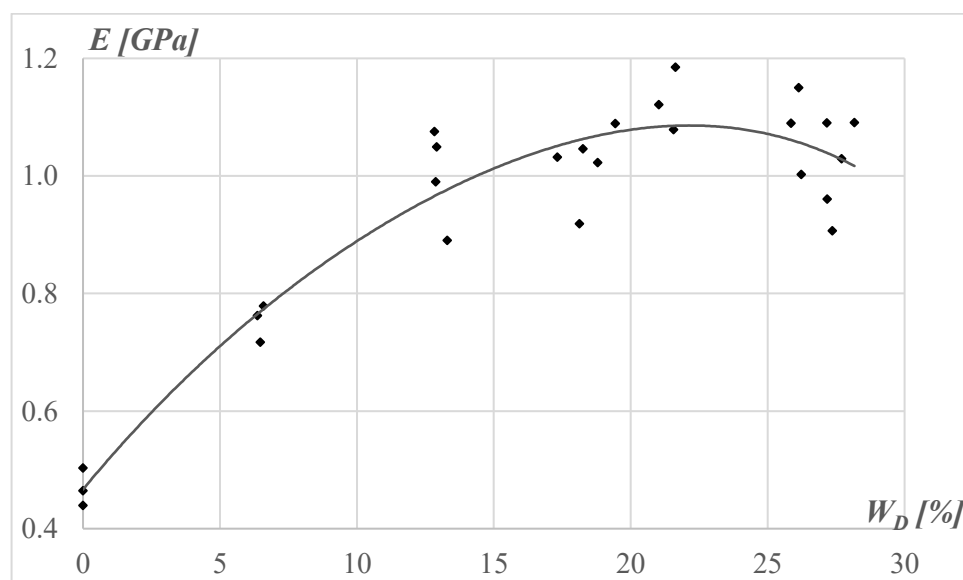


Figure 3.11 : Module d'Young en fonction du taux des fibres de Diss.

La figure montre aussi qu'une courbe de tendance polynômiale du 4^{ème} degré semble bien correspondre aux données observées dans l'ensemble, car il capture à la fois la montée et la descente du module d'élasticité.

Le polynôme de tendance de degré 4 utilisée est :

$$E = -8 \times 10^{-7} W_D^4 + 4 \times 10^{-5} W_D^3 - 0.0017 W_D^2 + 0.0566 W_D + 0.4666 \quad (3-5)$$

Avec : E module d'Young
 W_D fraction massique des fibres de Diss

Ce modèle donne un pic $E_{max} \approx 1.1333 GPa$ atteint pour un taux en fibre de Diss proche de 23% ce qui adhère avec la valeur maximale enregistrée pour le module d'élasticité (1.1851 GPa pour une fraction massique de 21.63%)

3.3.2.3 Impact du taux en fibres sur contrainte maximale σ_e

La contrainte maximale suit une tendance similaire : elle augmente avec le pourcentage de fibres jusqu'à une certaine limite. En observant les courbes contrainte-déformation en tiret - point pour des fractions massiques entre 26.23 et 27.36%, on remarque que les fibres semblent optimiser la résistance mécanique qui a passée de 25 MPa pour l'époxy seule à 65 MPa pour une fraction massique $\sim 26\%$). Après un taux supérieur à 27.7%, la contrainte maximale diminue légèrement, ce qui suggère un comportement dépendant de la qualité d'interaction entre fibres et matrice.

3.3.2.4 Interprétations mécaniques

Les fibres de Diss apportent un renforcement significatif à la matrice pour des concentrations modérées ($\sim 26\%$). Cela s'explique par une bonne répartition des charges entre les fibres et la matrice, ainsi qu'un transfert efficace des contraintes. Sur la Figure 3.12 sont représentées les sections de rupture de quelques éprouvettes avec une bonne adhésion fibre-matrice (a) et d'autres avec une mauvaise adhésion fibre-matrice (b).

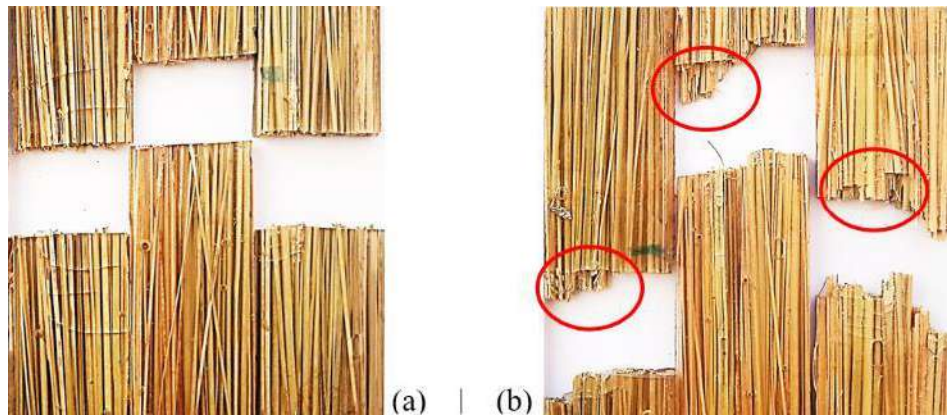


Figure 3.12 : Section de rupture pour quelques éprouvettes :
 (a) avec bonne adhésion fibre-matrice et (b) avec mauvaise adhésion
 fibre-matrice

On observe clairement l'absence de décohésion entre les fibres et la matrice au niveau des surfaces de rupture, la majorité des fibres ont été coupées dans cette section, et il n'y avait pas d'indications de glissement des fibres, ce qui indique une forte adhérence entre les fibres et la matrice. De plus les sections de rupture quasi-perpendiculaire aux efforts de traction reflètent un comportement fragile du biocomposite. Par contre ; sur la Figure 3.12b, l'adhérence de plusieurs fibres à la matrice apparaît mauvaise en raison de la surabondance de fibres, ce qui a favorisé une rupture précoce pour des taux de renfort dépassant 28%.

3.3.3 Essai d'impact Charpy

La quantité maximale de fibres Diss pouvant être remplie dans chacun des 8 trous rectangulaires de la pièce médiane du moule illustré à la Figure 3.7 n'était que de 2g. Ainsi, 44 échantillons ont été élaborés avec différentes quantités de fibres Diss variantes entre 0 et 2g par incrément de 0.2g déposée uni-directionnellement suivant la longueur des éprouvettes. La composition des échantillons et l'énergie absorbée lors du choc sont indiquées dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Résultats de l'essai de résilience Charpy.

N°	M_D [g]	M [g]	W_D [%]	Énergie absorbée [J]
01	0.0	7.53	0.0000	0.66
02	0.0	7.61	0.0000	0.82
03	0.0	7.68	0.0000	0.54
04	0.0	7.60	0.0000	0.50
05	0.2	7.16	2.7933	1.09
06	0.2	7.10	2.8169	0.66
07	0.2	7.57	2.6420	0.67

N°	M_D [g]	M [g]	W_D [%]	Énergie absorbée [J]
08	0.2	6.62	3.0212	0.72
09	0.4	7.64	5.2356	0.85
10	0.4	7.61	5.2562	0.99
11	0.4	7.74	5.1680	1.09
12	0.4	7.28	5.4945	1.14
13	0.6	7.62	7.8740	0.85
14	0.6	7.55	7.9470	1.10
15	0.6	7.49	8.0107	1.05
16	0.6	7.87	7.6239	1.11
17	0.8	7.12	11.2360	1.20
18	0.8	7.55	10.5960	1.91
19	0.8	7.34	10.8992	1.15
20	0.8	7.34	10.8992	1.50
21	1.0	7.61	13.1406	2.32
22	1.0	7.19	13.9082	1.94
23	1.0	7.74	12.9199	2.20
24	1.0	7.50	13.3333	2.23
25	1.2	7.61	15.7687	2.15
26	1.2	7.43	16.1507	2.27
27	1.2	7.11	16.8776	2.10
28	1.2	7.49	16.0214	2.44
29	1.4	7.08	19.7740	2.05
30	1.4	6.77	20.6795	2.90
31	1.4	6.69	20.9268	3.05
32	1.4	7.01	19.9715	3.01
33	1.6	7.57	21.1361	2.75
34	1.6	7.40	21.6216	2.54
35	1.6	7.29	21.9479	2.41
36	1.6	7.75	20.6452	2.75
37	1.8	7.20	25.0000	3.05
38	1.8	7.22	24.9308	3.39
39	1.8	7.01	25.6776	2.72
40	1.8	7.09	25.3879	3.25
41	2.0	7.28	27.4725	3.50
42	2.0	7.37	27.1370	3.21
43	2.0	7.07	28.2885	2.93
44	2.0	6.72	29.7619	3.28

La Figure 3.13 montre les éprouvettes du biocomposite en époxy renforcées par des fibres unidirectionnelles de Diss avec différents taux de renforcement (après avoir été testés).

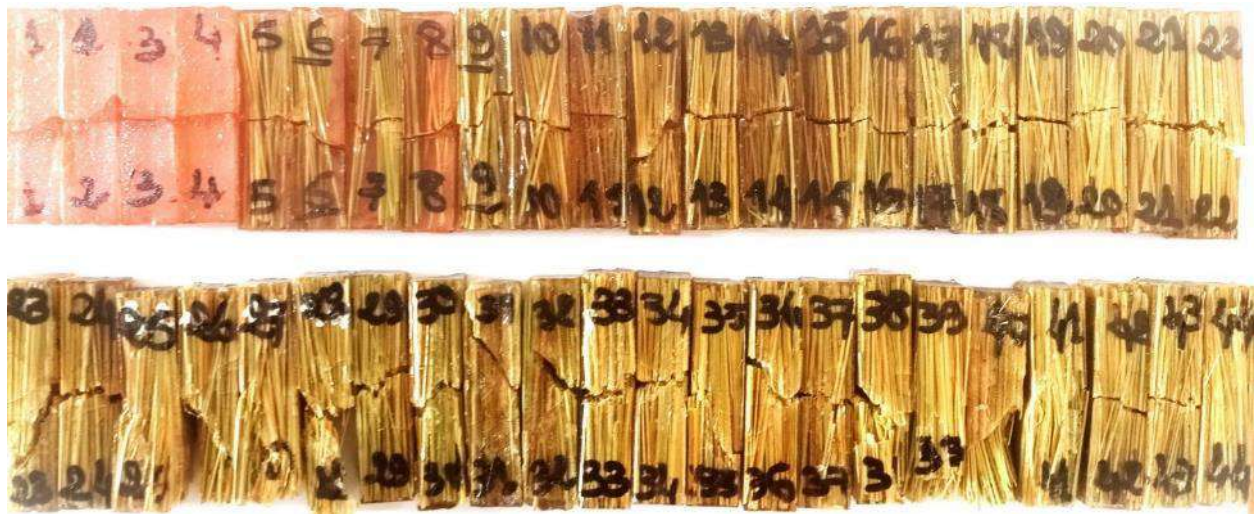


Figure 3.13 : Les éprouvettes de l'essai de résilience avec différents pourcentages en poids de fibre de Diss après avoir été testés.

