



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Modélisation Numérique

Thème :

Effet des paramètres d'élaboration sur le comportement mécanique d'un bio-composites

Proposé et dirigé par :

Dr. ROKBI Mansour

Présenté :

KHALDOUNE Abd raouf

Année Universitaire : 2015 / 1016

N° d'ordre : GM/...../2016

Remerciements

Je remercie vivement Monsieur et mon père "Khaldoune Djamel";

Ce travail a été réalisé au département de Génie Mécanique de l'université de M'sila.

*Je tiens à remercier mon encadreur **Dr. Monsieur Rokbi Mansour** pour avoir proposé et dirigé mes travaux de recherche. Ses compétences et ses bonnes directives m'ont aidé à achever ce mémoire de master. Merci aussi pour son attention et ses exigences pendant la période de rédaction du mémoire.*

Je remercie vivement le laboratoire (LASEM) de l'Ecole Nationale d'ingénieur de Sfax (ENIS) à Tunisie pour me aider dans mon travail numérique.

*Je suis très reconnaissante a **Ishaq Aiche** et **Bouchareb khaled** pour leur aide, leur soutien moral*

et pour tout les bons moments passés en leur compagnie.

Mes remerciements vont également de département de Génie Mécanique notamment a Messieurs « H. Fareh », « A. Herizi » ainsi tous ceux qui ont participé de loin ou de près pour l'élaboration de Génie Mécanique de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents : « Djamel » et « Nadjet ».

Je leurs remercie pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs soutien, l'aide et les encouragements qui m'ont apporté durant toutes ces années d'étude sans eux,

je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également :

A mes frères et sœurs: «Sara», «Hanan», «Amine», «Yahia», «Hayat», «Yassmine», «Yacine», «Wassim», «Anfal».

A mon oncle et tantes chacun par son nom.

A toute ma famille.

A mes amis.

A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à ce travail.

KHALDOUNE Abd raouf.

Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I

Matériaux composites

1. Généralités sur les matériaux composites.....	03
1.1. Définition	03
1.2. Classification des matériaux composites.....	03
1.2.1. Classement suivant la nature des constituants.....	03
1.2.2. Classement suivant la morphologie.....	04
1.3. Constituants des matériaux composites.....	05
1.3.1. Matrice.....	05
1.3.2. Renfort.....	08
1.4. Architecture de renforcement.....	11
1.5. Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	12

Chapitre II

Composites Stratifiés

1. Qu'est ce qu'un composite stratifié ?.....	15
1.1. Stratifié.....	15
1.2. Les orientations normalisées.....	16
1.3. Pourquoi la symétrie miroir ?.....	17
1.4. Angles positifs et négatifs.....	17
2. Principaux mécanismes d'endommagement dans les matériaux stratifiés.....	18
3. Développement des mécanismes et processus de rupture.....	21

Chapitre III

Fibres végétales

1. Introduction.....	24
2. Fibres végétales.....	24
2.1. Classification des fibres végétales.....	24
2.2. Morphologie de la fibre végétale.....	25
2.3. Structure et composition des fibres naturelles d'origine végétale.....	25
2.4. Propriétés Mécaniques des Fibres Végétales.....	31
3. Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	31

CHAPITRE IV

Matériaux et méthodes expérimentales

1. Introduction.....	34
2. Matériaux utilisés.....	34
2.1. Matrice.....	34
2.2. Fibres de Jute.....	36
3. Caractérisations de la fibre de Jute.....	37
3.1. ATR- FTIR.....	37
3.2. Analyse thermogravimétrique (ATG).....	39
4. Préparation du bio-composite.....	40
4.1. Découpage.....	40
4.2. Compression des tissus Jute.....	41
4.3. Elaboration des bio-composite.....	42
4.4. Obtention des éprouvettes.....	42
5. Essais de traction.....	45

CHAPITRE V

Résultats et discussions

1. Introduction	49
2. Analyse structurale.....	49
2.1.ATR - FTIR.....	49
3. Analyse thermiques	50
3.1.L'Analyse Thermogravimétrique (ATG), (DTG)	50
4. Caractérisations mécaniques.....	52
4.1. Analyse des courbes Charge - déplacement.....	52
4.2. Paramètres de rupture.....	52
4.3. Analyse des faciès de rupture.....	56

PARTIE NUMERIQUE

A.1. Introduction.....	62
A.2. Présentation de ANSYS.....	62
A.3. Simulation ANSYS.....	63
A.3.1. Évaluation des propriétés mécaniques apparentes.....	63
A.3.2. Géométrie.....	63
A.3.3. Effet du maillage.....	64
A.3.4. Obtention des résultats.....	65
Références Bibliographiques.....	71

Liste des figures

Chapitre I

Fig.I.1. Matériaux composite.....	03
Fig.I.2. Classification des matériaux composites.....	05
Fig.I.3. Les différents types des matrices.....	06
Fig.I.4. Principaux types de tissages.....	11
Fig .I.5. Principales orientations des fibres	12

Chapitre II

Fig .II.1. Constitution d'un stratifié.....	15
Fig .II.2. Exemple d'empilement symétrique quasi-isotrope $[-45/90/45/0]^{\circ}\text{C}$	16
Fig .II.3. Schématisation de l'effet miroir sur la stratification.....	17
Fig.II.4. Désignation du signe de l'orientation.....	17
Fig .II.5. Mécanismes d'endommagement observés dans un composite stratifié.....	18
Fig .II.5.1. Exemple de fissuration matricielle	19
Fig .II.5.2. Décohésion fibre/matrice.....	20
Fig .II.5.3. Rupture de fibre.....	20
Fig .II.5.4. Délaminage.....	21
Fig .II.6 . Mécanismes d'endommagement dans les stratifiés	22

Chapitre III

Fig. III.1. Schéma des parois d'une fibre de lin.....	26
Fig. III.2 . Représentation des microfibrilles formant un angle.....	27
Fig. III.3. Exemple de représentation schématique de l'agencement des différents composants des fibres végétales à l'échelle micrométrique.....	30

CHAPITRE IV

Fig. IV.1. Film de plastique en polypropylène PP recyclée.....	35
Fig. IV.2. Plante de Jute.....	36
Fig. IV.3. Tissu de Jute utilisé.....	36
Fig. IV.4. Schéma de principe de la spectrométrie FTIR-ATR sur des échantillons fibreux.	37
Fig. IV.5. Photo d'un appareillage d'analytique ATR- FTIR.	38
Fig. IV.6. Spectres ATR-FTIR de fibre <i>Lygeumspartum</i>	39

Fig. IV.7. Courbes ATG et DTG de fibre de <i>Lygeum spartum</i>	40
Fig. IV.8. Matériaux utilisés: a) Jute b)Plastique PP.....	40
Fig. IV.9. Les séquences PP/Jute utilisés lors de l'élaboration du bio-composites.....	41
Fig. IV.10. représenté la compression des tissus de Jute.....	42
Fig. IV.11. éprouvette de traction.....	43
Fig. IV.12. usinage d'éprouvette par CNC.....	44
Fig. IV.13. présentées les éprouvettes obtenues.....	45
Fig. IV.14. machine d'essai de traction.	45
Fig. IV.15. Principe de l'essai de traction	47

CHAPITRE V

Fig. V.1. Spectre FT-IR de fibre de Jute.....	50
Fig. V.2. Analyse thermogravimétrique de la fibre de Jute.	51
Fig. V.3. Evolution de la contrainte en fonction de la déformation.....	53
Fig. V.4. Histogrammes de l'évolution des modules de Young des éprouvettes PP/Jute...	54
Fig. V.4. Histogrammes de l'évolution des contraintes des éprouvettes PP/Jute.	55
Fig. V.6. Histogrammes de l'évolution des allongements à la rupture des éprouvettes PP/Jute.	56
Fig. V.7. Vue microscopique des faciès de bio-composites PP/Jute (A₁ , A₂ et A₃).....	57
Fig. V.8. Vue microscopique des faciès de bio-composites PP/Jute (A₄).	58
Fig. V.9. Vue microscopique des faciès de bio-composites PP/Jute (B₁ et B₂).	59
Fig. V.10. Vue microscopique des faciès de bio-composites PP/Jute (B₃ et B₄).....	60
Fig. A.1. Intégration des dimensions de l'éprouvette dans la basse ANSYS.....	64
Fig. A.2. Vue globale de l'éprouvette en utilisant ANSYS.	64
Fig. A.3. Effet de maillage sur l'évaluation des résultats.....	65
Fig. A.4. Comparaison entre les contraintes expérimentales et celles numériques des bio- composites (A₁ , A₂ , A₃ et A₄) élaborés à pression constante.....	67
Fig. A.4. Comparaison entre les contraintes expérimentales et celles numériques des bio- composites (B₁ , B₂ , B₃ et B₄) élaborés à température constante.	68

Introduction Générale

Durant ces dernières décennies, Les fibres naturelles ont réussi acquérir un grand intérêt à l'échelle académique et industrielle. Ces fibres sont résistantes, possèdent des densités relativement basses, ont de faibles coûts et proviennent de ressources renouvelables abondantes. Plusieurs techniques classiques et modernes peuvent être utilisées pour la mise en œuvre de bio-composites à base de fibres végétales.

Cependant, les problèmes de compatibilité entre les fibres ligno-cellulosiques et les thermoplastiques limitent le transfert de charge entre fibre et matrice et ainsi les propriétés mécaniques de ces bio-composites.

Le but essentiel de ce travail est de mieux comprendre les phénomènes relatifs à la mise en œuvre et l'utilisation des matériaux bio-composites à base de polypropylène renforcé par des fibres de Jute en utilisant une presse à chaud. Cette dernière, est une installation développée et conçue pour cette raison, par des étudiants de PFE depuis 2012, et améliorée récemment par nous-même par un système hydraulique (vérin simple effet), capteur de température et capteur de pression. Ses améliorations visent à étudier, d'une façon générale, l'influence des paramètres de fabrication des bio-composites à base de fibres végétales, et en particulier la résine polypropylène renforcée par des tissus de Jute. Ainsi on tente d'optimiser les paramètres d'élaboration de tels bio-composites.

Dans cette objective, deux paramètres distincts et prépondérants sont mis en cause lors de l'élaboration de nos bio-composites. Soient la variation de la température d'élaboration à pression constante et la variation de la pression d'élaboration à température constante.

De plus de l'objectif visé, dans notre collaboration, nous avons tenté à une caractérisation des fibres de Jute étudiées comme renfort du polypropylène, ainsi une étude détaillée visant l'analyse structurale de cette fibre en utilisant ATR-FTIR ainsi l'analyse thermique ATG et DTG.

Les essais mécaniques sur les bio-composites ont montré que les paramètres de mise en œuvre de nos bio-composites ont un effet significatif sur les paramètres de rupture de tels matériaux. Ces résultats sont en concordance avec l'ensemble des analyses présentés entre autres les faciès microscopiques.

CHAPITRE I

Matériaux composites

1. Généralités sur les matériaux composites

1.1. Définition

Les matériaux composites sont des matériaux solides constitués de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants pris séparément ne possède (**Fig.I.1**). Le renfort généralement de nature fibreuse permet de supporter la charge de la structure, réduit les contraintes thermiques et assure la rigidité et la résistance macroscopique. La matrice permet de lier le renfort, assurer une protection face aux agents extérieurs et transférer les charges au renfort via la liaison entre la fibre et la matrice [1].

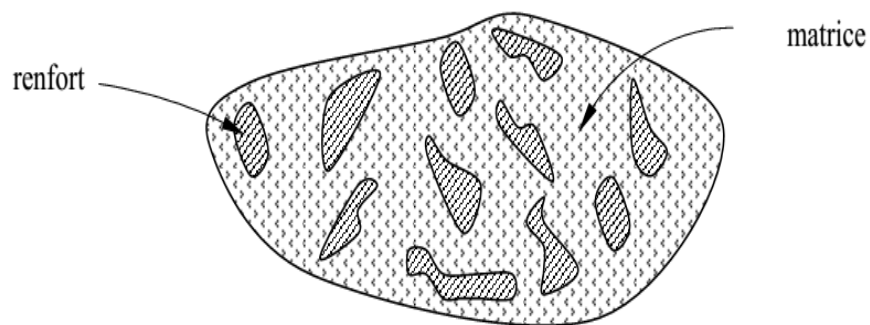


Fig.I.1. Matériaux composite [1].

1.2. Classification des matériaux composites

La classification des composites peut être effectuée selon la forme des composants ou suivant leurs natures [1,2].

1.2.1. Classement suivant la nature des constituants

- **Composites à matrice organique** : (résine, charges) avec :
 - Fibres minérales : verre, carbone, etc. ;
 - Fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc. ;
 - Fibres métalliques : bore, aluminium, etc. ;
- **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 (BSiC).

- **Composites à matrice minérale : (céramique), avec :**

- Des fibres métalliques : bore ;
- Des particules métalliques : cermets ;
- Des particules minérales : carbures, nitrures, oxydes réfractaires.

1.2.2. Classement suivant la morphologie

Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts (selon leurs morphologies). Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes (**Fig.I.2**) :

- **Composites à renforts de particules :** Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.
- **Composites à renforts de paillettes :** Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'une à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.
- **Composites à renforts de fibres :** Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts : en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues).
- **Composites stratifiés :** Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification.

