

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des matériaux

Présenté par :

SAFER HANIA & GAUDI SOMIA

Thème

**ETUDES THEORIQUE ET PRATIQUE DE LA DECOHESION
INTERFACIALE RESINE/ FIBRE VEGETALE**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
ROUABHI YOUCEF	MCB	Président
ROKBI Mansour	MCA	Encadreur
LATRACHE MOHAMED	DOCTORANT	Examinateur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2021

سورة الاحقاف

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire. Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr ROKBI MANSOUR**, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

La présent étude a été réalisée au niveau du laboratoire de moulage au département de génie mécanique faculté de technologie l'Université Msila

Dédicaces

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire. Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail. un merci spécial mon dd pour ses relectures, ses corrections et son attention bienveillante dans ce travail.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie ma sœur , et mes frères, pour leurs encouragements. enfin, je remercie mes amis



saferhania

Remerciement.....	I
Dédicace	II
Sommaire	III
Liste tableau.	VIII
Liste figure	IX

CHAPIRE I

I. Introduction général	1
-------------------------------	---

CHAPIRE II Les matériaux composites

DEFINITION.....	4
CARACTERISTIQUES GENERALES.....	4
CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES	6
II. 3. 1. Classification suivant la forme des constituants	6
II. 3. 1. 1.Composites à fibres.....	6
1. 2. Composites à particules	6
II. 3. 2. Classification suivant la nature des constituants.....	6
FRACTIONS VOLUMIQUES ET MASSIQUES	7
II. 4. 1. Introduction.....	7
II. 4. 2 Fractions volumiques.....	7
II. 4. 3. Fractions massiques	8
II. 4. 4. Relations entre fractions volumiques et massiques	8
II. 4. 5. Présence de porosités.....	9
MISE EN OEUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES.....	10
II. 5. 1. Moulages sans pressio	10
II. 5. 1. 1. Moulage au contact.....	10
II. 5. 1. 2. Moulage par projection simultanée	11
2. Moulage sous vide.....	11
II. 5. 3. Moulage par compression.....	12

II. 5. 3. 1. Moulage par injection de résine	12
II. 5. 3. 2. Moulage par compression à froid.....	12
II. 5. 3. 3. Moulage par compression à chaud.....	12
II. 5. 3. 4. Moulage par injection	13
II. 5. 4. Moulage en continu	13
II. 5. 5. Moulage par pultrusion.....	14
II. 5. 6. Moulage par centrifugation.....	14
II. 5. 7 Moulage par enroulement filamentaire.....	15
II. 5. 7. 1. Principe.....	15
II. 5. 7. 2. Enroulement circonférentiel.....	15
II. 5. 7. 3. Enroulement hélicoïdal	15
II. 5. 7. 4. Enroulement polaire.....	16
II. 5. 7. 5. Mandrins	16
II. 5. 7. 6. Applications	17
II. 6. UTILISATION DE DEMI-PRODUITS.....	17
II. 6. 1. Introduction.....	17
II. 6. 2. Préimprégnés	17
II. 6. 2. 1. Principe	17
II. 6. 2. 2. Élaboration.....	17
II. 6. 2. 3. Intérêt des préimprégnés	18
II. 6. 2. 4. Mise en œuvre.....	18
II. 6. 3. Les compounds de moulage.....	18
II. 6. 3. 1. Généralités	18
II. 6. 3. 2. Principe	19
3. 3. Élaboration.....	19
II. 6. 3. 4. Mise en œuvre.....	20
II. 7. ARCHITECTURE DES MATÉRIAUX COMPOSITES	20
II. 7. 1. Introduction.....	20
II. 7. 2. Stratifiés	20
2. 1. Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels	21
II. 7. 2. 2. Structure générale d'un stratifié	24

II. 7. 3. Composites sandwiches	25
II. 7. 3. 1. Généralités	25
II. 7. 4. Autres architectures	26
II. 7. 4. 1. Plastiques renforcés	26
II. 7. 4. 2 Composites volumiques	26
II. 7. 5. Conséquences sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites	26

CHAPIRE III : Composites à base de fibres végétales

Fibres végétales	28
III.Introduction	28
Les fibres végétales	28
Présentation des fibres végétales.....	29
Fibres de jute. 29	
Fibres de chanvre 30	
Fibres de sisal	31
III .1.2.4. Fibres d'Alfa.....	32
III.1.2.5. Fibres de lin	32
III .1.2.6. Fibres de ramie	33
III.1.2.7. Production et disponibilité des fibres végétales	34
Structure d'une fibre végétale	35
La cellulose	36
Les hémicelluloses 37	
Les lignines 37	
Avantages et inconvénients des fibres végétales	39
Extraction des fibres végétales	40
Méthodes d'extraction des fibres.....	40
L'extraction mécanique	40

	• a.teillage	40
	• b.déflexion.....	41
	• c.laminage	41
	L'extraction chimique	41
	• a. Procédé Kraft.....	41
	• b. Procédé au bisulfite	41
	• c. Procédé acide.....	41
	• d. Procédé à la soude	42
	L'extraction biologique	42
	a. Le rouissage à terre.....	42
	b. Le rouissage à l'eau.....	42
	c. Par action microbienne.....	43
	III.3- Méthodes de caractérisation des composites à fibres végétales	43
Introduction	43	
	Caractéristiques mécaniques	43
Essai de traction	44	
	Caractéristiques Physiques et Mécaniques des Fibres Végétales.....	45
	Mécanisme d'endommagement dans un composite	48
	ENDOMMAGEMENT DES MATERIAUX COMPOSITES	48
	MICROFISSURATION, DECOHESION FIBRE-MATRICE	49
	FISSURATION MATRICIELLE.....	50
DELAMINAGE	51	
	Traitement des fibres végétales	56
	A. Traitements chimiques.....	56
	1. Généralité	56
	2. Traitement alcalin.....	56
	3. Acétylation	57
	4. Traitement par acide stéarique	57
	B. Les traitements physiques.....	57
	1. Traitement plasma	57
	2. Traitement corona	58
	3. Le traitement thermique de séchage.....	58

CHAPITRE IV Phase de transfert de charge dans un composite

IV.INTRODUCT.....	59
MODELE DE COX TRANSFERT DE CHARGE ELASTIQU	59
PROFILS DE CONTRAINTE DANS LA FIBRE ET A L'INTERFACE.....	60
• Equilibre des forces de cisaillement.....	60
• Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre	61

CHAPITRE V MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Introduction	64
Materiaux utilisées	64
Caractérisation des matériaux utilisés	64
La méthode de traitement d'alfa.....	64
L'essai de traction	69
V.5.1-Diagramme de traction.....	69
V.5.2.Machines d'essais	70
V.5.2.Machines d'essais	70

CHAPITRE VI Etude bibliographie

Test de micro-liaison.....	73
Réalisation des microgouttes	77
Résultats et interprétations.....	78
l'adhérence entre une fibre de lin (brut et traité à l'eau) et le PLLA	78
Conclusion.....	80
CONCLUSION GÈNIRALE	80
BIBLIOGRAPHE.....	81

LISTE DE TABLEAUX

Tableau II. 1. Exemples de matériaux composites, pris au sens large.4

CHAPIRE III : Composites à base de fibres végétales

Tableau III.1 : Composition chimique de certaines fibres végétales..... 39

Tableau III .2 présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales comme renfort dans les composites.40

Tableau III.2-7(a) : Les caractéristiques physiques des fibres végétales les plus utilisées46

Tableau III .3-7(b) : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales 46

CHAPIRE VI :Etude bibliographie

Tableau . IV.1. Propriétés de résistance au cisaillement interfacial chanvre/polypropylène de microbond..... 75

Tableau.VI.2. Récapitulatif de la géométrie et des propriétés mécaniques (L_e : Longueur de goutte enchâssée, D_g diamètre des gouttes, τ_{app} contrainte de cisaillement apparente et $\tau_{friction}$ contrainte de friction) des systèmes fibres de lin/PLLA Bruit et traité à l'eau 78

LISTE FIGURE

CHAPIRE II Les matériaux composites

Figure II. 1. Matériau composite.....	5
Fig.II. 1 : Principe du moulage au contact.....	10
Fig. II. 2 : Principe du moulage par projection simultanée	11
Fig. II. 3 : Moulage sous vide.....	11
Fig. II. 4 : Moulage par injection de résine	12
Fig. II. 5 : Principe du moulage par compression.....	12
Fig. II. 6 : Moulage par injection.....	13
Fig. II. 7 : Moulage en continu de plaques	13
Fig. II. 8 : Moulage en continu de panneaux ondulés	14
Fig. II. 9 : Moulage par pultrusion.	14
Fig. II. 10 : Moulage par centrifugation	15
F. II. 11 : Principe de l'enroulement circonférentiel.....	15
Fig. II. 12 : Principe de l'enroulement hélicoïdal	16
Fig. II. 13. Enroulement hélicoïdal continu	16
Fig. II. 14. Enroulement polaire.....	16
Fig. II. 15 : Schéma de principe de l'élaboration d'un préimprégné	18
Fig. II. 16 : Moulage par compression à partir d'un préimprégné	18
Fig. II. 17 : Différentes distributions des fibres dans les SMC.....	19
Fig. II. 19 : Principe d'élaboration d'un SMC-C/R.....	19
Fig. II. 20 : Moulage par compression à partir d'un compound	20
Fig. II. 21 : Constitution d'un stratifié	21
Fig. II. 22 : Désignation d'un stratifié.....	21
Fig. II. 23 : Convention de signe pour la désignation des stratifiés	21
Fig. II. 24 : Poutre sollicitée en flexion	24
Fig. II. 26 : Matériaux sandwiches à âmes creuses	25
Fig. II. 27 : Schéma d'étude du comportement mécanique d'une structure en matériau composite	27

CHAPIRE III : Composites à base de fibres végétales

Figure III. 1: Classification des fibres végétales.....	29
Figure III.2 : Le jute	30
Figure III.3 : Le chanvre.....	31
Figure III. 4 : Le sisal.	31
Figure III.5 : l'Alfa	32
Figure III.6 : Le lin.	33
Figure III.7 : La ramie	33
Figure 8 : Cultures mondiales de fibres primaires pendant les dernières decenies.	34
Figure III. 9 : Production mondiale de fibres végétales hors coton et bois	35
Figure III. 11 : Molécule de la cellulose.....	36
Figure III. 12: Structure d'un type de xyloglucane.....	37
Figure III.13 : Représentation schématique de la.	38
Figure III.14 : Structure des précurseurs de la lignine.....	39
Figure III. 15. Schéma de principe de l'essai de traction.....	44
Figure III .16. : Schématisation des fibres végétales	46
Figure III.17: Variation de la résistance en fonction du % de cellulose.....	47
Figure III.18. : Variation de la résistance en fonction de l'angle spiral	47
Figure III.19: courbe contrainte déformation de quelques fibres végétales.....	48
Fig. III.20. Fissure matricielle formée à partir de la coalescence des décohésions.....	50
Figure 21: Mécanismes d'endommagement observés dans un composite.....	52
Figure III. 23 : Concepts d'interphase et d'interface	54
Figure III.24 : Modes d'endommagements.....	55
Figure.III.25– Structure typique de la fibre lignocellulosique.....	56
Figure.III. 26– Acétylation avec ou sans catalyseur acide	57

CHAPIRE IV Phase de transfert de charge dans un composite

Figure IV.1. Volume Elémentaire Représentatif.....	59
Figure IV.2. Equilibre élastique de la matrice en cisaillement	60

Figure IV.3. Equilibre élastique d'une portion de fibre..... 61

Figure IV.4 : *Modèle de Cox -Profils de contrainte dans la fibre (σ) et à l'interface (τ)* 63

CHAPIRE V MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Figure.V.1: les étapes premier pour préparé les fibre d'alfa 65

Figure.V.2: les fibres d'alfa dans l'eau distillée 65

Figure.V.3: PH mètre 66

Figure.V.4 : Traitement thermique l'étuvage..... 66

Figure.V.5 : ajoute couche la résine a les fibres d'alfa 66

Figure.V.6. solution résine durcisseur 66

Figure.V.7: balance 66

Figure.V.8.: tapes avant le traction 68

Figure.V.9 : Schéma représentant 2 types différents de courbes de traction..... 70

Figure.V.10 : La machine de traction..... 71

Figure.V.11 : Principe de l'essai de traction 72

CHAPIRE VI Etude bibliographie

Figure VI.1.(a) schémas d'une microfibrille les différents canapés. (b) Structure cristalline de la cellulose constituant les microfibrilles (Baillie, 2004)..... 73

Figure IV.2. Montage utilisé pour réaliser le test de la goutte 73

Figure IV.3. Tracé typique de la force d'arrachement en fonction du déplacement 74

Figure IV.4.Micrographie SEM d'une microgoutte après un déplacement de 150 μ m sur fibre 76

Figure VI.5. A Microgoutte de PLA sur fibre unitaire de lin- B Comportement typique enregistré lors du déchaussement de système Lin/PLLA..... 78

Chapitre I :

Introduction général

Chapitre I Introduction général

Introduction général

Depuis leur avènement dans les années trente et jusqu'à nos jours, les matériaux composites ont fortement participé au développement de nos technologies. Grâce à eux, la consommation des véhicules de transport a été notablement réduite ; le nautisme s'est démocratisé, les voitures de courses sont devenues de plus en plus rapides et l'airbus A380 a pu prendre son envol. Les matériaux composites se démarquent par leur légèreté et leur facilité de mise en oeuvre. Leur résistance mécanique, physique et chimique offre un large éventail de possibilités en termes d'utilisation, de design, de géométrie et d'intégration de fonctions. S'adaptant parfaitement à toute sorte d'environnement, même les plus hostiles, ils s'intègrent totalement à notre quotidien à tel point qu'ils peuvent passer inaperçus.

L'apparition des fibres végétales dans les applications composites révolutionne peu à peu le paysage industriel, notamment dans l'automobile où le facteur environnement est une valeur forte. Les bio-composites envahissent peu à peu l'espace confort de nos véhicules à l'image de Mercedes qui équipe déjà ses Class A, M et R d'éléments en fibre naturelle comme les panneaux de porte ou les capots de roue de secours. Outre les valeurs écologiques, l'épuisement des ressources fossiles, l'augmentation de coût et des gravissimes atteintes à la santé, la valorisation des déchets ligno-cellulosiques s'avère une nécessité absolue. C'est dans ce sens que s'oriente notre contribution dont le thème est "**Valorisations des déchets comme constituants des bio-composites**". Notre travail consiste à utiliser des matériaux recyclés dans le but d'élaborer un nouveau matériau bio-composite dont les caractéristiques seront présentées dans ce mémoire.

Les matériaux nouveaux sont depuis toujours un axe de recherche et de développement des civilisations et plus récemment des sociétés modernes. Le développement des matériaux s'est accéléré au siècle dernier avec l'entrée dans l'ère industrielle et la croissance exponentielle de la métallurgie et la sidérurgie pour la fabrication de pièces industrielles et de structures de masse. Durant les deux dernières décennies, et jusqu'à présent de nouveaux matériaux composites ont émergé dans le paysage industriel, les contraintes environnementales ont poussé les industriels à développer de nouveaux matériaux issus de ressources renouvelables [1,2], parmi ces dernières on trouve les matériaux à fibres végétales. Les fibres naturelles telles que le chanvre, le lin, le jute, le sisal, le bambou ou encore le palmier et l'alfa sont introduits dans l'industrie des composites. Par conséquent de lourds

Chapitre I Introduction général

investissements sont faits dans le secteur de production agricole de ces fibres. L'utilisation des fibres végétales prend de plus en plus d'ampleur. Les propriétés spécifiques intéressantes, la faible densité et la biodégradabilité de ces fibres ouvrent des perspectives prometteuses. Ces nouveaux matériaux ont connu un essor très important au cours de ces dernières décennies. En effet, les fibres végétales d'Alfa sont en abondance dans le territoire algérien, et présentent de bonnes résistances dans son environnement naturel, c'est pour ces raisons, plusieurs chercheurs ont investi dans ce type de fibre comme renfort dans les matériaux composites. L'incompatibilité des fibres cellulosiques avec certains polymères est l'un des obstacles majeurs qui peuvent freiner ou ralentir l'utilisation des fibres végétales. Cette incompatibilité provient de la nature hydrophile des fibres végétales et du caractère plus hydrophobe de la matrice. Cela constitue une difficulté majeure sachant que l'interface est le lieu privilégié du transfert des charges entre le renfort et la matrice. De façon plus générale, l'amélioration de la qualité de l'interface fibre/matrice est le focus des activités de recherche menées sur les composites à base de fibres naturelles.

C'est dans cette optique que vient notre collaboration. En résumé, nous avons essayé de valoriser la fibre végétale d'Alfa sous forme d'un tissage combiné de fibres Alfa et de Jute.

Ce tissu dit combiné a été produit dans un métier à main. Trois types de fibres sont utilisés : a) les fibres Alfa non traitées, les fibres Alfa traitées avec NaOH et les fibres Alfa traitées avec NaOH. Et pour comparaison, nous avons utilisé un tissu Jute/Jute. A partir des quatre tissus cités précédemment, quatre composites ont été élaborés à base d'une matrice thermodurcissable en adoptant la technique de moulage sous vide. Le développement d'un tissu mixte (combiné) des fibres Alfa/Jute dans un but de fabriquer des composites à base de ce tissu puis d'optimiser les caractéristiques mécaniques en traction et en flexion des composites renforcés par tissu combiné non traité, tissu combiné traité à NaOH et tissu combiné traité à NaOH en comparaison avec le composite renforcé par tissu jute /jute, nous fournira sans aucun doute des informations fructueuses et très utiles dans le domaine d'application de ce type de composites. Une étude bibliographique est faite sur les fibres végétales et spécialement sur les fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*) Après une présentation exhaustive de ses fibres, les principales techniques d'obtention des fibres végétales sont présentées. On présente également des généralités sur le tissage l'évolution du métier à tisser, les armures fondamentales du tissage ainsi le principe de base de la formation d'un tissu. Etant donné que la littérature est assez riche sur les principales techniques de modification de la surface des substrats cellulosiques, et les principes de modification des

Chapitre I Introduction général

fibres cellulosiques d'une part, d'autre part, dans notre étude les fibres non traitées et celles traitées feront l'objet d'autre étude, nous n'avons pas ajouté ce chapitre. Dans les résultats et discussions, le comportement des quatre composites sous sollicitations statiques sont présentés et discutés. Les effets des différents traitements physico chimiques et mécaniques sont exploités. Le mémoire s'achève par une conclusion générale. Il s'agit d'une synthèse des résultats obtenus, les conclusions tirées de cette étude et les perspectives envisagées

Les quatre premiers chapitres de ce manuscrit sont consacrés à une synthèse

- Chapitre II généralité sur les matériaux composite
- Chapitre III Composites à base de fibres végétales
- Chapitre IV Phase de transfert de charge dans un composite
- Chapitre V comment préparé et traité des échantillons de fibre d'alfa et les matérielles qui besoin
- Chapitre VI étude bibliographie sur l'extraction

Chapitre II :

Les matériaux composites

DEFINITION

Dans un sens large, le mot "**composite**" signifie "constitué de deux ou plusieurs parties différentes". En fait, l'appellation **matériau composite** ou **composite** est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce chapitre. Nous en donnons pour l'instant la définition générale suivante. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Des

exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau 1.1.

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
1. Composites à matrice organique		
Papier, carton	Résine/charges/fibres cellulosiques	Imprimerie, emballage, etc.
Panneaux de particules	Résine/copeaux de bois	Menuiserie
Panneaux de fibres	Résine/fibres de bois	Bâtiment
Toiles enduites	Résines souples/tissus	Sports, bâtiment
Matériaux d'étanchéité	Elastomères/bitume/textiles	Toiture, terrasse, etc.
Pneumatiques	Caoutchouc/toile/acier	Automobile
Stratifiés	Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc.	Domaines multiples
Plastiques renforcés	Résines/microsphères	
2. Composites à matrice minérale		
Béton	Ciment/sable/granulats	Génie civil
Composite carbone carbone	Carbone/fibres de carbone	Aviation, espace, sports, bio-médecine, etc.
Composite céramique	Céramique/fibres céramiques	Pièces thermo-mécaniques
3. Composites à matrice métallique		
	Aluminium/fibres de bore	Espace
	Aluminium/fibres de carbone	
4. Sandwiches		
Peaux	Métaux, stratifiés, etc.	Domaines multiples
Ames	Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, etc.	

Tableau II. 1. Exemples de matériaux composites, pris au sens large.

CARACTERISTIQUES GENERALES

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant (figure 1.1). Une exception importante à la description précédente est le cas de polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomères. Pour ce type de matériau, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont

pratiquement pas modifiées par l'adjonction de particules élastomères, alors que les caractéristiques au choc sont améliorées.

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- des propriétés des matériaux constituants,
- de leur distribution géométrique,
- de leurs interactions, etc.

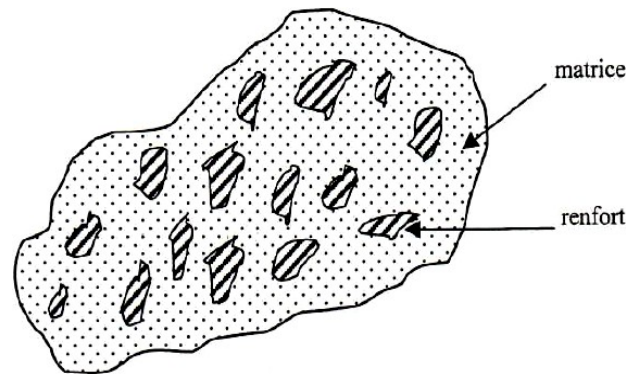


Figure II. 1. Matériau composite.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- la nature des constituants et leurs propriétés,
- la géométrie du renfort, sa distribution,
- la nature de l'interface matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc. Si l'ensemble de ces paramètres concourt à déterminer les propriétés du composite, les modélisations descriptives ne tiendront compte que de certains paramètres, du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu. Par exemple, la forme du renfort sera schématiquement approchée soit par des sphères, soit par des cylindres.

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse). La concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important. Une distribution uniforme assurera une "homogénéité" du matériau : les propriétés du composite seront indépendantes du point de mesure. Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

Dans le cas de matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'anisotropie du matériau composite. Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptées aux propriétés souhaitées.

CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants.

II. 3. 1. Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

II. 3. 1. 1. Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur :

- la nature des constituants,
- la proportion des constituants,
- l'orientation des fibres, suivant le cahier des charges imposées.

L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques. En conséquence, le présent ouvrage sera essentiellement consacré par la suite à l'étude de ce type de matériaux.

1. 2. Composites à particules

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée.

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple, des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage. Des particules de métaux fragiles tels le tungstène, le chrome et le molybdène, incorporées dans des métaux ductiles, augmenteront leurs propriétés à températures élevées, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante.

Les cermets sont également des exemples de composites métal-céramique à particules, adaptés à des utilisations à températures élevées. Par exemple, les cermets à base d'oxydes sont utilisés pour les outils de coupe à vitesse élevée, et pour les protections à hautes températures.

Également, des particules d'élastomère peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragiles, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration.

Ainsi, les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse. Toutefois, compte tenu de leurs diversités, ce type de matériaux ne sera pas étudié dans le cadre de cet ouvrage.

II. 3. 2. Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale.

Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvons citer :

1. Composites à matrice organique (résine, charges), avec :

- des fibres minérales : verre, carbone, etc.
- des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
- des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

2. Composites à matrice métallique (alliages légers et ultra – légers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :

- des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC),
- des fibres métalliques : bore,
- des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BorSiC).

3. Composites à matrice minérale (céramique), avec :

- des fibres métalliques : bore,
- des particules métalliques : cermets,
- des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300 °C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600 °C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000 °C pour une matrice céramique.

FRACTIONS VOLUMIQUES ET MASSIQUES

II. 4. 1. Introduction

Un des facteurs les plus importants qui déterminent les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite est la proportion relative de matrice et de renfort.