La variation de l'énergie absorbée lors de l'impact en fonction de la fraction massique des fibres de Diss est représentée par le graphe de la Figure 3.14, le graphe révèle que ce biocomposite absorbe mieux l'énergie lors du choc lorsqu'il contient plus de fibres Diss.

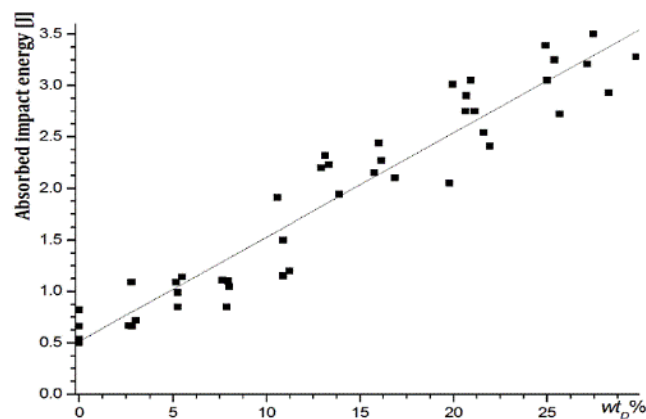


Figure 3.14 : Variation de l'énergie absorbée en fonction de la fraction massique des fibres de Diss.

Une relation globalement croissante entre la fraction massique de fibres et l'énergie d'impact absorbée est clairement visible, démontrant que l'incorporation progressive de fibres améliore significativement la résistance du biocomposite aux impacts. Cette tendance, qui peut être approximée comme linéaire est typique des composites renforcés par des fibres, où l'ajout de fibres augmente la rigidité, la ténacité et la capacité de dissipation d'énergie :

- **Sans fibres de Diss (0% de fraction massique) :** L'énergie d'impact absorbée par les échantillons est faible, variant entre 0.50 J et 0.82 J, avec une moyenne approximative de

0.63 J. Cela indique que la matrice époxy seule est très fragile, sa capacité d'absorption d'énergie est limitée.

- **Pour des fractions massiques faibles (2.6% à 5.5%) :** Une légère augmentation de l'énergie d'impact est observée, atteignant environ 1.14 J à 5.5% de fibres. Cela montre que l'ajout d'une petite quantité de fibres améliore les performances mécaniques en termes d'absorption d'énergie. Le composite devient légèrement plus ductile, car les fibres commencent à jouer un rôle dans la dissipation de l'énergie et à limiter la propagation des fissures.
- **Pour des fractions massiques intermédiaires (7.6% à 13.9%) :** Le matériau devient nettement plus ductile. L'énergie d'impact augmente significativement jusqu'à 1.94 J à 13.9%. Le renforcement par les fibres semble devenir plus efficace, probablement grâce à une meilleure répartition et à une meilleure interaction entre les fibres et la matrice.
- **Pour des fractions massiques élevées (15.7% à 29.8%) :** Le matériau atteint son niveau maximal de ductilité, avec une énergie absorbée atteignant 3.50 J à 27.5%. À ces fractions massiques, les fibres jouent un rôle dominant dans la dissipation de l'énergie, augmentant considérablement la résistance aux impacts. Cependant, à partir de 25%, l'amélioration ralentit, indiquant une limite de renforcement au-delà de laquelle des effets tels que des défauts internes peuvent diminuer la performance.
- **Le maximum de renforcement en fibres de Diss a été 30% pas plus :** Il n'a été possible de savoir le comportement du bio matériau au choc pour des fractions massiques supérieures, cependant la corrélation ne resterait pas linéaire nécessairement vu que l'adhérence fibre-matrice devient médiocre suite à une surabondance du renfort.

Le courbe de tendance utilisée est :

$$E_p = 0.1011W_D + 0.5177 \quad (3-6)$$

Avec : E_p énergie absorbée lors de l'impact
 W_D fraction massique des fibres de Diss

En outre, l'analyse de la section transversale révèle que les fibres sont coupées à différents endroits, ce qui implique que la force d'impact a provoqué la rupture des fibres en différents points de leur longueur. Néanmoins, il convient de noter que les fibres adhèrent toujours.

En résumé, ce biocomposite est ductile en comparaison avec l'époxy seule, il absorbe jusqu'à 5 à 6 fois plus d'énergie que l'époxy seule, ce qui démontre l'intérêt des fibres de Diss comme renfort. La meilleure absorption d'énergie est atteinte grâce à une bonne interaction fibres-matrice

avec un renforcement dans les alentours de 24% permettant une dissipation efficace de l'énergie lors de l'impact.

3.3.4 Détermination de la masse volumique

D'après les résultats des essais précédents, un biocomposite à base de résine époxy renforcée par des fibres de Diss présente une meilleure résistance à la traction et aux chocs pour un taux de renfort compris entre 24 % et 27 %. Dans cette section, nous allons déterminer la masse volumique d'un tel biocomposite.

La méthode utilisée est simple et repose sur le principe de la mesure par déplacement du liquide dans récipient gradué :

- **Pesée des éprouvettes :** Des éprouvettes présentant un taux de renfort proche de 25 % ont été pesées ensemble pour déterminer leur masse totale.
- **Mesure du volume :**
 - Un récipient gradué a été rempli de l'huile de silicone à un niveau de référence V_i .
 - Les éprouvettes ont ensuite été immergées, déplaçant un volume de l'huile de silicone équivalent à leur propre volume
- **Calcul de la masse volumique :** Connaissant la masse totale des éprouvettes et leur volume, la masse volumique du biocomposite a été déterminée par le rapport :

$$\rho = m/V \quad (3-1)$$

Avec :

ρ	masse volumique
m	masse
V	volume

Cette méthode permet d'obtenir une estimation fiable de la masse volumique du matériau, essentielle pour caractériser ses propriétés mécaniques.

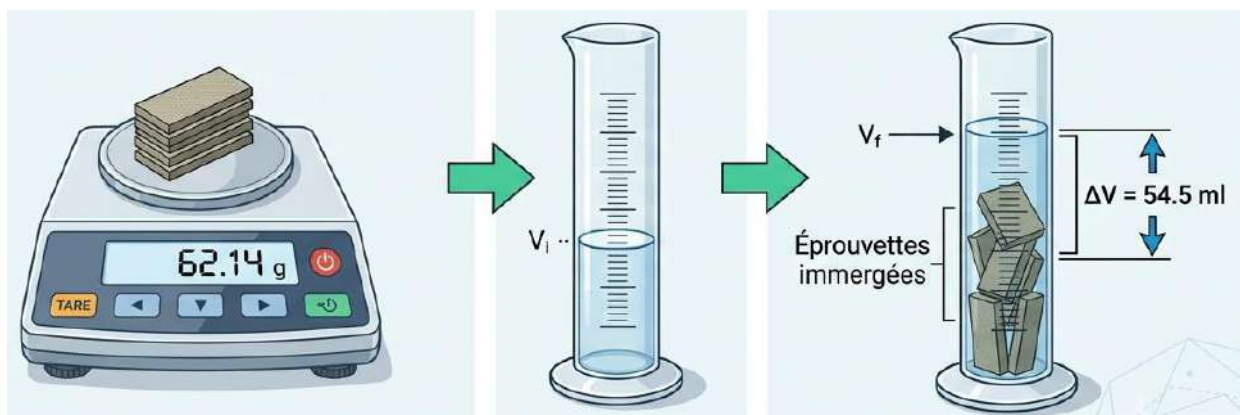


Figure 3.15 : Processus de détermination de la masse volumique.

Pour une masse de 62.14g, nous avons enregistré un volume de 54.50 cm³, ainsi ; la masse volumique du biocomposite à base d'époxy renforcé par des fibres de Diss à un taux proche de 26 % est de l'ordre de :

$$\rho_c = m_c/V_c = 62.14/54.50 = 1.14 \text{ g/cm}^3$$

La masse volumique déterminée pour ce biocomposite s'avère plus faible que celle de nombreux composites traditionnels, tels que :

- Les composites époxy/verre (1.8 à 2.0 g/cm³),
- Les composites époxy/carbone (1.5 à 1.6 g/cm³),
- Les composites polyester/fibres de verre (1.4 à 1.9 g/cm³).

Cette légèreté relative confère au biocomposite un avantage significatif dans les applications où le poids est un critère déterminant, notamment : l'industrie aérospatiale, l'automobile et les équipements sportifs.

Sachant que la masse volumique de l'époxy seule (calculer avec la même technique), est égale à :

$$\rho_m = 53.33/36 = 1.48 \text{ g/cm}^3$$

En remarque que les fibres de Diss ont non seulement améliorer la résistance du matériau, mais aussi sa légèreté du fait de leur masse volumique très faible : 41.69g de fibres de Diss ont occuper 51 cm³ de volume, donc ils ont une masse volumique égale à :

$$\rho_f = m_f/V_f = 41.69/51 = 0.82 \text{ g/cm}^3$$

Donc, la fraction volumique V_c du composite est :

$$V_c = \frac{W_f}{\rho_f} / \left(\frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \right) = 0.38$$

3.4 Performances comparées avec des composites époxy / fibres naturelles

Le tableau 3.3 compare les propriétés mécaniques du composite époxy renforcé par des fibres de Diss (développé dans le cadre de notre présent travail) avec divers composites à base de fibres naturelles (Bamboo, Banana, Flax, Hemp, Henequen, Jute) issus de la littérature.

Contrairement à la quasi-totalité des travaux de la littérature (qui dépendent de traitements chimiques lourds et coûteux comme l'Alkali, le silane, le styrène ou le plasma), le composite à base de Diss développé ici affiche des performances très compétitives avec "Aucun traitement".

Cela représente un gain de temps considérable, une réduction drastique des coûts de fabrication et un procédé nettement plus écoresponsable (chimie verte).