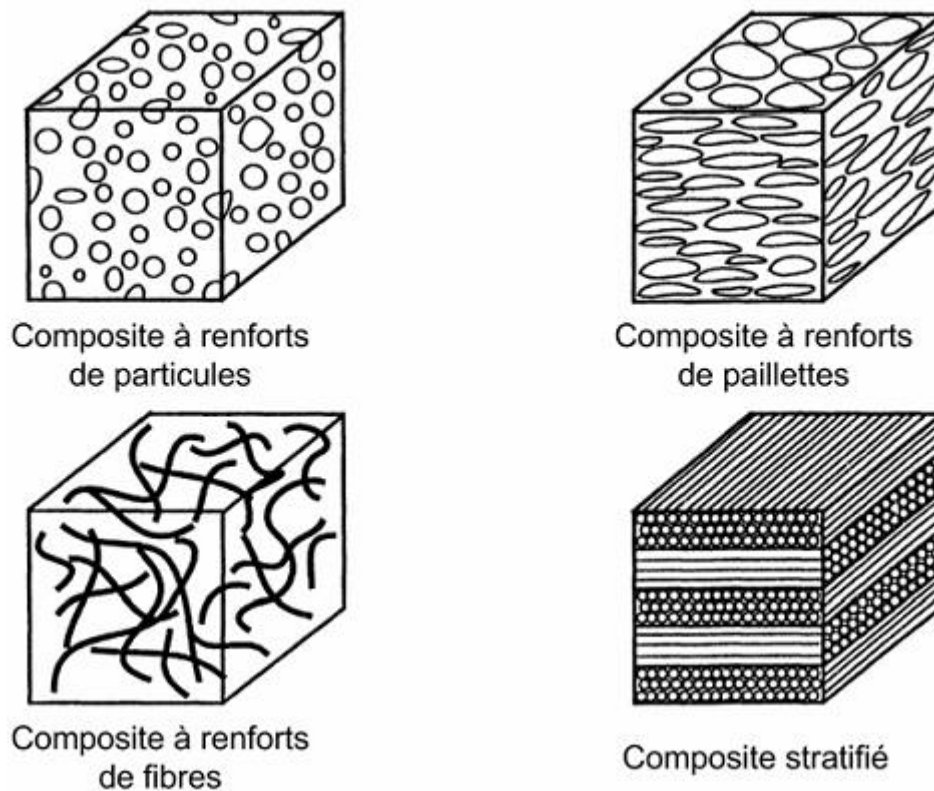


Fig.I.2. Classification des matériaux composites [2].

1.3. Constituants des matériaux composites

1.3.1. Matrice

La matrice est la phase continue dont les fonctions sont [3] :

- De réaliser la liaison entre les renforts de manière à répartir les sollicitations et ainsi de prévenir les ruptures catastrophiques.
- D'assurer la protection de ces renforts vis-à-vis des agents agressifs.
- De donner la forme à la pièce et garantir ses caractéristiques géométriques.

Les matrices utilisées dans les matériaux composites se divisent en deux grandes familles : les matrices organiques et les matrices inorganiques (minérales). La **Figure.I.3** présente les types des matrices.

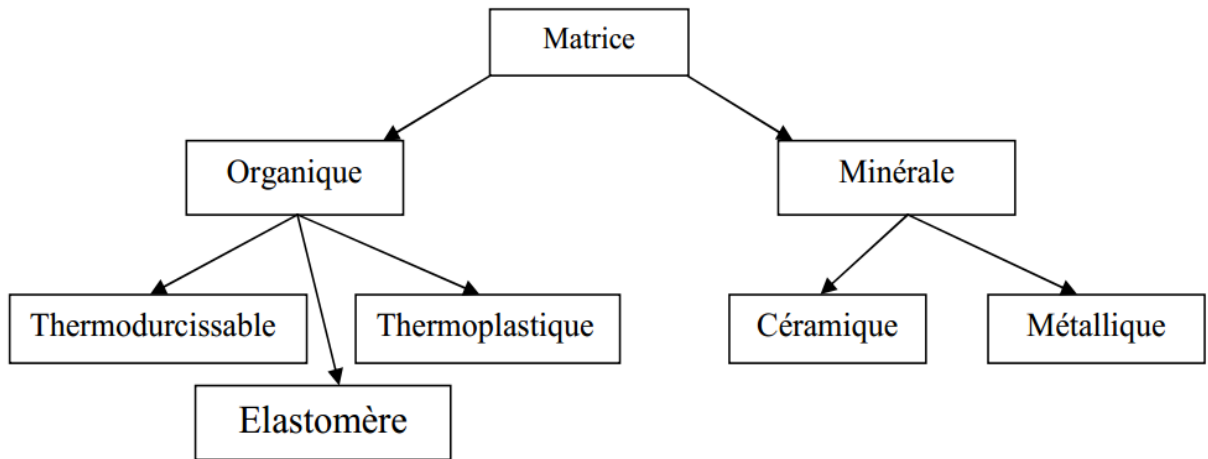


Fig.I.3. Les différents types des matrices [3]

Les matrices les plus employées sont les matrices thermodurcissables et thermoplastiques.

a) Matrices thermoplastiques :

Les matrices ou les résines thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux [4].

Avantages	inconvénients
-Mise en œuvre rapide -Possibilité de retransformation -Meilleure ténacité	-Une faible tenue en température -Peu de résistance aux solvants

b) Matrices thermodurcissables :

Ces résines possèdent la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à l'état solide [5] ; elles durcissent après un cycle de chauffage appelé « cycle de polymérisation » ou « cycle de réticulation ».

Les résines thermodurcissables principalement utilisées dans la fabrication des matériaux composites sont :

- **Résine polyester** : présente un bon accrochage sur les fibres, un prix bas, mais un retrait important et une tenue réduite à la chaleur humide.

- **Résine phénolique** : ayant de moins bonnes propriétés mécaniques que les résines époxydes, elle n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis-à-vis de tenue au feu.
- **Résine polyamide** : d'un emploi relativement difficile et cher, elle a l'avantage de garder des bonnes caractéristiques sur une large plage de température (de -100 à +260°C).
- **Résine époxyde** : (c'est la résine utilisée dans notre étude) les résines époxydes se présentent sous la forme de plusieurs ingrédients à mélanger :

- Une **résine principale** portant les terminaisons époxydes ; c'est un liquide plus ou moins visqueux ou un solide qui est, dans certaines conditions, soluble ou fusible.

- Un **diluant** réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif (solvants organiques, en général) ; c'est un liquide très fluide, dont le rôle est d'abaisser la viscosité du système lorsque le mélange est effectué.

- Un **flexibilisant** réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif ; c'est un liquide plus ou moins visqueux, dont le rôle est de rendre la résine durcie plus flexible.

- Un **durcisseur** portant les terminaisons chimiques qui réagissent sur les terminaisons époxydes des autres ingrédients pour constituer, en fin de cycle de polymérisation, un solide, c'est un liquide ou un solide (poudre, paillettes, blocs solubles ou fusibles).

La proportion de chaque produit entrant dans la composition du système de résine dépend des conditions de mise en œuvre à obtenir et des propriétés recherchées [5].

Le **Tableau.1.1** donne une comparaison entre les différentes résines.

	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes	Polyamides
<i>Caractéristiques Mécanique</i>	Moyennes	Faibles	Très bonnes	Excellentes
<i>Tenue aux chocs</i>	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
<i>Tenue en fatigue</i>	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
<i>Pouvoir adhésif</i>	Moyen	Moyen	Très bon	Très bon
<i>Température Maxi d'utilisation</i>	140°C	130°C	190°C	260°C
<i>Tenue au feu</i>	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
<i>Retrait</i>	Important	Faible	Très faible	Très faible
<i>Durée de polymérisation</i>	Courte	Courte	longue	Moyenne
<i>Mise en œuvre</i>	Très facile	Difficile	Facile	Difficile

Tab.1.1 : Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables [6].

1.3.2. Renfort Le renfort est le constituant qui confère au composite ses caractéristiques mécaniques : la rigidité, la résistance à la rupture, la dureté. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont de propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible cout.

➤ **Principales catégories des renforts**

Il existe un grand nombre des renforts sous forme de fibres que l'on peut diviser en quatre grandes catégories [7] :

- **Les fibres naturelles** : il s'agit essentiellement de fibres végétales (lin, chanvre, sisal, jute, ect) ou animales (poiles et la soie de sécrétion) ;
- **Les fibres artificielles** : elles sont obtenues après dissolution de matières naturelles et filage de la solution par un procédé d'extrusion. Les fibres les plus utilisées sont : **les fibres de viscose** haute ténacité ; **les fibres d'alginate** et **les fibres de chitosane**.

- **Les fibres synthétiques** : ces fibres sont obtenues par filage d'un polymère synthétique et mise en œuvre à partir d'un procédé d'extrusion/filage par voie fondu ou solvant. Les principales variétés sont : polyamides, polyesters polyoléfines, chlorofibres, fibres de PVA et les thermoplastiques hautes performances.
- **Les fibres de spécialité** : cette catégorie regroupe les fibres les plus utilisées dans l'industrie :

1) Fibres organiques à haute performance

- (a) **Mécanique** : para-aramides (Kevlar, Twaron), para-polyéthylène haute ténacité ;
- (b) **Thermique** :méta-aramide (Nomex), polyamide-imide (Kermel), copolyimide
- (c) **Mécanique et thermique** : Zylon, M5.

2) Fibres inorganiques

- Fibres de verre.
- Fibres de basalte (issues des roches volcaniques).
- Fibres céramiques haute température.
- Fibres de carbone.
- Fibres métalliques.

3) Présentation commerciales des renforts fibreux

a) Fibres discontinues

Des fibres courtes ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudres), améliorent le comportement mécanique du matériau composé de la matrice seule, mais celle-ci reste l'élément de base et on obtient un polymère renforcé.

b) Fibres continues

Celles-ci jouent un rôle principal dans le comportement mécanique du composite, la fonction de la matrice étant, en particulier, d'empêcher les

déplacements relatifs des fibres continues. C'est ce type de composites qui est utilisé dans les applications structurelles fortement sollicitées [8].

Les renforts continus se trouvent sous plusieurs formes commerciales :

1) Nappes unidirectionnelles

Elles sont constituées de fibres parallèles entre elles orientées dans une seule direction. La cohésion transversale est assurée :

- Pour les préimprégnés, par la résine.
- Pour les nappes sèches :
 - Soit par un ruban adhésif déposé suivant un pas déterminé
 - Soit par un léger tissage, on obtient un tissu unidirectionnel dans lequel

La masse de fibres dans le sens chaîne présente plus de 70% de la masse totale.

2) Tissus

Les fibres (monofilaments) sont en général rassemblées en mèche (ou fil), éventuellement réunies par torsion. Le renfort tissé est constitué par l'entrecroisement de fils de chaîne (suivant la direction d'enroulement sur son support) et des fils de trame (déposés perpendiculairement). Un tissu est équilibré si le poids de chaîne est égal au poids de trame.

Les armures les plus courantes utilisées sont les suivantes :

- **Taffetas** : dans lequel les fibres de chaîne et trame s'entrecroisent alternativement, en obtient un tissu peu déformable ayant une planéité excellente (**Fig.I.4a**).
- **Le sergé** : est intermédiaire de taffetas et de satin. Un fil de chaîne passe sous plusieurs fils de trame successif puis en dessus d'un fil de trame, en suivant un schéma régulier. Ce type d'armure produit un motif diagonal, ces tissus sont à la fois denses et souples (**Fig.I.4b**).
- **Le satin** : le fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs fils de trame, cette forme est la plus déformable : elle est utilisée pour réaliser des formes complexes. Les satins utilisés pour les composites sont les satins de 5 et 8 (**Fig.I.4c**).

La **figure.I.4** présente les principaux motifs d'armures :

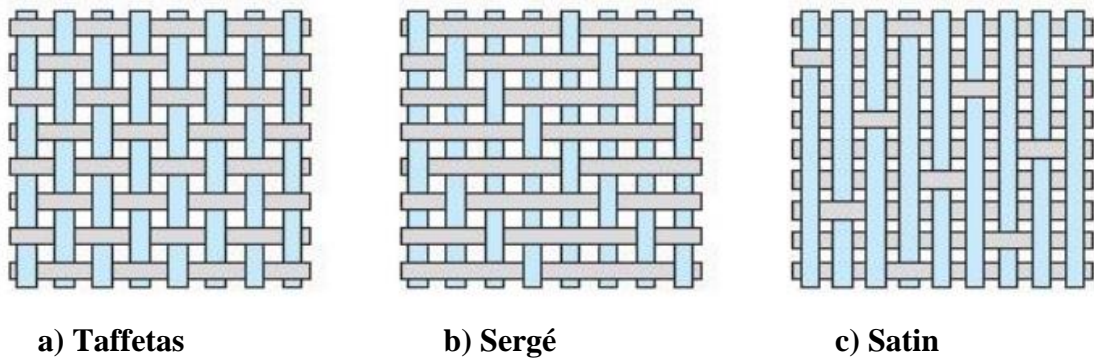


Fig.I.4. Principaux types de tissages.

3) Feutres ou mats :

Nous appelons feutre ou mat un tapis de fibres, coupées ou non, aléatoirement orientées dans un plan. Les produits tels quels ou sous forme préimprégnés.

Dans le cas de produits tel quel ; les fibres doivent être liées entre elles : soit chimiquement par le dépôt à faible taux de colles, soit mécaniquement par aiguilletage pour conserver leur comportement en feuilles lors de leur mise en œuvre.

1.4. Architecture de renforcement

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la texture des renforts (leur architecture) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. En fonction des propriétés recherchées, on rencontre plusieurs architectures de renforcements (**Fig.I.5**) [9].

a) Unidirectionnelle

Les fibres sont orientées dans une même direction ; elles sont parallèles et peuvent se présenter sous deux formes :

- Sans liaison particulière (roving).
- Reliées par un fil (nappes).

b) Multidirectionnelle aléatoire

Il est possible de fabriquer des composites avec des fibres disposées dans trois

directions. Par construction tous les composites sont fortement anisotropes, puisque la rigidité et la résistance des fibres sont de l'ordre de 50 à 100 fois supérieures à celles des résines.

Elles peuvent se présenter sous les formes :

- Fibres coupées et broyées, sans arrangement particulier.
- Feutre de fibres agglomérées par un liant : le mat peut être à fibres courtes. (Longueur inférieure à 50 mm), sans orientation particulière ou à fibres continues.

c) Orientée

Le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles) ; suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile, un sergé ou un satin.