Cette proportion peut être exprimée soit en fraction volumique (ou fraction en volume), soit en fraction massique (ou fraction en masse). Les fractions massiques sont plus faciles à mesurer lors de l'élaboration des matériaux. Par contre, les fractions volumiques interviennent directement dans les modèles théoriques décrivant le comportement mécanique des matériaux. Il est donc nécessaire de savoir passer de l'une à l'autre de ces fractions. Ces expressions seront établies pour un matériau à deux phases, puis étendues à un matériau à plus de deux phases.

II. 4. 2 Fractions volumiques

Considérons un volume v_c de matériau composite, composé d'un volume v_f de fibres et d'un volume v_m de matrice. Par la suite, les indices c , f et m seront systématiquement utilisés comme indices respectifs des caractéristiques du matériau composite, des fibres et de la matrice. La fraction volumique de fibres est :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}$$

La fraction volumique de matrice est :

$$V_m = \frac{v_m}{v_c},$$

avec

$$V_m = 1 - V_f,$$

puisque

$$v_c = v_f + v_m.$$

II. 4. 3. Fractions massiques

Les fractions massiques sont définies de la même manière à partir des masses p_c , p_f , p_m respectives de matériau composite, de fibres, de matrice. Les fractions massiques ou fractions en masse de fibres et de matrice s'écrivent respectivement :

$$P_f = \frac{p_f}{p_c},$$

$$P_m = \frac{p_m}{p_c},$$

avec

$$P_m = 1 - P_f.$$

II. 4. 4. Relations entre fractions volumiques et massiques

Les relations entre les fractions volumiques et massiques font intervenir les masses volumiques respectives du matériau composite, des fibres, de la matrice. Les masses et volumes sont liés par les relations :

$$p_c = \rho_c v_c, \quad p_f = \rho_f v_f, \quad p_m = \rho_m v_m.$$

La masse totale du matériau composite est :

$$p_c = p_f + p_m,$$

ou

$$\rho_c v_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m.$$

La masse volumique du matériau composite s'écrit donc en fonction des fractions volumiques suivant :

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m (1 - V_f).$$

De même, en partant du volume total du composite :

$$v_c = v_f + v_m,$$

nous obtenons :

$$\frac{p_c}{\rho_c} = \frac{p_f}{\rho_f} + \frac{p_m}{\rho_m}.$$

D'où l'expression de la masse volumique en fonction des fractions massiques :

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_m}{\rho_m}}$$

Les relations entre fractions massiques et fractions volumiques peuvent maintenant être établies, en partant des relations de définition :

$$P_f = \frac{P_f}{P_c} = \frac{\rho_f v_f}{\rho_c v_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f,$$

et

$$P_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m,$$

La masse volumique du matériau composite étant déterminée par la relation précédente.

Les relations inverses s'obtiennent de la même manière, soit :

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} P_f,$$

$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} P_m,$$

Où la masse volumique du matériau composite est déterminée cette fois par l'expression (1.).

Les expressions précédentes entre fractions volumiques et fractions massiques peuvent être étendues au cas d'un nombre quelconque de constituants. Les expressions générales s'écrivent pour n constituants :

$$P_i = \frac{\rho_i}{\rho_c} V_i, \quad (1.27)$$

avec

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i, \quad (1.28)$$

et

$$V_i = \frac{\rho_c}{\rho_i} P_i, \quad (1.29)$$

avec

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\rho_i}}$$

II. 4. 5. Présence de porosités

Il peut arriver que la masse volumique mesurée expérimentalement ne coïncide pas avec la valeur calculée par l'expression (1.) à partir des masses des constituants introduites. Dans le cas où ce désaccord dépasse les précisions expérimentales, il peut être attribué à la présence de porosités. La différence entre la masse volumique ρ_{ct} calculée par l'expression (1.) et la masse volumique ρ_{ce} mesurée expérimentalement permettra d'estimer la fraction volumique V_p de porosités par l'expression :

$$V_p = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}}$$

La présence de porosités dans un composite peut entraîner une diminution significative de ses caractéristiques mécaniques, en augmentant la dispersion de ses valeurs. La présence de porosités augmente également la sensibilité du matériau composite à l'environnement extérieur : augmentation de l'absorption de l'humidité, diminution de la résistance aux produits chimiques, etc. Il sera donc important d'avoir une estimation de la proportion de porosités, de manière à évaluer la qualité d'un composite. Un matériau composite de qualité contiendra moins de 1 % en volume de porosités, alors qu'un composite de médiocre qualité pourra atteindre 5 %.

MISE EN OEUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES

II. 5.1. Moulages sans pression

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat.

Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur.

II. 5.1.1. Moulage au contact (figure II. 1)

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

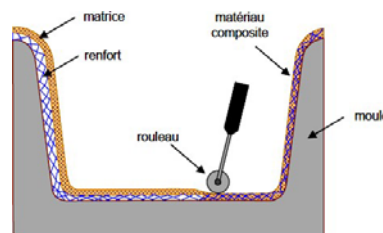


Fig. II. 1 : Principe du moulage au contact

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :

1. Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.
2. Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
3. Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un débullage est effectué avec un rouleau cannelé.
4. Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.
5. Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures).

6. La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).
7. Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc.

II. 5. 1. 2. Moulage par projection simultanée (figure II. 2)

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifil et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé.

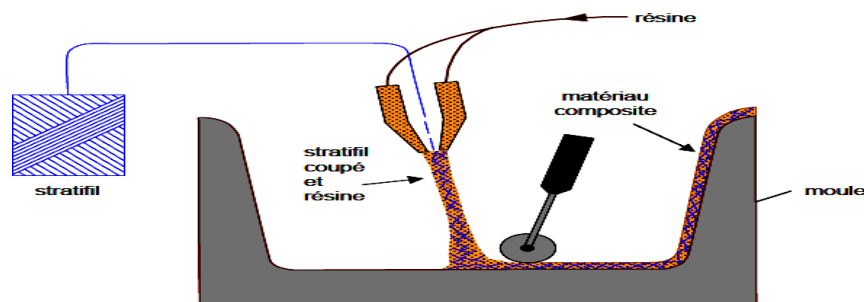


Fig. II. 2 : Principe du moulage par projection simultanée.

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

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

2. Moulage sous vide (figure II. 3)

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et débulle la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité.

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes.

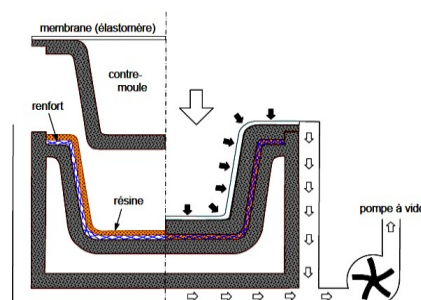


Fig. II. 3 : Moulage sous vide.

II. 5. 3. Moulage par compression

II. 5. 3. 1. Moulage par injection de résine (figure II. 4)

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées.

Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées.

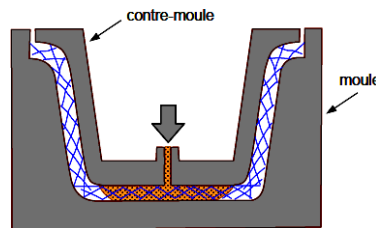


Fig. II. 4 : Moulage par injection de résine.

II. 5. 3. 2. Moulage par compression à froid (figure II. 5. 1)

Le moulage est effectué à basse pression (< 5 bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exothermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70 °C, en fonctionnement permanent.

Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gel-coat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contre-moule est fermé, puis pressé. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production.

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la presse à chaud.

II. 5. 3. 3. Moulage par compression à chaud (figure II. 5. 2)

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants.

Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contremoule.

Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée.

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50 bars, la température des moules de l'ordre de 80 à 150 °C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule.

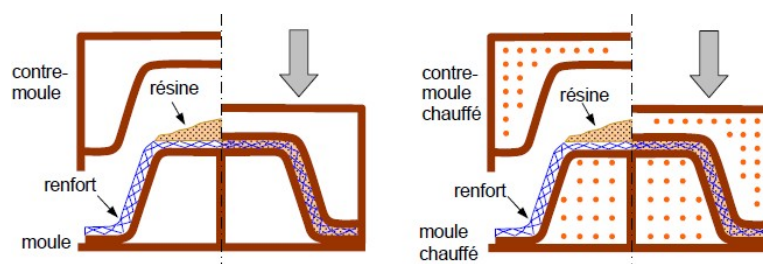


Fig. II. 5. 1. À froid

Fig. II. 5. 2. À chaud

Fig. II. 5 : Principe du moulage par compression.

II. 5. 3. 4. Moulage par injection (figure 3.6)

La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, etc.).

Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques.

Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats préimprégnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation.

Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé "plastiques renforcés" que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries.

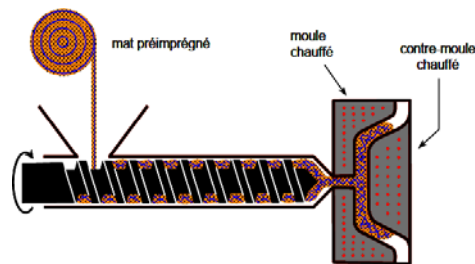


Fig. II. 6 : Moulage par injection.

II. 5. 4. Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwiches (figure III.7), de panneaux ondulés pour toitures (figure III.8), plaques nervurées, etc.

Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases.

1. Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc.).
2. Une phase de mise en forme.
3. Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).
4. Une phase de refroidissement et découpage.

Dans le cas de la fabrication de plaques planes (figure III. 7), la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.

Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation (figure III.8), par l'intermédiaire de rouleaux mobiles.

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel.

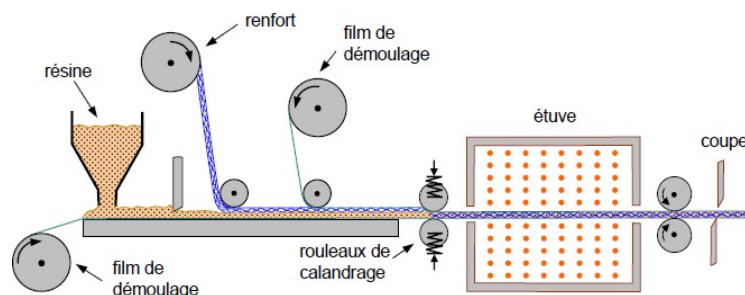


Fig. II. .7 : Moulage en continu de plaques.

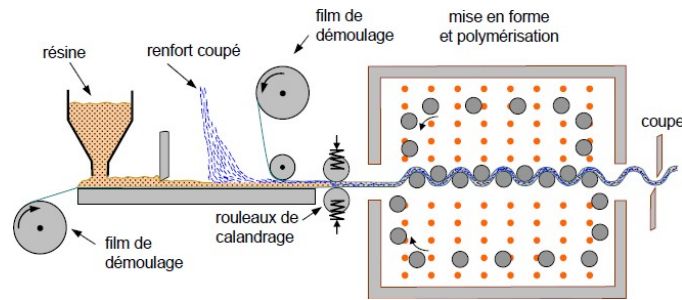


Fig. II. 8 : Moulage en continu de panneaux ondulés.

II. 5. 5. Moulage par pultrusion

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés, rectilignes ou courbes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale.

Dans cette technique (figure III. 9), les renforts : fils, stratifils, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine.

Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80 % en volume.

Le procédé est adapté aux productions d'assez grandes séries (vitesse de défilement jusqu'à 20 m/h). Il nécessite un investissement important de matériel.

Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs, etc.

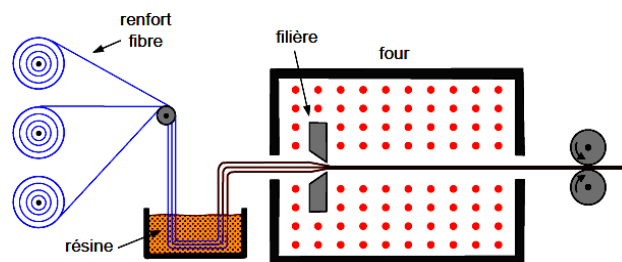


Fig. II. 9 : Moulage par pultrusion.

II. 5. 6. Moulage par centrifugation

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation (figure III.10) de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé.

Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel coat, on introduit simultanément en continu :

- le renfort : fibres coupées ou stratifil coupé;
- la résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

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

Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement en discontinu avant rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation.

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule.

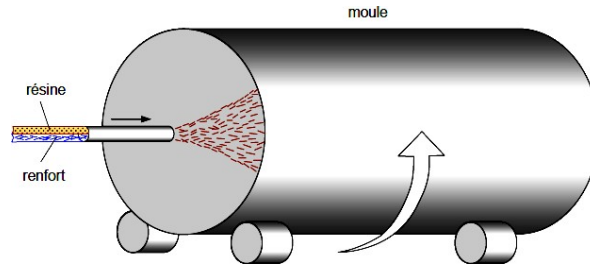


Fig. II. 10 : Moulage par centrifugation.

II. 5. 7 Moulage par enroulement filamentaire

II. 5. 7. 1. Principe

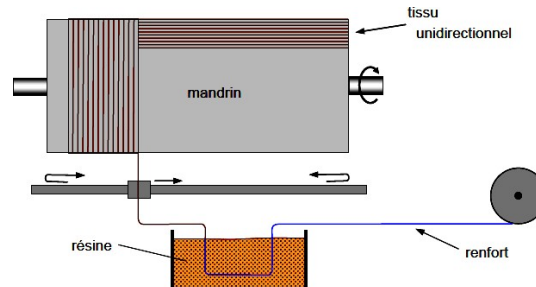
Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation.

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

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

II. 5. 7. 2. Enroulement circonférentiel (figure III. 11)

Le bobinage est effectué à 90° par rapport à l'axe du mandrin et confère une résistance tangentielle élevée. Pour obtenir une résistance longitudinale satisfaisante, il est nécessaire d'intercaler des couches de tissus unidirectionnels dans le sens axial du mandrin. Ce type d'enroulement est assez peu utilisé.



F. II. 11 : Principe de l'enroulement circonférentiel.

II. 5. 7. 3. Enroulement hélicoïdal

1. Enroulement discontinu

La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif du guide-fils par rapport à la rotation du mandrin (figure III.12). La valeur de l'angle est choisie en fonction du rapport souhaité entre la résistance tangentielle et la résistance transversale. La nappe de fils est régulièrement répartie et stratifiée sur toute la surface du mandrin par des mouvements alternatifs du guide-fils parallèlement à l'axe du mandrin. Ce type d'enroulement donne une grande liberté pour la disposition angulaire des fils. Il permet en particulier de réaliser des couches successives avec des angles différents.

Ce procédé d'enroulement a de nombreuses applications pour la fabrication de pièces de grandes dimensions comme des conteneurs, la fabrication d'enveloppes de fusées, de torpilles, de tubes de forage pétrolier, de bouteilles de gaz, etc.

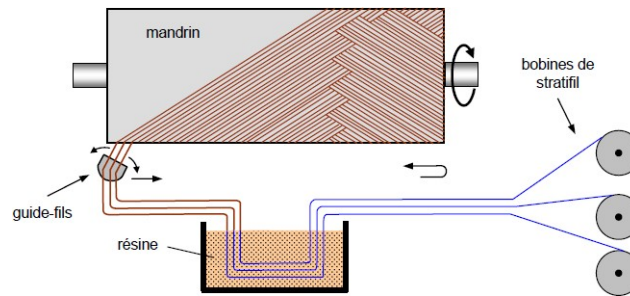


Fig. II. 12 : Principe de l'enroulement hélicoïdal.

2. Enroulement continu

L'enroulement continu (figure II. 13) permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs.

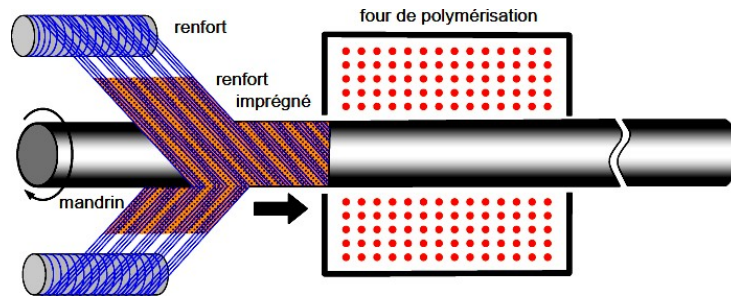


Fig. II. 13. Enroulement hélicoïdal continu.

II. 5. 7. 4. Enroulement polaire

L'enroulement polaire permet de fabriquer des pièces à extrémités sphériques sans discontinuité de l'enroulement (figure III. 14). Dans ce type d'enroulement, le mandrin doit posséder trois degrés de liberté en rotation, permettant de commander 3 rotations simultanées ou non.

Cette technologie sert à fabriquer des réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, etc.

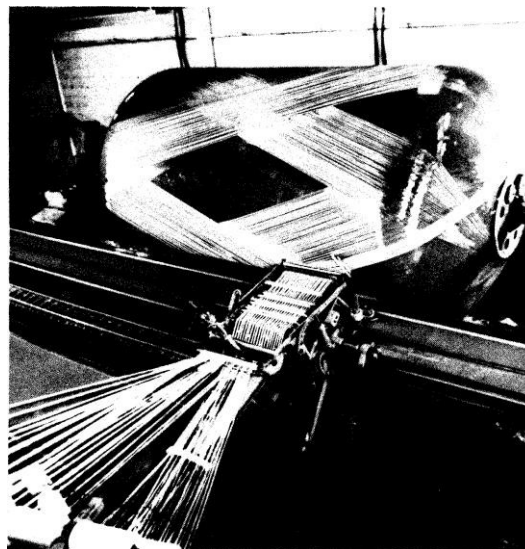


Fig. II. 14. Enroulement polaire

II. 5. 7. 5. Mandrins

Les mandrins pour l'enroulement filamentaire doivent permettre le démoulage.

Ils peuvent être :

- en métal, en bois, etc., monobloc ou en plusieurs éléments démontables;
- en matériau à bas point de fusion;
- en matériau soluble : par exemple grains de sable agglomérés dans un liant soluble dans l'eau;
- en élastomère gonflable.

II. 5. 7. 6. Applications

Les applications de l'enroulement filamentaire ont été dégagées dans les paragraphes précédents. D'une manière générale, ce processus de mise en œuvre est utilisé pour fabriquer des pièces ayant une symétrie de révolution : tuyaux, tubes, réservoirs, bouteilles de gaz, enveloppes cylindriques, etc. Des pièces de grandes dimensions peuvent être réalisées : conteneurs, silos, etc. Les dimensions des pièces sont limitées par le type de machine utilisée. L'intérêt de l'enroulement filamentaire réside également dans la possibilité d'une automatisation assistée par ordinateur.

Le procédé d'enroulement filamentaire est également applicable à des pièces sans symétrie de révolution : pales d'hélicoptères et de turbines, réservoirs à sections rectangulaires, etc.

II. 6. UTILISATION DE DEMI-PRODUITS

II. 6. 1. Introduction

La mise en œuvre de demi-produits (préimprégnés, compounds) fait appel aux mêmes techniques que le moulage (paragraphe III. 2) à partir de fils ou tissus, dont l'imprégnation par la résine est effectuée au moment de la mise en œuvre. Nous en avons séparé la présentation, compte tenu du caractère propre de ces demi-produits : facilité de manipulation, possibilité d'automatisation avancée des procédés de mise en œuvre à partir de ces produits, etc. Il est ainsi concevable de penser que l'utilisation et le développement de préimprégnés et compounds de divers types, associés à une conception assistée par ordinateur et à une robotisation, permettront de pénétrer de plus en plus les marchés industriels : construction automobile, construction navale, armement, etc.

II. 6. 2. Préimprégnés

II. 6. 2. 1. Principe

Les préimprégnés (en anglais : les "prepregs" de pre-impregnated) sont des produits vendus sous forme de stratifils, rubans, tissus, etc., imprégnés de résine généralement dissoute dans un solvant.

Les résines peuvent être phénoliques, des polyesters, des résines époxydes, des polyimides, etc. Le pourcentage en volume de fibres est élevé (50 à 80 %) de manière à obtenir des composites à hautes performances mécaniques.

Le stratifil imprégné ou "stratipreg" (désignation de Vetrotex-Saint Gobain dans le cas de fibres de verre) est principalement destiné à l'enroulement filamentaire. Les tissus imprégnés sont généralement minces (de l'ordre de 1/10 mm), et par conséquent de faible masse surfacique : 100 à 300 g/m². Toutefois, pour les besoins de la construction navale, certains préimprégnés épais ont été mis au point pour simplifier la mise en œuvre.

II. 6. 2. 2. Élaboration

La fabrication des préimprégnés se fait sur une machine verticale ou horizontale, suivant le schéma de principe de la figure III. 15. Le fil ou tissu est déroulé à vitesse lente (1 à 10 m/min), et passe dans un bac contenant une résine d'imprégnation diluée dans un solvant. À la sortie, des racleurs et des rouleaux essoreurs éliminent l'excès de résine. En effet, nous avons indiqué qu'un des intérêts des préimprégnés est d'être à faible proportion de résine. Le fil ou tissu imprégné passe ensuite dans un four, où la plus grande partie du solvant s'évapore, et où s'amorce un début de polymérisation. A la sortie du four, le préimprégné est refroidi par ventilation, de manière à stopper la polymérisation qui doit rester inachevée. Le tissu est ensuite :

- soit enroulé entre deux feuilles de polyéthylène pour être livré en rouleau,
- soit coupé et empilé entre deux feuilles de polyéthylène pour être livré en plaques.

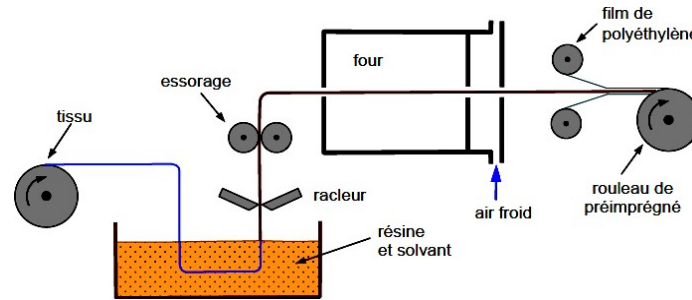


Fig. II. 15 : Schéma de principe de l'élaboration d'un préimprégné.

II. 6. 2. 3. Intérêt des préimprégnés

Les avantages essentiels des préimprégnés résident dans :

- des performances mécaniques élevées du stratifié obtenu, résultant de la forte proportion de fibres;
- une amélioration des conditions de travail et de sécurité, du fait de la suppression des manipulations de résine et du dégagement de vapeurs toxiques;
- une automatisation possible par drapage, à l'aide d'automates ou de robots, permettant de diminuer les prix de revient des produits finis.

II. 6. 2. 4. Mise en œuvre

Les préimprégnés peuvent être mis en œuvre :

- par compression à chaud, puis cuisson;
- par moulage sous vide, avec cuisson dans des moules chauffants.

Lors de la mise en œuvre, les préimprégnés doivent être découpés aux dimensions des pièces à réaliser (figure II. 16). Il en résulte que seules les formes simples peuvent être réalisées. Après mise en place des préimprégnés dans le moule, sous l'action de la chaleur, la résine redevient fluide, puis durcit pour obtenir la pièce finale.

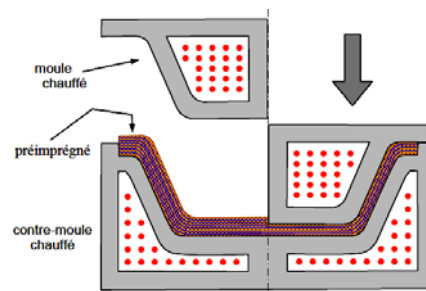


Fig. II. 16 : Moulage par compression à partir d'un préimprégné.

II. 6. 3. Les compounds de moulage

II. 6. 3. 1. Généralités

Les "compounds" (composés) de moulage sont des demi-produits livrés en rouleaux ou feuilles d'épaisseur d'environ 3 mm, composés généralement de résine polyester-fibres de verre, placés entre deux films de polyéthylène. Ils sont parfois considérés comme des préimprégnés, leur utilisation les différencie toutefois nettement. Parmi ces compounds, les plus utilisés sont :

- les SMC : Sheet Moulding Compounds,
- les HMC : High Moulding Compounds.

Divers autres types de compounds existent et sont développés pour chaque utilisation spécifique. Un des intérêts des compounds polyesters réside dans un temps de polymérisation très court (quelques minutes), d'où la possibilité de les utiliser dans des productions de grandes séries.