Malgré l'absence de traitement de surface, notre composite atteint une contrainte à la rupture de 70MPa en traction. Ce résultat est particulièrement remarquable car il surpasse les composites de fibres de Diss traitées chimiquement (54MPa), est mieux que le Bamboo sans traitement (68MPa) et les composites à base de Banana (58 à 63MPa) ou de Jute (65MPa) pourtant traités.

Tableau 3.3 : Caractéristiques des composites époxy / fibres naturelles.

Type de fibre	Traitement de surface	Fraction volumique	Méthode d'essai module de Young	E (GPa)	σ_e (MPa)	Résilience (J)	Réf
Diss	Aucun traitement	0.38	Traction (ASTM D3039)	1.18	70	3.5	Travail présent
	Alkali + thermique	0.21	Flexion 3-points	~2.4	~54	~3.8	[162]
Bamboo	Aucun traitement	0.22	Flexion 3-points (ASTM D790)	~2.8	~68	~5.2	[107]
Banana	Alkali + thermique	0.23	Flexion 3-points	~2.7	~63	~4.6	[112]
	Alkali	0.2	Traction (ASTM D638)	~2.6	~60	~4.3	[111]
	Alkali + styrène	0.2	Flexion 3-points	~2.5	~58	~4.1	[62]
Flax	Alkali + plasma	0.29	Traction (ISO 527)	~4.2	~87	~6.1	[120]
	Alkali + silane	0.28		~3.8	~82	~5.8	[57]
Hemp	Alkali (NaOH 10%)	0.25	Traction (ASTM D638)	~3.1	~74	~5.7	[86]
	Alkali (NaOH 5%)			~3.4	~79	~6.3	
	Alkali + zincone	0.27	Traction (ASTM D3039)	~3.9	~88	~6.9	[78]
	Alkali (NaOH)	~0.25	Flexion 3-points (ASTM D790)	~3.2	~75	~6.5	[8]
Henequen	Alkali	0.24	Traction (ASTM D638)	~2.9	~66	~5.0	[125]
Jute	Alkali	0.22	Traction (ASTM D638)	~2.9	~65	~4.9	[61]

3.5 Optimisation par la méthode de Taguchi

Les résultats des tests de traction et de résilience présenter respectivement au Tableau 3.1 et Tableau 3.2 ainsi que sur les graphes de la Figure 3.11 et Figure 3.14 montrent que l'ajout de fibres de Diss améliore à la fois la résistance à la traction et la résilience du biocomposite à base d'époxy. Cependant, il y a une certaine variabilité dans les résultats en ce qui concerne le module de Young pour les tests de traction et l'énergie d'impact absorbée pour les tests de résilience et cela pour des fractions massiques de fibres proches. Cela peut être dû à des variations dans le processus de

fabrication, à des non-homogénéités dans la distribution des fibres, ou à d'autres facteurs de bruit ; certains échantillons montrent des valeurs significativement plus élevées ou plus basses que la moyenne pour une fraction massique donnée.

Afin d'améliorer les performances mécaniques du biocomposite – notamment sa résistance à la traction, son module de Young et son énergie d'impact absorbée – tout en réduisant la variabilité des résultats, une approche systématique d'optimisation est nécessaire. La méthode de Taguchi, reconnue pour son efficacité dans l'amélioration de la qualité des procédés industriels, peut être appliquée pour déterminer les conditions optimales de fabrication.

La fraction massique de fibres de Diss W_D est identifiée comme le paramètre clé à optimiser, car elle influence directement les propriétés mécaniques du biocomposite, le temps que les facteurs de bruit sont les variations inévitables ou difficiles à maîtriser, telles que :

- L'hétérogénéité de la distribution des fibres dans la matrice époxy,
- Les fluctuations de température lors de la polymérisation,
- Le taux d'humidité ambiant pendant la fabrication,
- Les imperfections d'interface entre les fibres et la matrice.

Ces facteurs introduisent une dispersion dans les résultats et peuvent altérer la reproductibilité du matériau. La méthode de Taguchi permet de minimiser leur impact en identifiant les conditions optimales qui garantissent à la fois des performances élevées et une faible sensibilité aux variations aléatoires.

La première étape consiste à déterminer les niveaux, suivi par le calcul de la moyenne pour chaque niveau, puis le calcul du rapport signal/bruit (S/N), utilisé pour mesurer la robustesse ; ce rapport est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_{Pi}^2} \right) \quad (3-7)$$

Avec : E_{Pi} énergie absorbée mesurée pour chaque expérience
 n nombre de répétitions

L'optimal est obtenu pour le rapport signal/bruit le plus élevé.

3.5.1 Test de traction

Pour optimiser la limite élastique (σ_e), on a utilisé six niveaux de la fraction massique de fibres de Diss comme indiquer au tableau 3.4, où sont indiqués aussi les rapports S/N correspondants. Comme exemple, le rapport S/N du premier niveau ($\approx 0\%$) est calculer comme suit :

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{3} \left(\frac{1}{25.0463^2} + \frac{1}{23.1638^2} + \frac{1}{26.6963^2} \right) \right) = 27.82$$

Tableau 3.4 : Niveaux de fraction massique pour les résultats des limites de résistance élastiques et rapports S/N correspondants.

N°	Fraction massique de fibres W_D [%]	Données (σ_e) [MPa]	Rapport S/N
01	$\approx 0\%$	25.0463 / 23.1638 / 26.6963	27.82
02	$\approx 6\%$	39.1088 / 38.8650 / 42.7913	31.98
03	$\approx 12\%$	43.4288 / 53.8388 / 43.8338 / 50.1600	32.89
04	$\approx 18\%$	44.3190 / 48.2820 / 47.0970 / 58.6763	33.45
05	$\approx 24\%$	53.8170 / 61.8060 / 67.4738 / 70.2375	35.67
06	$\approx 28\%$	62.2013 / 63.9863 / 50.8463 / 59.6138	35.12

On remarque pour la résistance élastique que le rapport S/N augmente avec l'augmentation de la fraction massique de fibres W_D . Le niveau optimal pour maximiser la limite élastique est 24% de fibres, avec un rapport S/N de 35.67.

Pour optimiser le module de Young (E), on a également utilisé six niveaux de la fraction massique de fibres de Diss (les mêmes) comme indiquer au tableau 3.5, où sont indiqués aussi les rapports S/N correspondants.

D'après ces résultats, on remarque une augmentation du rapport S/N avec l'augmentation de la fraction massique de fibres W_D , mais atteignant un plateau autour de 24%. Pour ce niveau, un rapport S/N max est enregistré (14.25).

Donc, le niveau optimal est 24% de fibres, ce qui suggère que ce pourcentage offre un bon compromis entre rigidité et résistance. Rappelons qu'une limite élastique élevée signifie que le matériau peut supporter des charges importantes sans se déformer de manière permanente, le temps qu'un module de Young élevé signifie que le matériau est rigide et se déforme peu sous charge.

Tableau 3.5 : Niveaux de fraction massique pour les résultats des modules de Young et rapports S/N correspondants.

N°	Fraction massique de fibres W_D [%]	Données (E) [GPa]	Rapport S/N
01	$\approx 0\%$	0.4646 / 0.4397 / 0.5036	6.58
02	$\approx 6\%$	0.7625 / 0.7174 / 0.7789	12.29
03	$\approx 12\%$	1.0757 / 0.9905 / 1.0497 / 0.8905	13.87
04	$\approx 18\%$	1.0324 / 0.9191 / 1.0465 / 1.0229	13.92
05	$\approx 24\%$	1.0899 / 1.1504 / 1.0031 / 1.0904	14.25
06	$\approx 28\%$	0.9608 / 0.9068 / 1.0294 / 1.0908	13.89

Dans ce cas, 24% de fibres de Diss optimise à la fois les deux propriétés, ce qui est idéal pour des applications structurales où la résistance et la rigidité sont cruciales.

3.5.2 Test de résilience

On a choisi utiliser six niveaux pour la fraction massique de fibres de Diss :

0% $\xleftrightarrow{\text{Niveau 1}}$ 5% $\xleftrightarrow{\text{Niveau 2}}$ 10% $\xleftrightarrow{\text{Niveau 3}}$ 15% $\xleftrightarrow{\text{Niveau 4}}$ 20% $\xleftrightarrow{\text{Niveau 5}}$ 25% $\xleftrightarrow{\text{Niveau 6}}$ 30%

Les rapports S/N pour chaque niveau sont indiqués au tableau suivant :

Tableau 3.6 : Niveaux de fraction massique pour les résultats des essais d'impact et rapports S/N correspondant.

N°	Fraction massique de fibres W_D [%]	Données (E_P) [J]	Rapport S/N
01	0% - 5%	0.66 / 0.82 / 0.54 / 0.50 / 1.09 / 0.66 / 0.67 / 0.72 / 0.85 / 0.99 / 1.09 / 1.14	10.5
02	5% - 10%	0.85 / 1.10 / 1.05 / 1.11	12.3
03	10% - 15%	1.20 / 1.91 / 1.15 / 1.50 / 2.32 / 1.94 / 2.20 / 2.23	14.2
04	15% - 20%	2.15 / 2.27 / 2.10 / 2.44 / 2.05	15.8
05	20% - 25%	2.90 / 3.05 / 3.01 / 2.75 / 2.54 / 2.41 / 2.75	16.5
06	25% - 30%	3.05 / 3.39 / 2.72 / 3.25 / 3.50 / 3.21 / 2.93 / 3.28	17.0

Il est clair que le niveau 6 (entre 25% et 30% de fibres de Diss) donne le rapport S/N le plus élevé, indiquant que c'est le niveau optimal pour maximiser l'énergie d'impact absorbée, ce

qui est conforme avec les résultats de l'analyse précédente ou en a conclu qu'une fraction massique plus de 25% en fibres de Diss assure une meilleure résistance aux chocs.

3.6 Conclusion

Cette étude révèle que les fibres de Diss, grâce à leur rugosité et leur faible densité (0.82 g/mL), améliorent significativement les propriétés mécaniques de l'époxy (amélioration du module d'Young à plus de 128%, de la résistance limite à plus de 160%, et une énergie absorbée lors des chocs dépassant $3J$ alors qu'on enregistre seulement $0.5J$ pour l'époxy seule). L'optimum à 25% en poids de fibres, identifié via la méthode de Taguchi, met en lumière un seuil critique au-delà duquel les performances se dégradent, probablement en raison de défauts d'interface. La disponibilité locale de la plante et son extraction peu coûteuse renforcent le potentiel industriel de ce biocomposite.