On réalise également, pour des applications particulières (aérospatiale, défense), des armatures de renforcements bi-ou tridimensionnelles. On réalise aussi des plaques ou coques dont la raideur et la résistance varient avec la direction de la sollicitation.

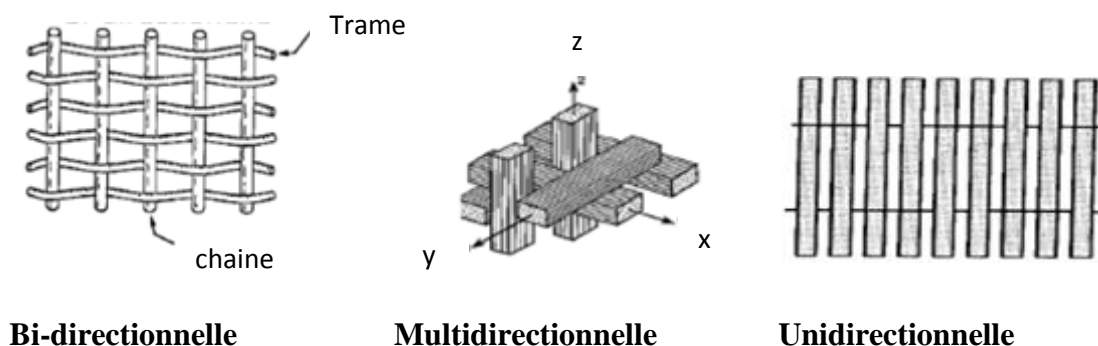


Fig.I.5. Principales orientations des fibres

1.5. Avantages et inconvénients des matériaux composites

• Avantage des matériaux composites

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

- Leur légèreté.
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.

- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit [10].

- **Inconvénients des matériaux composites**

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- la gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

CHAPITRE II

Composites Stratifiés

1. Qu'est ce qu'un composite stratifié ?

Un ensemble de plusieurs plis ou monocouches identiques disposés de la même façon constitue une couche. On appelle stratifié ce qui résulte de la superposition de plusieurs de ces couches ou plis de nappes unidirectionnelles, de tissus ou de mats, avec des orientations propres à chaque pli : c'est l'opération de drapage (**Fig. II.1**). On distingue différents types de stratifiés. Les monolithiques sont constitués uniquement de plis composite fibres/résine, les sandwichs sont constitués de deux couches monolithiques appelées peaux, séparées par une âme en mousse ou en nid d'abeille. Un stratifié monolithique est constitué de plusieurs plis dont la direction est décalée dans chaque couche. Lorsque les fibres sont toutes dans la même direction, le pli est dit unidirectionnel ; lorsque les fibres se présentent sous forme de tissu, le pli est dit tissé, il comporte des fibres dans deux directions appelées sens chaîne et sens trame. S'il y a autant de fibres dans les sens chaîne et trame le pli est dit tissé équilibré. Sur la **figure.II.1** une présentation d'un stratifié est donnée [11]

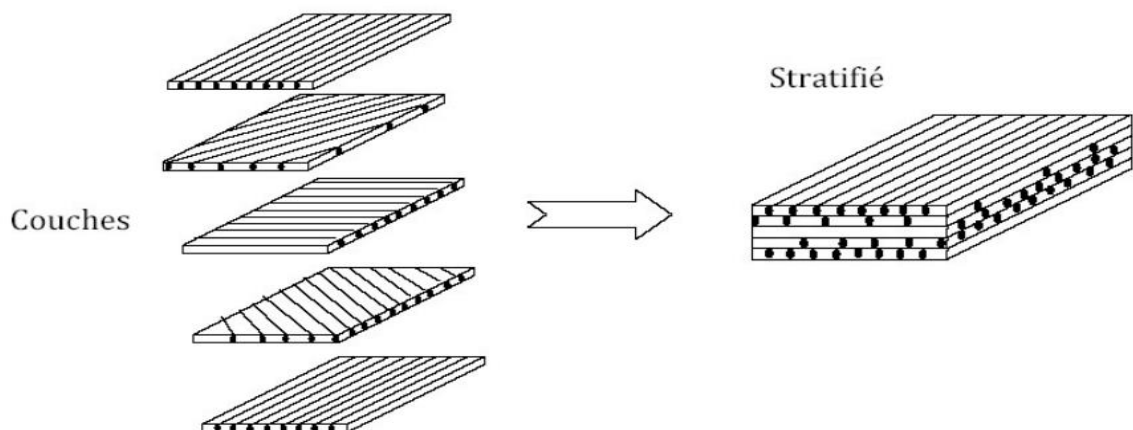


Fig.II.1. Constitution d'un stratifié [11].

1.1. Stratifié

Les composites stratifiés sont utilisés dans divers domaines de haute technologie (aéronautique, aérospatiale, construction navale et ferroviaire, automobile...). Ils sont plus avantageux par rapport aux matériaux métalliques. Ils sont caractérisés par leur légèreté, leur tenue à la corrosion, leur facilité de mise en œuvre, leur tenue à la fatigue, etc.

Un stratifié résulte de la superposition de plusieurs plis (couches) constitués par des fibres enrobées d'une résine. Lorsque toutes les fibres sont dans la même direction, le pli est dit unidirectionnel. Il est dit tissé, lorsque les fibres sont disposées suivant deux directions différentes, appelées sens chaîne et sens trame. S'il y a autant de fibres dans les sens chaîne et trame, le pli est dit tissé équilibré [12].

1.2. Les orientations normalisées

On désigne les stratifiés par l'orientation des fibres de chaque pli par rapport à un repère global arbitraire (x,y,z) , l'axe x correspondant le plus souvent à la direction du chargement. Un pli orienté à 0° présente des fibres dirigées selon l'axe x et un pli orienté à 90° des fibres selon y . Un stratifié quelconque de N plis est ainsi désigné par le N -uplet des orientations de ses plis dans le sens des z croissants. Pour condenser l'écriture, on note sous forme d'indice le nombre de plis adjacents de même orientation ainsi que le nombre de répétitions d'une même séquence de plis. L'indice "s" correspond à un stratifié symétrique pour lequel on ne renseigne que la moitié de l'empilement, de la surface au plan de symétrie miroir **figure.II.2** présente l'exemple d'un empilement symétrique $[-45/90/45/0]_s[1]$. Les plis successifs sont en général orientés différemment (classiquement 0° , 45° , 90° , 60°). La figure II.2 présente un exemple de la composition d'un stratifié $[60^\circ,90^\circ,+45^\circ,0^\circ]_C$ ayant la symétrie miroir. Les minimums technologiques sont de 3 à 4 couches de tissu équilibré ou 8 couches unidirectionnelles et une épaisseur de 1 mm [12].

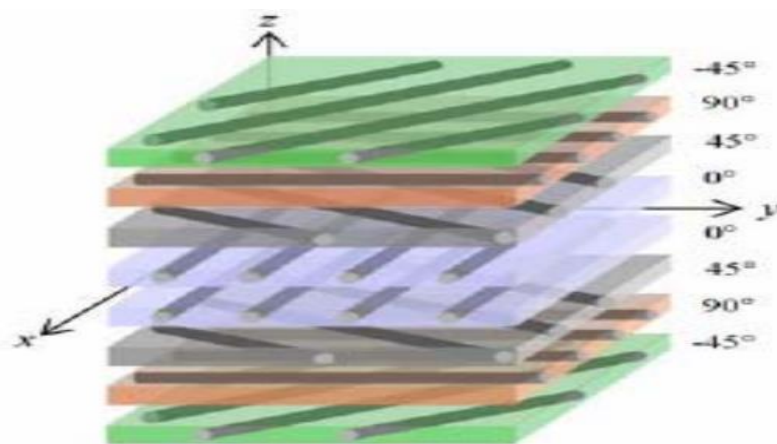


Fig.II.2.Exemple d'empilement symétrique quasi-isotrope $[-45/90/45/0]_C$ [11].

1.3. Pourquoi la symétrie miroir ?

Lors de la constitution de la pièce stratifiée, les plis successifs imprégnés de résine sont drapés à température ambiante, puis placés dans une étuve pour la polymérisation. Dans le composite ainsi créé à chaud, la dilatation d'ensemble de la pièce, d'origine thermique, s'effectue sans qu'il y ait variation globale de sa forme par voilement ou gauchissement. Par contre, lors du refroidissement, les plis ont tendance à se contracter différemment suivant le sens des fibres ou suivant le sens travers (Fig II.3). De là, l'apparition des contraintes d'origine thermique [13].

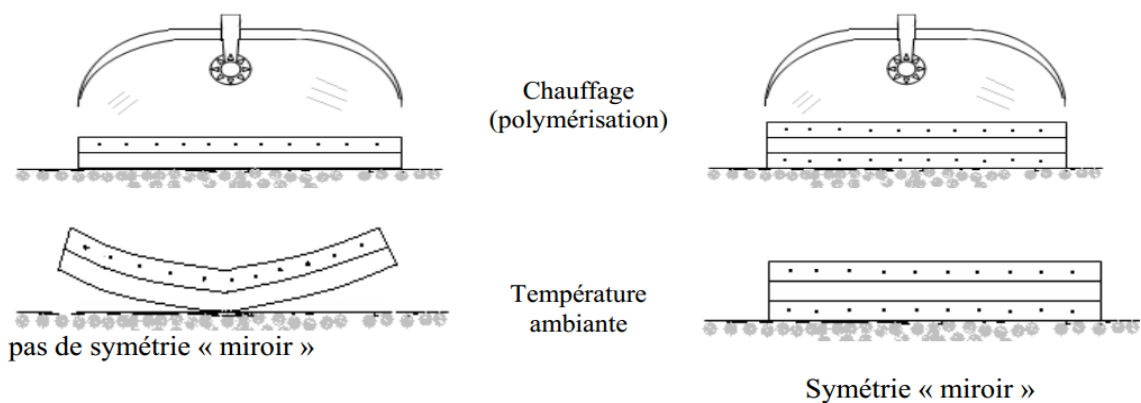


Fig.II.3. Schématisation de l'effet miroir sur la stratification [11].

1.4. Angles positifs et négatifs

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais des 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 (Fig.II.4) [11].

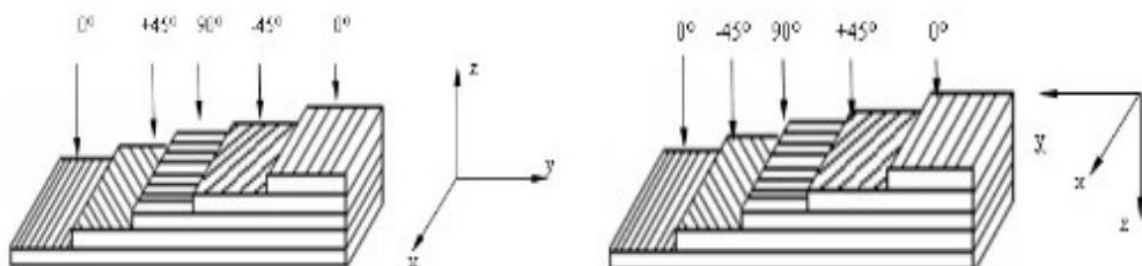


Fig.II.4. Désignation du signe de l'orientation [11].

2.Principaux mécanismes d'endommagement dans les matériaux stratifiés

Lorsqu'ils sont soumis à des contraintes externes, les matériaux composites (fibres/matrice) subissent différents types de dégradation résultant de l'endommagement local au niveau de la matrice, des fibres et de l'interface fibre/matrice. Généralement, ces mécanismes se produisent simultanément, réduisant ainsi les propriétés mécaniques du matériau composite. Les mécanismes de dégradation se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitation mécanique imposées [14]. Pour les composites à base polymère soumis à une sollicitation mécanique, l'expérience a montré que l'on peut distinguer quatre principaux modes d'endommagement [15-17]: la fissuration matricielle, la rupture de l'interface fibre/matrice ou décohésion, la rupture des fibres et le délaminage inter plis (**Fig.II.5**).

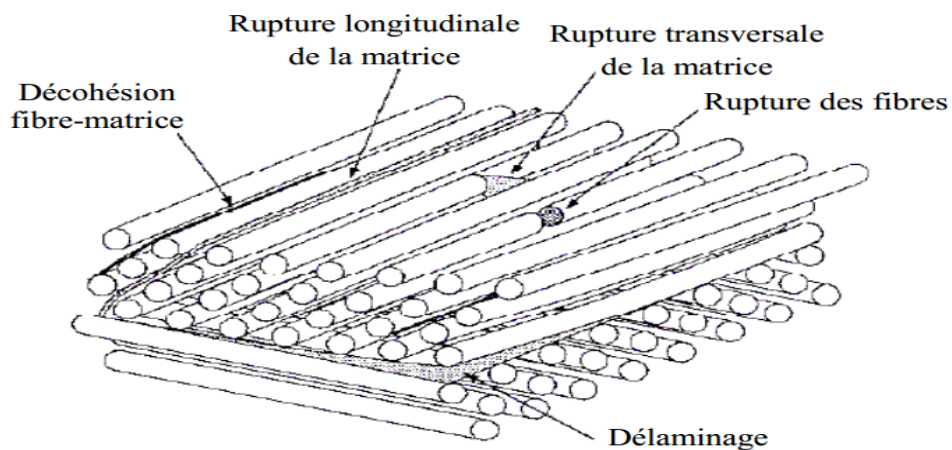


Fig.II.5. Mécanismes d'endommagement observés dans un composite stratifié [14].

a) Fissuration matricielle

Les microfissures qui se produisent au sein de la matrice apparaissent aux niveaux des porosités et des inclusions, soit par fissuration transversale, soit par fissuration longitudinale. Ce dernier mode de rupture se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à celle de cisaillement. Dans ce cas, les fissures sont orientées dans la direction de la sollicitation. La fissuration transversale se propage selon la direction perpendiculaire à la sollicitation et elle peut provoquer une décohésion fibre/matrice (**Fig.II.5.1**).