II. 6. 3. 2 Principe

Le SMC est un composé de moulage lamifié ("sheet" signifie "feuille"), comportant une proportion de fibres assez faible (30 % en masse), et une forte proportion de charges (50 % en masse) dans la résine. Les fibres peuvent être (figure III.17) :

- soit des fibres coupées (généralement 25 à 50 mm), réparties au hasard dans le plan de la feuille (SMC-R);
- soit des fibres coupées unidirectionnelles (SMC-D);
- soit des fibres continues unidirectionnelles (SMC-C).

Il existe également des SMC mixtes : par exemple SMC-D/R (fibres coupées unidirectionnelles et réparties au hasard), SMC-C/R (fibres continues unidirectionnelles et fibres coupées réparties au hasard).

Les fibres peuvent être de diverses natures : verre, carbone, Kevlar, ou mixtes. En diminuant la proportion des charges dans la résine, il est possible d'augmenter la proportion de fibres de 30 à 50 % en masse. Le compound est alors appelé HMC et possède des caractéristiques mécaniques élevées.

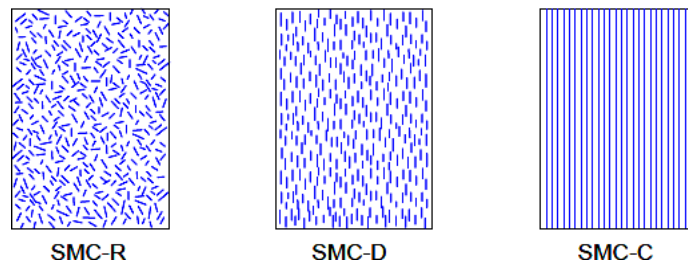


Fig. II. 17 : Différentes distributions des fibres dans les SMC.

3. 3. Élaboration

Le principe d'élaboration des compounds est donné à la figure III. 18 pour les SMC-R et à la figure III. 19 pour les SMC-D/R. La résine sous forme de pâte est SMC-R SMC-D SMC-C véhiculée sur une feuille de polyéthylène. Les fibres sont déposées sur la résine, puis recouvertes par une deuxième feuille de polyéthylène.

L'ensemble passe dans un système de compactage, pour être ensuite enroulé. La polymérisation de la résine est retardée par adjonction d'oxyde de magnésium. Le compound se présente alors sous forme de feuilles molles et poisseuses.

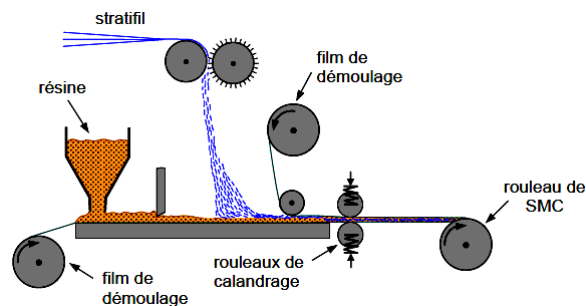


Fig. II. 18 : Principe d'élaboration d'un SMC-R.

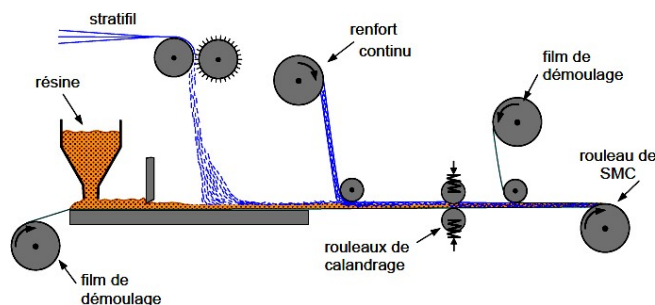


Fig. II. 19 : Principe d'élaboration d'un SMC-C/R.

II. 6. 3. 4. Mise en œuvre

Le moulage est effectué selon les techniques traditionnelles de moulage par compression (figure III. 20). Des "flans" de compounds sont découpés dans les feuilles et placés entre le moule et le contre-moule. La forme des flans ne doit pas nécessairement être adaptée aux dimensions du moule. En effet, à la différence des préimprégnés, les compounds ont une proportion élevée (50 à 70 % en masse) de matrice. Lors de la compression à chaud, la matière s'écoule (on dit qu'elle "flue"), et vient remplir tout le moule. Lors de cet écoulement, il peut y avoir réorientation des fibres. Le rôle du concepteur sera de rechercher la forme et l'épaisseur optimales des flans pour obtenir les caractéristiques finales souhaitées de la pièce après durcissement.

Ainsi les compounds permettent la fabrication de très grandes pièces à formes éventuellement complexes comportant nervures et bossages à embouti profond, telles que cabines de camions, de voitures, etc. Le fait de mouler des pièces de surfaces de plus en plus grandes conduit à utiliser des presses de plus en plus puissantes.

Les gros tonnages ont d'abord été réalisés dans le domaine de l'électrotechnique, puis dans celui de l'automobile (par exemple pare-chocs d'automobiles, capot-moteur d'automobiles, etc.). Les applications des compounds touchent aujourd'hui tous les secteurs industriels.

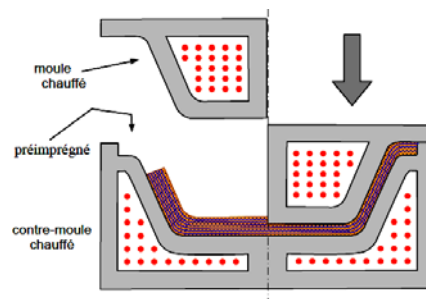


Fig. II. 20 : Moulage par compression à partir d'un compound.

II. 7. ARCHITECTURE DES MATÉRIAUX COMPOSITES

II. 7. 1. Introduction

L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

- par surface: plaques, coques,
- par stratification de couches successives.

Ce concept justifie l'importance qui sera donnée par la suite à l'étude des matériaux composites considérés sous la forme de plaques ou de coques, constituées de couches différentes (ou non). Les coques peuvent être modélisées comme un ensemble de plaques, et leur étude déduite de l'étude des plaques.

L'objet de ce paragraphe est de dégager l'architecture générale des matériaux composites.

II. 7. 2. Stratifiés

Les stratifiés sont constitués (figure II. 21) de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines.

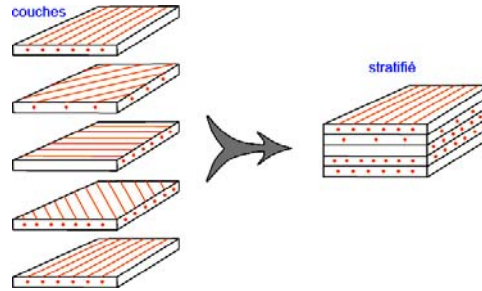


Fig. II. 21 : Constitution d'un stratifié.

Nous examinons les divers types de stratifiés.

2. 1. Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués (figure II. 22) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche. La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

1. Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe *x* de référence.
 2. Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents.
 3. Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique.
 4. Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre.
- Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code.

La désignation dépend du système d'axes choisi. Un exemple est donné à la figure III. 22.

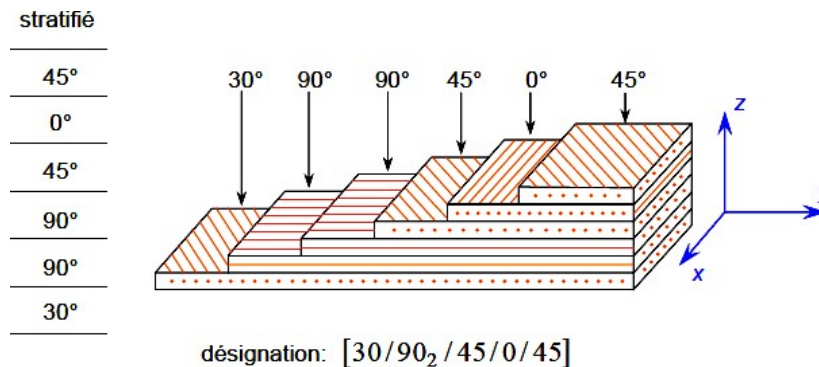


Fig. II. 22 : Désignation d'un stratifié.

Angles positifs et négatifs

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais de signes opposés, les signes + ou - sont utilisés. La convention pour les angles positifs ou négatifs dépend du système d'axes choisi : une inversion peut apparaître suivant le choix effectué (figure III. 23).

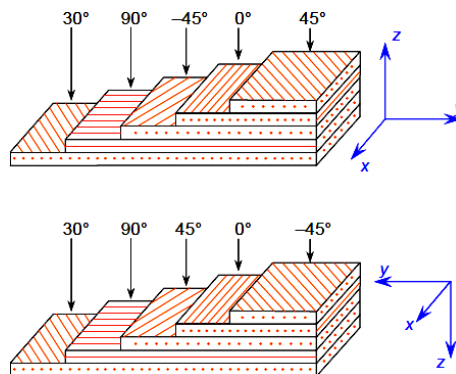


Fig. II. 23 : Convention de signe pour la désignation des stratifiés.

Nous donnons ci-après quelques exemples de désignation de stratifiés.

Stratifié Désignation

0°	
30°	
-30°	[±45 / ∓30 / 0]
-45°	
45°	
30°	
-60°	
-60°	[45 / 0 / -60 ₂ / 30]
0°	
45°	
0°	
-45°	
-45°	[45 ₂ / -45 ₂ / 0]
45°	
45°	
0°	
-45°	[± ∓ ±45 / 0]
45°	
45°	ou [45 / -45 ₂ / 45 ₂ / -45 / 0]
-45°	
-45°	
45°	

Stratifiés symétriques

Un stratifié est symétrique si son plan moyen est plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives.

Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie. Un indice S indique que le stratifié est symétrique. Par exemple :

90°	
45°	
45°	[90 / 45 ₂ / 0] _S
0°	
0°	
45°	
45°	
90°	

Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée. Par exemple :

90 °	
45 °	
45 °	[90 / 45 ₂ / $\bar{0}$] _S
0 °	
45 °	
45 °	
90 °	

Séquences

La répétition de séquences peut être indiquée par un indice indiquant le nombre de fois où une séquence est successivement répétée. Par exemple :

0 °	
45 °	
90 °	[(0 / 45 / 90) ₂] _S
0 °	
45 °	ou [0 / 45 / 90] _{2S}
90 °	
90 °	
45 °	
0 °	
90 °	
45 °	
0 °	

0 °	
45 °	
90 °	
0 °	[(30 / 60) ₃ (90 / 45 / 0) ₂]
45 °	
90 °	
60 °	
30 °	
60 °	
30 °	
60 °	
30 °	

L'alternance $[0 / 90]_n$ est souvent désignée par *stratifié croisé*.

Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation. Par exemple, pour des stratifiés avec la même résine :

0°	V
45°	C
-45°	C
90°	C
90°	C
-45°	C
45°	C
0°	V

$$[0_V / \pm 45_C / 90_C]_S$$

0°	K
0°	K
45°	V
90°	V
45°	V
0°	C
0°	C

$$[0_{2C} / (45 / \overline{90})_{SV} / 0_{2K}]$$

avec V : verre, C : carbone, K : Kevlar

II. 7. 2. 2. Structure générale d'un stratifié

Dans le cas général, le renfort de chaque couche sera de natures diverses : fils, stratifils, mats, tissus, fibres de verre, fibres de carbone, etc. Chaque couche doit alors être désignée par l'indication de la nature des fibres, du type de renfort : fils, mat, tissu avec indication de la proportion de fibres suivant le sens chaîne et trame.

Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation du matériau composite, en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposé :

- les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres;
- les mats sont peu résistants en traction et devront être réservés aux zones comprimées : par exemple (figure III. 24) couches unidirectionnelles dans la zone de traction, mat dans la zone de compression d'une poutre sollicitée en flexion;
- une stratification croisée sera sensible au délaminage interlaminaire;
- une stratification avec au moins trois directions de fibres sera nécessaire pour avoir une pseudo-isotropie dans le plan du stratifié.

Enfin, il est intéressant de noter qu'une stratification symétrique garantira généralement une bonne planéité du stratifié après démoulage.

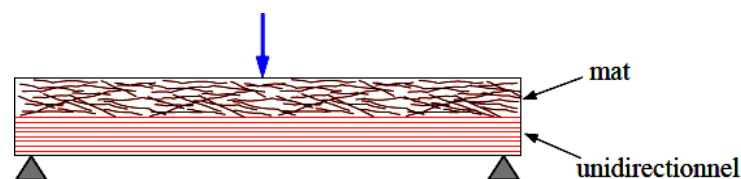


Fig. II. 24 : Poutre sollicitée en flexion.

Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides permettent d'être plus performants en utilisant au mieux les propriétés des diverses fibres disponibles. Parmi les différents hybrides, on peut distinguer :

- des *hybrides intercouches*, constitués d'une suite de couches, chacune de nature différente;
- des *hybrides intracouches*, constitués par une séquence de couches identiques, chaque couche étant constituée de renforts différents;
- des couches métalliques peuvent également être intercalées entre les couches.

II. 7. 3. Composites sandwiches

II. 7. 3. 1. Généralités

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer sur une âme mat unidirectionnel (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux "feuilles", appelées peaux, possédant de bonnes caractéristiques en traction. L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité.

Généralement, le choix des matériaux est fait avec pour objectif initial d'avoir une masse minimale en tenant compte ensuite des conditions d'utilisation (conditions thermiques, corrosion, prix, etc.).

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

- pour les *âmes pleines* (figure III. 25) :

- le balsa ou bois cellulaire;
- diverses mousses cellulaires;
- des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques ;
- etc.;

- pour les *âmes creuses* (figure III. 26), essentiellement nid d'abeilles et profilés :

- des alliages métalliques légers;
- du papier kraft (enduit ou non de résine);
- du papier polyamide, type papier Nomex;
- etc.;

Des âmes mixtes peuvent être utilisées.

Les peaux sont le plus souvent des stratifiés (verre, carbone, Kevlar) ou des feuilles d'alliages légers.

Pour que les structures sandwiches jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme-peaux, de manière à répartir les efforts entre âme et peaux. L'assemblage est réalisé par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence.

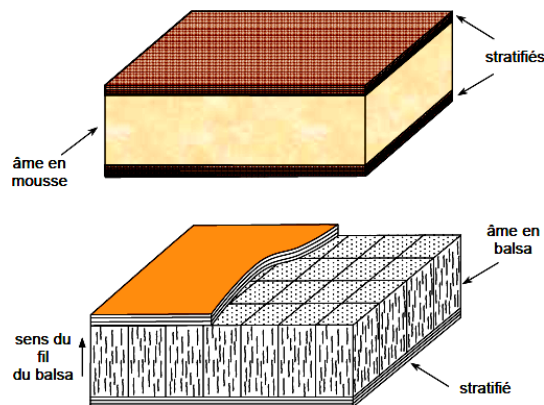


Fig. III. 25 : Matériaux sandwiches à âmes pleines.

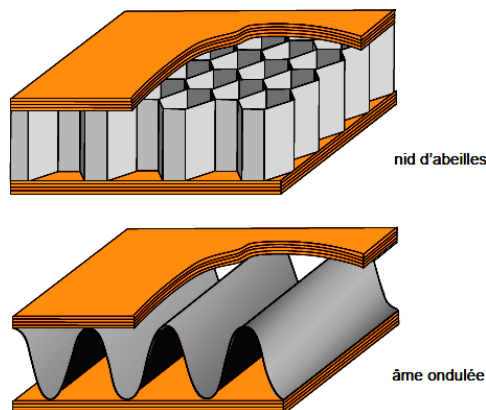


Fig. II. 26 : Matériaux sandwiches à âmes creuses.

II. 7. 4. Autres architectures

Les autres architectures des matériaux composites peuvent être schématiquement classées en : plastiques renforcés et composites volumiques.

II. 7. 4. 1. Plastiques renforcés

Ces matériaux sont constitués de résines ou matrices dans lesquelles sont introduits des renforts de type :

- fibres courtes,
- billes pleines ou billes creuses,
- poudres : métalliques, de graphite.

Les renforts permettent généralement d'augmenter le module d'élasticité d'un facteur 2 à 5. Le comportement mécanique de ces matériaux peut être homogénéisé, et son étude est ramenée à celle d'un matériau usuel isotrope.

II. 7. 4. 2 Composites volumiques

Les composites volumiques ont été introduits pour des besoins spécifiques de l'aéronautique. Ils sont élaborés à partir de tissages volumiques (paragraphe II. 4. 4. 2). Ces matériaux sont très onéreux. Outre des intérêts spécifiques, ils permettent d'obtenir des caractéristiques mécaniques très élevées, avec un comportement sensiblement isotrope en volume.

II. 7. 5. Conséquences sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites

L'étude de la mise en œuvre des matériaux composites a montré l'importance des stratifiés et des matériaux sandwichs. L'architecture de ces matériaux nous permet maintenant de dégager les grandes lignes de l'étude de leur comportement mécanique.

Cette étude comportera deux phases :

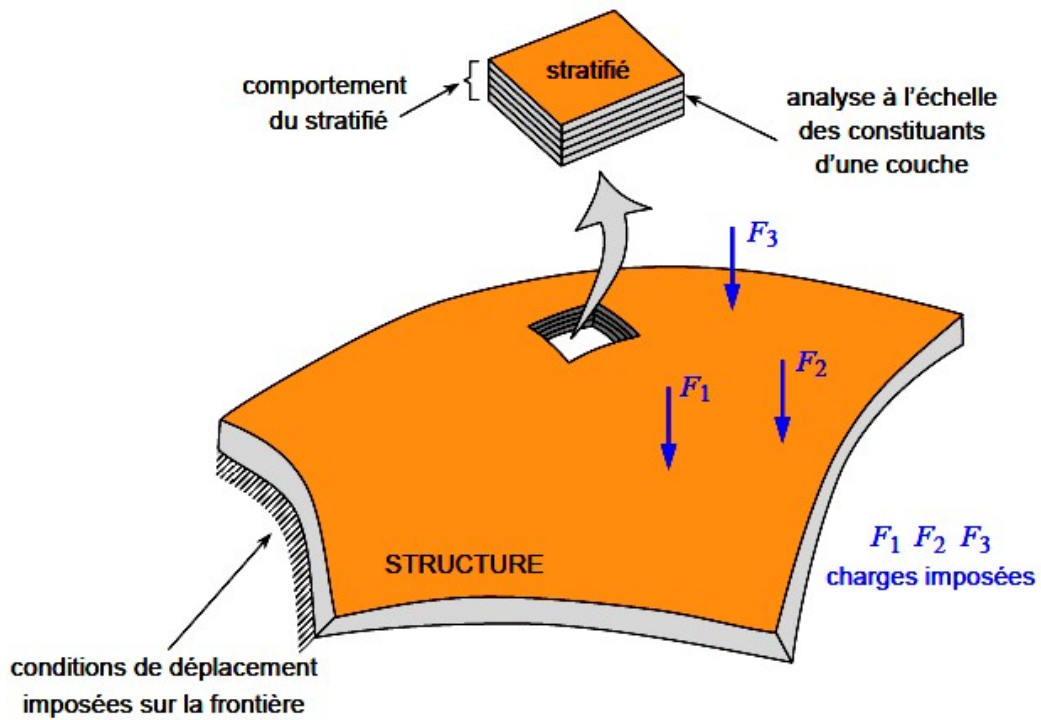
1. L'étude du comportement mécanique de chaque couche, parfois appelé comportement micromécanique ou microscopique du matériau composite. Cette étude est assez souvent désignée par microanalyse du matériau composite.

2. L'étude du comportement global du matériau constitué de plusieurs couches, et désigné généralement par comportement macroscopique du matériau composite ou comportement du stratifié.

Ces deux études étant effectuées, le comportement mécanique global d'une structure en composite sera ensuite analysé en adaptant les outils classiques du calcul des structures au comportement macroscopique des matériaux composites.

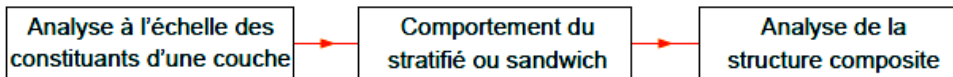
L'analyse des structures simples (poutres et plaques) peut généralement être abordée par une méthode analytique, alors que l'étude de structures complexes nécessite l'utilisation de la méthode des éléments finis.

L'analyse du comportement mécanique d'une structure en matériau composite est schématisée sur la figure II. 27.



Pour caractériser le comportement mécanique de la structure composite
il est nécessaire de connaître le champ des contraintes et celui des déplacements
en tout point de la structure

Processus d'étude



Analyse à l'échelle des constituants

Analyse des propriétés élastiques et du comportement à la rupture
d'une couche en fonction des constituants

Comportement du stratifié ou sandwich

Étude des propriétés élastiques et du comportement à la rupture
du matériau stratifié ou sandwich en fonction des couches

Fig. II. 27 : Schéma d'étude du comportement mécanique d'une structure en matériau composite.

Chapitre III :

***Composites à base de fibres
végétales***

III.1- Fibres végétales :

Introduction :

Dans ce chapitre on présente une description des matériaux composites à renforts fibreux végétales, et situe le contexte de développement et d'utilisation de ces produits. La connaissance de la structure et la composition chimique de chacun des constituants est nécessaire pour appréhender l'étude des interactions entre les fibres de renforts et les matrices. Dans cette étude bibliographique, nous nous proposons de présenter une description des différents constituants entrant dans la mise en forme des matériaux composites en les regroupant par catégories. Les différentes techniques de fabrication seront ensuite explicitées et mises en relation avec les types de constituants utilisés. Ensuite nous nous proposons de présenter quelques domaines d'applications des matériaux composites renforcés par des fibres végétales.

III.1. 1. Les fibres végétales :

Les fibres végétales sont des matériaux filamenteux issus de la biomasse. Elles peuvent être extraites du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante cultivée, des arbustes et des herbes. Sont susceptibles d'être filées pour fabriquer des fils et des cordes. Elles sont tissées, tricotées ou tressées pour confectionner des textiles indispensables à la société.

La fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de leur origine. En effet, les dimensions des filaments végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale [3]

Les fibres végétales sont également caractérisées par la diversité de l'épaisseur de leur paroi cellulaire résultant de la porosité fibreuse [4]

La forme morphologique de la fibre végétale peut également être un facteur important dans la compréhension du transfert de contrainte aux interfaces fibre-matrice [5]

III .1.2. Présentation des fibres végétales :

Il existe une grande variété de fibres végétales qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges des matériaux composites. Elles sont classées suivant leur provenance et leur forme (**Figure 1**).

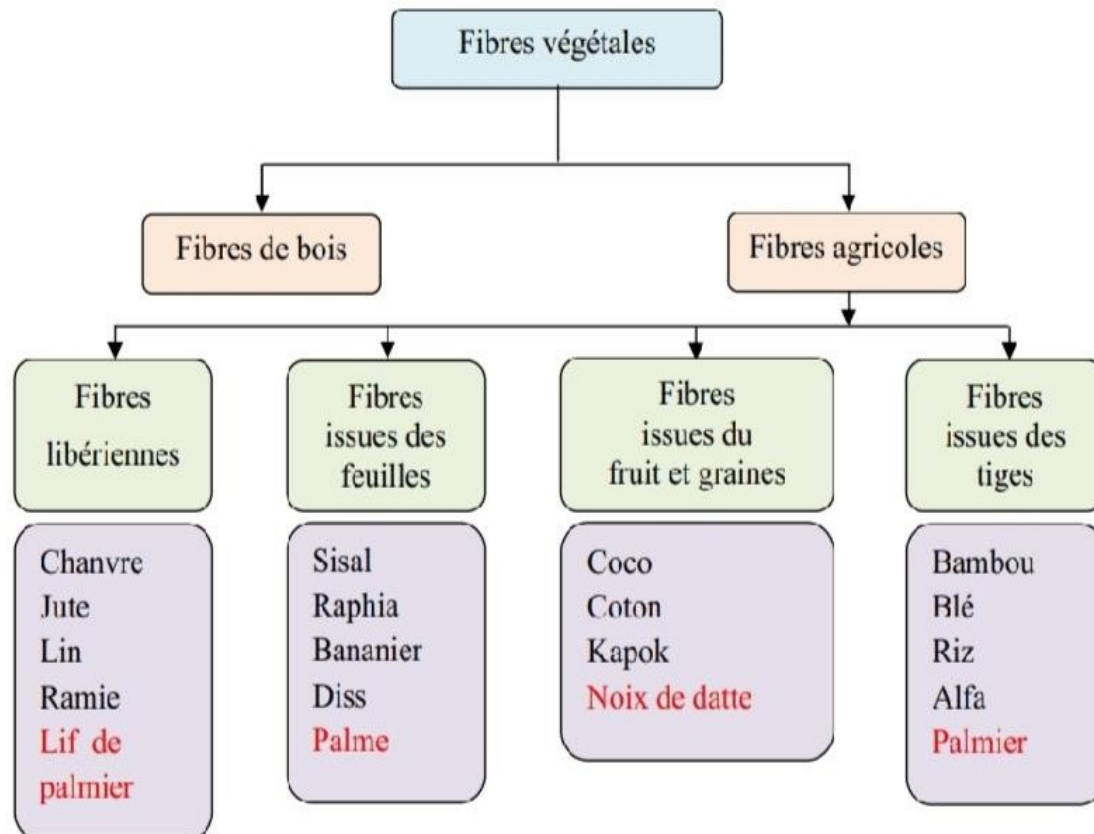


Figure III. 1: Classification des fibres végétales .