CONCLUSION GENERALE

Les composites à matrice polymère renforcés par des fibres naturelles représentent une alternative durable aux matériaux conventionnels, particulièrement dans les secteurs de la construction légère, de l'emballage et de l'automobile. Parmi ces fibres, celles de Diss se distinguent par leur faible densité, leur bonne ténacité spécifique et leur faible coût. Lorsqu'elles sont combinées à une matrice en résine époxy, elles forment un composite dont le comportement mécanique dépend fortement de l'orientation des fibres et ayant une bonne adhérence à l'interface fibre-matrice favorisée par la rugosité naturelle des fibres de Diss.

Cette thèse a démontré le potentiel des fibres de Diss (*Ampelodesmos mauritanicus*) comme renfort écologique pour des biocomposites performants. Nos travaux expérimentaux et numériques ont permis de caractériser le comportement mécanique d'un composite Diss/époxy soumis à un chargement de traction, révélant des propriétés remarquables :

- Un module d'Young amélioré de 128% (1.30 GPa) pour seulement 25 à 26% de charge en fibres par rapport à l'époxy seule (0.57 GPa),
- Une limite de la résistance mécanique amélioré de 160% (passée de 25 MPa pour l'époxy seule à 65 MPa pour une fraction massique $\sim 26\%$)
- Une énergie d'impact croissante avec la teneur en fibres, témoignant d'une excellente résistance aux chocs (dépassant 3 J le temps que l'époxy seule enregistre seulement 0.5 J pour une fraction massique $\sim 26\%$),
- Une faible densité (1.14 g/cm^3) adaptée aux applications nécessitant une légèreté.

Ces résultats valident l'hypothèse selon laquelle la rugosité des fibres de Diss favorise une adhérence renforcée, contribuant ainsi à l'amélioration des performances mécaniques globales du biocomposite.

En plus de constituer une ressource abondante et renouvelable dans la région méditerranéenne, ce biocomposite bénéficie d'un procédé d'extraction à la fois simple et peu

coûteux. De plus, sa biodégradabilité est nettement améliorée par rapport à celle des composites synthétiques, ce qui renforce son intérêt écologique.

De par sa nature végétale, il présente nécessairement une sensibilité possible à l'humidité, mais la matrice époxy (hydrophobe de nature) peut servir comme isolant afin d'éviter la dégradation des fibres à cause de l'humidité.

En conclusion, cette étude positionne les composites à base de fibres de Diss comme une alternative crédible aux matériaux traditionnels dans des secteurs exigeants comme l'automobile, l'aéronautique ou les emballages techniques. Leur combinaison unique de performances mécaniques, de légèreté et d'écocompatibilité répond parfaitement aux enjeux actuels d'économie et de développement durable.

Les résultats obtenus ouvrent la voie à de nouvelles recherches sur l'optimisation de ces matériaux et leur intégration dans des applications industrielles concrètes, contribuant ainsi à la transition vers une ingénierie plus respectueuse de l'environnement, à titre d'exemple :

- Etude de l'effet des traitements de surface sur les propriétés des fibres et leur adhérence à la matrice,
- Etude de l'effet de la longueur des fibres et leur orientation sur les caractéristiques mécaniques,
- Optimisation des procédés de fabrication pour une industrialisation à plus grande échelle.
- Etude du comportement en conditions réelles (vieillesse, fatigue),
- Extension à des architectures hybrides (combinaison avec d'autres fibres naturelles),
- Analyse du cycle de vie complet pour valider le bénéfice environnemental.

Références

- [1] OCDE, *Perspectives mondiales des plastiques: Scénarios d'action à l'horizon 2060*. Éditions OCDE, 2023. doi: 10.1787/c5abcbb1-fr.
- [2] M. Bhong *et al.*, « Review of composite materials and applications », *Mater. Today Proc.*, oct. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.10.026.
- [3] Z. S. Mazhandu, E. Muzenda, T. A. Mamvura, M. Belaid, et T. Nhubu, « Integrated and Consolidated Review of Plastic Waste Management and Bio-Based Biodegradable Plastics: Challenges and Opportunities », *Sustainability*, vol. 12, n° 20, Art. n° 20, janv. 2020, doi: 10.3390/su12208360.
- [4] L. Gebrehiwet, E. Abate, Y. Negussie, T. Teklehaymanot, et E. Abeselom, « Application Of Composite Materials In Aerospace & Automotive Industry:Review », mars 2023, doi: 10.35629/5252-0503697723.
- [5] I. Elfaleh *et al.*, « A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials », *Results Eng.*, vol. 19, juill. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101271.
- [6] S. Shinoj, R. Visvanathan, et S. Panigrahi, « Towards industrial utilization of oil palm fibre: Physical and dielectric characterization of linear low density polyethylene composites and comparison with other fibre sources », *Biosyst. Eng.*, vol. 106, n° 4, p. 378-388, août 2010, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2010.04.008.
- [7] C. Baley, *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. Ed. Techniques Ingénieur, 2005.
- [8] E. Sassoni, S. Manzi, A. Motori, M. Montecchi, et M. Canti, « Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization », *Energy Build.*, vol. 77, p. 219-226, juill. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.033.
- [9] R. B. Deo, J. H. Starnes, et R. C. Holzwarth, « Low-Cost Composite Materials and Structures for Aircraft Applications », 2003.
- [10] J. Komornicki, « Polymer composites for automotive sustainability », 2017.

-
- [11] P. Feraboli et A. Masini, « Development of carbon/epoxy structural components for a high performance vehicle », *Compos. Part B Eng.*, vol. 35, n° 4, p. 323-330, janv. 2004, doi: 10.1016/j.compositesb.2003.11.010.
- [12] J.-M. Berthelot, *Matériaux composites - Comportement mécanique et analyse des structures*, Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés. Le Mans, France, 2010.
- [13] M. F. Ashby *et al.*, « Technology of the 1990s: Advanced Materials and Predictive Design [and Discussion] », *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, vol. 322, n° 1567, p. 393-407, 1987.
- [14] H. Arribart et E. Le Bourhis, « Glass », in *Between Nature and Society*, WORLD SCIENTIFIC, 2021, p. 21-39. doi: 10.1142/9789811251757_0003.
- [15] B. Castanié *et al.*, « Wood and plywood as eco-materials for sustainable mobility: A review », *Compos. Struct.*, vol. 329, p. 117790, févr. 2024, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117790.
- [16] A. M. Hussein, F. S. Madkour, H. M. Afifi, M. Abdel-Ghani, et M. Abd Elfatah, « Comprehensive study of an ancient Egyptian foot case cartonnage using Raman, ESEM-EDS, XRD and FTIR », *Vib. Spectrosc.*, vol. 106, p. 102987, janv. 2020, doi: 10.1016/j.vibspec.2019.102987.
- [17] Vitruvius, *Vitruvius: « Ten Books on Architecture »*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. doi: 10.1017/CBO9780511840951.
- [18] J. W. Beever et Z. Pavlović, « The Modern Reproduction of a Mongol Era Bow Based on Historical Facts and Ancient Technology Research », *EXARC J.*, n° 2017/2, juin 2017.
- [19] J. Dong, K. Shi, Y. Zhang, Tenigeer, et Y. Yao, « Mechanism analysis of ancient Chinese crossbows », *Mech. Sci.*, vol. 11, n° 2, p. 437-445, nov. 2020, doi: 10.5194/ms-11-437-2020.
- [20] J. Radić, A. Kindij, et A. Mandić Ivanković, « HISTORY OF CONCRETE APPLICATION IN DEVELOPMENT OF CONCRETE AND HYBRID ARCH BRIDGES », juill. 2008.
- [21] L. H. Baekeland, « Method of making insoluble products of phenol and formaldehyde », US942699A, 7 décembre 1909
-

-
- [22] S. Games, « Method of making glass wool », US2175225A, 10 octobre 1939
- [23] W. Audra, « Nylon: A Revolution in Textiles », *Science History Institute*.
- [24] R. Bacon, « Filamentary graphite and method for producing the same », US2957756A, 25 octobre 1960
- [25] H. Blades, « Dry jet wet spinning process », US3767756A, 23 octobre 1973
- [26] K. K. Chawla, « Glass Fibers », in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Oxford: Elsevier, 2001, p. 3541-3545. doi: 10.1016/B0-08-043152-6/00630-6.
- [27] A. Cevahir, « Glass fibers », in *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, 2017, p. 99-121. doi: 10.1016/B978-0-08-101871-2.00005-9.
- [28] Q. Zu, M. Solvang, et H. Li, « Commercial Glass Fibers », in *Fiberglass Science and Technology: Chemistry, Characterization, Processing, Modeling, Application, and Sustainability*, H. Li, Éd., Cham: Springer International Publishing, 2021, p. 1-87. doi: 10.1007/978-3-030-72200-5_1.
- [29] « Securite dans l'utilisation des fibres minerales et synthetiques », Bureau international du travail, Genève, 64, déc. 1990.
- [30] C. Roux et J. Robertson, « FIBERS | Types », p. 838-854, janv. 2000, doi: 10.1006/rwfs.2000.0513.
- [31] M. Puttegowda, S. M. Rangappa, M. Jawaidd, P. Shivanna, Y. Basavegowda, et N. Saba, « Potential of natural/synthetic hybrid composites for aerospace applications », in *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, M. Jawaidd et M. Thariq, Éd., in Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. , Woodhead Publishing, 2018, p. 315-351. doi: 10.1016/B978-0-08-102131-6.00021-9.
- [32] K. Shirvanimoghaddam *et al.*, « Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 92, p. 70-96, janv. 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.10.032.
- [33] A. R. Pereira, J. C. P. de Souza, R. M. Iost, F. C. P. F. Sales, et F. N. Crespilho, « Application of carbon fibers to flexible enzyme electrodes », *J. Electroanal. Chem.*, vol. 780, p. 396-406, nov. 2016, doi: 10.1016/j.jelechem.2016.01.004.
-