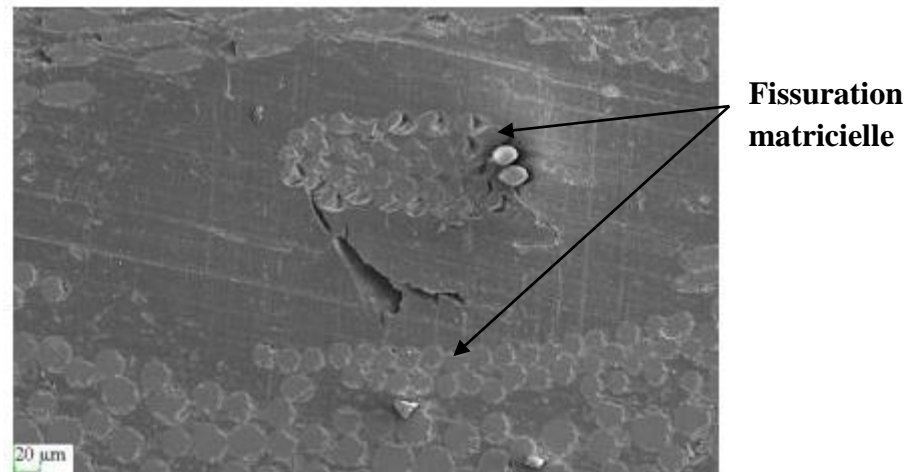


Fig.II.5.1.Exemple de fissuration matricielle [21].

b) Décohésion fibre/matrice

C'est dans la zone de l'interface où s'effectue le transfert de charge de la matrice vers les fibres ou vice versa. Après initiation, la propagation de la rupture change suivant la nature de l'adhésion fibre/matrice. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres, on peut distinguer les cas suivants:

- Cas d'une interface très forte : si l'adhérence entre les fibres et la matrice est très forte, on aura une propagation de la fissure initiée soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle. La rupture observée sera de type fragile.
- Cas d'une interface très faible : la fissuration matricielle est déviée à l'interface et la décohésion fibre/matrice s'étend sur une très grande distance.
- Cas d'une interface ayant des propriétés intermédiaires : la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface(**Fig.II.5.2**).

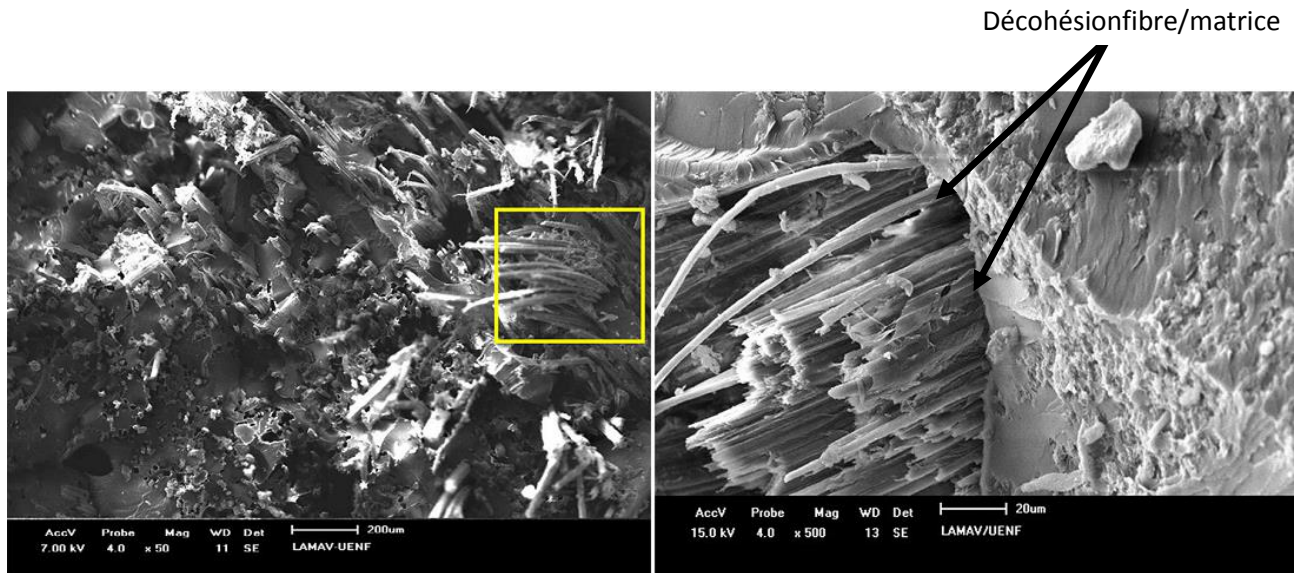


Fig.II.5.2.Décohésion fibre/ matrice[20]

c) Rupture de fibre

La rupture de fibre intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint sa contrainte à la rupture(Fig.II.5.3).

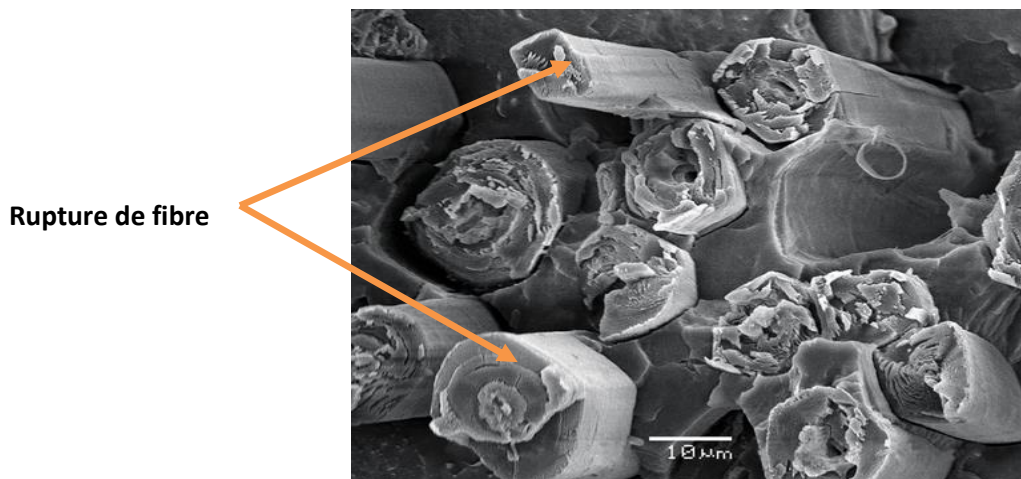


Fig.II.5.3.Rupture de fibre [22]

Elle se produit souvent dans les plis les moins désorientés par rapport à la direction de la sollicitation. Ce mode d'endommagement est la conséquence de concentrations de

contraintes dues aux deux types d'endommagement précédents. Lorsqu'une fissure apparaît dans une fibre, son instabilité devient grande, entraînant ainsi sa rupture complète.

d) Délaminage

Dans le cas de stratifiés à plis croisés, aux mécanismes décrits précédemment (fissuration matricielle, décohésion et rupture de fibres), s'ajoute un autre mécanisme d'endommagement entre couches appelé délaminage. Le processus de délaminage est le résultat d'une chronologie de divers types d'endommagement. Le délaminage est donc une séparation locale de deux plis du composite. Elle est due soit à une concentration de contraintes locale près des bords, soit à une densité de fissurations transversales très importante. Ce type d'endommagement contribue largement à la dégradation des propriétés mécaniques de la structure (**Fig.II.5.4**).

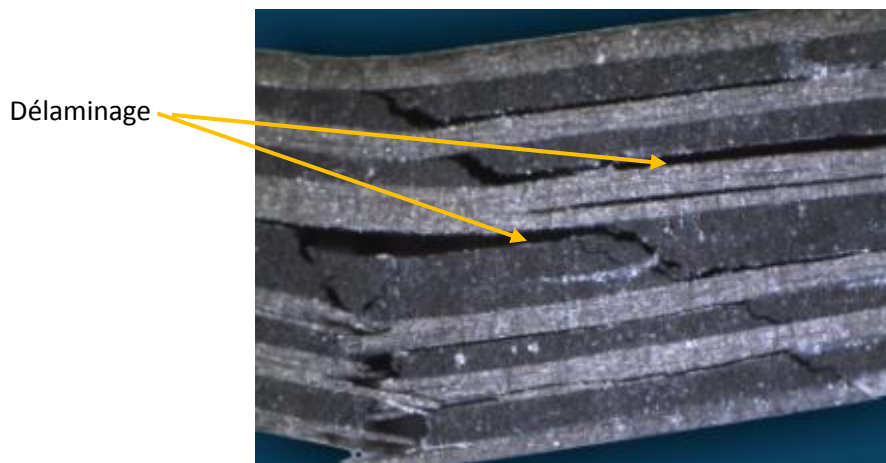


Fig.II.5.4.Délaminage [23]

3. Développement des mécanismes et processus de rupture

La **figure.II.6** récapitule les mécanismes de dégradation présentés précédemment et leurs échelles correspondantes. Outre la nature de la sollicitation appliquée (statique/dynamique, direction, vitesse,...), ces mécanismes sont fortement conditionnés dans leurs types (évolution et cinétique) par les différents paramètres suivants [18]:

- La nature et les propriétés des constituants (en particulier leur mode d'endommagement propre).

- Leur arrangement géométrique (proportion, forme et orientation dans chaque pli. séquence d'empilement).
- L'interaction entre les différentes phases (types d'interfaces notamment).
- Le processus de fabrication (porosité initiale, contraintes résiduelles).

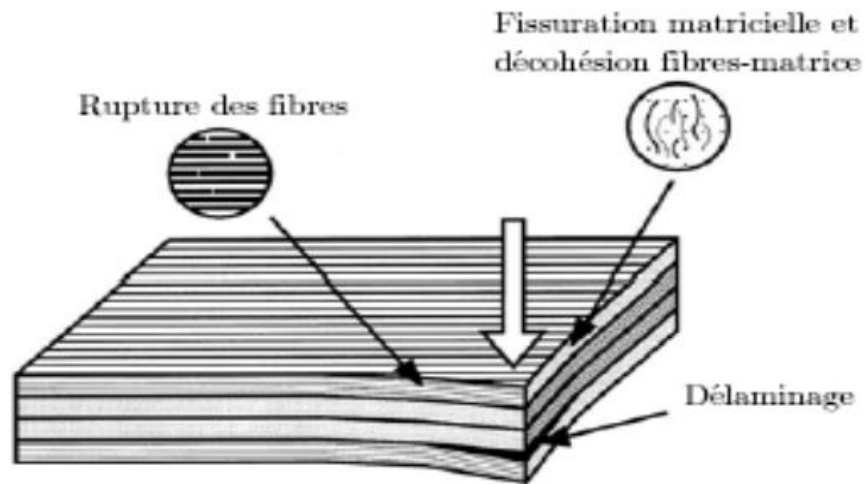


Fig.II.6 .Mécanismes d'endommagement dans les stratifiés [19]

CHAPITRE III

Fibres végétales

1. Introduction

Les fibres végétales peuvent être associées à des matrices de différentes natures. L'utilisation de fibres végétales dans une matrice thermoplastique ou thermodurcissable est une technique déjà utilisée et industrialisée notamment dans l'automobile (panneaux intérieurs, garnitures de toit, planchers de camions etc.), la construction (profilés de portes et de fenêtres, clôtures, bardages etc.) ou encore dans l'équipement domestique (meubles de jardin par exemple). En France, des études sont également en cours pour des applications dans le domaine de la construction aéronautique [24].

2. Fibres végétales

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [25,26].

2.1. Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

- Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en **fibres de tiges** (Kénafe, jute, lin, ramie), et **de feuilles** (Sisal, abace, paille de graminée) [26].
- Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigides provenant de matériels ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du **bois** et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénafe, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) [25].
- Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libériennes, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine. et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues [26].

2.2. Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres 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 (Tab.III.1) [27].

La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire qui découle de celle de la porosité des fibrilles [28].

Tableau. III.1 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales

Fibres	Longueur de la fibre (mm)	Diamètre de la fibre (μm)	Angle micro fibrillaire ($^\circ$)
Cotton	35	10-45	-
Lin	4-77	5-76	10
Chanvre	5-55	10-51	6,2
Kéna	2.5-4.5	14-33	-
Jute	2.5	5-25	8
Sisal	900	8-50	20
Ramie	900-1200	20-80	7.5
Noix de coco	03-1	12-24	45

La morphologie des fibres végétales peut constituer une donnée importante pour bien appréhender les transferts de contrainte aux interfaces fibre-matrice.

2.3. Structure et composition des fibres naturelles d'origine végétale.

Les propriétés mécaniques des fibres naturelles sont déterminées par leur :

- Composition chimique : pourcentage de cellulose (micro-fibrille = renfort).
- Structure physique : angle micro-fibrillaire. La diminution de l'angle entraîne une augmentation de la rigidité et la résistance.

a) Structure de la fibre végétale

La fibre végétale est considérée comme un matériau multicouche du fait des parois cylindriques concentriques qui la composent. Au centre de la fibre élémentaire, on distingue le lumen qui contenait, jusqu'à maturité de la fibre, le noyau cellulaire et le cytoplasme. La taille du lumen permet de déterminer la qualité et le degré de maturité de la fibre [29]. La paroi végétale, qui est l'enveloppe de la cellule végétale, est composée essentiellement de composés glucidiques. Elle comporte 2 parties présentées sur la **figure .III.1** :

- La paroi primaire
- La paroi secondaire, elle-même composée de 3 couches : S1, S2 et S3

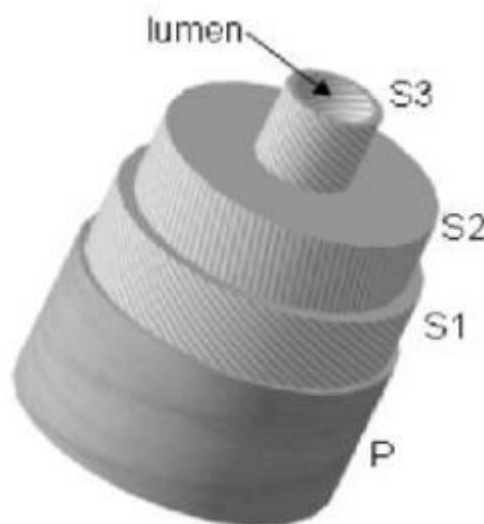


Fig. III.1. Schéma des parois d'une fibre de lin [30].