III .1.2.1. Fibres de jute :

Le jute sont des arbustes de 2 à 4 m de haut, à tige rigide et fibreuse de 2 cm de diamètre environ, et ramifiée seulement dans la partie supérieure. Les feuilles, longuement jute se situe en sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'inde, le Bangladesh et la chine.

Les composites à matrice thermoplastique renforcée par des fibres de jute ont été utilisés dans l'industrie en Allemagne pour fabriquer les portes en panneaux composites. La fibre de jute est utilisée par les tireurs d'élite pour créer un filet de la forme d'un vêtement. Ce type de vêtement de camouflage est appelé une ghillie suit.

Diverses recherches ont été réalisées sur ces composites, ces études ont porté notamment sur la stabilité thermique, la cristallinité, la durabilité, l'orientation des fibres, le frottement à l'usure, et l'éco-conception des composants automobiles [6].



Figure III.2 : Le jute

Fibres de chanvre :

Le chanvre est une variété de plante cultivée. C'est une plante annuelle de la famille Cannabis (**Figure 3**). Les principaux producteurs sont la France et l'Italie. Les fibres de chanvre sont très recherchées comme renfort dans les composites à matrice thermoplastique à cause de sa grande rigidité et de son intérêt économique. Elles sont appliquées dans les structures internes, les pièces automobiles et les matériaux de construction.



Figure III.3 : Le chanvre

Fibres de sisal :

Le sisal est le nom de la fibre extraite des feuilles d'une plante appelée l'Agave constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2m de long (Figure 4). L'originaire de l'est du Mexique, cette fibre sert à la fabrication de cordage, de tissus grossiers et de tapis.



Figure III. 4 : Le sisal

III .1 . 2.4. Fibres d'Alfa :

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes. Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête (**Figure 5**). La fibre d'alfa est généralement employée dans la fabrication du papier de haute qualité mais aussi utilisée pour la fabrication de cordages, d'espadrilles, de tissus grossier, tapis et panier. Les principaux producteurs sont : Algérie (4.000.000 ha), Maroc (3.186.000 ha), Tunisie (600.000 ha), Lybie (350.000 ha) et Espagne (300.000 ha).[7]



Figure III.5 : l'Alfa

III.1.2.5. Fibres de lin :

Le lin est une plante cultivée dans les régions tempérées. Il se présente sous l'aspect d'une tige unique pouvant atteindre une hauteur voisine de 1m pour un diamètre au collet de l'ordre de 2 mm. Sur cette tige se répartissent 80 à 100 feuilles simples. La fibre de lin est la plus ancienne au monde, elle est trouvée dans la grotte de Géorgie, les pays asiatique centrale et l'Egypt. (**Figure .6**) La fibre de lin est parmi l'une les fibres naturelles utilisée comme renfort dans les composites à matrice thermoplastiques pour les structures internes dans l'industrie automobile. En 1941, ces composites ont été utilisés pour fabriquer les carrosseries de voitures Henry Ford, pour avoir une résistance 10 fois plus élevée que l'acier sous l'impact .



Figure III.6 : Le lin .

III .1.2.6. Fibres de ramie :

Le nom scientifique de la Ramie est *Boehmeria nivea*. C'est une plante vivace herbacée de 1m à 2,5 m de haut, avec des feuilles de forme de coeur, de 7 à 15 cm de longueur et de 6 à 12 cm de large et de couleur blanches sur la face inférieure avec des petits poils denses.

Aujourd'hui, la ramie est principalement cultivée en Chine, Brésil, Philippines, Inde, Corée du Sud, Thaïlande et États-Unis d'Amérique.

Les fibres de ramie ont une longueur moyenne comprise entre 40 et 250 mm, un diamètre moyen de 45 μ m. Ces fibres sont utilisées comme renforts dans les composites à matrice polyester, époxy et polypropylène.



Figure III.7 : La ramie

III .1.2.7. Production et disponibilité des fibres végétales :

[8] La (Figure 8) représente la tendance de la production de cultures de fibres végétales dans le monde pour toutes les applications industrielles au cours du deuxième moitié du siècle dernières.

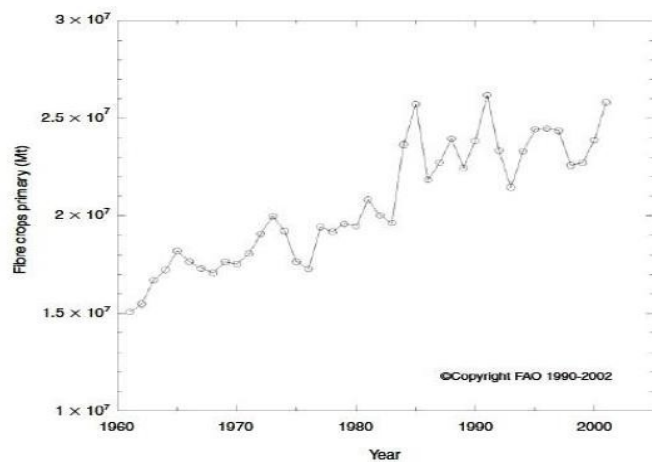


Figure 8 : Cultures mondiales de fibres primaires pendant les dernières decenies

Cette production mondiale annuelle de fibres végétales est estimée entre les années 2001 à 2008 à 6200Kt hors coton (22600Kt) et bois.

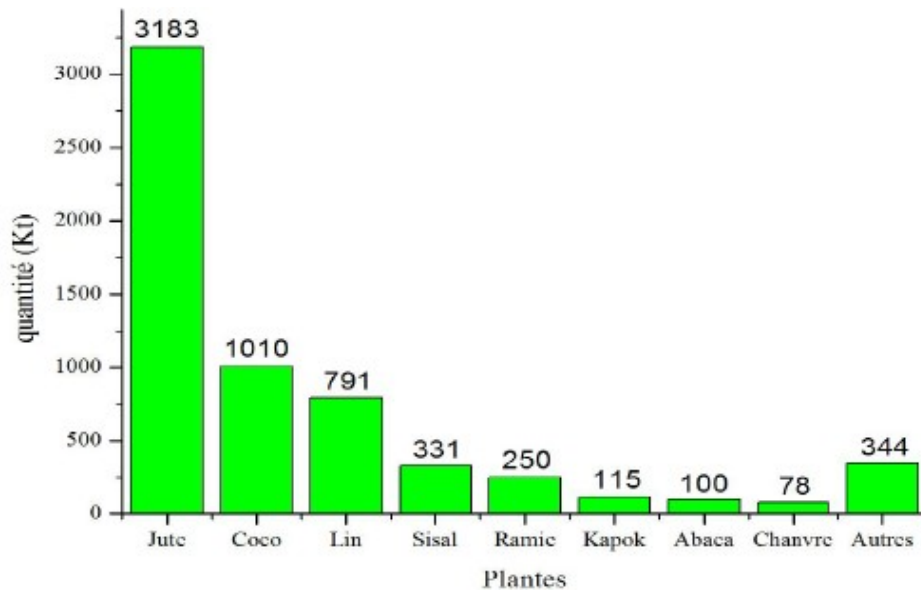


Figure III. 9 : Production mondiale de fibres végétales hors coton et bois (2001-2008).

La moitié du gisement mondial (hors coton et bois) est issue de la culture du jute et de ses fibres apparentées et analogues. L'industrie du jute emploie directement et indirectement 11 millions de personnes à travers le monde.

Les fibres les plus représentées ensuite sont le coco et le lin avec respectivement 16 et 13% de la production mondiale. Il existe également de nombreuses espèces végétales dont il est possible d'extraire des fibres soit des tiges (chanvre, ramie, kenaf, bambou, ortie, miscanthus, etc.), soit des feuilles (sisal, abaca, etc.) ou soit des graines (kapok, etc.) .

III.1.3. Structure d'une fibre végétale :

Les charges à base de cellulose sont des matériaux simples, chimiquement et physiquement. Si l'on ignore l'eau absorbée, les principaux constituants des renforts à base de cellulose se composent de trois types de produit chimiques : environ la moitié de celle-ci est la cellulose et environ un quart de celle-ci est l'hémicelluloses et la lignine. Elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques en faibles proportions [9].

Les constituants majoritaires des fibres lignocellulosiques déshydratées sont la cellulose, les hémicelluloses et les lignines (**Figure 10**).

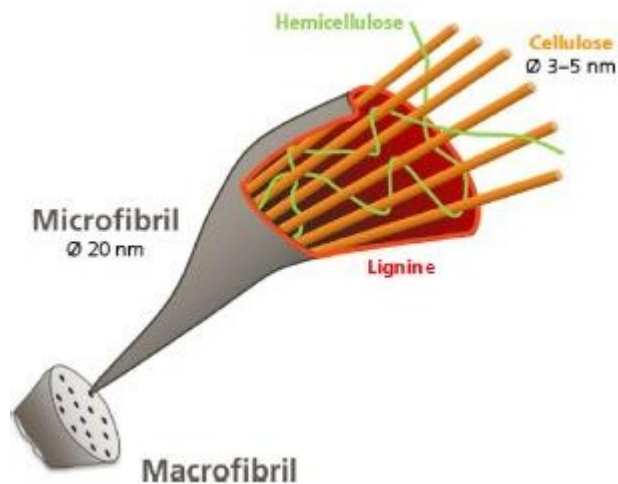


Figure III. 10 : Structure schématique d'une fibre végétale

III.3.1 : La cellulose

L'existence de la cellulose comme matériau commun dans les parois cellulaires végétales était d'abord découverte par Anselm Payen en 1838 . [10].

La cellulose représente la molécule biologique la plus abondante sur terre. D'un point de vue chimique, la cellulose est une macromolécule constituée par une très longue chaîne stéréo-régulière composée de maillons de glucose $C_6H_{12}O_6$ (Figure 11).

La cellulose possède une structure fibrillaire et partiellement cristalline. Les microfibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines ordonnées et de zones amorphes totalement désordonnées.

Dans la zone cristalline, les chaînes cellulosiques sont disposées parallèlement les unes aux autres, liées par des liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogène qui se développent entre les chaînes. Les interactions moléculaires sont fortes et assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs. Grâce à sa grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. La cellulose est de nature très hydrophile .

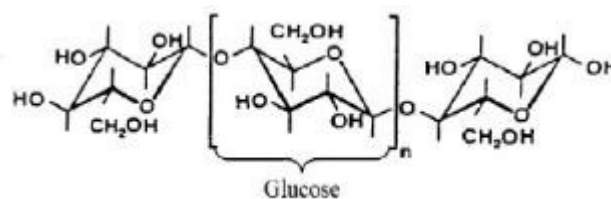


Figure III. 11 : Molécule de la cellulose.

III .1.3.2. Les hémicelluloses

Dans la plupart des fibres naturelles, la cellulose est mélangée à des hémicelluloses qui sont également des polysaccharides composés d'une combinaison de cycles à 5 et 6 carbones (**Figure 12**).

L'hémicellulose forme la matrice de support des microfibrilles de cellulose. L'hémicellulose diffère de la cellulose par trois aspects. Tout d'abord, elle est composée de sucres neutres : xylose, arabinose, galactose, glucose, mannose, et d'acides uroniques alors que la cellulose ne contient que des unités 1,4-βD-glucopyranose. Deuxièmement, elle présente un degré considérable de branchements contenant des groupes latéraux à l'origine de sa nature non-cristalline. Enfin, à l'état naturel, elle a un degré de polymérisation compris entre 50 et 300, tandis que celui de la cellulose native est 10-100 fois plus élevé. L'hémicellulose est très hydrophile, soluble en milieu alcalin, et facilement hydrolysable dans les acides

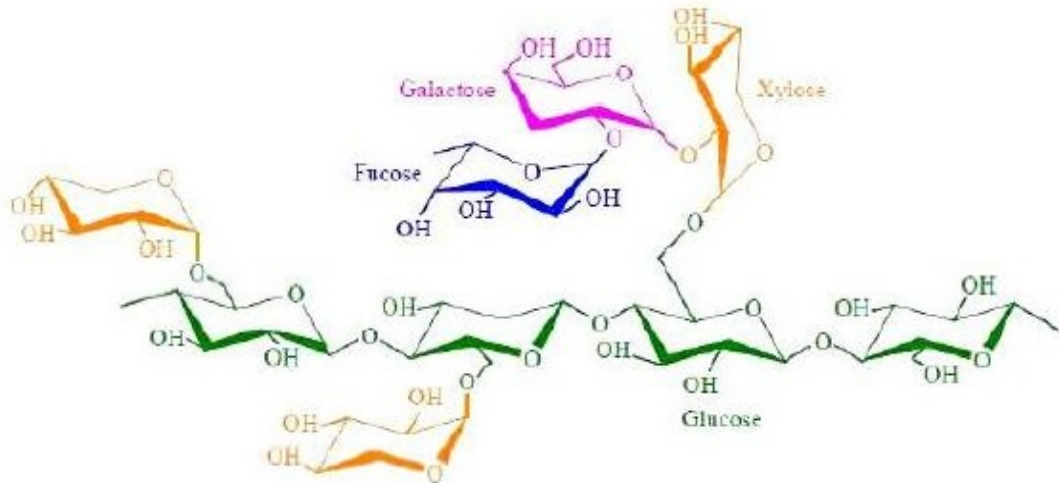


Figure III. 12: Structure d'un type de xyloglucane .[10]

III.1.3.3. Les lignines

La lignine est une macromolécule extrêmement hétérogène composée de polymères aromatiques. Elle représente, après les polysaccharides, le polymère naturel le plus abondant sur terre. Elle participe à la rigidité structurale des parois cellulaires et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes. La lignine est une molécule à trois dimensions

composée d'unités de phényle propane (**Figure 13**). Les unités primaires (monolignols) constituant la lignine sont l'alcool coniférylique, l'alcool sinapylique et l'alcool *p*-coumarylique (**Figure 14**). Au cours du processus de lignification, des phénol oxydases végétales telles que les laccases interviennent et permettent la polymérisation des différentes unités élémentaires. Une fois synthétisée, la lignine s'associe avec les différents polysaccharides pour former une matrice constitutive de la paroi végétale .

La lignine est totalement amorphe et hydrophobe. Elle n'est pas hydrolysée par les acides, mais soluble à chaud dans la soude, facilement oxydée et facilement condensable avec du phénol [11]

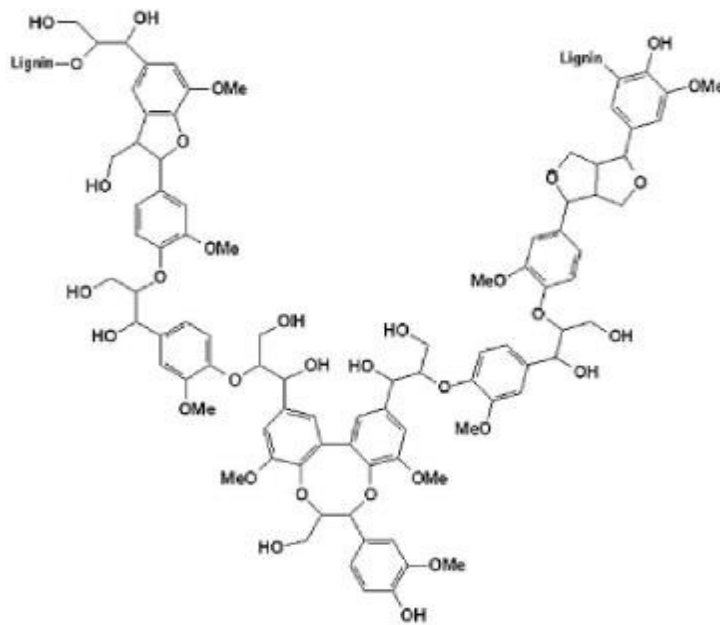


Figure III.13 : Représentation schématique de la lignine [12]

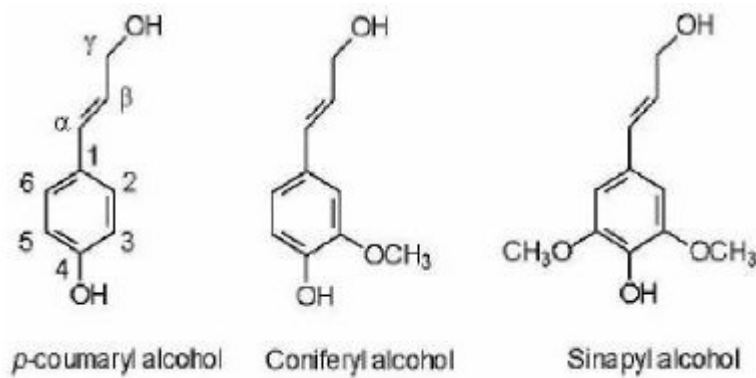


Figure III.14 : Structure des précurseurs de la lignine [12]

Le Tableau III.1 présente La composition chimique de certaines fibres végétales.

Fibres	Celluloses (wt%)	Hémicelluloses (wt%)	Lignines (wt%)	Pectines (wt%)
Lin	60-81	14-18.6	2-3	1.8-2.3
Jute	51-72	12-20.4	5-13	0.2
Sisal	43-88	1 0-12	4-12	0.8-2
Chanvre	70-78	17.9-22	3.7-5	0.9
Kenaf	36	21	18	2
Ramie	68.6-76	13.1-15.0	0.6-1	1.9-2
Coton	82.7-90	2-5.7	0.5-1 5.	7
Bois	45-50	23	27 -	
Palmier dattier	41-45	6-10	30-40	

Tableau III.1 : Composition chimique de certaines fibres végétales.[13]

III.1.4 . Avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres lignocellulosiques ont un avantage par rapport aux fibres synthétiques, puisqu'elles forment des boucles au lieu de se rompre au cours de leur transformation et de leur fabrication. En outre, la cellulose possède une section transversale ovale aplatie qui augmente le transfert de charge en présentant un rapport d'aspect effectivement plus élevé [14]

Le Tableau III .2 présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales comme renfort dans les composites.

Avantages	inconvénients
Faible coût	Absorption d'eau
Biodégradable (pour l'environnement)	Biodégradabilité (pour le matériau)
Resource renouvelable	Fibres anisotropes
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Pour des applications industrielles, nécessite de gestion d'un stock
Demande peu d'énergie pour la production	Faibles stabilité dimensionnelle
Non abrasif pour les outillages	Faible tenue thermique (200 à 300°C max)
Bon isolant thermique et acoustique	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, des conditions
Neutre pour l'émission de CO ₂	Météorologiques
Pas de résidus après incinération	Renfort discontinu
Pas d'irritation cutanée lors de la Manipulation des fibres	

III.2- Extraction des fibres végétales :

III.2 . Méthodes d'extraction des fibres

Habituellement, pour un usage de renfort de matériau composite, les fibres végétales sont prélevées dans la chaîne de transformation de l'industrie textile. Cette filière a développé, depuis de très nombreuses années, des techniques pour séparer les fibres du reste de la plante. Les techniques utilisées pour séparer et présenter les fibres sont l'extraction mécanique, chimique et biologique. [14]

III. 2 .1. L'extraction mécanique : [15]

a. teillage

Cette méthode consiste à séparer les fibres (tiges) par action mécanique tel que le Broyage et le battage, Cette technique est plutôt utilisée pour extraire les fibres de lin ou de chanvre. Elle est assurée par des machines automatisées qui engagent, maintiennent et dégagent automatiquement les tiges grâce à des systèmes de roues cannelées à grosses dentures au début puis à plus fines denture. Par la suite, les fibres passent sous la cannelure des rouleaux avec un angle proche de 90° pour rendre le broyage plus efficace. L'opération est effectuée successivement côté pied et côté tête. Les fibres courtes appelées aussi étoupes, moins résistantes, et les anas sont récupérées par aspiration et séparées.

b. déflexion

L'extraction des fibres se fait par action combinée de grattage et de battage. Les machines appelées «raspadors» (grattoir en langue espagnole) râpent les feuilles de la plante et libèrent les fibres. Ces machines principalement constituées par un axe rotatif entraîné par un moteur, sur lequel des supports maintiennent des batteurs en acier ont été fixés. Les tiges insérées en amont de la machines, sont prises entre ces batteurs et une table à ciseaux, râpées et guidées vers le coté opposé. La poudre et le bois passent à travers des cribles. La distance qui sépare les lames est réglable en fonction du lot.

c. laminage

Les tiges sont découpées en morceaux qui sont ensuite écrasées sous presse ou par laminage ou encore par combinaison des 2 traitements. Ceci est effectué plusieurs fois de suite jusqu'à ce que les fibres soient suffisamment séparées.

3.2.2. L'extraction chimique :

Plusieurs méthodes basées sur la séparation chimique de la cellulose des autres composants non cellulosiques existent dans la bibliographie. Elles permettent d'éviter les inconvénients de l'extraction mécanique, et surtout un gain de temps et d'énergie considérables. Dans cette section, nous présentons les principales méthodes d'extraction chimique des fibres végétales.

a. Procédé Kraft

Ce procédé alcalin vise à éliminer la lignine, les pectines et les hémicelluloses sous l'action d'une solution d'Hydroxyde de Sodium (NaOH) et de Sulfure de Sodium (Na₂S). Ce dernier est un réducteur, il protège la cellulose et évite son oxydation. La température de cuisson est comprise entre 170° et 175°C pour une durée de 2 à 4 heures.

b. Procédé au bisulfite

Ce procédé permet de séparer la lignine des fibres de cellulose en utilisant divers sels de l'acide sulfureux. Les sels utilisés dans le processus de réduction sont en fonction du pH: des sulfites (SO₃²⁻) ou bisulfites (HSO₃⁻). Il est basé sur la réaction sur la lignine de l'hydrogène sulfite de calcium, sodium, ammonium ou magnésium contenant de l'anhydride sulfureux libre. Le pH est situé entre 1.5 et 5 (sulfites ou bisulfites), la durée est entre 4 et 14 heures et la température de 130° jusqu'à 160°C qui sont aussi en fonction de la base utilisée.

c. Procédé acide

Les composants non cellulosiques sont éliminés par l'action d'un acide de préférence fort (acide sulfurique). L'acide transforme la lignine en acide lignosulfonique soluble, ou

l'acide chlorhydrique, et qui grâce à ses ions chlorates forme des chlorolignines solubles dans l'hydroxyde de sodium.

d. Procédé à la soude

Ce procédé n'utilise que la soude NaOH pour dissoudre les substances non celluloses telles que la lignine, la pectine et l'hémicellulose, ainsi que les différents constituants formant la réserve et la paroi extérieure de la tige de plante. La température, la pression, la concentration et la durée du traitement sont à définir en fonction du lot, l'âge et le type de la plante de telle façon à ne pas dégrader les fibres celluloses. Il est conseillé de contrôler le pH de la solution et l'ajuster autour de 7. Des réducteurs peuvent être rajoutés pour empêcher l'oxydation de la cellulose.