-
- [34] M. Menini *et al.*, « Biological and mechanical characterization of carbon fiber frameworks for dental implant applications », *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 70, p. 646-655, janv. 2017, doi: 10.1016/j.msec.2016.09.047.
- [35] C. Méjean *et al.*, « Electromagnetic absorber composite made of carbon fibers loaded epoxy foam for anechoic chamber application », *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 220, p. 59-65, juin 2017, doi: 10.1016/j.mseb.2017.03.009.
- [36] H. Raghubanshi, E. D. Dikio, et E. B. Naidoo, « The properties and applications of helical carbon fibers and related materials: A review », *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 44, p. 23-42, déc. 2016, doi: 10.1016/j.jiec.2016.08.023.
- [37] S. Yang, Z. Zhu, F. Wei, et X. Yang, « Carbon nanotubes / activated carbon fiber based air filter media for simultaneous removal of particulate matter and ozone », *Build. Environ.*, vol. 125, p. 60-66, nov. 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.08.040.
- [38] Q. Han, Z. Yi, F. Wang, Y. Wu, et L. Wang, « Preparation of bamboo carbon fiber and sandwich-like bamboo carbon fiber@SnO₂@carbon composites and their potential application in structural lithium-ion battery anodes », *J. Alloys Compd.*, vol. 709, p. 227-233, juin 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2017.03.141.
- [39] J. M. Moreno-Maroto, B. González-Corrochano, J. Alonso-Azcárate, L. Rodríguez, et A. Acosta, « Manufacturing of lightweight aggregates with carbon fiber and mineral wastes », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 83, p. 335-348, oct. 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.08.001.
- [40] E. Kowsari, V. Haddadi-Asl, F. B. Ajdari, et J. Hemmat, « Chapter 6 - Aramid fibers composites to innovative sustainable materials for biomedical applications », in *Materials for Biomedical Engineering*, V. Grumezescu et A. M. Grumezescu, Éd., Elsevier, 2019, p. 173-204. doi: 10.1016/B978-0-12-816872-1.00006-6.
- [41] C. Teng, H. Li, J. Liu, H. Gu, H. Kong, et M. Yu, « Effect of High Molecular Weight PPTA on Liquid Crystalline Phase and Spinning Process of Aramid Fibers », *Polymers*, vol. 12, n° 5, Art. n° 5, mai 2020, doi: 10.3390/polym12051206.
- [42] S. Prashanth, K.M. Subbaya, K.S. Nithin, et S. Sachhidananda, « Fiber Reinforced Composites - A Review », *J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 06, janv. 2017, doi: 10.4172/2169-0022.1000341.
-

-
- [43] N. P. Sahu, D. K. Khande, G. C. Patel, et P. Sen, « Study On Aramid Fibre and Comparison With Other Composite Materials », 2015.
- [44] F. Wawner, « Boron and Silicon Carbide Fibers (CVD) », in *Comprehensive Composite Materials*, 2000, p. 85-105. doi: 10.1016/B0-08-042993-9/00061-9.
- [45] L. Tang, J. Zhang, Y. Tang, J. Kong, T. Liu, et J. Gu, « Polymer matrix wave-transparent composites: A review », *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 75, p. 225-251, juin 2021, doi: 10.1016/j.jmst.2020.09.017.
- [46] OECD, « Plastics use by polymer ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/data/7a3d070a-en>
- [47] *Plastiques — Symboles et termes abrégés — Polymères de base et leurs caractéristiques spéciales*, ISO 1043-1:2011, Suisse., 2011. Consulté le: 1 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/50590.html>
- [48] S. E. M. Selke et J. D. Culter, *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations*, 3^e éd. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. doi: 10.3139/9783446437197.
- [49] A. A. Adelodun, « Plastic Recovery and Utilization: From Ocean Pollution to Green Economy », *Front. Environ. Sci.*, vol. 9, juill. 2021, doi: 10.3389/fenvs.2021.683403.
- [50] H. Maddah, « Polypropylene as a Promising Plastic: A Review », *2163-1352*, vol. 2016, p. 1-11, janv. 2016, doi: 10.5923/j.ajps.20160601.01.
- [51] M. F. Ashby, « Chapter 15 - Material profiles », in *Materials and the Environment (Second Edition)*, M. F. Ashby, Éd., Boston: Butterworth-Heinemann, 2013, p. 459-595. doi: 10.1016/B978-0-12-385971-6.00015-4.
- [52] R. Giesa et H.-W. Schmidt, « High-temperature Stable Polymers », in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, K. H. J. Buschow, R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilshner, E. J. Kramer, S. Mahajan, et P. Veyssière, Éd., Oxford: Elsevier, 2001, p. 3803-3806. doi: 10.1016/B0-08-043152-6/00677-X.
- [53] H. Menana, B. Douine, K. Berger, J. L v  que, et M. Hinaje, « Caractérisation électromagnétique des matériaux conducteurs non conventionnels », présenté   Symposium de Génie  lectrique (SGE 2016), Grenoble, France, juin 2016.
- [54] M. Akay, *An introduction to polymer-matrix composites*. Bookboon.com, 2013.
-

-
- [55] P. Cognard, « Résistance chimique et à la corrosion des composites », *Corros. Vieil.*, juin 2004, doi: 10.51257/a-v1-cor500.
- [56] M. Elnashar et S. Karakus, « Introductory Chapter: Introduction to Biocomposites – New Insights », 2023. doi: 10.5772/intechopen.109980.
- [57] T. Manu, A. R. Nazmi, B. Shahri, N. Emerson, et T. Huber, « Biocomposites: A review of materials and perception », *Mater. Today Commun.*, vol. 31, p. 103308, juin 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103308.
- [58] S. Kiratli, « Advanced Biocomposites: Processing, Characterization and Applications », *Int. J. Adv. Nat. Sci. Eng. Res.*, vol. 7, n° 3, Art. n° 3, avr. 2023, doi: 10.59287/ijanser.390.
- [59] N. K. Faheed, « Advantages of natural fiber composites for biomedical applications: a review of recent advances », *Emergent Mater.*, vol. 7, n° 1, p. 63-75, févr. 2024, doi: 10.1007/s42247-023-00620-x.
- [60] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, et M. Sain, « Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites », *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 299, n° 1, p. 9-26, 2014, doi: 10.1002/mame.201300008.
- [61] A. Gholampour et T. Ozbakkaloglu, « A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications », *J. Mater. Sci.*, vol. 55, n° 3, p. 829-892, janv. 2020, doi: 10.1007/s10853-019-03990-y.
- [62] S. Parbin, N. K. Waghmare, S. K. Singh, et S. Khan, « Mechanical properties of natural fiber reinforced epoxy composites: A review », *Procedia Comput. Sci.*, vol. 152, p. 375-379, janv. 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.05.003.
- [63] R. Scaffaro, A. Maio, E. F. Gulino, G. Alaimo, et M. Morreale, « Green Composites Based on PLA and Agricultural or Marine Waste Prepared by FDM », *Polymers*, vol. 13, n° 9, Art. n° 9, janv. 2021, doi: 10.3390/polym13091361.
- [64] P. Evon, « Utilisation des graisses, gélatines et collagènes de ruminants en alimentation animale », Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort, Avis ANSES/FGE/0037, mai 2020.
- [65] M. Nouri, « Développement d'éléments en biocomposite à base de fibre végétale pour la réhabilitation énergétique des bâtiments. », phdthesis, École centrale de Nantes, 2020.
-

-
- [66] S. Iwamoto, W. Kai, A. Isogai, et T. Iwata, « Elastic Modulus of Single Cellulose Microfibrils from Tunicate Measured by Atomic Force Microscopy », *Biomacromolecules*, vol. 10, n° 9, p. 2571-2576, sept. 2009, doi: 10.1021/bm900520n.
- [67] J. Page, « Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée », 2017.
- [68] T. Nilsson et P. J. Gustafsson, « Influence of dislocations and plasticity on the tensile behaviour of flax and hemp fibres », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, n° 7, p. 1722-1728, juill. 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.01.018.
- [69] A. Roudier, « Analyse multi-échelle du comportement hygro-mécanique des fibres de lin », phdthesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2012.
- [70] E. Richely, A. Bourmaud, V. Placet, S. Guessasma, et J. Beaugrand, « A critical review of the ultrastructure, mechanics and modelling of flax fibres and their defects », *Prog. Mater. Sci.*, vol. 124, p. 100851, févr. 2022, doi: 10.1016/j.pmatsci.2021.100851.
- [71] H. A. Begum, T. R. Tanni, et M. A. Shahid, « Analysis of Water Absorption of Different Natural Fibers », *J. Text. Sci. Technol.*, vol. 7, n° 4, Art. n° 4, sept. 2021, doi: 10.4236/jtst.2021.74013.
- [72] M. S. Sureshkumar, V. Vanchinathan, G. Sabareeshwaran, et P. Sivarajan, « Hydrophilicity in natural fibers – A mini review », *AIP Conf. Proc.*, vol. 2327, n° 1, p. 020030, févr. 2021, doi: 10.1063/5.0039427.
- [73] V. Fiore, « Natural Fibres and Their Composites », *Polymers*, vol. 12, n° 10, p. 2380, oct. 2020, doi: 10.3390/polym12102380.
- [74] Q. Wang *et al.*, « Recent Progress on Moisture Absorption Aging of Plant Fiber Reinforced Polymer Composites », *Polymers*, vol. 15, n° 20, Art. n° 20, janv. 2023, doi: 10.3390/polym15204121.
- [75] J. S. S. Neto, H. F. M. de Queiroz, R. A. A. Aguiar, et M. D. Banea, « A Review on the Thermal Characterisation of Natural and Hybrid Fiber Composites », *Polymers*, vol. 13, n° 24, p. 4425, déc. 2021, doi: 10.3390/polym13244425.
- [76] M. Asim *et al.*, « Thermal stability of natural fibers and their polymer composites », *Iran. Polym. J.*, vol. 29, n° 7, p. 625-648, juill. 2020, doi: 10.1007/s13726-020-00824-6.
-