La paroi primaire est la paroi la plus externe dont l'épaisseur est comprise entre 0,1 et 0,5 μm (**Fig .III.1**) [31]. Cette paroi est poreuse et élastique [32]. Elle est constituée principalement de pectines et de micro-fibrilles de cellulose orientées aléatoirement [33,34].

La paroi secondaire ou paroi interne possède une épaisseur d'environ 10 μm , constituant la plus grande partie du volume de la fibre. Cette paroi se divise en 3 couches : S1, S2 et S3. Ces trois sous-couches se différencient par leur composition biochimique, leur épaisseur ainsi que par leur arrangement.

La paroi primaire ainsi que la paroi secondaire sont considérées comme des composites renforcés de fibrilles. Leurs principaux constituants sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine qui constitue la matrice du composite. Chacune des sous couches est constituée de lamelles concentriques, qui consistent en un enroulement de micro-fibrilles de cellulose parallèles entre elles dans une matrice de lignine, les hémicelluloses assurent l'interphase.

L'élément constitutif des parois est appelé micro-fibrille. Les micro-fibrilles sont disposées en forme de spirale, formant un angle β avec l'axe longitudinal de la fibre (**Fig.III.2**). Cet angle est appelé l'angle des micro-fibrilles (AMF), il est déterminé par diverses techniques dont la microscopie confocale polarisante et la diffraction des rayons X [25,26]. Plus l'angle est petit, plus les micro-fibrilles de cellulose sont verticales. Ainsi, la couche S2, qui est la couche la plus riche en cellulose, a une disposition favorisant le soutien de la plante. Cette couche est donc très importante pour la résistance mécanique.

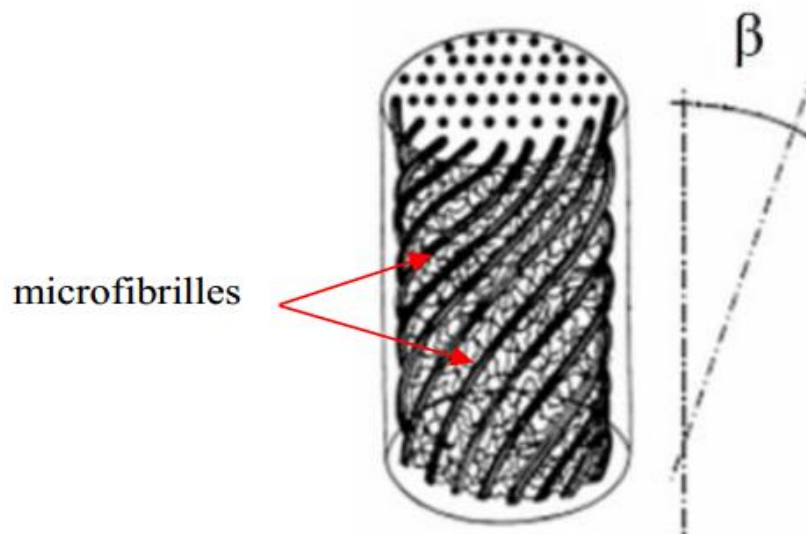


Fig. III.2. Représentation des micro-fibrilles formant un angle.

La couche S1 est constituée d'un treillis de fibres dont l'angle varie de -80 à $+80^\circ$, elle représente 5 à 10 % de l'épaisseur totale de la paroi végétale (**Fig.III.1**).

La couche S2, qui est la plus épaisse, occupe environ 75 à 85% de l'épaisseur de la paroi végétale (**Fig.III.1**) et assure la rigidité mécanique globale de la fibre végétale. Les micro-fibrilles ont un angle compris entre 0° et 45° (**Tab.III.1**).

Les micro-fibrilles de la couche S3 font un angle égal à + (40°- 80°) avec l'axe de la fibre [30]. L'épaisseur de la couche varie entre 5 et 10% de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire (**Fig.III.1**).

b) Composition chimique des fibres végétales

La biomasse végétale est constituée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de la paroi végétale.

Comme nous l'avons vu précédemment les composées les plus majoritaires sont la cellulose, l'hémicellulose les pectines et les lignines. Ces différents constituants sont agencés de manière très complexe (**Fig.III.3**).

a) Cellulose

La cellulose est le constituant principal de la masse végétale. Ce polymère linéaire de glucose présente est à l'état presque pur (>90%) dans la fibre de coton. Il est aussi, avec de la lignine, l'un des constituants essentiels du bois (50%) [35].

b) Hémicelluloses

On désigne par hémicellulose tout polysaccharide soluble dans l'eau et pouvant être extrait de la paroi des cellules végétales par des solutions acides.

Les hémicelluloses sont une classe de polymères très variés (de nombreux monomères et de nombreux branchements différents). Elles sont donc assez mal définies. Dans leurs états naturels, leur structure est fonction de l'espèce végétale. Elles ont un degré de polymérisation compris entre 200 et 300 [36].

c) Pectines

Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois). Elles jouent le rôle de ciment intercellulaire et contribuent à la cohésion des tissus végétaux [37].

d) Lignine

La lignine est après la cellulose, la matière organique renouvelable et la plus abondante à la surface terrestre. La lignine originelle ou "protolignine" constitue la plus importante fraction non saccharique des fibres végétales. C'est la matière "incrustante" de la cellulose. La lignine est constituée de polymères phénoliques tridimensionnels, amorphes possédant trois unités différentes de type pénylopropane : les alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique [38].

e) Extractibles

Ce sont des molécules de faible masse molaire qui remplissent la lumière des cellules. Ils représentent 2 à 5 % de la masse sèche. La plupart de ces extractibles sont solubles dans l'eau ou des solvants organiques, d'où leur dénomination. La composition en extractibles varie en fonction de l'essence considérée et influe sur la couleur et l'odeur. Il s'agit de tanins, de pectines, de sucre et d'autres composés [39].

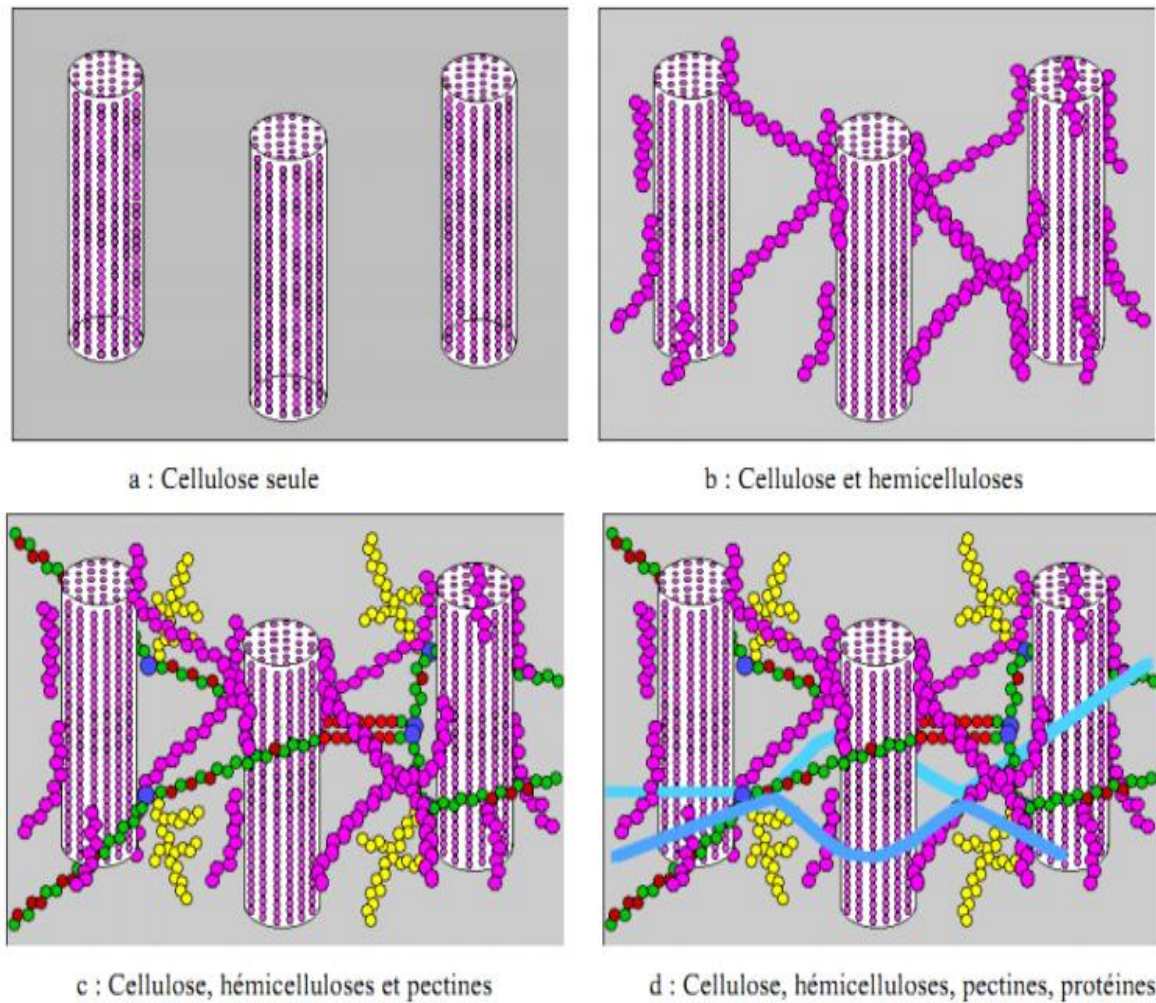


Fig. III.3. Exemple de représentation schématique de l’agencement des différents composants des fibres végétales à l’échelle micrométrique [40].

Le **Tableau .III.2** présente la composition chimique de quelques plantes à fibres :

Tableau .III.2: Composition chimique de quelques plantes à fibres [26].

	Cellulose	Hémicellulose	Lignines	Pectines	Autres (cire,eau...)
Lin	64-85	5-20	0-5	2-20	9-12
Chanvre	58-85	10-23	3-6	1-17	11
Jute	61-75	11-15	8-15	0.2-1	11
Rmie	68.6-76.2	13-17	0.6	1.9-2	8.3
Sisal	66	12	9.9	0.8	11.3

2.4. Propriétés Mécaniques des Fibres Végétales Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité [41]. Le **Tableau.III.3** présente les propriétés usuelles des fibres végétales [39].

Tableau III.3 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles [42].

Fibre	Densité(g/cm³)	Allongement(%)	Résistance à la traction (Mpa)	Module de Young (Gpa)
Coton	1.5-1.6	7-8	287-597	5,5-12.6
Jute	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
lin	1.5	2.7-3.2	345-1035	27.6
chanvre	-	1.6	690	61.4-128
ramie	-	3.6-3.8	400-938	61.4-128
sisal	1.5	2-2.5	511-635	6.4-22
coco	1.2	30	175	4-6
verre E	2.5	2.5	2000-3500	70
verre S	2.5	2.8	4570	86
aramide	1.4	3.3-3.7	3000-3150	63-67
Carbone	1.4	1.4-1.8	4000	230-240

3. Avantages et inconvénients des fibres végétales

Pour des raisons de disponibilité et de coût, les fibres naturelles d'origine végétale sont les plus utilisées pour le renforcement des matériaux composites ; elles constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort des composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau de développement industriel.

Tableau .III.4: Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts des matériaux composites [43].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Faible coût. ✓ Biodégradabilité. ✓ Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité). ✓ Non abrasif pour les outillages. ✓ Neutre pour l'émission de CO₂. ✓ Peu d'énergie pour production. ✓ Pas de résidus après incinération. ✓ Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres. ✓ Ressource renouvelable. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Difficulté de leur extraction ✓ La nature hydrophobe ✓ L'incompatibilité avec les polymères ✓ Absorption d'eau ✓ Stabilité thermique limitée (200-250°C) ✓ Structure anisotropes ✓ Variation des propriétés en fonction de la zone de croissance et l'âge de la plante.

CHAPITRE IV

***Matériaux et méthodes
expérimentales***

1. Introduction

Pour optimiser la technique d'élaboration des bio-composites, une campagne d'essais sur des bio-composites PP/Jute est menée suivant des paramètres bien étudiés. Pour cela, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Analyse de physico-chimique de la fibre de Jute ;
- Découpage des thermoplastique PP et des plis de Jute ;
- Compression des plis de Jute ;
- Proposition des paramètres d'élaboration des bio-composites ;
- Elaboration des bio-composites ;
- Caractérisation mécanique du bio-composite ;

2. Matériaux utilisés

Dans cette étude, nous avons utilisé deux composants essentiels :

- Matrice (résine thermoplastique).
- Fibre de Jute.

Le matériau bio-composite considéré dans ce travail est un matériau à matrice thermoplastique chargé par des fibres naturelles.

2.1. Matrice

Le polypropylène est une matière plastique formé de chaîne linéaire constitué de motifs propylènes dans le cas d'un homopolymère et d'une altération contrôlée de motifs propylène et éthylène dans les copolymères [41]; la chaîne polypropylène (PP) permet une cristallisation segmentée et un couplage par cohésion entre la fibre modifiée et la matrice PP. Le greffage par copolymérisation est efficace mais complexe [44].

Il caractérisée par [45]:

- Bonne stabilité thermique,
- Faible densité
- Légèreté,
- Chimiquement inerte,

- Résistance haute température,
- Ecologique,
- Rigide et durable,
- Imperméable,
- 100% recyclable.