III .2.3. L'extraction biologique [16]

a. Le rouissage à terre

Le rouissage est un procédé naturel destiné à favoriser l'extraction des fibres. Il consiste à étaler les tiges (de lin par exemple) dans un champ après sa récolte, afin de bénéficier de l'action combinée du soleil et de la pluie favorisant le développement de microorganismes capables de séparer les éléments non celluloses de la partie fibreuse de la plante. Cette opération peut durer de 6 à 8 semaines en fonction de la météo. Malgré l'efficacité de cette méthode, elle connaît plusieurs inconvénients qui résident dans sa dépendance entière des conditions météorologiques (excès d'humidité, vent très fort). Donc le rouissage à l'air est un procédé efficace si la météo est bonne mais qui reste très lent, par conséquence, c'est un procédé aléatoire.

b. Le rouissage à l'eau

Ce type de rouissage repose sur le même principe de développement de microorganismes que le rouissage à l'air, la différence est que les tiges (de chanvre par exemple) sont plongées dans l'eau pendant plusieurs jours. Les bottes de 5 à 7 Kg sont soumises à l'action de bactéries anaérobies. Dès que les fibres se détachent sur toute la longueur, la plante est sortie de l'eau pour être séchée. Cette technique donne des résultats moins aléatoires que la première mais elle présente un inconvénient majeur : la pollution de l'eau. En effet, le rouissage du lin et du chanvre est très répandu au nord de l'Europe (France, Belgique, Pays Bas). Le rouissage à l'eau est effectué ensuite en cuve, dans de l'eau tempérée (37°C) jusqu'à ce que les fibres soient délignifiées et non adhérentes. Cette technique est en régression continue, au profit du rouissage à terre.

c. Par action microbienne

Trois groupes d'agents microbiens sont capables de dégrader les composants non cellulosiques présents dans les tiges ou les feuilles des plantes : les bactéries, les protozoaires et les champignons. Dans la première catégorie de bactéries, il existe trois espèces, une qui possède une activité dépolymérase et une autre glycosidasique capables d'hydrolyser la chaîne principale et de couper les chaînes latérales en utilisant les oligosaccharides et les oses libérés. La deuxième possède uniquement une activité dépolymérase mais incapable d'utiliser les produits d'hydrolyse des hémicelluloses. Enfin la troisième, qui possède des activités glycosidasiques mais dépourvue d'activité dépolymérase.

Plusieurs espèces des protozoaires sont capables de dépolymériser les hémicelluloses, ainsi que pour les substances pectiques, mais elles n'ont qu'une capacité limitée à utiliser les produits d'hydrolyse comme source d'énergie. Concernant les champignons, ils sont capables de dépolymériser les hémicelluloses et d'utiliser les oligosaccharides et les oses libérés, et de solubiliser partiellement la lignine. Cependant, elles ne peuvent pas dépolymériser les pectines.

III.3- Méthodes de caractérisation des composites à fibres végétales

III.3.1 .. Introduction

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétales dans la construction remonte aux années où l'on fabriquait des briques renforcées par la paille ou des roseaux. Dans le temps moderne (depuis l'année 1970), le premier composite liant avec les fibres végétales était le plâtre. De ce fait, plusieurs ouvrages sont réalisés avec le plâtre renforcé de fibres végétales.

Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine de renforcement du ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les fibres végétales. [17]

Caractéristiques mécaniques :

Les produits ont été caractérisés selon leurs propriétés mécaniques au regard des applications attendues et dans l'esprit de la démarche produit/procédé/matériau. C'est dans cet esprit que les essais de flexion, de traction, d'impact et de torsion sont utilisés pour déterminer les propriétés phénoménologiques du matériau en vue dans un premier temps de qualifier notre produit. Les essais de flexion ont permis de mesurer les caractéristiques telles que le

module d'Young, les contraintes et les déformations en flexion. L'essai d'impact au choc IZOD a permis de déterminer la résilience des matériaux. Enfin les essais de traction et de torsion ont permis de déterminer respectivement les caractéristiques telles le module de traction, la résistance maximale avant rupture, l'allongement pour cent après rupture et le module de Coulomb pour la torsion.

Essai de traction

A . Principe

L'éprouvette est soumise à un effort de traction selon son axe principal, à une vitesse constante. La force résultante est mesurée jusqu'à ce que l'éprouvette se rompe ou que son allongement atteigne une valeur prédéterminée (**figure 15**).

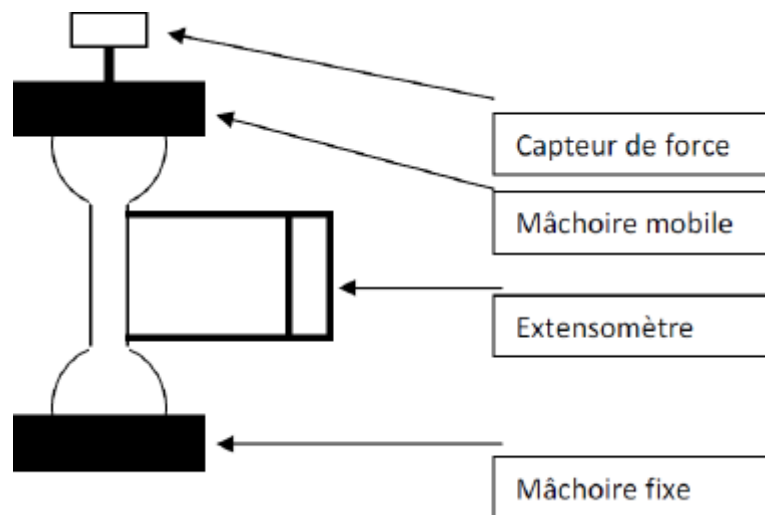


Figure III. 15. Schéma de principe de l'essai de traction.

B) Intérêt

Il permet d'obtenir une courbe contrainte-déformation afin de calculer :

- Différentes contraintes (élastique, maximale, à la rupture),
- Différentes déformations relatives,
- Le module d'élasticité et de comparer ces résultats aux données du fournisseur ou à un cahier des charges.

- Calcul des contraintes : $\sigma = F/S_0$ En MPA
- Calcul des déformations : $\epsilon = \Delta l / L_0$ sans unité ou en %
- Calcul du module d'élasticité :
dans la partie linéaire: $E = \sigma / \epsilon$ en MPA

- Calcul du coefficient de Poisson : $\Delta d / d = \nu \Delta l / l$ sans unité

III .3.2.1.1. Caractéristiques Physiques et Mécaniques des Fibres Végétales

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre sa densité et son teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Et elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité.

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales ont été traitées par beaucoup de chercheurs [18]

A titre d'exemple sur le tableau 1-7(a) et 1-7 (b) dans leur étude concernant les fibres végétales, ont constaté que la résistance à la traction et le module d'élasticité des fibres végétales sont proportionnelle à leur teneur en cellulose. Ainsi, ils ont remarqué que la résistance dépend de la forme des spirales des filaments (voir figures 1.2, 1.3, 1.4) ils constatent que les fibres à grand angle spiral ont une grande déformabilité, mais une faible résistance, tandis que les fibres à faible angle spirale ont une faible déformabilité et une grande résistance.

A titre d'exemple la figure 1-2 schématise une fibre végétale et montre les spirals des filaments des fibres. Tandis que, les figures 1-3 et 1-4 donnent la variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur en cellulose et de l'angle spirale des filaments.

Sur le tableau 1-7(a), nous constatons que les fibres végétales sont naturellement humides. Pratiquement elles absorbent des quantités importantes d'eau à la saturation. Nous remarquons sur le tableau 1 - 7 (b) que la densité de ces différentes fibres est très rapprochée, alors que leurs résistances à la traction et leurs modules d'élasticité sont très variable. Cela est dû à la variation de leur composition chimiques et leur texture et spécialement l'orientation de leurs filaments et leur angle spiral.

Tableau III.2-7(a) : Les caractéristiques physiques des fibres végétales les plus utilisées

Fibre	Référence	Diamètre (mm)	Densité (g/cm ³)	Teneur en eau à l'état naturel (%)	Absorption d'eau après 5 min (%)	Absorption d'eau à la saturation (%)
Sisal	[1]	-	1.5	-	-	-
	[12]	-	1.37	-	89.30	92
	[19]	0.08-0.30	0.75-1.07	10.97-14.44	67-92	190-250
Noix de coco	[1]	-	1.2	-	-	-
	[12]	-	1.17	-	43.20	80.40
	[19]	0.11-0.53	0.67-1.00	11.44-15.85	22-28	85-135

Tableau III .3-7(b) : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales

Fibres	Référence	Densité (g/cm ³)	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
Cotton	[1]	1.5-1.6	7.0-8.0	587-597	5.5-12.6
Jute	[1]	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
Lin	[1]	1.5	2.7-3.2	345-1035	27.6
Chanvre	[1]	--	1.6	690	--
Ramie	[1]	--	3.6-3.8	400-938	61.4-128
Sisal	[1]	--	2.6	278	--
	[12]	1.37	5.2	363	15.2
	[19]	0.75-1.07	2.08-4.08	577.50	10.94-26.70
	[22]	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
Noix de coco	[1]	1.2	30.0	175	4.0-6.0
	[12]	1.17	37.7	107	2.8
	[19]	0.67-1.00	13.7-41.0	174	2.5-4.5
	[22]	1.33	-	72	2.0
Palmier Dattier	[16]	0.51-1.08	7.5-17.4	170-290	2.1-5.25

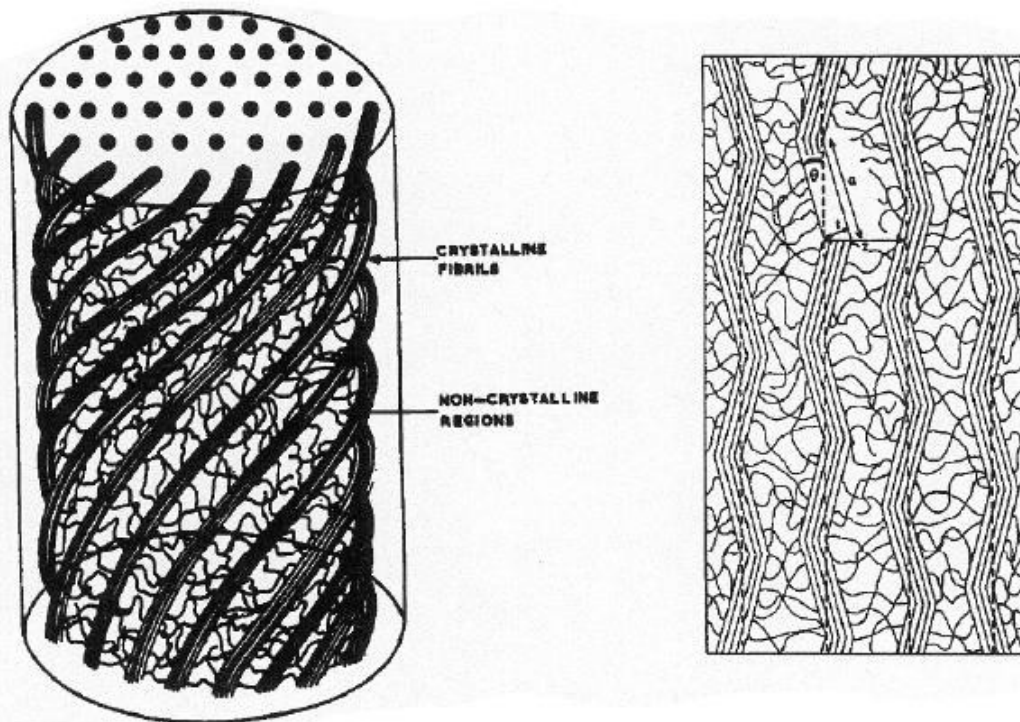


Figure III.16. : Schématisation des fibres végétales[18]

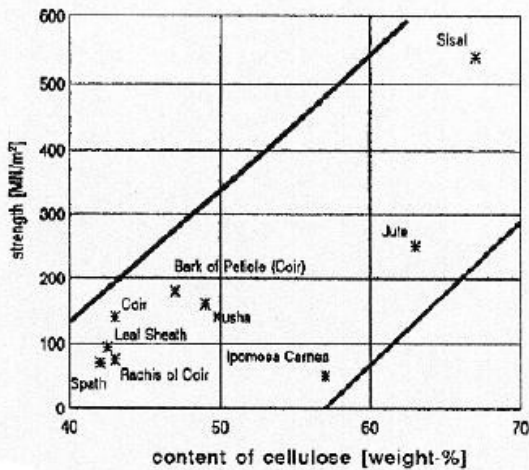


Figure III.17: Variation de la résistance en fonction du % de cellulose

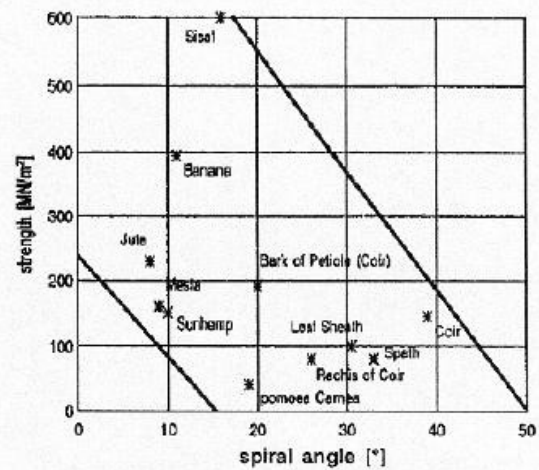


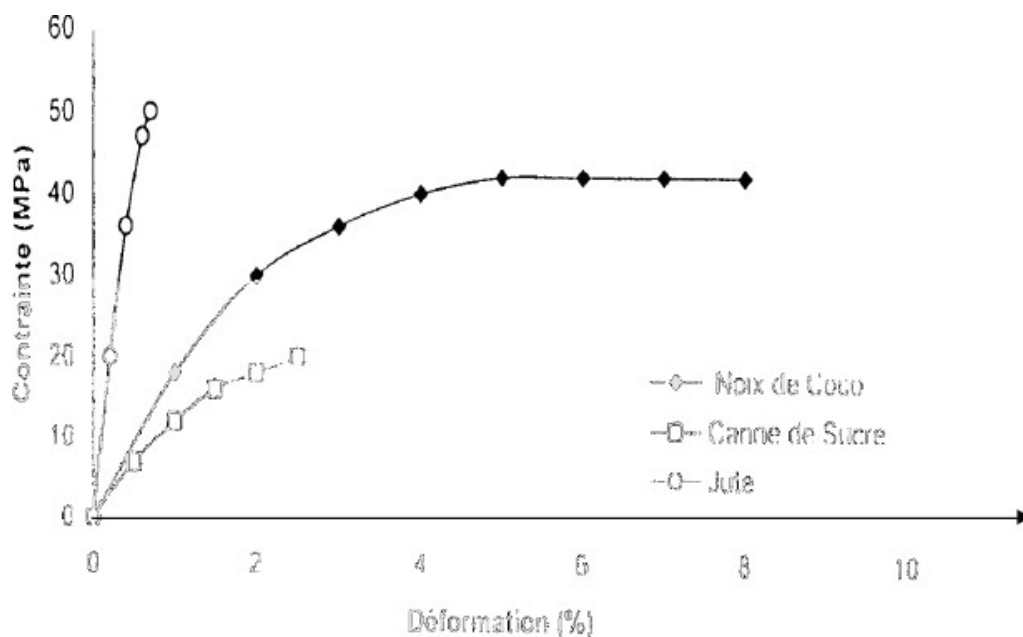
Figure III.18. : Variation de la résistance en fonction de l'angle spiral

Comportement en Traction des Fibres

Le comportement en traction des fibres dépend de la nature de celle-ci. Ainsi, si le comportement en traction de l'acier est défini avec précision (élasto-plastique écrouissable) du fait que l'acier est un matériau homogène, le comportement des fibres végétales ne l'est pas parce qu'il dépend de plusieurs paramètres très variables tels que la composition chimique, la teneur en eau et l'éclatement (L/d).

La Figure.2-1 présente quelques courbes expérimentales (contrainte déformation) données par [19]

. Selon ces courbes nous constatons que les fibres testées (Canne de sucre, Jute ou Noix de coco) ont un comportement presque élastique et linéaire au démarrage de l'essai ensuite un comportement plastique jusqu'à la rupture.



a) Figure III.19: courbe contrainte déformation de quelques fibres végétales

Mécanisme d'endommagement dans un composite :

ENDOMMAGEMENT DES MATERIAUX COMPOSITES

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui conduit à l'apparition de défauts locaux. il désigne les phénomènes de création de nouvelles surfaces au sein d'un matériau sous l'effet d'une sollicitation. le définit comme étant une augmentation de

la taille ou du nombre de fissures ce qui engendre une diminution des caractéristiques mécanique de tout le système provoquant sa ruine qui est un phénomène très complexe où plusieurs mécanismes d'endommagement différents apparaissent et interagissent. Chaque constituant fibre, matrice ou interface peut être affecté par un mécanisme d'endommagement.

Constituants	Matrice	Fibre	Interface	
			Inter-ply	Fibre-matrice
Mécanismes d'endommagement	Micro fissuration Micro vides Macro fissuration	Rupture des fibres	Déamination	Décohésion fibre-matrice

Ces endommagements ne sont pas présents uniformément dans la structure. Ils dépendent du type de sollicitation, mais aussi de l'orientation et de la proportion des renforts, du fait de l'hétérogénéité de leur structure, il n'existe pas de mécanisme unique mais plusieurs types de dégradations différentes par leur nature et leur mode de développement. Ces dégradations apparaissent à différentes échelles. Ainsi, on distingue²⁸ :

NB : [28]J. Cinquin, "Les composites en aérospatiale", Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites, 2002

- A l'échelle microscopique; apparaissent des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice ce sont des décohésions fibres/matrice ou alors dues aux porosités,
- A l'échelle mésoscopique, ou l'échelle du pli; on observe des fissures intra-laminaires transverses, perpendiculaires à la direction de sollicitation ou longitudinales, dans la direction de l'application de l'effort et des ruptures de fibres au stade ultime de la ruine du matériau,
- A l'échelle macroscopique; on observe le phénomène de délaminage qui correspond à une séparation locale entre deux couches, liée à une concentration importante des contraintes en cisaillement s'amorçant généralement aux bords libres de la structure.

III.3.2.2.2.MICROFISSURATION, DECOHESION FIBRE-MATRICE

Ce sont les premiers endommagements qui apparaissent si la matrice est soumise à un chargement important. A l'échelle microscopique, les défauts représentent le lieu propice pour l'amorçage des endommagements à l'échelle macroscopique²⁹ .

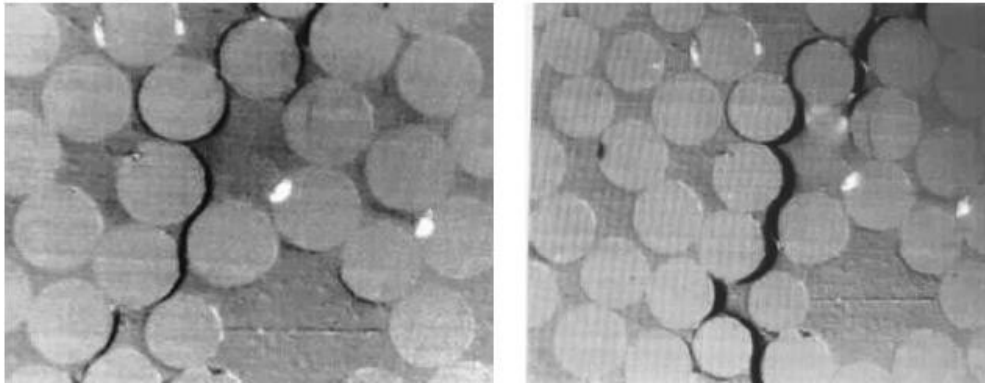


Fig. III.20. Fissure matricielle formée à partir de la coalescence des décohésions et microfissures matricielles[20]

Parmi les causes de ces décohésions, la présence de micro-défauts au niveau de l'interface fibre-matrice comme des micro-vides qui donnent naissance à des décohésions ainsi que les contraintes d'origine thermique ou l'état de contrainte locale induit par la répartition aléatoire des fibres[21].

FISSURATION MATRICIELLE

Elle est essentiellement la principale cause de la détérioration de la matrice dans la mesure où sans pour autant être directement nocive, elle peut être à l'origine de l'apparition d'autres phénomènes plus endommageant.

L'orientation de la fissuration est fortement liée à l'architecture du matériau et à sa forte anisotropie. De nombreux travaux se sont penchés sur ce mécanisme [22] [23] [24]

Il existe cependant d'autres paramètres influençant l'apparition de ce type d'endommagement tels que le facteur thermique comme il a été démontré [34,35], ou alors l'effet de l'épaisseur du pli dans l'apparition ainsi que l'évolution et la densité des fissures [36,37,38].

Concernant l'évolution du nombre de fissures, elle progresse jusqu'à atteindre le niveau de saturation où l'augmentation de charge appliquée ne provoquera plus l'apparition de nouvelles fissures, elle est également influencée par l'épaisseur du pli [39], ainsi que le type d'empilement, il a été démontré [40] que les empilements du type distribué $((\alpha, \beta, \theta)_n)_s$ présente un niveau d'endommagement moins élevé que les empilements compacts $((\alpha_n, \beta_n, \theta_n))_s$

DELAMINAGE

On peut définir le délaminage comme la rupture des interfaces existant entre des plis différents. On distingue trois types de délaminage :

- Le micro-délaminage

Originaire des fissures matricielles qui sont stoppées à l'interface entre deux plis.

offrent ne analyse de l'interaction entre ces deux modes d'endommagement. En pointe de fissure, les concentrations de contraintes induites sont telles que ce phénomène peut apparaître entre les deux plis voisins. Le micro-délaminage est le responsable de l'état saturé de la fissuration matricielle et son apparition annonce la rupture brutale par localisation des endommagements

a. Les mécanismes d'endommagement :

Le procédé global de la rupture dans les composites est souvent considéré comme un processus d'accumulation de différents types d'endommagements. Les mécanismes d'endommagement potentiels d'un matériau hétérogène, notamment les composites à base polymère soumis à une sollicitation mécanique, peuvent se regrouper en trois principaux modes

différents selon le site où ils opèrent (Figure 1):

- Fissuration matricielle ;
- Rupture de l'interface fibre /matrice et déchaussement de fibre, Délaminage (décohésion étendue intra plis);
- Rupture des fibres;
- Délaminage inter plis

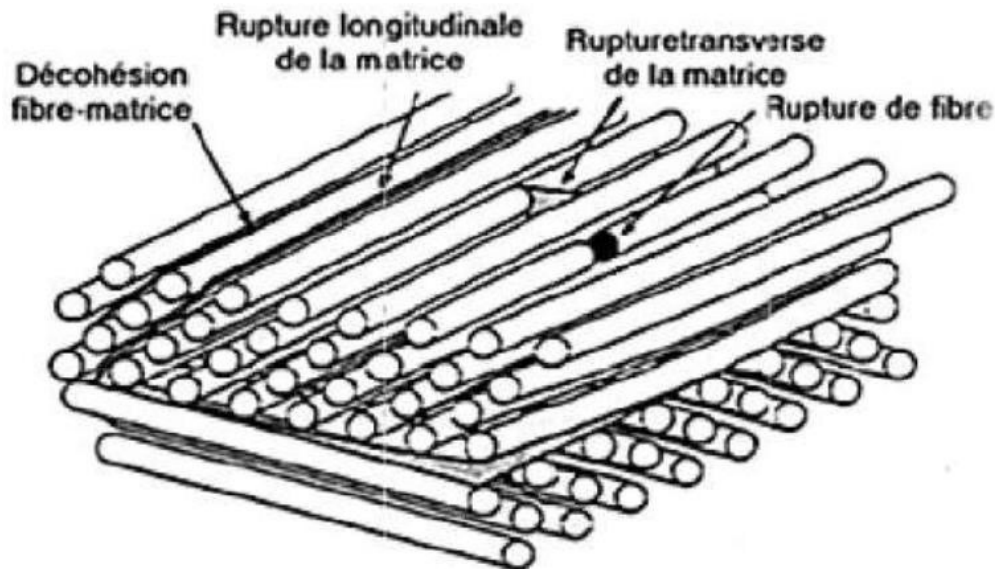


Figure.III. 21: Mécanismes d'endommagement observés dans un composite

1.1. Comportement de l'interface fibre-matrice dans les composites

Généralité :

Les caractéristiques de l'interface sont fonction de plusieurs paramètres: les propriétés physicochimiques des constituants (fibres et matrice), la microstructure de l'interface (interphase et rugosité), les contraintes thermiques résiduelles, la méthode d'élaboration du composite, etc. Il est donc évident que la qualité des liaisons interfaciales (faibles ou fortes) et la résistance au frottement sont des paramètres déterminant le comportement du composite. D'autres facteurs aussi importants que le choix des constituants sont liés directement à la performance du composite (Figure 22.)