-
- [77] J. L. Thomason et J. L. Rudeiros-Fernández, « Thermal degradation behaviour of natural fibres at thermoplastic composite processing temperatures », *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 188, p. 109594, juin 2021, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109594.
- [78] M. M. Kabir, M. Y. Alhaik, S. H. Aldajah, K. T. Lau, H. Wang, et M. M. Islam, « Effect of Hemp Fibre Surface Treatment on the Fibre-Matrix Interface and the Influence of Cellulose, Hemicellulose, and Lignin Contents on Composite Strength Properties », *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2021, n° 1, p. 9753779, 2021, doi: 10.1155/2021/9753779.
- [79] M. Grégoire, « Extraction des fibres de chanvre pour des composites structuraux - Optimisation du potentiel mécanique des fibres pour des applications concernant des matériaux composites 100% bio-sourcés », phdthesis, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2021.
- [80] K. L. Pickering, G. W. Beckermann, S. N. Alam, et N. J. Foreman, « Optimising industrial hemp fibre for composites », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, n° 2, p. 461-468, févr. 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2006.02.020.
- [81] B. K. Das, P. K. Ray, et A. C. Chakravarty, « The Properties of Jute Fibres at Different Stages of Plant Growth », *J. Text. Inst.*, vol. 74, n° 6, p. 367-373, nov. 1983, doi: 10.1080/00405008308631693.
- [82] Y. Wu, C. Xia, L. Cai, A. C. Garcia, et S. Q. Shi, « Development of natural fiber-reinforced composite with comparable mechanical properties and reduced energy consumption and environmental impacts for replacing automotive glass-fiber sheet molding compound », *J. Clean. Prod.*, vol. 184, p. 92-100, mai 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.257.
- [83] T. Sullins, S. Pillay, A. Komus, et H. Ning, « Hemp fiber reinforced polypropylene composites: The effects of material treatments », *Compos. Part B Eng.*, vol. 114, p. 15-22, avr. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.02.001.
- [84] N. Lu, S. Oza, et I. Ferguson, « Effect of Alkali and Silane Treatment on the Thermal Stability of Hemp Fibers as Reinforcement in Composite Structures », *Adv. Mater. Res.*, vol. 415-417, p. 666-670, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.415-417.666.
- [85] J. T. Oh, J. H. Hong, Y. Ahn, et H. Kim, « Reliability improvement of hemp based bio-composite by surface modification », *Fibers Polym.*, vol. 13, n° 6, p. 735-739, juill. 2012, doi: 10.1007/s12221-012-0735-2.
-

-
- [86] M. S. Islam, K. L. Pickering, et N. J. Foreman, « Influence of alkali fiber treatment and fiber processing on the mechanical properties of hemp/epoxy composites », *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 119, n° 6, p. 3696-3707, 2011, doi: 10.1002/app.31335.
- [87] M. Ramesh, L. Rajeshkumar, et V. Bhuvaneswari, « Leaf fibres as reinforcements in green composites: a review on processing, properties and applications », *Emergent Mater.*, vol. 5, n° 3, p. 833-857, juin 2022, doi: 10.1007/s42247-021-00310-6.
- [88] S. S. Kamath, D. Sampathkumar, et B. Bennehalli, « A review on natural areca fibre reinforced polymer composite materials », *Ciênc. Tecnol. Mater.*, vol. 29, n° 3, p. 106-128, sept. 2017, doi: 10.1016/j.ctmat.2017.10.001.
- [89] G. S. Mann, L. P. Singh, P. Kumar, et S. Singh, « Green composites: A review of processing technologies and recent applications », *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 33, n° 8, p. 1145-1171, août 2020, doi: 10.1177/0892705718816354.
- [90] A. Karimah *et al.*, « A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations », *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 13, p. 2442-2458, juill. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.06.014.
- [91] « Future Fibres: Abaca », FAO. Consulté le: 14 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/abaca0/en/>
- [92] E. A. Simbaña, P. E. Ordóñez, Y. F. Ordóñez, V. H. Guerrero, M. C. Mera, et E. A. Carvajal, « 6 - Abaca: cultivation, obtaining fibre and potential uses », in *Handbook of Natural Fibres (Second Edition)*, R. M. Kozłowski et M. Mackiewicz-Talarczyk, Éd., in Woodhead Publishing Series in Textiles. , Woodhead Publishing, 2020, p. 197-218. doi: 10.1016/B978-0-12-818398-4.00008-6.
- [93] A. K. Sinha, S. Bhattacharya, et H. K. Narang, « Abaca fibre reinforced polymer composites: a review », *J. Mater. Sci.*, vol. 56, n° 7, p. 4569-4587, mars 2021, doi: 10.1007/s10853-020-05572-9.
- [94] F. Seculi, F. X. Espinach, F. Julián, M. Delgado-Aguilar, P. Mutjé, et Q. Tarrés, « Evaluation of the Interface Strength in the Abaca-Fiber-Reinforced Bio-Polyethylene Composites », *Polymers*, vol. 15, n° 12, Art. n° 12, janv. 2023, doi: 10.3390/polym15122686.
-

-
- [95] D. Araya-Gutiérrez, G. G. Monge, K. Jiménez-Quesada, D. Arias-Aguilar, et R. Q. Cordero, « Abaca: a general review on its characteristics, productivity, and market in the world », *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, vol. 76, n° 1, p. 1-12, 2023.
- [96] T. M. Loganathan *et al.*, « Physical, Thermal and Mechanical Properties of Areca Fibre Reinforced Polymer Composites — An Overview », *J. Bionic Eng.*, vol. 17, n° 1, p. 185-205, janv. 2020, doi: 10.1007/s42235-020-0015-6.
- [97] N. Uppal, A. Pappu, V. K. S. Gowri, et V. K. Thakur, « Cellulosic fibres-based epoxy composites: From bioresources to a circular economy », *Ind. Crops Prod.*, vol. 182, p. 114895, août 2022, doi: 10.1016/j.indcrop.2022.114895.
- [98] R. B. Ashok, C. V. Srinivasa, et B. Basavaraju, « A review on the mechanical properties of areca fiber reinforced composites », *Sci. Technol. Mater.*, vol. 30, n° 2, p. 120-130, mai 2018, doi: 10.1016/j.stmat.2018.05.004.
- [99] S. Chikkol Venkateshappa et K. N. Bharath, « Impact and Hardness properties of Areca fiber – Epoxy reinforced Composites », *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 2, p. 351-356, janv. 2011.
- [100] A. Banagar, S. V. Chikkol, et B. Bennehalli, « “Studies on physical and mechanical properties of untreated (raw) and treated areca leaf sheaths” », *Mater. Res. Innov.*, vol. 25, n° 7, p. 404-411, nov. 2021, doi: 10.1080/14328917.2020.1834747.
- [101] B. A. Praveena *et al.*, « Experimental Investigation on Density and Volume Fraction of Void, and Mechanical Characteristics of Areca Nut Leaf Sheath Fiber-Reinforced Polymer Composites », *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2022, n° 1, p. 6445022, 2022, doi: 10.1155/2022/6445022.
- [102] J. Payá, J. Monzó, M. V. Borrachero, M. M. Tashima, et L. Soriano, « 17 - Bagasse ash », in *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, R. Siddique et P. Cachim, Éd., in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. , Woodhead Publishing, 2018, p. 559-598. doi: 10.1016/B978-0-08-102156-9.00017-1.
- [103] M. J. Ndengue, M. Z. Ayissi, P. M. A. Noah, F. B. Ebanda, et A. Ateba, « Implementation and Evaluation of Certain Properties of a Polymer Matrix Composite Material Reinforced by Fibrous Residues of *Saccharum officinarum* in View of an Applicability Orientation », *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 09, n° 02, Art. n° 02, mars 2021, doi: 10.4236/jmmce.2021.92015.
-

-
- [104] R. S. Chen, Y. H. Chai, E. U. Olugu, et S. Ahmad, « Characterization of post-consumer HDPE/sugarcane bagasse biocomposites », *Mater. Today Proc.*, vol. 51, p. 1410-1414, janv. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.541.
- [105] X. Gao, D. Zhu, S. Fan, M. Z. Rahman, S. Guo, et F. Chen, « Structural and mechanical properties of bamboo fiber bundle and fiber/bundle reinforced composites: a review », *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 19, p. 1162-1190, juill. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.05.077.
- [106] S. Ochi, « Mechanical properties of bamboo fiber bundle-reinforced bamboo powder composite materials », *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 80, n° 2, p. 263-275, avr. 2022, doi: 10.1007/s00107-021-01757-4.
- [107] T. Richmond *et al.*, « Physical and dynamic mechanical properties of continuous bamboo reinforcement/ bio-based epoxy composites », *Mater. Res. Express*, vol. 9, janv. 2022, doi: 10.1088/2053-1591/ac4c1a.
- [108] Y. Fan, « Study on Preparation and Application of Banana Fiber-Based Composites », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2539, p. 012093, juill. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2539/1/012093.
- [109] V. Chenrayan *et al.*, « Experimental and numerical assessment of the flexural response of banana fiber sandwich epoxy composite », *Sci. Rep.*, vol. 13, n° 1, p. 18156, oct. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-45460-1.
- [110] T. A. Nguyen et T. H. Nguyen, « Study on Mechanical Properties of Banana Fiber-Reinforced Materials Poly (Lactic Acid) Composites », *Int. J. Chem. Eng.*, vol. 2022, n° 1, p. 8485038, 2022, doi: 10.1155/2022/8485038.
- [111] T. A. Nguyen et T. H. Nguyen, « Banana Fiber-Reinforced Epoxy Composites: Mechanical Properties and Fire Retardancy », *Int. J. Chem. Eng.*, vol. 2021, n° 1, p. 1973644, 2021, doi: 10.1155/2021/1973644.
- [112] K. Z. M. A. Motaleb, A. Ahad, G. Laureckiene, et R. Milasius, « Innovative Banana Fiber Nonwoven Reinforced Polymer Composites: Pre- and Post-Treatment Effects on Physical and Mechanical Properties », *Polymers*, vol. 13, n° 21, Art. n° 21, janv. 2021, doi: 10.3390/polym13213744.
- [113] K. M. F. Hasan, P. G. Horváth, Z. Kóczán, et T. Alpár, « Thermo-mechanical properties of pretreated coir fiber and fibrous chips reinforced multilayered composites », *Sci. Rep.*, vol. 11, n° 1, p. 3618, févr. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-83140-0.
-