Les propriétés de résine polypropylène sont représentées par le **Tableau .IV.1**. La **Figure .IV.1** présente le film de plastique PP utilisé dans cette étude.

Tableau.IV.1 : Caractéristiques de résine polypropylène [46]

Propriétés du polypropylène		
Densité	(g/cm ³)	0,905
Température de fusion	(°C)	165 – 170
Module élastique	(GPa)	1,0 – 1,4
Limite d'élasticité	(MPa)	25 – 38
Déformation à la rupture	(%)	300
Coefficient de dilatation	(°C)	175 * 10 ⁻⁶
Température de mise œuvre	(°C)	190 – 285



Fig. IV.1. Film de plastique en polypropylène PP recyclée

2.2. Fibres de Jute

La plante de Jute est cultivée au Bangladesh et en Inde, c'est une plante des régions tropicales appartenant à la famille des liliacées (**Fig. IV.2**). La tige peut atteindre une hauteur de 4 à 6 m avec un diamètre d'environ 3 cm. La fibre ultime est très courte et très lignifiée [47]. Les fibres utilisées en papeterie sont les déchets de culture et de filature. Les caractéristiques de ces fibres sont généralement assimilées à celles du kenaf [48].



Fig. IV.2. Plante de Jute

Dans cette étude, nous avons utilisé des fibres de Jute sous forme de tissu Taffetas de masse surfacique de 420 g/m² (**Fig. IV.3**). Ce tissu nous a été fourni par la société de textile et emballage de Bejaia.



Fig. IV.3. Tissu de Jute utilisé

3. Caractérisations de la fibre de Jute

3.1. ATR- FTIR

La spectrométrie Infrarouge à transformée de Fourier (en anglais : Fourier Transform Infra redspectro-scropy FTIR) est une technique efficace qui va nous permettre d'analyser les propriétés chimiques et structurales de différentes fibres végétales afin d'étudier les modifications résultants de traitements effectués (**Fig. IV.4**). Cette technique est basée sur le fait que les molécules possèdent des fréquences spécifiques pour lesquelles elles vibrent (ou tournent) en correspondance avec des niveaux d'énergies appelés : modes vibratoires. Ici la radiation incidente est de type infrarouge. Pour cette technique particulière (à transformée de Fourier), la lumière infrarouge, après avoir rencontré l'échantillon, passe au travers d'un interféromètre de Michelson (et non pas un monochromateur) constitué d'une séparatrice de faisceaux, d'un miroir fixe et d'un miroir mobile. Le signal enregistré s'appelle inter-férogramme, il subit une transformée de Fourier pour être finalement tracé et devient un spectre [49].

La technique spectroscopique ATR- FTIR est l'une des méthodes les plus utilisées pour l'analyse qualitative et quantitative des matières organiques [39].

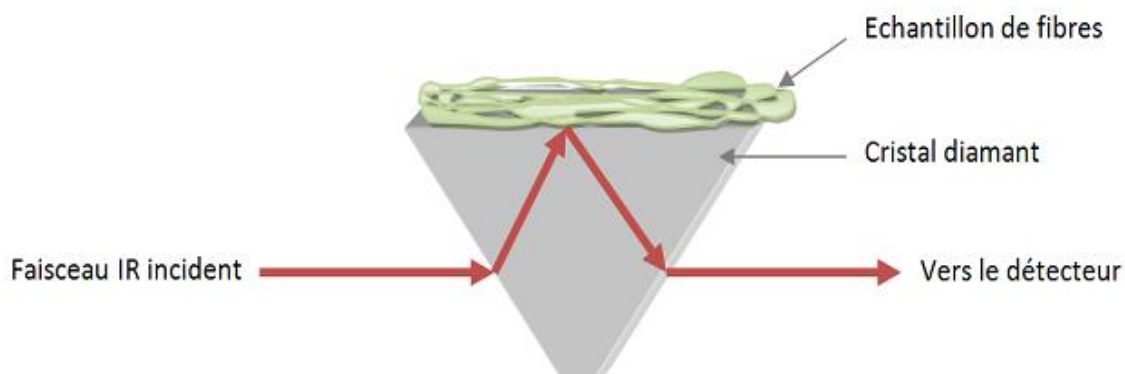


Fig.IV.4. Schéma de principe de la spectrométrie FTIR-ATR sur des échantillons fibreux.

La **Figure. IV.5** présente un appareil d'analytique ATR- FTIR.



Fig. IV.5. Photo d'un appareil d'analytique ATR- FTIR.

Par exemple, Belouadah et al [50] ont étudié ATR-FTIR des fibres de *Lygeum-spartum*. Le spectre obtenu ATR-FTIR est représenté sur la **Figure. IV.6**. Une grande bande d'absorption, observée autour 3340 cm^{-1} , est attribuée au groupe hydroxyle (-OH). Les deux pics à 2915 cm^{-1} et 2848 cm^{-1} sont associés à (CH_2) des groupes de la cellulose et de l'hémicellulose. Le nombre d'onde à 1732 cm^{-1} et 1637 cm^{-1} correspond aux groupes carbonyle (C=O) de lignine et d'hémicellulose, tandis que la très faible intensité de la bande à 1512 cm^{-1} indique (C=C) des groupes de lignine. Le pic autour 1427 cm^{-1} correspond à la (CH_2) les groupes de cellulose. Alors, la présence de pic autour 1371 cm^{-1} est associée à (C-H) les groupes de cellulose. Le pic localisé à 1237 cm^{-1} indique groupes (-COO) d'hémicellulose. En outre à 1158 cm^{-1} nous avons trouvé les groupes (C-O-C) de la cellulose et de l'hémicellulose. Le nombre d'onde autour 1037 cm^{-1} correspond à la (C-O) les groupes de cellulose. En outre, la présence d'un pic aux alentours 898 cm^{-1} est associée à (C-O) les groupes qui sont liés à β -glycosidiques, tandis que le petit coup d'œil autour de 588 cm^{-1} correspond à la (C-OH) courbure.

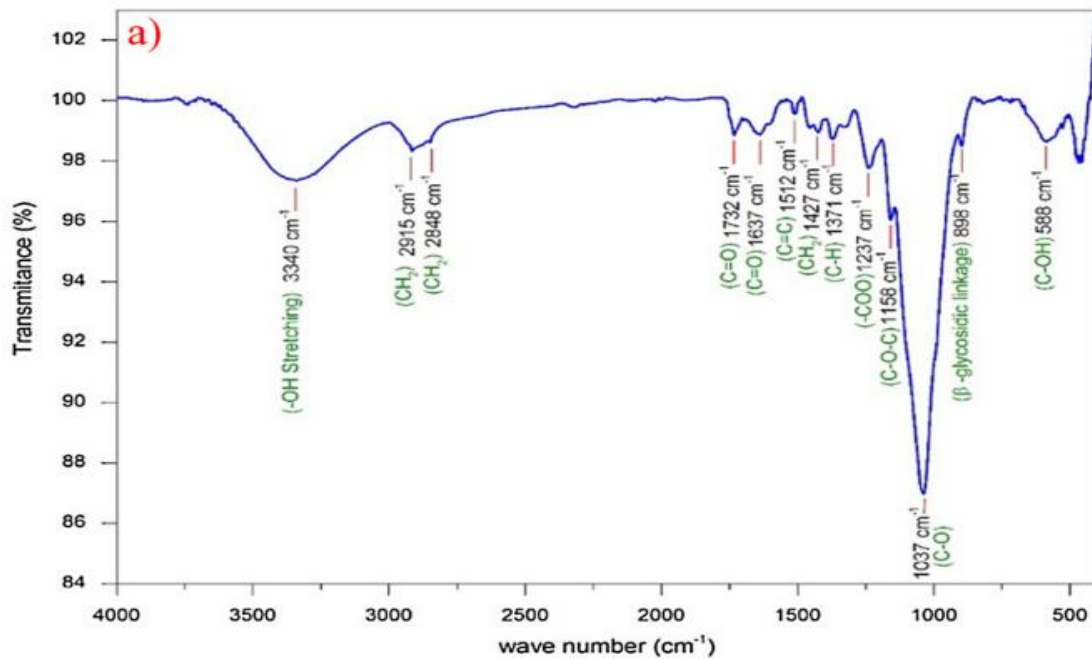


Fig. IV.6. Spectres ATR-FTIR de fibre Lygeum-spartum

3.2. Analyse thermogravimétrique (ATG)

L'analyse thermogravimétrique a été utilisée pour étudier la stabilité thermique et la vitesse de décomposition que subit un échantillon au cours d'un traitement thermique en fonction de la température. Généralement, les procédés de fabrication de composites à matrice thermoplastique renforcées par des fibres naturelles sont souvent mises en œuvre à des températures élevées. Voilà pourquoi il est important d'évaluer le comportement thermique de fibres naturelles dans différentes températures afin de : déterminer les meilleures conditions possibles pour la mise en œuvre des composites, et d'éviter la dégradation des propriétés de ces fibres. Plusieurs chercheurs ont signalé la décomposition thermique des composants principaux de fibres végétales, on cite : cellulose (240–350 °C), hémicellulose (200–260 °C) et lignine (280–500 °C). Parmi ces trois composantes, l'hémicellulose est le responsable sur la dégradation thermique, tandis que, le faible taux de lignine conduit à une meilleure performance thermique de son composite [49]

Par exemple ,Belouadah et al [50] ont étudié le comportement thermique du fibres de Lygeum-spartum. Ils ont observés que le comportement de cette type de fibres caractérisé par trois stage de dégradation, Dans le premier stage, une perte de masse de entre la température ambiante et 110 °C en raison de l'évaporation de l'eau. Dans le deuxième

stage(entre 220 °C et 375 °C) une dégradation maximale des principaux composants des fibres. Après ça, la perte de poids a été poursuivie jusqu'à ce que 600 °C (troisième stage) (Fig. IV.7).

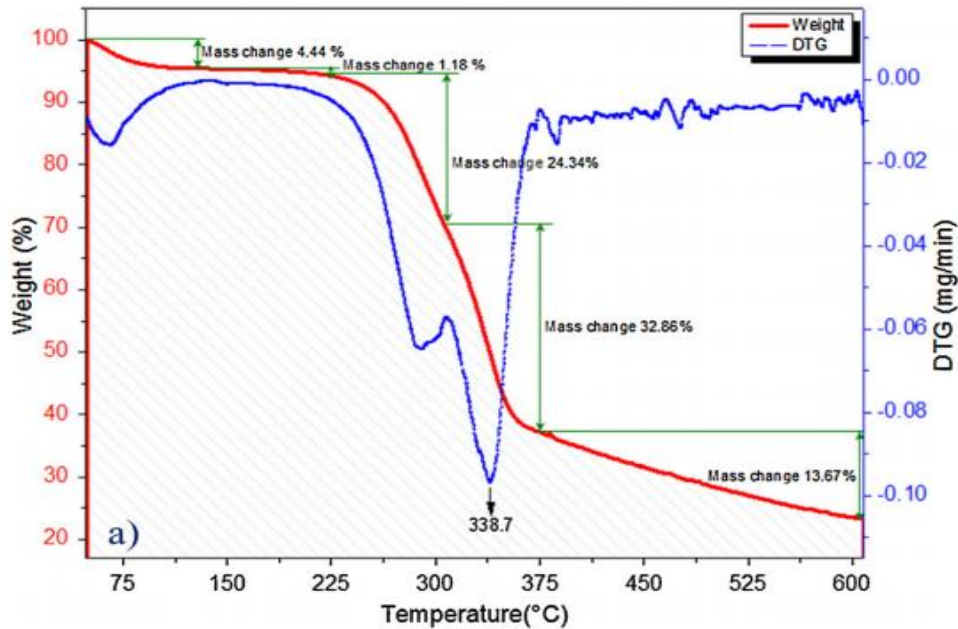


Fig. IV.7. Courbes ATG et DTG de fibre de Lygeum-spartum [49]

4. Préparation du bio-composite

4.1. Découpage

Le thermoplastique PP ainsi que le tissu de Jute sont découpés selon la dimension du moule (Fig. IV.8).

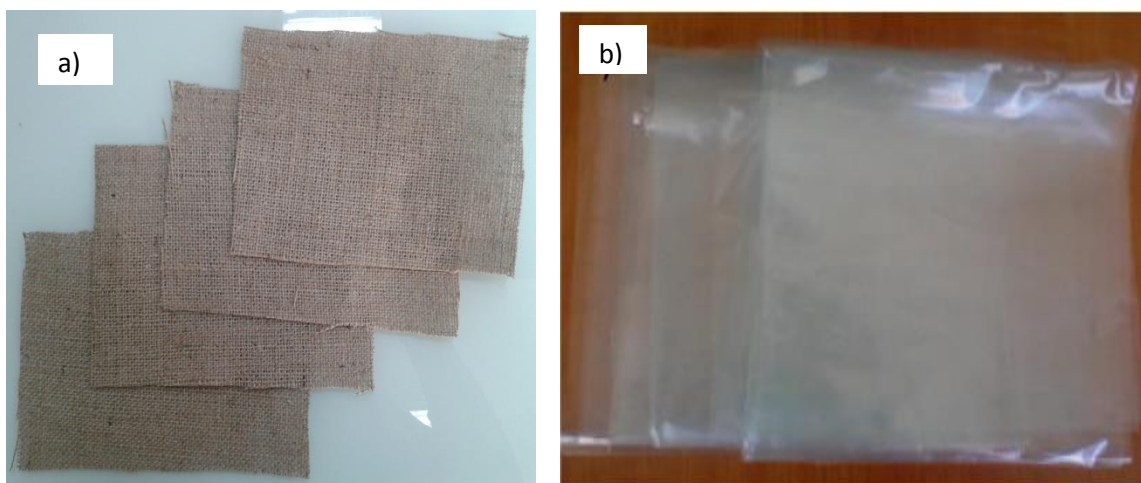


Fig. IV.8. Matériaux utilisés : a) Jute b) Plastique PP

La **Figure. IV.9** représente les séquences des plis PP/JUTE utilisée dans chaque plaque de bio-composite. Ces séquences sont déduites après une série de tests sur les bio-composites PP/Jute.