Le procédé de fabrication de ce composite et les propriétés de l'interface entre les fibres et la matrice.

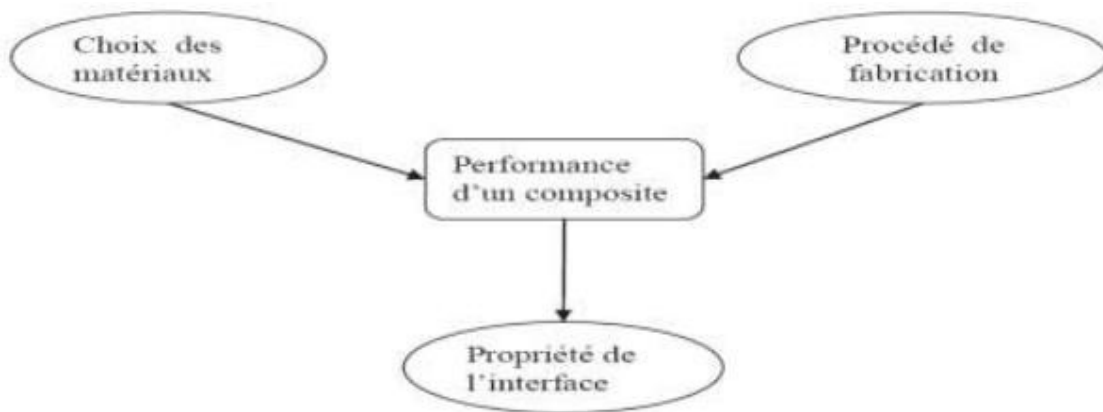


Figure III.22 : Paramètres qui conditionnent les performances d'un composite.

En effet, il est reconnu que le comportement mécanique des matériaux composites dépend fortement de la liaison fibre/matrice qui s'établit entre les constituants lors de l'élaboration du composite. Cette liaison est constituée d'une ou plusieurs interphases et interfaces. Rappelons [25]

tout d'abord la distinction entre les termes interphase et interface :

interphases : Est une zone concentrique à la fibre, d'épaisseur fine (en général quelque 10 ou 100 nm) et de nature chimique définie (formée par un ou plusieurs constituants élémentaires du composite lors de son élaboration). Elle peut être également une fine couche introduite volontairement dans le but de protéger la fibre ou de contrôler la liaison interfaciale, ou bien encore de contribuer à améliorer la compatibilité chimique fibre/matrice (Figure 23, a). [26]

b- interface : Est un terme utilisé dans le domaine des matériaux composites, pour décrire la surface ou la zone qui sépare la fibre et la matrice (discontinuité macroscopique) (Figure 23, b). [27]

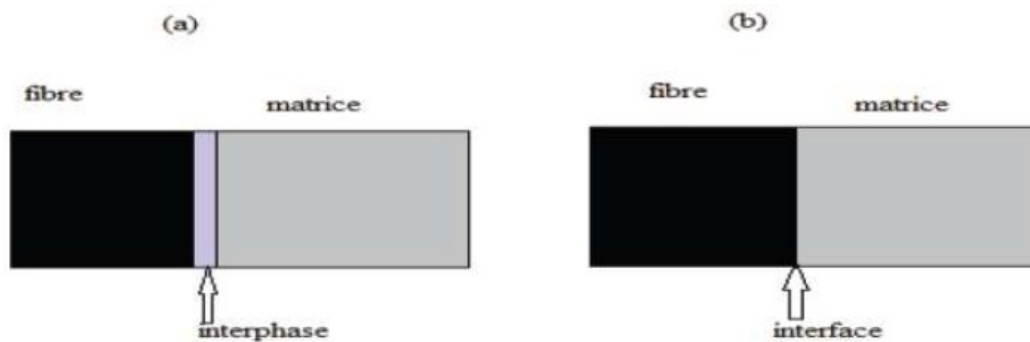


Figure III. 23 : Concepts d'interphase et d'interface

.1.2. Comportement d'un composite unidirectionnel :

Dans un composite céramique unidirectionnelle sollicitée parallèlement aux fibres, le comportement à rupture peut être imaginé comme étant constitué des séquences suivantes :

- Cas des fibres et matrice subissent la même déformation :

Le composite possède donc un comportement linéaire élastique jusqu'à l'apparition d'une première fissure matricielle. Cette fissure se propage et s'approche d'une fibre, ensuite on peut distinguer les cas suivants: [28]

a). Cas d'une interface très forte (interface liée):

Si l'adhérence entre fibres et matrice est très forte, la fissure continue sa propagation comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle, mode I (mode d'ouverture). Cela entraîne aussi des concentrations de contraintes sur les fibres voisines et provoque la rupture catastrophique du composite. Le comportement du composite est celui d'un matériau fragile et les fibres n'exercent aucun effet de renforcement sauf éventuellement par leur énergie de rupture. Qui ne peut plus jouer son rôle de renfort. Ce type de matériau possède un comportement fragile, comme une céramique monolithique. Alors la déformation des deux constituants est élastique.

Il n'y a aucun déplacement relatif entre fibre et matrice, le transfert de charge s'effectue par l'intermédiaire d'une forte contrainte de cisaillement dans la matrice, dont l'intensité décroît lorsqu'on s'éloigne radialement de la fibre. Figure24. [29]

b) Cas d'une interface très faible (non liée):

Si l'interface est trop faible, la fissure matricielle est bien déviée à l'interface, mais la décohésion entre fibres et matrice s'étend sur une très grande distance sur laquelle la matrice n'intervient donc plus. Là également, la résistance du composite est très faible, mode II et III.

[29]

c) Cas d'une interface relativement faible:

Si l'adhérence entre fibres et matrice est relativement faible, la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire (mode II de la rupture) en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface. Le mode II, ou mode de glissement droit, est la situation recherchée dans la déviation de fissure, avec le mode III (glissement vis). En règle générale, la propagation de la fissure est en mode mixte combinant le mode I et les deux autres modes (II et III) voir fig. II.24. [30]

- Mode I : mode d'ouverture de la fissure, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont

perpendiculaires à la direction de propagation [31]

- Mode II : mode de cisaillement dans le plan, où les déplacements aux lèvres de la fissure

sont parallèles à la direction de propagation

- Mode III : mode de cisaillement hors du plan, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles au fond de la fissure

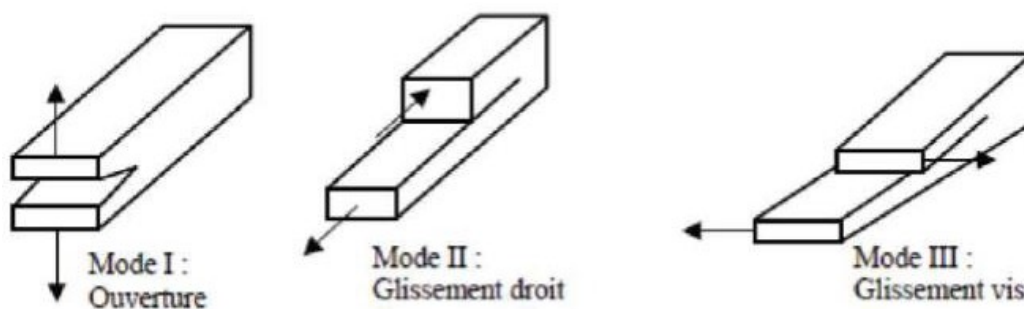


Figure III.24 : Modes d'endommagements

III .3.3. Traitement des fibres végétales

A. Traitements chimiques

1. Généralité :

Les méthodes de traitements chimiques se caractérisent par leurs capacités à nettoyer la surface de la fibre, mais aussi à la modifier. Cela permet de limiter le procédé d'absorption de l'eau, d'améliorer l'état de surface ainsi que l'interface entre les fibres et la matrice. Plusieurs critères sont retenus pour le choix de la procédure : 1) efficacité 2) absence de modifications interne de la fibre, 3) utilisation de produits accessibles à grandes échelles (industrialisation) et possédant un impact minimal sur l'environnement 4) absence de techniques et d'instrumentation complexe.

2. Traitement alcalin

Le traitement des fibres naturelles par l'hydroxyde de sodium (NaOH) est largement utilisé pour modifier la structure moléculaire cellulosique. Il modifie l'orientation des zones cristallines de la cellulose (Cellulose I → Cellulose II) [31] et forme plus de régions amorphes (Figure 25).

Ceci augmente l'accessibilité des produits chimiques. Dans la région amorphe, les chaînes de cellulose sont séparées et des molécules d'eau s'insèrent entre ces chaînes. Le traitement alcalin diminue le taux des groupements -OH de la cellulose et forme des groupements -O-Na⁺ entre les chaînes moléculaires de la cellulose [32] Ainsi, la sensibilité à l'humidité des fibres diminue. Ce traitement enlève également une partie des hémicelluloses, de la lignine, de la pectine, de la cire et des huiles [33]

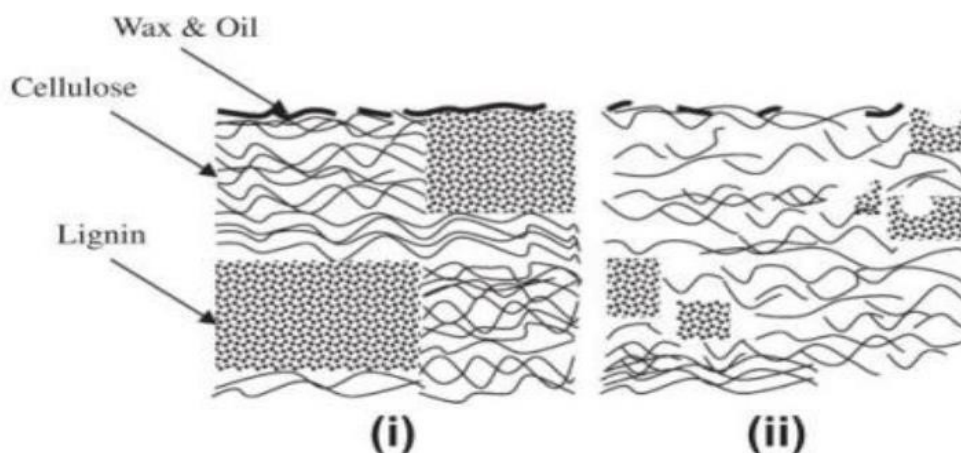


Figure.III.25– Structure typique de la fibre lignocellulosique (i) non traitée et (ii) et après traitement alcalin [L. Y. Mwaikambo and M. P. Ansell, “Chemical modification of hemp,

3. Acétylation

L'acétylation est une technique d'estérification des fibres naturelles. Les fibres sont acétylées avec l'acide acétique ou l'anhydride acétique en présence ou non d'un catalyseur acide pour greffer des groupements acétyles sur la cellulose (Figure I.16). Le groupement acétyle (CH₃CO) remplace le groupement hydroxyle (OH) hydrophile de la fibre. Ainsi, la nature hydrophile de la fibre diminue [34].

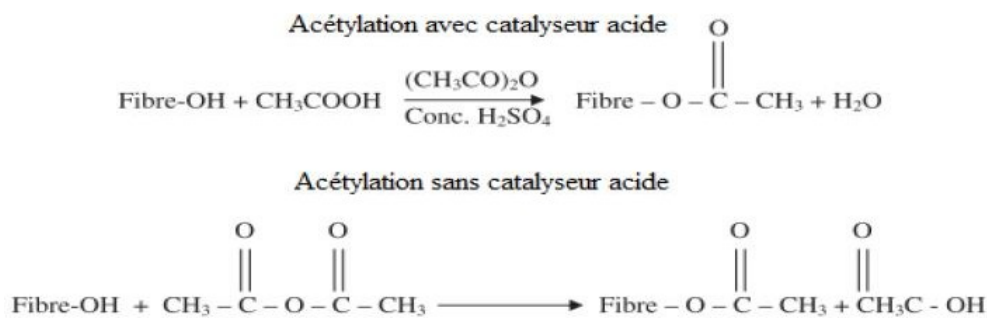


Figure.III. 26– Acétylation avec ou sans catalyseur acide [35]

4. Traitement par acide stéarique

Le traitement par acide stéarique est une autre technique d'estérification des fibres naturelles [36]. L'acide stéarique de formule CH₃(CH₂)₁₆COOH est utilisé pour modifier la surface des fibres. Le groupement carboxyle –COOH de l'acide stéarique réagit avec les groupements hydroxyles hydrophiles de la fibre et réduit sa sensibilité à l'humidité [37]

. Ce traitement peut conférer aux fibres naturelles un caractère extrêmement hydrophobe[38]. Cependant, il élimine certains constituants de la structure de la fibre (pectine, huile de cire, etc.). Par conséquent, les faisceaux de fibres se décomposent et des phénomènes de défibrillation se produisent [39]. Pour des applications composites, ce traitement favorise une meilleure liaison à l'interface fibres-matrice et fournit des meilleures propriétés des composites.

B. Les traitements physiques

Les différents traitements physiques utilisés pour la modification des fibres sont [22]:

Traitement plasma

Un des traitements physiques utilisés pour l'amélioration des propriétés interfaciales fibre naturelle/matrice polymère est le traitement plasma. Pendant le traitement plasma, le

substrat est bombardé par des particules de haute énergie se déplacement dans le flux de plasma.

Traitement corona

Les procédés de type corona (couronne) sont largement utilisés dans le traitement de surface des matériaux. Différents types de supports peuvent être traités: polymères, aluminium, textiles..., etc.

Le traitement thermique de séchage

Le séchage des fibres naturelles avant leur mise en oeuvre est un facteur important. Les quantités d'eau contenues dans les fibres sont parfois élevées et agissent comme agent de séparation entre la fibre et la matrice au niveau de l'interface. De plus, lors de la mise en oeuvre, l'évaporation de l'eau crée des vides dans les composites et conduit ainsi à la formation d'un réseau de défauts aléatoirement réparti et à de faibles propriétés mécaniques. Dans les cas des thermodurcissables, les températures de réaction dépassent généralement la température d'évaporation de l'eau. Aussi, les thermoplastiques sont mis en oeuvre à des températures largement au-dessus de 100°C. Dans ces deux cas, la présence de l'eau ou bien de sa vapeur favorise la formation de vides et de mauvaise propriété sinter faciales et macroscopiques. Cependant, lorsqu'une fibre lignocellulosique est exposée à la chaleur, des phénomènes de dégradation peuvent apparaître sur les différents constituants de la fibre (cellulose, hémicellulose, lignine, pectine, graisses...etc.) et dépend de la température et de la durée du traitement.

CHAPITRE IV :

***Phase de transfert de charge
dans un composite***

INTRODUCTION

Un composite ne peut remplir pleinement sa fonction mécanique que si les charges appliquées au matériau peuvent être transmises de la matrice à la fibre. Ce transfert de charge est bien entendu largement conditionné par la réponse mécanique de la zone de contact entre la fibre et la matrice, autrement dit de l'interface ou de l'interphase.

Il est possible de décrire les processus de transfert de charge par des modèles micromécaniques simplifiés considérant, par exemple, une [40] . constitué d'une fibre noyée dans un cylindre de matrice sur lequel est appliquée une contrainte de traction. L'écriture des équations d'équilibre élastique permet théoriquement de déterminer le profil de la contrainte de traction dans la fibre et celui du cisaillement à l'interface. A partir de ces données, il est possible d'évaluer la courbe contrainte-déformation du composite.

En fonction du comportement supposé de l'interface, différentes réponses peuvent être simulées. Dans cette fiche, deux modèles pionniers dans ce domaine, ceux de Cox [41] et de Kelly-Tyson , sont détaillés. Dans le modèle de Cox, la liaison entre fibre et matrice est supposée parfaite et le comportement mécanique de ces constituants élastiques. Au contraire, le modèle de Kelly-Tyson a initialement été développé dans le contexte de matériaux à matrice métallique pour lesquels des mécanismes de plasticité sont activés au voisinage de l'extrémité des fibres. Un modèle applicable aux composites à matrices polymères et combinant les approches de Cox et de Kelly est succinctement présenté à la fin de la fiche.

MODELE DE COX; TRANSFERT DE CHARGE ELASTIQUE

On considère le VER schématisé ci-dessous et constitué d'un fragment de fibre de rayon a enrobée dans un cylindre de matrice dont le rayon R est fixé par la fraction volumique de fibres v_f et les hypothèses faites sur l'arrangement des fibres. Ce V.E.R. est soumis à ses extrémités à une déformation en traction ε_2 Seule les composantes axiales des contraintes générées dans la fibre et la matrice sont considérées. Il s'agit donc d'une approche mono-dimensionnelle dans laquelle la contrainte axiale dans une section donnée de la fibre est en outre supposée uniforme. La fibre et la matrice sont supposées parfaitement élastiques et la liaison fibre/matrice parfaite.

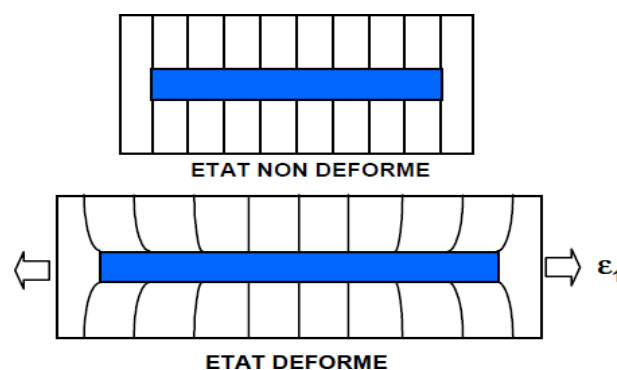


Figure IV.1. Volume Élémentaire Représentatif

PROFILS DE CONTRAINTE DANS LA FIBRE ET A L'INTERFACE (A)

Equilibre des forces de cisaillement

On écrit que les forces de cisaillement générées dans la matrice à une distance r de l'axe de la fibre ($r > a$) sont équilibrées par la force de cisaillement à l'interface ($r = a$) soit:

$$2\pi r \tau dx = 2\pi a \tau_i dx$$

où τ et τ_i sont respectivement la contrainte de cisaillement dans la matrice et la contrainte de cisaillement à l'interface. Soit :

$$r = \frac{a \tau_i}{\tau}$$

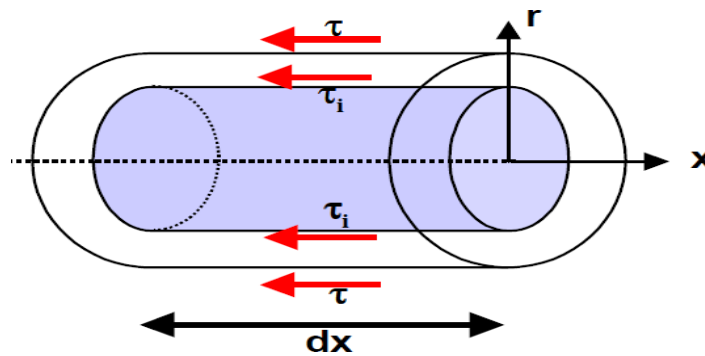


Figure IV.2. Equilibre élastique de la matrice en cisaillement

En faisant l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire de la matrice en cisaillement ($\tau = G_m \gamma$),

$$\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau}{G_m} = \frac{a \tau_i}{G_m r}$$

où w est le déplacement de la matrice selon la direction x et G_m son module de cisaillement. Par intégration, on obtient une expression de la contrainte interfaciale en fonction du déplacement de la matrice en $r = a$ (w_a) et $r = R$ (w_r):

$$\int_a^R dw = \frac{\tau_i a}{G_m} \int_a^R \frac{dr}{r}$$

$$WR - Wa = \frac{\tau_i a}{G_m} \ln\left(\frac{R}{a}\right) \quad (2)$$

Soit :

$$\tau_i = \frac{G_m(WR - Wa)}{a \ln(R/a)}$$

(B) Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre

On écrit que la force de traction dans une portion dx de la fibre est équilibrée par la force de cisaillement à l'interface:

$$\pi a^2 d\sigma_f = -2\pi a \tau_i dx$$

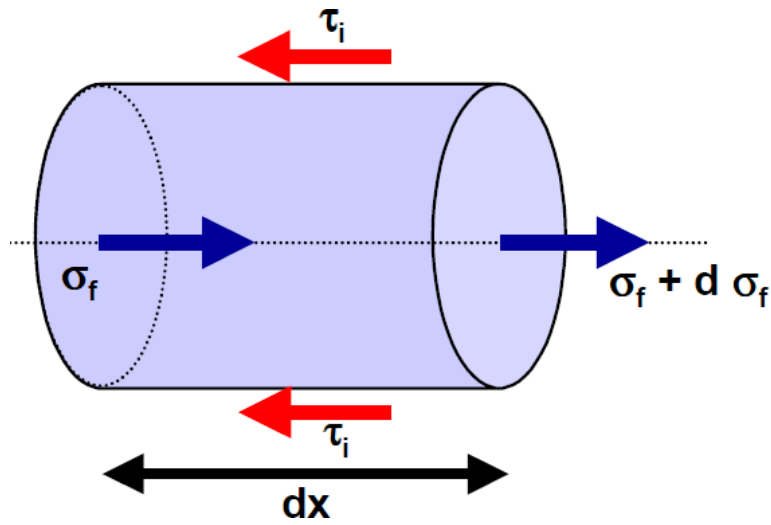


Figure IV.3. Equilibre élastique d'une portion de fibre

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_i}{a}$$

Ce qui permet d'écrire:

$$\frac{d^2\sigma_f}{dx^2} = \frac{2d\tau_i}{adx}$$

D'après (2) on obtient :

$$\frac{2\tau_i}{dx} = \frac{G_m}{a \ln\left(\frac{R}{a}\right)} \left(\frac{awR}{dx} - \frac{dw_a}{dx} \right)$$

* Pour $r = R$: on suppose que la déformation de la matrice est égale à la déformation appliquée ε_1 :

$$\frac{dwR}{dx} = \varepsilon_1 = \varepsilon_m$$

* Pour $r = a$: la déformation de la matrice est égale à celle de la fibre (liaison fibre/matrice parfaite) soit:

$$\frac{dwa}{dx} = \varepsilon_f \frac{\sigma_f}{w_f}$$

Ce qui permet de décrire l'équilibre élastique du système par l'équation différentielle suivante:

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = \frac{\beta^2}{a^2} (\sigma_f - E_f \varepsilon_f)$$

Avec

$$\beta^2 = \frac{2G_m}{E_f \ln\left(\frac{R}{a}\right)}$$

En supposant la contrainte $f\sigma$ nulle aux extrémités de la fibre (en $x = -L$ et $x = L$), il est possible de résoudre l'équation différentielle. On obtient les solutions suivantes:

B.1-Contrainte axiale dans la fibre :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \left\{ 1 - \left(\cosh\left(\frac{\beta x}{r}\right) \middle| \cosh(\beta s) \right) \right\}$$

B.2.Contrainte de cisaillement à l'interface :

$$\tau_i = 1/2 \beta E_f \varepsilon_1 \sinh\left(\frac{\beta x}{r}\right) / \cosh(\beta s)$$

Où $s = \frac{l}{a}$ est le rapport d'aspect de la fibre.

$$\tau_i = 1/2 \beta E_f \varepsilon_1 \sinh\left(\frac{\beta x}{r}\right) / \cosh(\beta l/a)$$

Les

profils de contrainte correspondant aux équations de contrainte axiale dans la fibre et contrainte de cisaillement à l'interface sont représentés ci-dessous: **Figure IV.3**

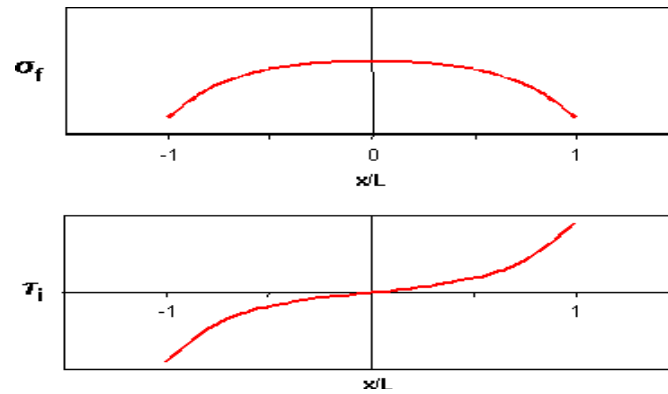


Figure IV.4 : Modèle de Cox - Profils de contrainte dans la fibre (σ_f) et à l'interface (τ)

Sur ce schéma, on voit que le développement de contraintes de cisaillement aux extrémités du fragment de fibre se traduit par une mise en charge progressive de la fibre en traction. Les efforts sont donc bien transférés de la matrice vers la fibre. [42]

Cette note décrit les approches statistiques couramment employées pour décrire la rupture de renforts fibreux fragiles. Celles-ci sont appliquées au cas de la rupture d'un écheveau de fibres. Pour une seule fibre entourée par la matrice, de nombreuses solutions analytiques ont été intéressantes de voir l'influence du contraindre thermique sur les dégâts de l'interface proposés par Cox [42], ce qui donne la forme de la contrainte de cisaillement le long de la longueur fibre que la forme suivante:

$$\tau = \frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta_1 \operatorname{th}(\beta_1 l/2)$$

Pour simplifier les calculs, nous prenons :

$$\beta_1 = \frac{2G_m}{E_f r_f^2 \ln\left(\frac{R}{r_f}\right)}$$

Où :

G_m : Le module de cisaillement de la matrice,

E_f : Le module de Young de la fibre,

ε : La déformation,

a : Un rayon de la fibre,

R : La distance entre les fibres,

τ : La contrainte de cisaillement de l'interface.