-
- [114] S. Onukwuli, C. Okpala, et F. Nnaemeka, « Review of benefits and limitations of coir fiber filler material in composites », *Int. J. Latest Technol. Manag. Appl. Sci.*, vol. 11, n° 5, p. 13-20, mai 2022.
- [115] L. F. Silva *et al.*, « Cotton incorporated Poly(lactic acid)/thermoplastic Starch Based Composites Used as Flexible Packing for Short Shelf Life Products », *Mater. Res.*, vol. 27, p. e20230366, mars 2024, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2023-0366.
- [116] M. M. Reza, H. A. Begum, et A. J. Uddin, « Potentiality of sustainable corn starch-based biocomposites reinforced with cotton filter waste of spinning mill », *Heliyon*, vol. 9, n° 5, p. e15697, avr. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15697.
- [117] Z. Kamble, B. K. Behera, R. Mishra, et P. K. Behera, « Influence of cellulosic and non-cellulosic particle fillers on mechanical, dynamic mechanical, and thermogravimetric properties of waste cotton fibre reinforced green composites », *Compos. Part B Eng.*, vol. 207, p. 108595, févr. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108595.
- [118] T. L. Hoang, « Etude de caractérisation du comportement de composites cimentaires incorporant des fibres courtes de lin », thesis, Caen, 2013.
- [119] K. Charlet, « Contribution à l'étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin : relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques », Theses, Université de Caen / Basse-Normandie, 2008.
- [120] B. Dal Pont, V. Gigante, L. Panariello, I. Canesi, L. Aliotta, et A. Lazzeri, « Investigation of Novel Flax Fiber/Epoxy Composites with Increased Biobased Content », *Polymers*, vol. 15, n° 19, Art. n° 19, janv. 2023, doi: 10.3390/polym15194030.
- [121] K. Mak et A. Fam, « Freeze-thaw cycling effect on tensile properties of unidirectional flax fiber reinforced polymers », *Compos. Part B Eng.*, vol. 174, p. 106960, oct. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.106960.
- [122] J. Rojas-Sandoval, « Agave fourcroydes (henequen) ». p. 3853, 6 novembre 2019. doi: 10.1079/cabicompendium.3853.
- [123] D. Trujillo-Ramírez, M. G. Bustos-Vázquez, A. Martínez-Velasco, et R. T. los Santos, « Integral use of Henequen (Agave fourcroydes): Applications and trends – a review », *Trop. Subtrop. Agroecosystems*, vol. 26, n° 2, mai 2023, doi: 10.56369/tsaes.4619.
- [124] F. X. Espinach, F. Julian, M. Alcalà, F. Vilaseca, F. Carrasco, et P. Mutjé, « Effective Tensile Strength Estimation of Natural Fibers through Micromechanical Models: The
-

-
- Case of Henequen Fiber Reinforced-PP Composites », *Polymers*, vol. 14, n° 22, p. 4890, nov. 2022, doi: 10.3390/polym14224890.
- [125] M. Torres, A. V. Rentería-Rodríguez, et E. A. Franco-Urquiza, « In Situ FBG Monitoring of a Henequen-Epoxy Biocomposite: From Manufacturing to Performance », *Chemistry*, vol. 4, n° 2, Art. n° 2, juin 2022, doi: 10.3390/chemistry4020028.
- [126] A. Majumder, F. Stochino, I. Farina, M. Valdes, F. Fraternali, et E. Martinelli, « Physical and mechanical characteristics of raw jute fibers, threads and diatons », *Constr. Build. Mater.*, vol. 326, p. 126903, avr. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126903.
- [127] A. L. L. Flores *et al.*, « Effect of Chemical Treatments on the Mechanical Properties of Jute/Polyester Composites », *Materials*, vol. 17, n° 10, p. 2320, mai 2024, doi: 10.3390/ma17102320.
- [128] E. Haq *et al.*, « Improved mechanical properties of environmentally friendly jute fibre reinforced metal laminate sandwich composite through enhanced interface », *Heliyon*, vol. 10, n° 2, janv. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24345.
- [129] M. Arya, E.-M. Malmek, T. K. Ecoist, J. Pettersson, M. Skrifvars, et P. Khalili, « Enhancing Sustainability: Jute Fiber-Reinforced Bio-Based Sandwich Composites for Use in Battery Boxes », *Polymers*, vol. 15, n° 18, Art. n° 18, janv. 2023, doi: 10.3390/polym15183842.
- [130] S. Shahinur, M. M. A. Sayeed, M. Hasan, A. S. M. Sayem, J. Haider, et S. Ura, « Current Development and Future Perspective on Natural Jute Fibers and Their Biocomposites », *Polymers*, vol. 14, n° 7, p. 1445, avr. 2022, doi: 10.3390/polym14071445.
- [131] A. Y. Zerga et M. Tahir, « Biobased Kapok Fiber Nano-Structure for Energy and Environment Application: A Critical Review », *Molecules*, vol. 27, n° 22, p. 8107, nov. 2022, doi: 10.3390/molecules27228107.
- [132] J. Baraniak et M. Kania-Dobrowolska, « Multi-Purpose Utilization of Kapok Fiber and Properties of Ceiba Pentandra Tree in Various Branches of Industry », *J. Nat. Fibers*, vol. 20, n° 1, p. 2192542, avr. 2023, doi: 10.1080/15440478.2023.2192542.
- [133] R. H. Sangalang, « Kapok Fiber- Structure, Characteristics and Applications: A Review », *Orient. J. Chem.*, vol. 37, n° 3, p. 513-523, juin 2021.
-

-
- [134] F. Luzi *et al.*, « Optimized extraction of cellulose nanocrystals from pristine and carded hemp fibres », *Ind. Crops Prod.*, vol. 56, p. 175-186, mai 2014, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.03.006.
- [135] E. Xanthopoulou, I. Chrysafi, P. Polychronidis, A. Zamboulis, et D. N. Bikiaris, « Evaluation of Eco-Friendly Hemp-Fiber-Reinforced Recycled HDPE Composites », *J. Compos. Sci.*, vol. 7, n° 4, Art. n° 4, avr. 2023, doi: 10.3390/jcs7040138.
- [136] L. Stelea *et al.*, « Characterisation of Hemp Fibres Reinforced Composites Using Thermoplastic Polymers as Matrices », *Polymers*, vol. 14, n° 3, Art. n° 3, janv. 2022, doi: 10.3390/polym14030481.
- [137] A. Kausar et I. Ahmad, « Hemp Fibres: Essentials, Composites or Nanocomposites and Technical Applications », *Nano-Horiz. J. Nanosci. Nanotechnologies*, vol. 2, p. 28 pages-28 pages, nov. 2023, doi: 10.25159/3005-2602/13835.
- [138] G. S. Deshmukh, « Advancement in hemp fibre polymer composites: a comprehensive review », *J. Polym. Eng.*, vol. 42, n° 7, p. 575-598, août 2022, doi: 10.1515/polyeng-2022-0033.
- [139] R. Boubaaya, M. Djendel, S. Benaniba, O. Kessal, et Z. Driss, « Impact of the loading of date palm fibers on the performances of mortars », *REM - Int. Eng. J.*, vol. 76, p. 159-168, avr. 2023, doi: 10.1590/0370-44672022760052.
- [140] K. Bendahane, M. Belkheir, A. Mokaddem, B. Doumi, et A. Boutaous, « Date and doum palm natural fibers as renewable resource for improving interface damage of cement composites materials », *Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 12, n° 1, p. 37, avr. 2023, doi: 10.1186/s43088-023-00374-9.
- [141] S. H. K. Bahrain *et al.*, « Morphological, Physical, and Mechanical Properties of Sugar-Palm (*Arenga pinnata* (Wurmb) Merr.)-Reinforced Silicone Rubber Biocomposites », *Materials*, vol. 15, n° 12, Art. n° 12, janv. 2022, doi: 10.3390/ma15124062.
- [142] L. Guettatfi, A. Hamouine, et K. Himouri, « Hydric behavior of adobes stabilized with quicklime, cement and date palm fibers », *MRS Adv.*, vol. 7, n° 28, p. 619-624, oct. 2022, doi: 10.1557/s43580-021-00203-0.
- [143] S. Benaniba, Z. Driss, M. Djendel, E. Raouache, et R. Boubaaya, « Thermo-mechanical characterization of a bio-composite mortar reinforced with date palm fiber », *J. Eng.*
-

-
- Fibers Fabr.*, vol. 15, p. 1558925020948234, janv. 2020, doi: 10.1177/1558925020948234.
- [144] W. Gallala, H. M. M. Khater, M. Souilah, K. Nouri, M. B. Regaya, et M. E. Gaied, « PRODUCTION OF LOW-COST BIOCOMPOSITE MADE OF PALM FIBERS WASTE AND GYPSUM PLASTER », *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 36, n° 2, Art. n° 2, avr. 2020, doi: 10.20937/RICA.53541.
- [145] R. L. Prabangkara et S. H. Susilo, « Exploring the Potential of Ramie Fiber Composites as Eco-friendly Materials for Medical Prostheses », *Asian J. Sci. Eng.*, vol. 2, n° 1, Art. n° 1, août 2023, doi: 10.51278/ajse.v2i1.677.
- [146] L. Prasad, P. Kapri, R. V. Patel, A. Yadav, et J. Winczek, « Physical and Mechanical Behavior of Ramie and Glass Fiber Reinforced Epoxy Resin-Based Hybrid Composites », *J. Nat. Fibers*, vol. 20, n° 2, p. 2234080, août 2023, doi: 10.1080/15440478.2023.2234080.
- [147] A. P. Wulandari *et al.*, « Tensile Strength Improvements of Ramie Fiber Threads through Combination of Citric Acid and Sodium Hypophosphite Cross-Linking », *Materials*, vol. 16, n° 13, Art. n° 13, janv. 2023, doi: 10.3390/ma16134758.
- [148] A. Wang, P. Yin, X. Liu, et G. Xian, « Hydrothermal Effect on Ramie-Fiber-Reinforced Polymer Composite Plates: Water Uptake and Mechanical Properties », *Polymers*, vol. 15, n° 14, Art. n° 14, janv. 2023, doi: 10.3390/polym15143066.
- [149] Y. Sun, L. Bao, C. Luo, A. Xu, et C. Chen, « Development of high-strength green composites based on ramie sliver and cellulose acetate resin », *Ind. Crops Prod.*, vol. 187, p. 115525, nov. 2022, doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115525.
- [150] S. Sembiring, P. Kusumaningrum, et F. Z. Anwar, « Sustainable Engineered Cementitious Composite using Natural Sisal and Coir Fibers », *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1245, n° 1, p. 012007, sept. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1245/1/012007.
- [151] A. C. G. da Silva *et al.*, « Influence of the addition of sisal fibers on the physical and mechanical properties of mortars », *MATEC Web Conf.*, vol. 403, p. 02007, 2024, doi: 10.1051/mateconf/202440302007.
- [152] C. Bintoro, V. Wuwung, S. Ninien, et Z. Y. A, « Improvement Mechanical Properties of Epoxy Composite Reinforced with Sisal, Ramie and Carbon Fibers », *IJFMR - Int. J. Multidiscip. Res.*, vol. 5, n° 4, août 2023, doi: 10.36948/ijfmr.2023.v05i04.5007.
-