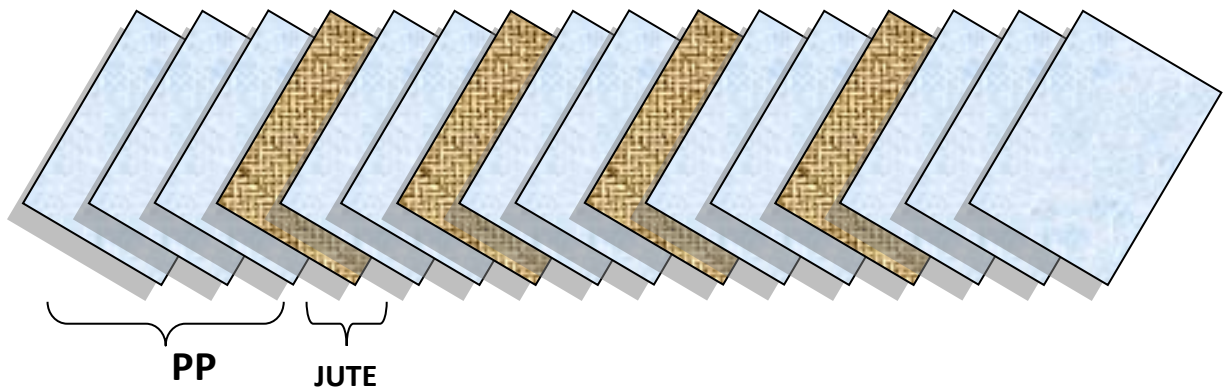


Fig. IV.9. Les séquences PP/Jute utilisés lors de l'élaboration du bio-composites

4.2. Compression des tissus Jute

Avant élaboration les plis de Jute sont compressés par une presse à chaud, cette technique nous permet de :

- Favoriser l'élaboration des bio-composite
- Adaptation les plis dans le moule
- Réduire l'épaisseur des plis pour un bio-composite idéal

Chaque plis de Jute compressés à 120°C du durant 10 mn avec pression 12 bar, la **Figure. IV.10** illustre cette technique.



Fig. IV.10. Représenté la compression des tissus de Jute

4.3. Elaboration des bio-composite

Dans ce travail les plaques bio-composites (supposés similaire) dans le moule, de la presse à chaud est exercé une force de pression sur le bio-composites une fois la température de 140°C est atteinte.

La différence entre un bio-composite et un autre réside dans la classe de nos bio-composites, pour cela deux classes de bio-composites sont élaborés suivants :

Classe A : bio-composites à pression constante (température variable).

Classe B : bio-composites à température constante (pression variable).

Le **Tableau. IV.2** résume les paramètres d'élaborations des bio-composite préparés :

4.4. Obtention des éprouvettes

Les tests sur bio-composites sont exercés sur des éprouvettes de traction selon ASTM D638-03 (**Fig. IV.11**).

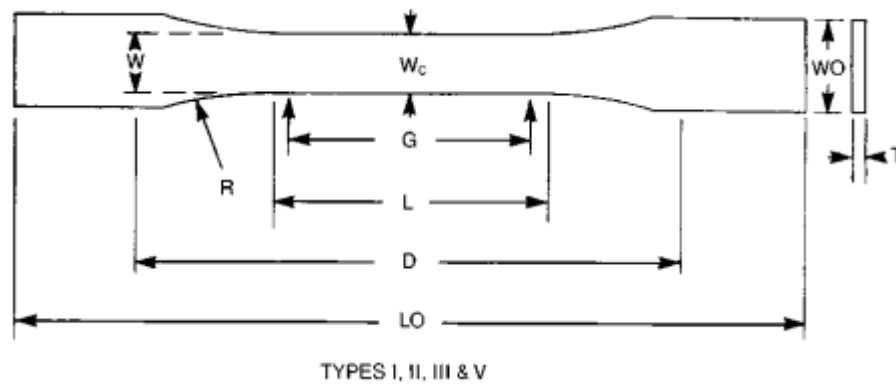


Fig. IV.11. Éprouvette de traction

Selon notre cas, le type (I), est utilisé :

- W = 13 mm
- L = 57 mm
- W₀ = 19 mm
- LO = 165mm
- G = 50 mm
- D = 115mm
- R = 76 mm

Tableau.IV.2 : les paramètres d'élaborations des bio-composite

Bio-composite Classe A							
N°	Température (°C)	Pression (bar)	Désignation	Démarrage (°C)	Temps demaintien (mn)	Arrête (°C)	Intervalle (°C)
01	190	20	A1	90	40	184	±1
02	210	20	A2	90	40	203	±1
03	230	20	A3	90	40	224	±1
04	250	20	A4	90	40	235	±1

Bio-composite Classe B							
N°	Température (°C)	Pression (bar)	Désignation	Démarrage (°C)	Temps demaintien (mn)	Arrête (°C)	Intervalle (°C)
01	200	10	B1	90	40	192	±1
02	200	20	B2	90	40	193	±1
03	200	30	B3	90	40	192	±1
04	200	40	B4	90	40	192	±1

Les éprouvette sont obtenu par usinage en utilisant un machine à commande numérique(**Fig.IV.12**), cette technique nous a performant d'avoir :

- ✓ des éprouvettes identiques ;
- ✓ gain de temps ;
- ✓ absence de contraintes résiduelles.



Fig. IV.12.usinage d'éprouvette par CNC

Les éprouvettes obtenues sont présentées par la **Figure. IV.13** :

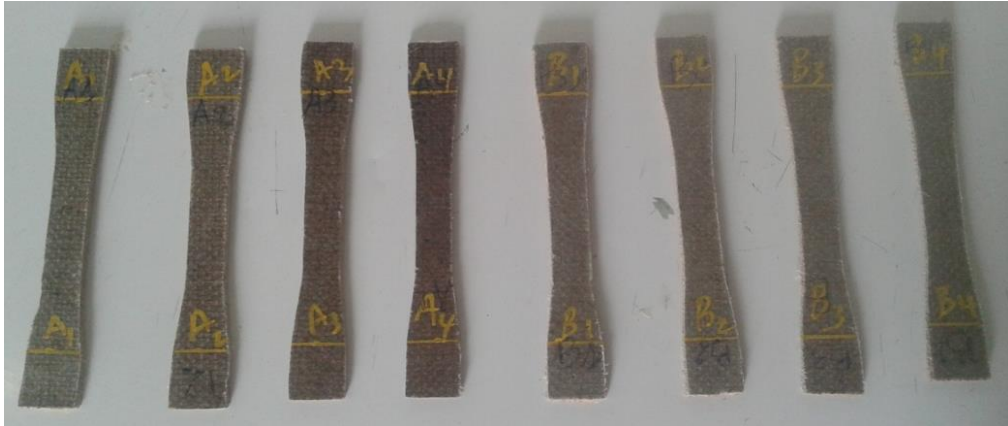


Fig. IV.13. Présentées les éprouvettes obtenues

5. Essais de traction

a) Essais de traction sur bio-composites

Les essais de traction sont des expériences mécaniques exécutées dans le but de déterminer l'allongement, la contrainte à la rupture et le module d'Young des bio-composites. Ces tests ont été réalisés sur une machine d'essai de traction de type YL Universaltesting machine /20 kN)(**Fig. IV.14**).



Fig. IV.14.machine d'essai de traction.

b) Paramètres d'études :

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

- **Contrainte de rupture**

La contrainte de rupture est donnée par la relation (IV.13) [51] :

$$\sigma = F/S$$

Avec : **F** : Force de traction (N)

S : Section rompue (mm²)

σ : Contrainte de rupture (MPa)

- **Module de Young [48] :**

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

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

$$E = \sigma / \varepsilon = (F \cdot L_0) / (S \cdot \Delta L)$$

Avec : **E** : Module d'young (Mpa).

L₀: Distance entre mords (mm).

S₀: Surface ou section (mm²).

ε : La déformation de la longueur des éprouvettes.

ΔL : L'allongement des éprouvettes (mm).

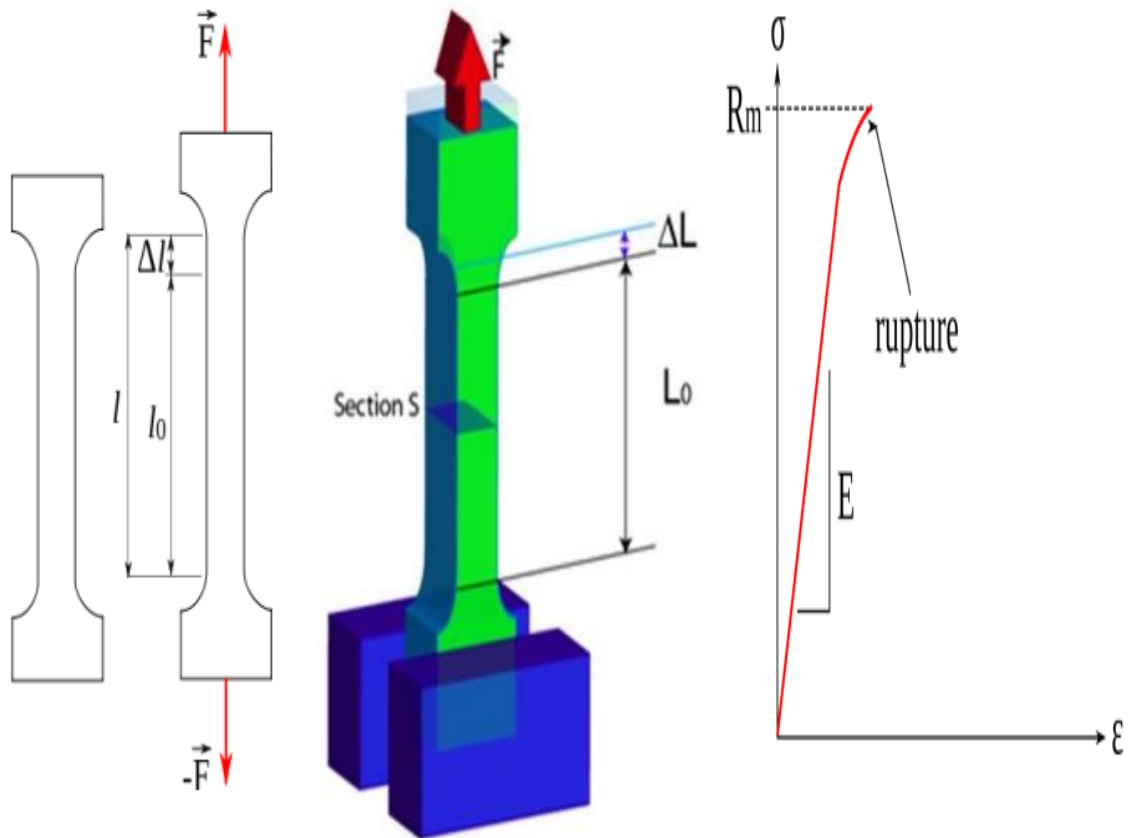


Fig. IV.15. Principe de l'essai de traction

CHAPITRE V

Résultats et discussions

1. Introduction

Dans ce chapitre, Les résultats expérimentaux obtenus des différents tests effectués, seront présentés et interprétés dans ce dernier chapitre. Au premier lieu, nous allons présenter une analyse des matériaux constituant nos bio-composites (ATR-FTIR), ensuite, nous discutons l'évolution des caractéristiques mécaniques des bio-composites en fonction des paramètres de leur élaboration (à températures ou à pressions variables). Les faciès de rupture de nos bio-composite (PP/Jute) sont également présentées et discutées en fonction des caractéristiques mécaniques.

2. Analyse structurale

L'analyse structurale va nous permettre de voir de près la constitution de fibre de Jute. La technique utilisée dans cette analyse est la Spectroscopie Infra- Rouge à Transformée de Fourier par une Réflexion Totale Atténuée (FTIR- ATR).

2.1.ATR - FTIR

La technique spectroscopique **ATR- FTIR** est l'une des méthodes les plus utilisées pour l'analyse qualitative et quantitative des matières organiques, Les spectres IR ont été enregistrés sur un spectromètre de modèle perkinelner, réflexion diamond crystal, softwar : perkinelnerspectrum, piloté par un ordinateur muni d'un logiciel de traitement avec une résolution de 4cm^{-1} .

La **figureV.1** montre les spectres infrarouges des fibres de Jute, ces spectres sont focalisés dans la région spectrale entre 4000 et 400 cm^{-1} . Nous constatons principalement :

La bande qui se situe entre 3200 et 3600 cm^{-1} attribuée au groupement O-H. D'autres pics montrent la présence de la cellulose comme ceux observés à 2949 et 2883 cm^{-1} , attribués à la vibration d'élongation de la liaison C-H et du groupement CH_2 . Le pic à 1732 cm^{-1} observé dans le spectrogramme des fibres de Jute associé à la vibration d'élongation du groupement carbonyle C=O indiquant la présence des pectines. On note aussi la présence de la bande 1642 cm^{-1} . Cette dernière correspond à l'eau absorbée. La bande à 1501 cm^{-1} correspond au cycle aromatique C=C. Les pics

observés à la longueur d'onde de 1425 cm^{-1} correspondant à la vibration de flexion du groupement CH_2 .

D'autres pics à des longueurs d'onde de 1367 et 1310 cm^{-1} témoins de la présence des groupements alcool ont été identifiés témoins de la présence des groupements alcool ont été identifiés. D'autre part, la bande à 1239 cm^{-1} indique la présence de lignines. En revanche, le pic à 1021 cm^{-1} indique la présence de cellulose.

Dans la gamme de faibles longueurs d'onde, une bande localisée à 1162 cm^{-1} correspond aux modes de vibration d'élongation du groupement C-OH. Egalement la bande localisée à 894 cm^{-1} caractéristique de la vibration d'étirement C-O-C (la liaison glycosidique β).