Ces variables relatives à des composants d'un matériau composite (fibre et matrice) sont toutes prises en représentant par la formule 111

CHAPITRE V
MATERIAUX ET
METHODES
EXPERIMENTALES

Introduction

Dans ce chapitre nous avons discuté la méthode de traitement d'alfa (la durée d'immersion) et l'opération d'extraction des fibres, aussi la méthode de la mesure de la densité de la fibre, De plus, le principe de caractérisation mécanique des fibres.

Materiaux utilisés

Dans notre expérience, nous avons utilisé un seul matériau c'est :

- Les fibres d'alfa et la résine

Caractérisation des matériaux utilisés

L'Alfa (de l'arabe Halfa) est une plante herbacée vivace de la famille des Poacée, qui sert notamment à fabriquer des papiers d'impression de qualité. Son nom scientifique est *Macrochloa tenacissima* (synonyme : *Stipa tenacissima* L.), famille des Poacées, sous-famille des Pooideae, tribu des Stipeae.

L'Alfa pousse en touffes d'environ un mètre de haut, formant de vastes « nappes » dans les régions d'aridité moyenne. Cette espèce est originaire de l'ouest du bassin

L'Alfa utilisée dans notre étude est récoltées de la région de boussada Wilaya de Msila, située à 69 km au sud-ouest de Msila et à 241 km au sud-est d'Alger. Le Climat de boussada est celui d'une région semi-aride.

La température moyenne est de 9,2°C en janvier et de 32,5°C en juillet.

La méthode de traitement d'alfa

Nous mettons la plante de alfa dans une solution d'eau et de carbonate pendant 21 jours pour faciliter le processus d'extraction des fibres de alfa .Après 21 jours, nous extrayons les fibres à l'aide d'une brosse métallique Puis nous mettons les fibres dans une bassine d'eau et on les lave bien à l'eau distillée, puis on les met dans un l'étuvage, puis on divise les fibres en trois sections.



Figure.V.1: les étapes premier pour préparé les fibre d'alfa

Laissez-le pendant 6 heures dans la solution, puis lavez-le bien avec de l'eau distillée



Figure.V.2: les fibres d'alfa dans l'eau distillée

Laissez-le pendant 6 heures dans la solution, puis lavez-le bien avec de l'eau distillée
Ensuite, nous mesurons le pH des fibres et constatons que le pH est de 7



Figure.V.3: PH mètre

On coupe d'abord les fibres d'une longueur de 10 cm, traitées au NaOH, et non traitées, on les colle sur le support en bois comme indiqué sur la photo, à l'aide d'un pistolet en silicone, puis on laisse sécher



Figure.V.4 : Traitement thermique l'étuvage



Figure.V.5 : ajoute couche la résine a les fibres d'alfa



Figure.V.6. solution résine durcisseur.



Figure.V.7: balance

Ensuite, nous mettons de très petites gouttes de la solution dans les fibres traitées et non traitées aisser sécher une demi-heure 30 minuite

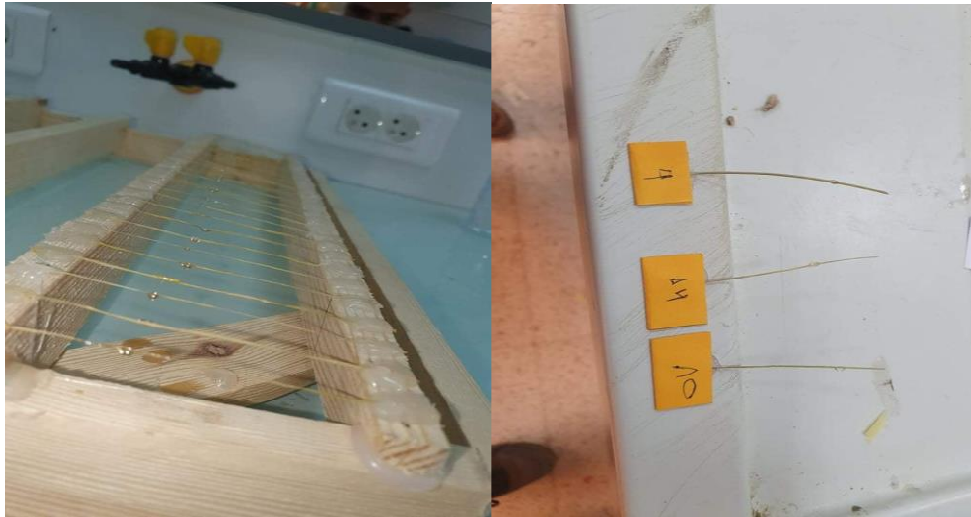


Figure.V.8.: tapes avant le traction

procédure expérimentale

III.5.1. Mesure de la section de fibre

Pour mesure la section de fibre nous avons utilisé la formation suivante

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Nous avons déposé que chaque fibre et un cylindre de section circulaire S donc

$$V = L \cdot S \quad (2)$$

Par le substitution de (2) dans (1)

$$\rho = \frac{M}{L \cdot S} \Rightarrow S = \frac{M}{L \cdot \rho} \quad (3)$$

ρ : La densité

M : La masse

V : Le volume

L : La longueur de cylindre

S : La section de cylindre

L'essai de traction

Un essai de traction est une expérience de physique qui permet de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau quelconque.

Certains objets fabriqués par l'homme doivent avoir un minimum de solidité pour pouvoir supporter les charges, le poids et bien d'autres efforts. L'essai de traction permet de caractériser les matériaux, indépendamment de la forme de l'objet sollicité.

Cet essai ou expérience consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur l'éprouvette jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée pour ensuite déterminer la déformation et la contrainte.

Les extrémités de l'éprouvette sont élargies, et sont dotées de congés, afin d'être sûr que la déformation plastique et la rupture auront lieu dans la partie centrale de l'éprouvette. Les dimensions de l'éprouvette sont normalisées, ce qui n'interdit pas d'utiliser d'autres formes d'éprouvettes. Une fois l'éprouvette en place, on applique un léger pré charge afin d'être sûr qu'il n'y a pas de jeu. On effectue un déplacement de la travée qui a pour effet d'étirer l'éprouvette, puis on mesure l'effort généré par ce déplacement.

À partir du déplacement de la travée, on calcule la déformation ε , et à partir de la force, on calcule la contrainte σ pour obtenir la loi de comportement. Dans certains cas, on peut travailler à vitesse de déformation constante plutôt que vitesse de déplacement constante ; il faut pour cela que la machine de traction soit pilotée informatiquement.

L'essai s'arrête à la rupture de l'éprouvette.

V.5.1-Diagramme de traction

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation.

La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette (contrainte nominale).

$$\sigma = F / S_0 \quad (5)$$

De même la déformation ε , se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale).

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0 \quad (6)$$

On parle de diagrammes rationnels quand on détermine les contraintes et les déformations vraies. Ils sont obtenus en divisant la force ou l'allongement par la section, respectivement la longueur instantanée. Ici nous nous contentons du premier type de diagramme qui est d'ailleurs le diagramme d'usage commun. La figure 1 illustre l'allure que peuvent avoir les courbes de traction de différents matériaux.

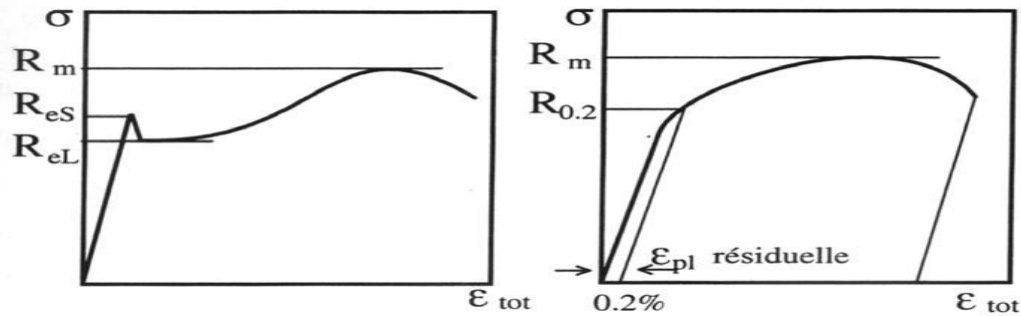


Figure.V.9 : Schéma représentant 2 types différents de courbes de traction.

Les différents éléments donnés par les courbes d'essais sont :

- le module de Young E , ou module d'élasticité longitudinale ;
- la limite élastique R_e ou σ_e , qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- la résistance maximale à la traction R_m ou σ_m ;
- l'allongement à la rupture A , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture ;
- le coefficient de Poisson, qui chiffre la variation de volume induite par la déformation des matériaux dans le domaine élastique.

V.5.2.Machines d'essais

Une machine de traction moderne dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système d'amarrage. Grâce aux micros ordinateurs, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 100 kN, à l'aide de quelques touches. Le dispositif d'amarrage est composé d'une paire de mordaches ou d'un autre système de fixation adapté à la forme de l'éprouvette (p.ex. : pour éprouvette avec tête filetée ou tête à épaulement). Afin d'éviter tous moments de flexion, il est important que les fixations soient bien orientées et alignées suivant l'axe de traction. Ceci n'est pas toujours facile à réaliser, mais est particulièrement critique lorsqu'on doit mesurer des matériaux fragiles, tels que les céramiques, qui ne peuvent pas s'adapter. De même toute

composante de torsion est à éviter. L'effort est exercé par l'entraînement soit mécanique soit hydraulique sur l'une des fixations.

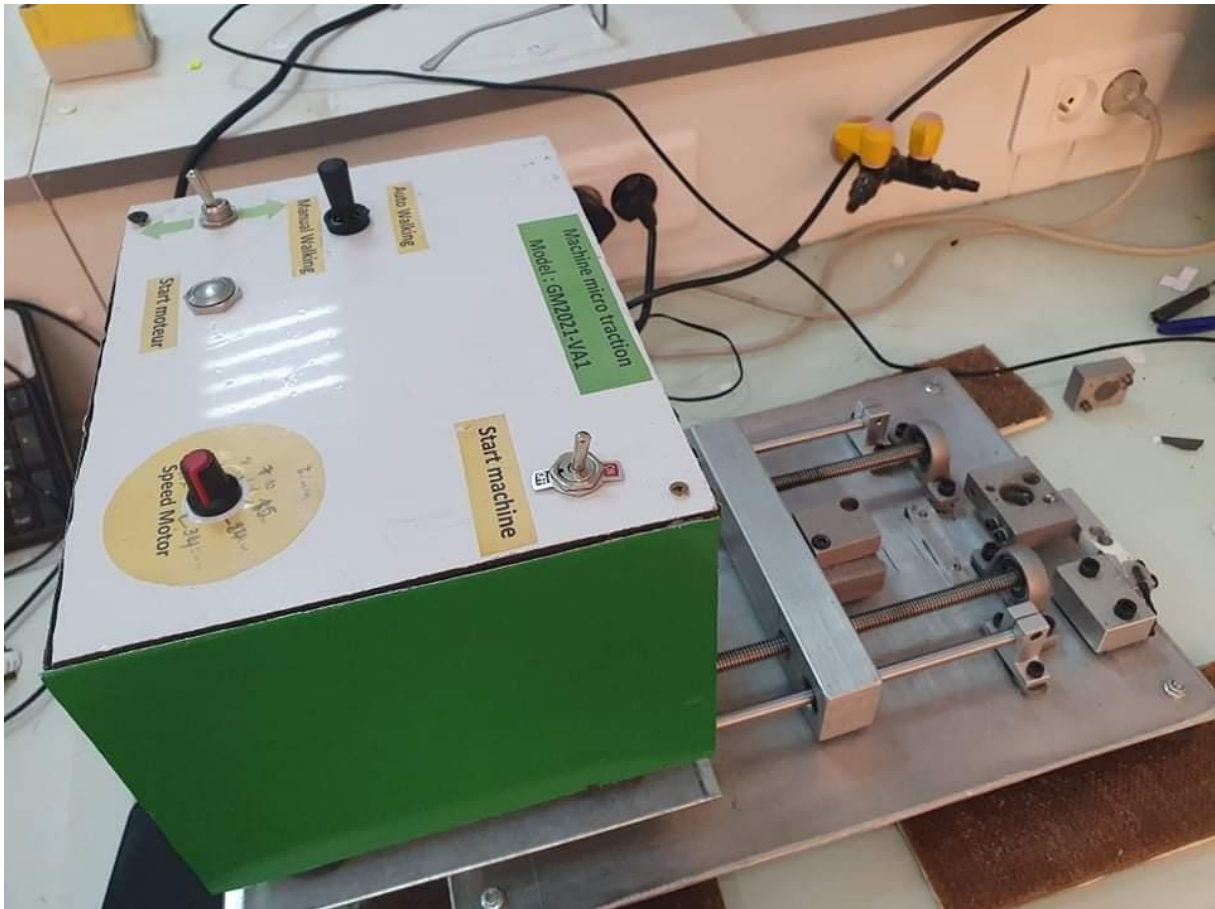


Figure.V.10 : La machine de traction

a) Essais de traction sur fibre

Les tests de traction sur fibres sont réalisés sur une machine 8888 à une vitesse de 2,5 mm/min. la distance entre les deux mords de serrage de fibre est de 40mm. illustre un système de fixations des fibres.

b) Paramètres d'études

Les caractéristiques mécaniques déterminées de l'essai de traction est :

- Contrainte de rupture

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (7)$$

Avec : F : Force de traction (N)

S : Section rompue (mm²)

σ : contrainte de rupture (MPa)

- Module de Young

Le module d'Young est le facteur de proportionnalité entre la contrainte σ et la déformation ϵ :

$$\sigma = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (8)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma \Delta L}{L_0 \epsilon} \quad (9)$$

Avec : E : module d'Young (Mpa).

L_0 : distance entre mors (mm).

S_0 : surface ou section (mm²).

ϵ : la déformation de la longueur des éprouvettes.

ΔL : l'allongement des éprouvettes (mm).

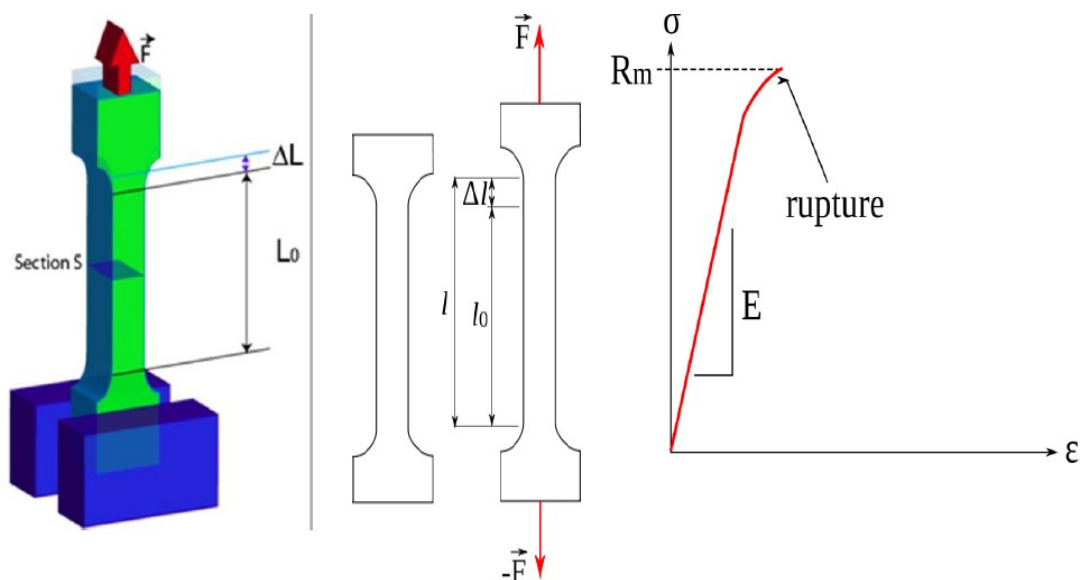


Figure. V.12 : Principe de l'essai de traction

CHAPITRE VI

Etude bibliographique

Nous avons attient ces études et les avons placées dans le chapitre VI grâce aux recherches réalisées par Antoine le duigou [42a]

Une fibre élémentaire est constituée de plusieurs couches. On parle généralement de deuxparties principales ; les parois cellulaires primaire et secondaire (Figure 1).

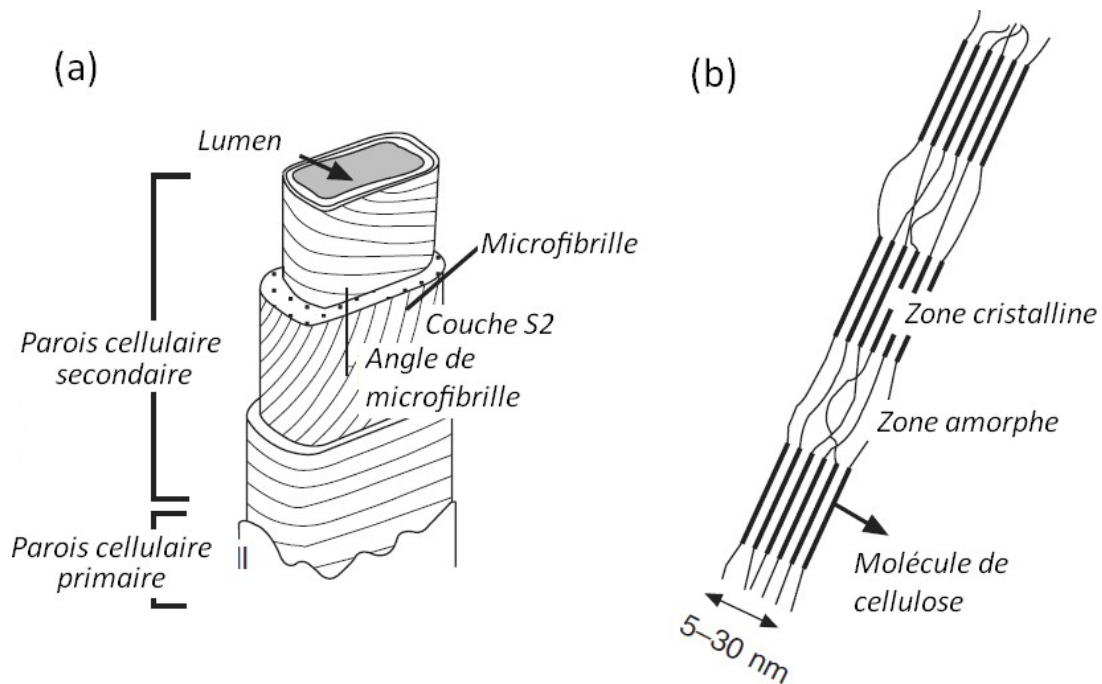


Figure VI.1.(a) schémas d'une microfibrille les différents canapés. (b) Structure cristalline de la cellulose constituant les microfibrilles (Baillie, 2004)



Figure VI.2. Montage utilisé pour réaliser le test de la goutte

(Test de micro-liaison)

Les interfaces fibre/matrice ont été caractérisées par le test de micro-liaison. Tous les échantillons ont montré un comportement similaire lors de l'arrachement de la fibre. Une

courbe charge-déplacement typique est donné dans la Figure V.12. Cette courbe présente quatre zones types : La première zone [OO'] correspond à un comportement linéaire élastique lié à l'extension de la fibre où le l'interface fibre/matrice reste intacte. Au point O', le décollement fibre/matrice s'amorce et un comportement non linéaire est observé [O'A]. Au point A, correspondant au maximum force de cisaillement, F_{max} , le décollement total se produit suivi d'une chute soudaine de la force au point B (force nécessaire pour extraire la fibre décollée de la matrice) [AB].

La dernière partie[BC] est associé au glissement frictionnel au niveau de la fibre/matrice décollée.

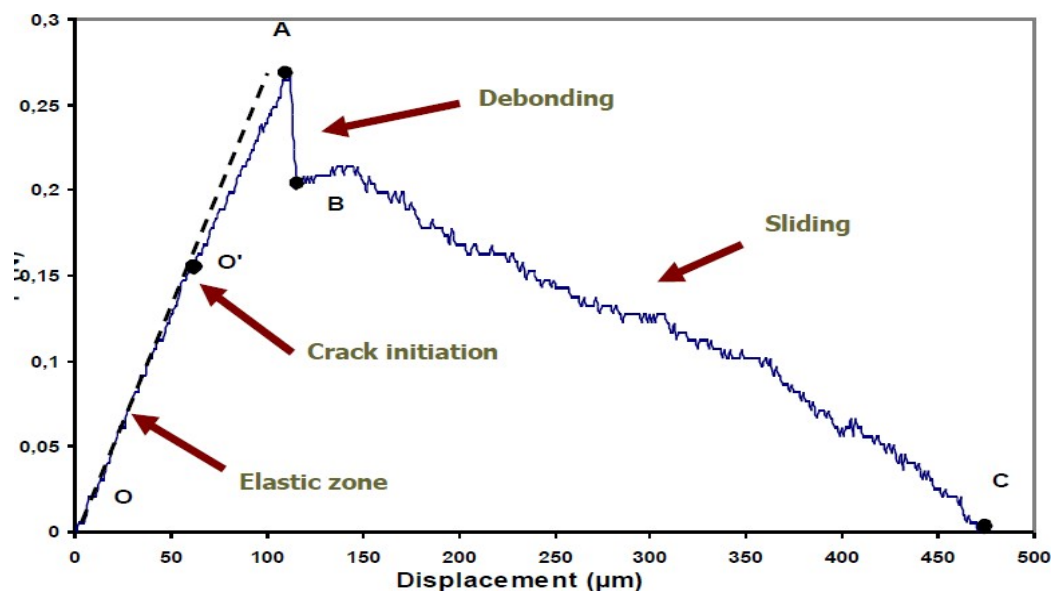


Figure VI.3. Tracé typique de la force d'arrachement en fonction du déplacement

plus grand, respectivement). De plus, la résistance au cisaillement interraccial est considérablement plus faible dans le cas des systèmes DF/PP (environ 12 % de moins que pour le ND/PP). Ces résultats sont en accord avec les tests de fragmentation réalisés sur des composites monofilament avec les mêmes constituants (Bouzoita et al., 2010).