-
- [153] H. A. Raslan, M. Y. Elnaggar, et E. S. Fathy, « Effect of gamma irradiation on the waste polyethylene/bagasse composites reinforced with flax and sisal fibers for use in wood applications », *J. Vinyl Addit. Technol.*, vol. 30, n° 1, p. 201-216, 2024, doi: 10.1002/vnl.22042.
- [154] M. G. Pathan *et al.*, « A Novel Composite Material (Agave sisalana), Sisal Fiber as a Reinforced Natural Fiber for Sustainable and Durable Concrete », *Curr. Mater. Sci.*, vol. 17, p. 1-12, doi: 10.2174/2666145417666230821162612.
- [155] D. G. dos Santos, A. G. B. de Lima, et P. de S. Costa, « The Effect of the Drying Temperature on the Moisture Removal and Mechanical Properties of Sisal Fibers », *Defect Diffus. Forum*, vol. 380, p. 66-71, 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.380.66.
- [156] F. Luzi *et al.*, « Valorization and extraction of cellulose nanocrystals from North African grass: *Ampelodesmos mauritanicus* (Diss) », *Carbohydr. Polym.*, vol. 209, p. 328-337, avr. 2019, doi: 10.1016/j.carbpol.2019.01.048.
- [157] A. Maghchiche, *Study of Some North African Grasses (Ampelodesma mauritanica and Esparto Grass)*. IntechOpen, 2017. doi: 10.5772/intechopen.70001.
- [158] M. Merzoud et M. F. Habita, « Elaboration of a Lignocellulosic Composite Formulated with a Local Resource: Diss as Infill in Structures Submitted to Seismic Actions », 2007, vol. 2, p. 410-415, doi: rjasci.2007.410.415.
- [159] M. Chenah et M. Amrani, « Physical and Chemical Characterization of *Ampelodesmos Mauritanicus* », in *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions*, A. Kallel, M. Ksibi, H. Ben Dhia, et N. Khélifi, Éd., Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 1235-1236. doi: 10.1007/978-3-319-70548-4_357.
- [160] B. Remila, I. Zembouai, L. Zaidi, M. Kaci, A. Kervoelen, et S. Bruzard, « Surface treatment effects on morphological and property enhancements of poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)/Diss fibers (*Ampelodesmos mauritanicus*) biocomposites », *Polym. Compos.*, oct. 2024, doi: 10.1002/pc.29113.
- [161] A. Abdelouahed, C. Kechkar, H. Hebhouh, M. Merzoud, et G. Boukhatem, « Enhancing the Performance and Durability of Eco-Friendly Mortar with Diss Fibers (*Ampelodesmos mauritanicus*) », *Rev. Compos. Matér. Avancés*, vol. 33, n° 4, p. 219-226, août 2023, doi: 10.18280/rcma.330402.
-

-
- [162] M. Nouri, M. Tahlaïti, et F. Grondin, « Effect of Chemical and Physical Treatments on Mechanical Properties of Diss Fibers-Based Biocomposites Materials », *J. Nat. Fibers*, vol. 20, n° 1, p. 2128148, avr. 2023, doi: 10.1080/15440478.2022.2128148.
- [163] N. Moussaoui *et al.*, « The impact of physicochemical treatments on the characteristics of *Ampelodesmos mauritanicus* plant fibers », *Cellulose*, vol. 30, n° 12, p. 7479-7495, août 2023, doi: 10.1007/s10570-023-05377-4.
- [164] R. Karek, M. Bouakba, M. khalfi, et Z. Abdallah, « Elaboration and Charpy Test of Bioplastics Reinforced by Renewable Fibers: Starch /Diss », *Int. J. Eng. Res. Afr.*, vol. 59, p. 77-87, 2022, doi: 10.4028/p-t62212.
- [165] T. Lakhemissi et S. Derfouf, « Effect of the Varying Percentage Diss Fiber on Mechanical Behaviour of the Based Polyester Bio-Composite », *Rev. Compos. Matér. Avancés*, vol. 31, p. 175-180, juin 2021, doi: 10.18280/rcma.310309.
- [166] Z. Touati, P. L. de Hoyos-Martinez, N. Belhaneche-Bensemra, et F. Charrier- El Bouhtoury, « Influence of Different Diss Fiber Treatments over the Properties of Poly Propylene/Recycled and Regenerated Low Density Polyethylene Based Biocomposites », *J. Polym. Environ.*, vol. 29, n° 1, p. 291-303, janv. 2021, doi: 10.1007/s10924-020-01877-7.
- [167] M. Nouri, M. Tahlaïti, F. Grondin, et R. Belarbi, « The Influence of Chemical and Thermal Treatments on the Diss Fiber Hygroscopic Behaviors », *J. Nat. Fibers*, vol. 19, n° 10, p. 3865-3878, déc. 2020, doi: 10.1080/15440478.2020.1848733.
- [168] M. Nouri, I. Griballah, M. Tahlaïti, F. Grondin, et J. Beaugrand, « Plant Extraction and Physicochemical Characterizations of Untreated and Pretreated Diss Fibers (*Ampelodesmos mauritanicus*) », *J. Nat. Fibers*, vol. 18, n° 8, p. 1083-1093, nov. 2019, doi: 10.1080/15440478.2019.1687062.
- [169] M. E. H. Bourahli et H. Osmani, « Chemical and Mechanical Properties of Diss (*Ampelodesmos mauritanicus*) Fibers », *J. Nat. Fibers*, vol. 10, n° 3, p. 219-232, juill. 2013, doi: 10.1080/15440478.2012.761115.
- [170] M. I. Zahidul, E. S. Ceyhun, et M. Syduzzaman, « Experimental investigation of mechanical properties of jute/hemp fibers reinforced hybrid polyester composites », *SPE Polym.*, vol. 5, n° 2, p. 192-205, 2024, doi: 10.1002/pls2.10119.
-

-
- [171] A. Alane, I. Zembouai, A. Benhamida, L. Zaidi, N. Touati, et M. Kaci, « Opuntia ficus indica fibers as reinforcement in PHBV biocomposites », *Mater. Today Proc.*, vol. 53, p. 218-222, janv. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.030.
- [172] A. Lekrine *et al.*, « Structural, thermal, mechanical and physical properties of Washingtonia filifera fibres reinforced thermoplastic biocomposites », *Mater. Today Commun.*, vol. 31, p. 103574, juin 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103574.
- [173] N. B. R. Legrand, M. Lucien, O. Pierre, B. E. Fabien, N. P. Marcel, et A. A. Jean, « Physico-Chemical and Thermal Characterization of a Lignocellulosic Fiber, Extracted from the Bast of Cola lepidota Stem », *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 8, n° 5, Art. n° 5, août 2020, doi: 10.4236/jmmce.2020.85024.
- [174] C. Baley, « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », *Plast. Compos.*, juill. 2020, doi: 10.51257/a-v3-am5130.
- [175] N. Doroudgarian, « High performance bio-based composites : mechanical and environmental durability », Doctoral thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2016. doi: 10.5821/dissertation-2117-96308.
- [176] L. F. Sierra Montes, M. A. Melaj, M. C. Lorenzo, L. Ribba, et M. A. Garcia, « Biodegradable Composite Materials Based on Cassava Starch and Reinforced with Topinambur (*Helianthus tuberosus*) Aerial Part Fiber », *Sustain. Polym. Energy*, vol. 2, n° 2, Art. n° 2, avr. 2024, doi: 10.35534/spe.2024.10004.
- [177] L. Ribba, M. C. Lorenzo, M. Tupa, M. Melaj, P. Eisenberg, et S. Goyanes, « Processing and Properties of Starch-Based Thermoplastic Matrix for Green Composites », in *Green Composites*, S. Thomas et P. Balakrishnan, Éd., Singapore: Springer, 2021, p. 63-133. doi: 10.1007/978-981-15-9643-8_4.
- [178] L. Darwish, M. T. El-Wakad, M. Farag, et M. Emara, « The Use of Starch Matrix-banana Fiber Composites for Biodegradable Maxillofacial Bone Plates », *Int. J. Math. Comput. Simul.*, vol. 15, p. 115-120, nov. 2021, doi: 10.46300/9102.2021.15.22.
- [179] Y. Zhang, « Preparation and characterization of medical gelatin matrix composites », *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 493, n° 1, p. 012118, mars 2019, doi: 10.1088/1757-899X/493/1/012118.
- [180] L. Zeng, W. Tao, J. Zhao, Y. Li, et R. Li, « Mechanical performance of a CFRP composite reinforced via gelatin-CNTs: A study on fiber interfacial enhancement and matrix
-

- enhancement », *Nanotechnol. Rev.*, vol. 11, n° 1, p. 625-636, janv. 2022, doi: 10.1515/ntrev-2022-0040.
- [181] N. S. Nazaruiddin et S. S. Jamari, « Effect on Thermal Properties of Nanocellulose Fibre (NCF) Reinforced Biodegradable Polyhydroxylalkanoates (PHA) Composite », *J. Chem. Eng. Ind. Biotechnol.*, vol. 7, n° 1, Art. n° 1, avr. 2021, doi: 10.15282/jceib.v7i1.6111.
- [182] E. M. Spiesz *et al.*, « Bacterially Produced, Nacre-Inspired Composite Materials », *Small*, vol. 15, n° 22, p. 1805312, 2019, doi: 10.1002/sml.201805312.
- [183] B. Cecen, « FDM-based 3D printing of PLA/PHA composite polymers », *Chem. Pap.*, vol. 77, n° 8, p. 4379-4386, août 2023, doi: 10.1007/s11696-023-02786-4.
- [184] R. Brunšek, D. Kopitar, I. Schwarz, et P. Marasović, « Biodegradation Properties of Cellulose Fibers and PLA Biopolymer », *Polymers*, vol. 15, n° 17, Art. n° 17, janv. 2023, doi: 10.3390/polym15173532.
- [185] E. Brancewicz-Steinmetz et J. Sawicki, « Bonding and Strengthening the PLA Biopolymer in Multi-Material Additive Manufacturing », *Materials*, vol. 15, n° 16, Art. n° 16, janv. 2022, doi: 10.3390/ma15165563.
- [186] M. Jałbrzykowski *et al.*, « Assessment of innovative PLA biopolymer compositions with plant waste fillers », *Eng. Fail. Anal.*, vol. 139, p. 106496, sept. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106496.
- [187] ASTM, « Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials », doi: 10.1520/D3039_D3039M-08.