Tableau . VI.1. Propriétés de résistance au cisaillement interfacial chanvre/polypropylène de microbond

État de surface de la fibre	IFSS (Mpa)	de Weibull Module (α)
ND	9.0	7.35
D	9.8	5.21
NDF	12.8	4.22
DF	7.9	5.38

La résistance au cisaillement interfacial est principalement associée à l'adhérence chimique ou physique et à l'emboîtement mécanique (Kim et Mal, 1998). Les résultats expérimentaux ont montré que les traitements de surface augmentaient le rapport O/C sur la surface et donc l'incompatibilité entre la résine PP non polaire et la fibre polaire. Par conséquent, une liaison chimique ou physique est considérée comme plutôt improbable.

La figure IV.4 montre une micrographie SEM d'une microgoutte après décollement observé sur le système fibre NDF/PP. La rupture de la surface d'interface après arrachement de la fibre de la matrice est en effet caractéristique d'une rupture d'adhésion et a été observée dans tous les cas étudiés. En fait, Tu et al. (1994) ont montré que la modification de la surface de la cellulose en une surface de nature hydrophobe n'améliorait pas l'adhérence au polypropylène.

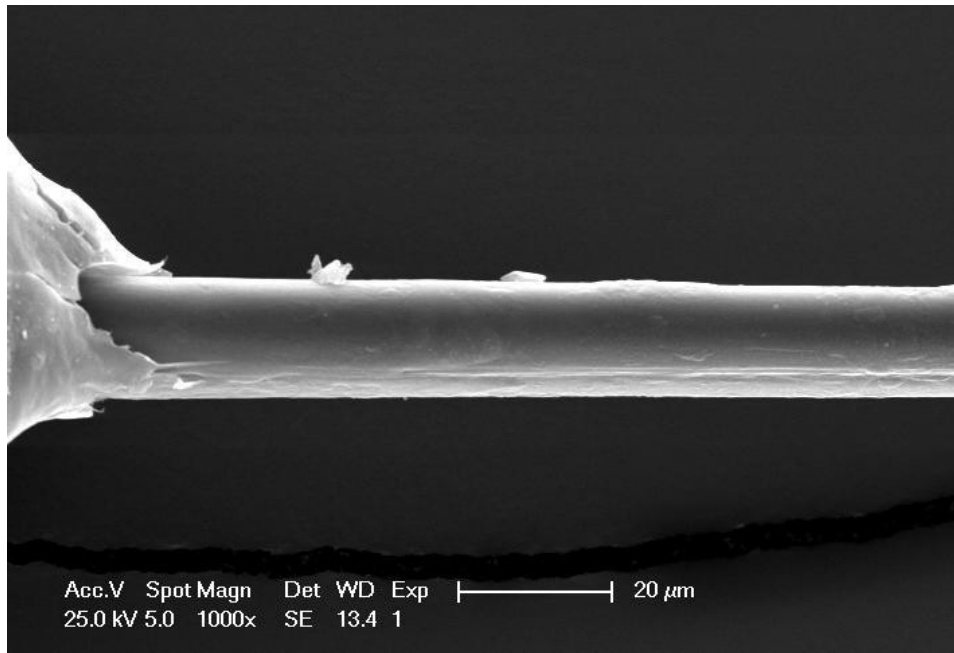


Figure VI.4. Micrographie SEM d'une microgoutte après un déplacement de 150 m sur fibre ND

L'adhérence accrue entre la fibre et la matrice dans le cas des fibres traitées par rapport à celles non traitées est probablement en partie due à un meilleur mouillage associé à l'élimination des cires recouvrant la surface externe de la paroi cellulaire des fibres, conduisant à un transfert légèrement meilleur des contraintes de matrice à fibre. Cependant, la principale raison de l'augmentation des valeurs IFSS peut être expliquée par la morphologie de la surface. Comme mentionné précédemment, les traitements ont conduit à la génération aléatoire de fissures superficielles, plus prononcées avec le traitement à la Fibroline (Bouzouita et al., 2010). Ainsi, l'interaction mécanique associée à l'irrégularité de la surface peut être considérée comme la principale raison de l'amélioration de l'IFSS (Liu et Dai, 2007). Ce phénomène s'est accru du fait des contraintes de compression résiduelles dans la fibre dans le sens radial associées au retrait de la matrice autour des fibres lors du refroidissement. Ce retrait est environ dix fois plus élevé pour les polymères thermoplastiques semi-cristallins comme le polypropylène que pour le TP amorphe (Parlevliet et al., 2006). La grande amélioration de l'IFSS observée sur les composites NDF par rapport aux composites à fibres sèches (D) peut être attribuée à la présence d'une couche transcristalline (Zafeiropoulos et al., 2001) qui provoque des contraintes résiduelles radiales supplémentaires et donc une meilleure efficacité de transfert des contraintes (Parlevliet et al., 2006). De plus, le traitement à la Fibroline peut avoir un effet sur la matrice PP. En effet, il est connu que les méthodes de

décharges électriques telles que Corona (Dong et al., 1992) introduisent des coupures de chaîne de polyoléfine (PE). Comme le PP utilisé pour la fabrication du microcomposite PP/chanvre a déjà été traité à la fibroline, il est possible que la viscosité de la masse fondue PP ait été légèrement réduite en raison des processus d'oxydation, conduisant à un meilleur écoulement de la masse fondue PP sur la micro-rugosité de la fibre. Cependant, une diminution du transfert de charge a été observée dans le cas des fibres DF par rapport aux fibres brutes malgré l'existence d'une couche TC et d'un traitement PP. Ce résultat suggère que le traitement des fibres conduit à une forte dégradation des fibres et à la formation d'une couche superficielle faible et lâche et donc à une diminution de l'IFSS. Les mêmes résultats ont à nouveau été observés par d'autres auteurs sur des fibres naturelles traitées par plasma d'air (Yuan et al., 2004 ; Baltazar-y-Jimenez et al., 2008). Cette diminution peut également être due au niveau élevé de rugosité de surface. L'écoulement à l'état fondu du PP ne peut pas combler la micro-rugosité de la surface de la fibre après le double traitement, ce qui conduit à la formation de vides piégés à l'interface qui peuvent servir d'amorçage de microfissure lorsque la contrainte est transférée de la matrice à la fibre surface.

Réalisation des microgouttes

Les microgouttes sont réalisées en effectuant un nœud à l'aide de fibres PLA autour des fibres de lin. L'excédent de fil est coupé aux micro-ciseaux. L'ensemble est ensuite mis à l'étuve à 175°C pendant 8 minutes suivant le protocole utilisé pour les bio composites **PLLA** renforcé par des fibres de lin précédemment étudiés au sein de notre équipe [43, 44]. Les microgouttes sont refroidies à l'air à température ambiante. Enfin la géométrie des gouttes est vérifiée au microscope optique.

Tous les échantillons présentant des défauts, soit au niveau de la fibre (Kink band), soit au niveau de la goutte, sont systématiquement rejetés. En plus d'être symétriques, les microgouttes doivent avoir une longueur inférieure à 250µm afin de conserver une relation linéaire entre la force de décohésion et la surface enchâssée [45].

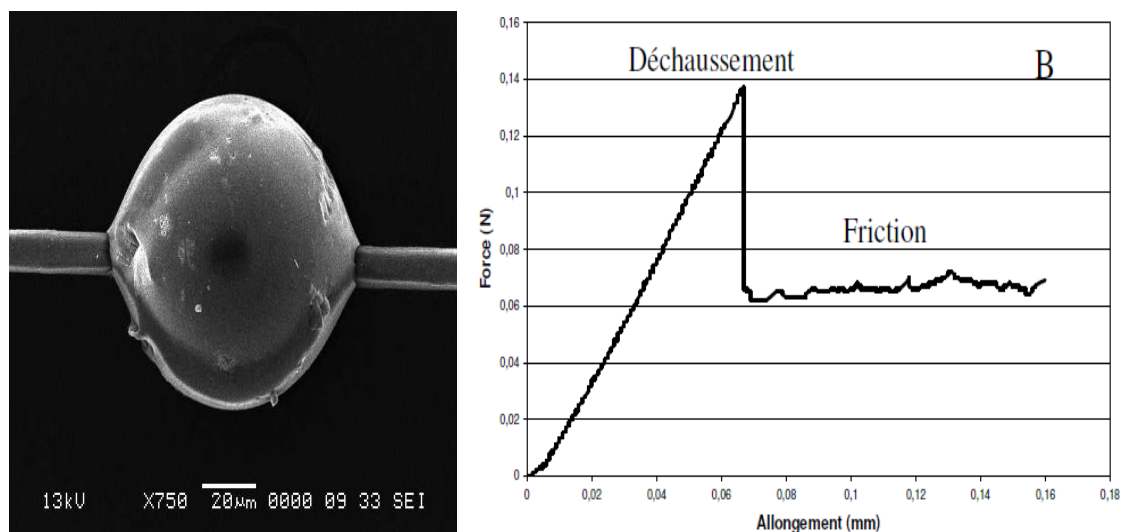


Figure VI.5. A Microgoutte de PLA sur fibre unitaire de lin- B Comportement typique enregistré lors du déchaussement de système Lin/PLLA

Résultats et interprétations

L'adhérence entre une fibre de lin (brut et traité à l'eau) et le PLLA

Le tableau 2 présente les rapports d'aspect (L_e/d_g) des microgouttes ainsi que les résultats issus des essais de déchaussement : la résistance apparente au cisaillement et la contrainte de friction.

Tableau.VI.1 Récapitulatif de la géométrie et des propriétés mécaniques (L_e : Longueur de goutte enchâssée, D_g diamètre des gouttes, τ_{app} contrainte de cisaillement apparente et $\tau_{friction}$ contrainte de friction) des systèmes fibres de lin/PLLA Brut et traité à l'eau

Matériaux	L_e/D_g	τ_{app} (MPa)	$\tau_{friction}$ (MPa)
PLLA/lin Brut	1.32 ± 0.10	16.4 ± 3.8	5.7 ± 1.3
PLLA/Lin Traité à l'eau	1.27 ± 0.11	18.8 ± 3.2	8.2 ± 1.1
Polyester/Verre [28]	1.5 ± 0.14	14.2 ± 0.4	4.4 ± 0.7

L'analyse des résultats souligne que le rapport d'aspect des gouttes de PLLA est dans une gamme de données proche ce qui implique que les essais mécaniques sont peu affectés par la différence de géométrie des gouttes. En comparaison du système verre/Polyester, les valeurs de rapport d'aspect sont plus faibles (1.32 et 1.27 contre 1.5) ce qui s'explique par à une mouillabilité plus faible.

Dans un premier temps, on constate que la contrainte de cisaillement apparente est proche de celle déterminée précédemment avec un autre PLLA (Biomer L9000) ($\tau_{app} = 15.3 \pm 3.3$ MPa) [46]. Les valeurs obtenues pour le système lin/PLLA demeurent supérieures à celles du système verre/polyester. La contrainte de frottement est également nettement plus élevée que pour le système verre/polyester.

Pourtant, une majeure partie des travaux disponibles dans la littérature soutient que les composites renforcés par des fibres végétales ont une interface entre fibre et matrice de mauvaise qualité.

Par exemple, Thomason et al [47] ont évalué analytiquement le niveau de contraintes radiales pour des systèmes PP/verre et PP/sisal. D'après eux, le coefficient de dilatation transverse élevé des fibres de sisal induit des contraintes radiales faibles ($\alpha_{L_{verre}} = 5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $\alpha_{T_{verre}} = 5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ et $\alpha_{L_{lin}} = -1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $\alpha_{L_{jute}} = 77 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) ce qui expliquerait les faibles propriétés des composites PP/sisal par Les mécanismes d'adhérence entre une fibre végétale et un polymère sont complexes et sont influencés par la rugosité des fibres (supérieure à 35 nm) [48], la différence de coefficient de poisson et les interactions de van der Waals et les hydrogènes entre la surface de la fibre rouie et ses groupements hydroxyles et les groupements carboxyles du PLLA [49]. Par ailleurs, peu d'information existe sur la contribution de la dilatation négative longitudinale des fibres végétales sur l'adhérence.

Conclusion

Pour déterminer les propriétés d'adhérence, les essais de déchaussement doivent être effectués sur des systèmes de fibres unitaires afin de s'affranchir des imprécisions liées à la contribution des propriétés des lamelles mitoyennes dans un faisceau. Globalement, les propriétés obtenues pour le lin/PLLA sont aussi élevées que les systèmes verre/polyester. Le traitement à l'eau permet d'améliorer sensiblement la contrainte de cisaillement interfaciale ainsi que la contrainte de friction notamment à cause du « lessivage » de certains composés faiblement adhérents.

Deux types de comportement ont été observés, le premier avec un frottement après déchaussement quasi constant et l'autre non constant. En fait, ces deux comportements correspondent à des mécanismes de rupture différents, le premier est une rupture interfaciale et l'autre est une rupture en partie cohésive avec pelage de paroi. La contribution de ces mécanismes de pelage aux propriétés mécaniques est encore difficile à quantifier du fait de la dispersion des résultats.

Conclusion générale

Conclusion

Ce travail constitue une contribution sur la méthode d'extraction de fibres Alfa à partir de la plante *Stipa Tenacissima* L. disponible dans la région du Hodna (M'sila). Cette plante aux vertus écologiques, économiques et sociales, ouvre la voie à de nouvelles applications tout à fait intéressantes (plus particulièrement comme renforts dans les matériaux composites).

Pour déterminer les propriétés d'adhérence, les essais de déchaussement doivent être effectués sur des systèmes de fibres unitaires afin de s'affranchir des imprécisions liées à la contribution des propriétés des lamelles mitoyennes dans un faisceau. Globalement, les propriétés obtenues pour le lin/PLLA sont aussi élevées que les systèmes verre/polyester. Le traitement à l'eau permet d'améliorer sensiblement la contrainte de cisaillement interfaciale ainsi que la contrainte de friction notamment à cause du « lessivage » de certains composés faiblement adhérents.

Deux types de comportement ont été observés, le premier avec un frottement après déchaussement quasi constant et l'autre non constant. En fait, ces deux comportements correspondent à des mécanismes de rupture différents, le premier est une rupture interfaciale et l'autre est une rupture en partie cohésive avec pelage de paroi. La contribution de ces mécanismes de pelage aux propriétés mécaniques est encore difficile à quantifier du fait de la dispersion des résultats.

BIBLIOGRAPHE

[1] **Mohamed Dallel** (2012), Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L):caractérisation physico-chimique de la fibre au fil .thèse doctorat en génie des Procédés, P5-Université de Haute Alsace, France .

[2]**R.Casey et C.Grove** « Fibers »,Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 39(10), pp.1213-1215 (October 1947).

[3] [Pizzi A, Kueny R, Lecoanet F, Massetau B, Carpentier D, Krebs A, Loiseau F, Molina S, Ragoubi M. High resin content natural matrix–natural fibre biocomposites. Industrial Crops and Products 2009;30:235–40]

[4] C. Ververis, K. Georghiou, N., " *Industrial crops and products*, vol. 19, pp. 245–254, [5] M. Nardin, "Interfaces fibre–matrice dans les matériaux composites. Application aux fibres végétales," *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, vol. 16, p. 49, 2006.

[6]A. Mokhtari, "Modélisation du comportement et de la rupture des composites à matrices thermoplastiques," Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2016.

[7]D. Hammiche, A. Boukerrou, H. Djidjelli, A. Kervoëlen, and Y. Grohens, "Étude des propriétés physico–chimiques, thermiques et mécaniques des fibres d'alfa," *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, vol. 25, pp. 7–24, 2015

[8] La (**Figure 8**) représente la tendance de la production de cultures de fibres végétales dans le monde pour toutes les applications industrielles au cours du deuxième moitié du siècle dernières.

[9]. Ragoubi, "Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne," Thèse de doctorat, Nancy 1, 2010

[10]. J. Biagiotti, D. Puglia, and J. M. Kenny, "A review on natural fibre–based composites– part I: structure, processing and properties of vegetable fibres," *Journal of Natural Fibers*, vol. 1, pp. 37–68, 2004.

[11]D. Sedan, "Etude des interactions physico–chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite," Thèse de doctorat, Limoges, 2007

BIBLIOGRAPHE

- [12] [H. Ville, "Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non,"Thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Alès, 2011.].
- [13] [H. Ville, "Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non,"Thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Alès, 2011.]
- [14] [J. Biagiotti, D. Puglia, and J. M. Kenny, "A review on natural fibre-based composites part I: structure, processing and properties of vegetable fibres," *Journal of Natural Fibers*, vol. 1, pp. 37-68, 2004].
- [15] [A. Elouaer, "Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales," Thèse de doctorat, Reims, France, 2011.].
- [16] [C. BALEY, *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*: Ed. Techniques Ingénieur. Matériaux fonctionnels, N° N2220., 2005.]
- [17] [M. Dallel, "Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*): caractérisation physico-chimique de la fibre au fil," Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2012.]
- [18] [SWAMY, R. H. S, AHUJA, B. M, KRISHAMOORTHY, S., "Behavior of concrete reinforced with jute, coir, bamboo fibers?. The international journal of cement composite and light weight concrete, volume 5, p 13 N°1, 1984.]
- [SAVASTANO, Jr.H., AGOPYAN,V., "Transition zone studies of vegetable cement paste composites .cement and concrete, composites , 21, pp.49-57, 1999.]
- [19] nous citons les résultats des chercheurs BLEDZKI et al. [1] TOLÉDO FILHO et al. [19] SAVASTANO et al. [12] KRIKER [16], ABBANI [20]. BLEDZKI et GASSAN [1],
- [20] [BLEDZKI, A. K and GASSAN. J., "Composites reinforced with cellulose based fibers ? ,ELSEVIER, Progress in polymer science, volume 24, pp.221-274, 1999.]
- [21] SWAMY [SWAMY, R. H. S, AHUJA, B. M, KRISHAMOORTHY, S., "Behavior of concrete reinforced with jute, coir, bamboo fibers?. The international journal of cement composite and light weight concrete, volume 5, p 13 N°1, 1984.]
- [22]Gamstedt EK, Sjögren BA. Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies. *Composite Science and Technology* 1999;59:167-78

BIBLIOGRAPHE

- [23] Gentz M, Armentrout D, Rupnowski P, Kumosa L, Shin E, Sutter JK, et al. Inplane shear testing of medium and high modulus woven graphite fiber reinforced/polyimide composites. *Composites Science and Technology* 2004;64:203–20.
- [24] Manders PW, Chou TW, Jones RR, Rock JW. Statistical analysis of multiple fracture in 0°/90°/0° glass–fiber/epoxy–resin laminates. *Journal of Material Sciences* 1983;8:352–62.
- [25] Parvisi A, Bailey JE. On multiple transverse cracking in glass-fiber epoxy crossply laminates. *Journal of Material Sciences* 1978;13:2131–6.
- [26] [(Dash et coll., 2000) Dash, B.N., Rana, A.K., Mishra, S.C., Mishra, H.K., Nayak, S.K., & Tripathy, S.S. (2000). Novel low-cost jute-polyester composite. II. SEM observation of the fracture surfaces. *Polymer Plastic Technology and Engineering*, 39(2), 333-350.]
- [27] [(Dash et coll., 2000) Dash, B.N., Rana, A.K., Mishra, S.C., Mishra, H.K., Nayak, S.K., & Tripathy, S.S. (2000). Novel low-cost jute-polyester composite. II. SEM observation of the fracture surfaces. *Polymer Plastic Technology and Engineering*, 39(2), 333-350.]
- [28] [Gassan J, Gutowski VS. Effects of corona discharge and UV treatment on the properties of jute-fibre epoxy composites. *Composites Science and Technology* 2000;60:2857–63.]
- [29] [Ragoubi M, Bienaime D, Molina S, George B, Merlin A. Impact of corona treated hemp fibres on mechanical properties of polypropylene composites made thereof. *Industrial Crops and Products* 2010;31:344–9.]
- [30] [Pizzi A, Kueny R, Lecoanet F, Massetau B, Carpentier D, Krebs A, Loiseau F, Molina S, Ragoubi M. High resin content natural matrix–natural fibre biocomposites. *Industrial Crops and Products* 2009;30:235–40]
- [31] [L. Y. Mwaikambo and M. P. Ansell, “Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 84, no. 12, pp. 2222–2234, 2002.], [M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 7, pp. 2883–2892, Oct. 2012]
- [32] [M. J. John and R. D. Anandjiwala, “Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites,” *Polymer Composites*, vol. 29, no. 2, pp. 187–207, Feb. 2008.]

BIBLIOGRAPHE

- [33] [L. Y. Mwaikambo, N. Tucker, and A. J. Clark, “Mechanical properties of hemp-fibre reinforced euphorbia composites,” *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 292, no. 9, pp. 993–1000, 2007.], [D. Ray, B. K. Sarkar, A. K. Rana, and N. R. Bose, “Effect of 2, p. 129, 2001.].
- [34] [M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 7, pp. 2883–2892, Oct. 2012].
- [35]. [M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 7, pp. 2883–2892, Oct. 2012]
- [36] [S. A. Paul, K. Joseph, G. D. G. Mathew, L. A. Pothen, and S. Thomas, “Influence of polarity parameters on the mechanical properties of composites from polypropylene fiber and short banana fiber,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 10, pp. 1380–1387, 2010.]
- [37] [M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 7, pp. 2883–2892, Oct. 2012]
- [38] [C. H. Xue, S. T. Jia, J. Zhang, and L. Q. Tian, “Superhydrophobic surfaces on cotton textiles by complex coating of silica nanoparticles and hydrophobization,” *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 16, pp. 4593–4598, 2009.], [C. H. Xue, S. T. Jia, H. Z. Chen, and M. Wang, “Superhydrophobic cotton fabrics prepared by sol-gel coating of TiO₂ and surface hydrophobization,” *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 9, no. 3, 2008.]
- [39]. [S. A. Paul, K. Joseph, G. D. G. Mathew, L. A. Pothen, and S. Thomas, “Influence of polarity parameters on the mechanical properties of composites from polypropylene fiber and short banana fiber,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 10, pp. 1380–1387, 2010.], [S. A. Paul, C. Oommen, K. Joseph, G. Mathew, and S. Thomas, “The role of interface modification on thermal degradation and crystallization behavior of composites from commingled polypropylene fiber and banana fiber,” *Polymer Composites*, vol. 16, no. 2,

BIBLIOGRAPHE

- [40] H.L. Cox, «L'élasticité et la résistance du papier et d'autres matières fibreuses», Brit. J. Appl. Phys., • Cox H.L., 'The elasticity and strength of paper and other fibrous materials', *British Journal of Applied Physics*, **3**, N°1 (1952) 72-79
- [41] • Kelly, A., Tyson, W.R., 'Fiber strengthened materials', in *High Strength Materials*, V.F. Zackay Ed., J. Wiley & Sons, London (1964) 578-602
- [42a] mr antione le duigou
- [42] • Piggott, M., Load Bearing fibre composites, Pergamon Press, 12, 72-79(1952)..
- [43] Le Duigou A, Davies P, and Baley C, (2009), "Seawater ageing of Flax/PLLA biocomposites"; *Polym Degrad and Stab*, 94, 1151-62:
- [44] Le Duigou A, Davies P, and Baley C, (2010), "Macroscopic analysis of interfacial properties of flax/PLLA
- [45] Liu C and Nairn J, (1999), "Analytical and experimental methods for a fracture mechanics interpretation of the microbond test including the effects of friction and thermal stresses"; *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 19, 1: p.59-70
- [46] Baley C, Grohens Y, Busnel F, and Davies P, (2004), "Application of interlaminar test to marine composites. Relation between glass fibre/polymer interfaces and interlaminar properties of marine composites"; *Applied Composite Materials*, 11: p.77-98
- [47] Le Duigou A, Davies P, and Baley C, (2010), "Interfacial bonding of flax/Poly(L-Lactide) biocomposites"; *Composites Science and Technology*, 70, 2: p.231-239
- [48] Thomason J. in 17 th International conference on composite materials (ICCM). Edimburg, 2009
- [49] Raj G, Balnois E, Baley C, and Grohens Y, (2011), "Role of polysaccharides on mechanical and adhesion

عَلَّمَ الْقُرْآنَ
عَلَّمَ الْقُرْآنَ
عَلَّمَ الْقُرْآنَ