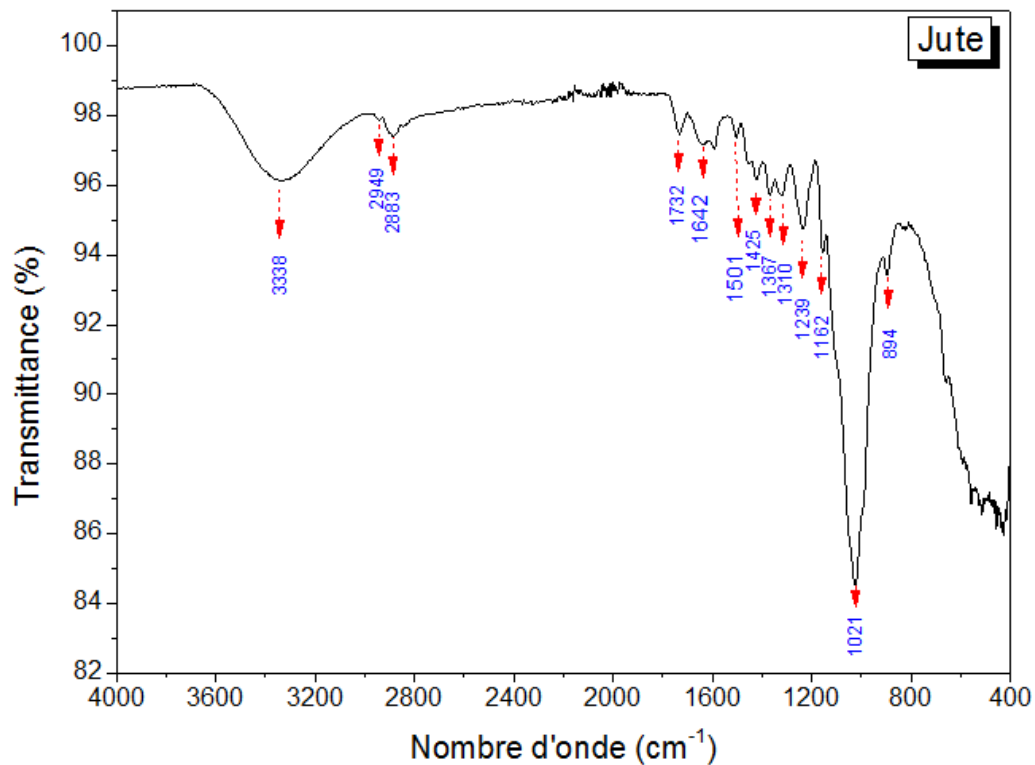


Fig.V.1. Spectre FT-IR de fibre de Jute

3. Analyse thermiques

3.1.L'Analyse Thermogravimétrique (ATG), (DTG)

L'analyse thermogravimétrique permet de suivre la variation de la masse d'un échantillon en fonction de la température. Pour faciliter la lecture, il est pratique de

représenter la courbe dérivée (DTG) de l'ATG. Cette courbe permet d'identifier plus facilement les phénomènes de perte de masse puisqu'ils se présentent sous forme de pics.

Le but essentiel de cette analyse est de mieux connaître le comportement thermique de la fibre de Jute afin de prévoir sa défaillance (dégradation) lors de l'élaboration de nos bio-composites. En revanche, le comportement thermique de la matrice Polypropylène est facilement déduit par la littérature. En résumé, ATG est une technique d'analyse thermique qui consiste à la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction du temps, pour une température ou un profil de température donné.

La courbe de **la figure V.2** permet d'identifier plus clairement la stabilité thermique de notre matériau et les pertes de masse dans chaque intervalle de température. La même figure représente les variations de température en fonction de pertes de masse (%); le comportement thermogravimétrique ATG et DTG de la fibre de Jute.

On distingue trois régions de perte de masse essentielle :

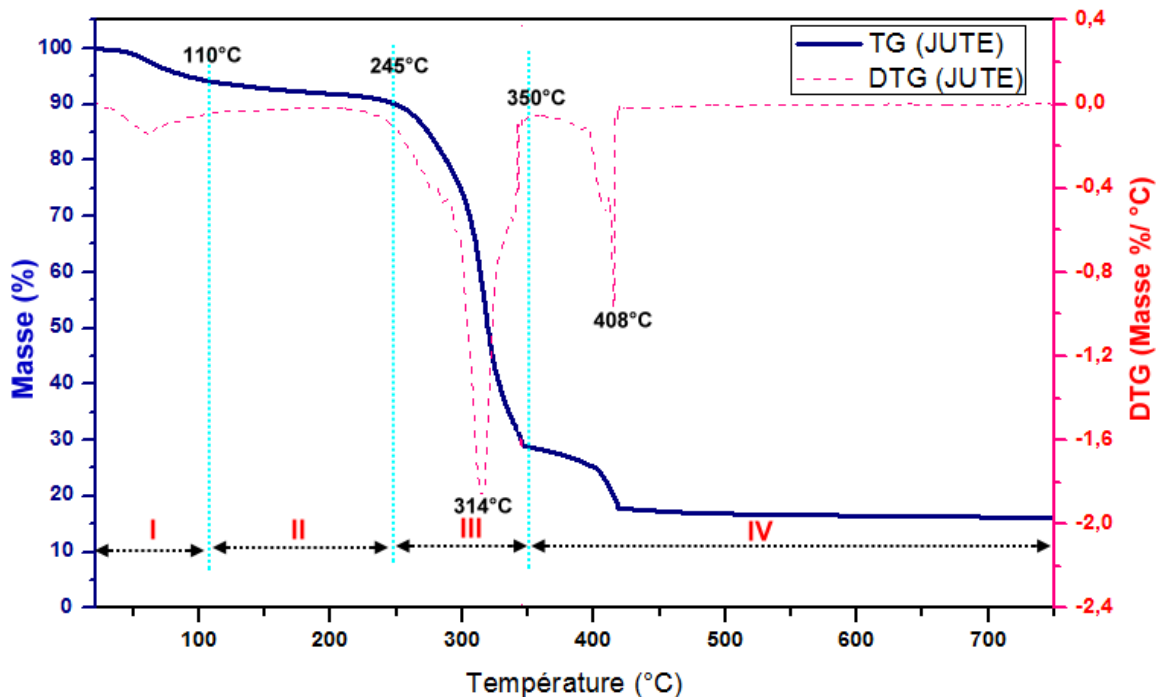


Fig. V.2. Analyse thermogravimétrique de la fibre de Jute.

- **La première région** qui va jusqu'à 110°C révèle une faible perte de masse, cela s'explique par la vaporisation de l'eau.

- *La deuxième région qui s'étend de 110°C jusqu'à 245°C*, cette zone se caractérise par une bonne stabilité thermique.
- *La troisième région qui s'étend entre 245°C à 350°C*, cette zone se caractérise par la décomposition des principaux composants chimiques de la fibre de Jute. Il est à signaler une dégradation maximale d'environ de 314 °C qui traduit la dégradation de la cellulose.
- *La quatrième région qui s'étend entre 350°C à 750°C*, dans cette zone on peut observer nettement la dégradation de la cellulose à l'environ de 408°C.

On peut conclure que la fibre de Jute est stable thermiquement jusqu'au 245°C, ce qui nous laisse dire qu'elle peut être utilisée pour le renforcement des matrices thermoplastiques telle que le polypropylène,....

4. Caractérisations mécaniques

Dans ce paragraphe, les résultats des tests mécaniques, obtenus à la suite d'essai de traction des bio-composites, sont illustrés et discutés.

4.1. Analyse des courbes Charge - déplacement

La figure **V.3 a et b** illustrent les évolutions typiques de la contrainte en fonction de la déformation des éprouvettes Polypropylène recyclé (PP) et PP/Jute sollicitées en traction statique, respectivement. Le test des éprouvettes en Polypropylène recyclée sans renfort soumises en traction statique (**Fig. V.3.a**) montre un comportement ductile (la contrainte varie d'une façon non linéaire en fonction de la déformation) [52]. Ce comportement change d'une façon remarquable dans le cas du renforcement du Polypropylène recyclé par des fibres de Jute (**Fig. V.3.b**). Dans ce cas, la ductilité du matériau bio-composite est très réduite, est une linéarité est observée ni au moins dans une zone élastique. De même, le matériau bio-composite à fibres de Jute se rompt d'une manière fragile une fois la charge maximale est atteinte.

4.2. Paramètres de rupture

Les résultats des tests en traction statique sur les différents bio-composites PP/Jute élaborés montrent que la variation de la température ainsi que la pression, lors de

l'élaboration de nos bio-composites ont un effet significatif sur les paramètres de rupture de ses derniers.

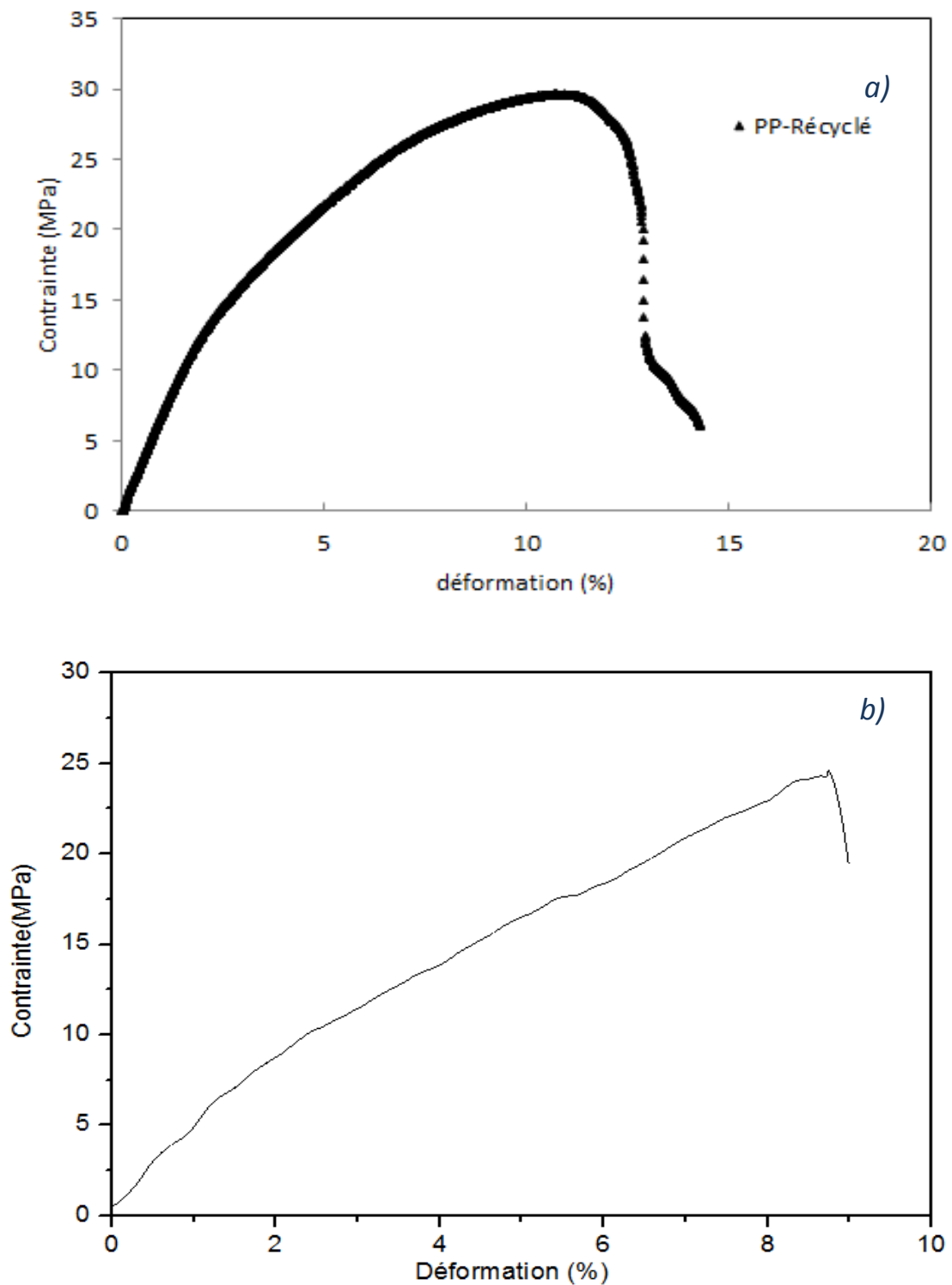


Fig. V.3. Evolution de la contrainte en fonction de la déformation

a) Polypropylène recyclée sans renfort [52], b) PP/Jute en traction.

L'histogramme de la figure V.4 montre que, dans le cas d'une pression constante (20bars), le module de Young du bio-composite PP/Jute est fortement influencé par la température d'élaboration. Comme on peut le voir sur cette figure (Fig. V.4), le module de Young augmente progressivement avec la température pour atteindre une valeur maximale de de l'ordre de 971 ± 46 MPa pour une température de 230°C (Cas du bio-composite A₃). Cela se traduit par l'effet de température sur l'élaboration des bio-composites. On peut dire que chaque fois que la température augmente (de 190°C à 230°C). Cette augmentation est de l'ordre de 40%. Le polypropylène de fonde de plus en plus tous en favorisant une bonne adhésion fibre/matrice.

En revanche, au-delà de 230°C ou plus, comme on peut le voir sur la même figure (Fig. V.4), le module de Young relatif au bio-composite A₄ chute brusquement (14%), cela semble être du au début de détérioration des fibres de Jute et/ou de la matrice polypropylène à la fois (250°C). Comme on l'a déjà signalé lors de l'analyse thermogravimétrique, la fibre de Jute est stable thermiquement jusqu'au 245°C . Au-delà de cette température, une dégradation de la fibre de Jute est observée.

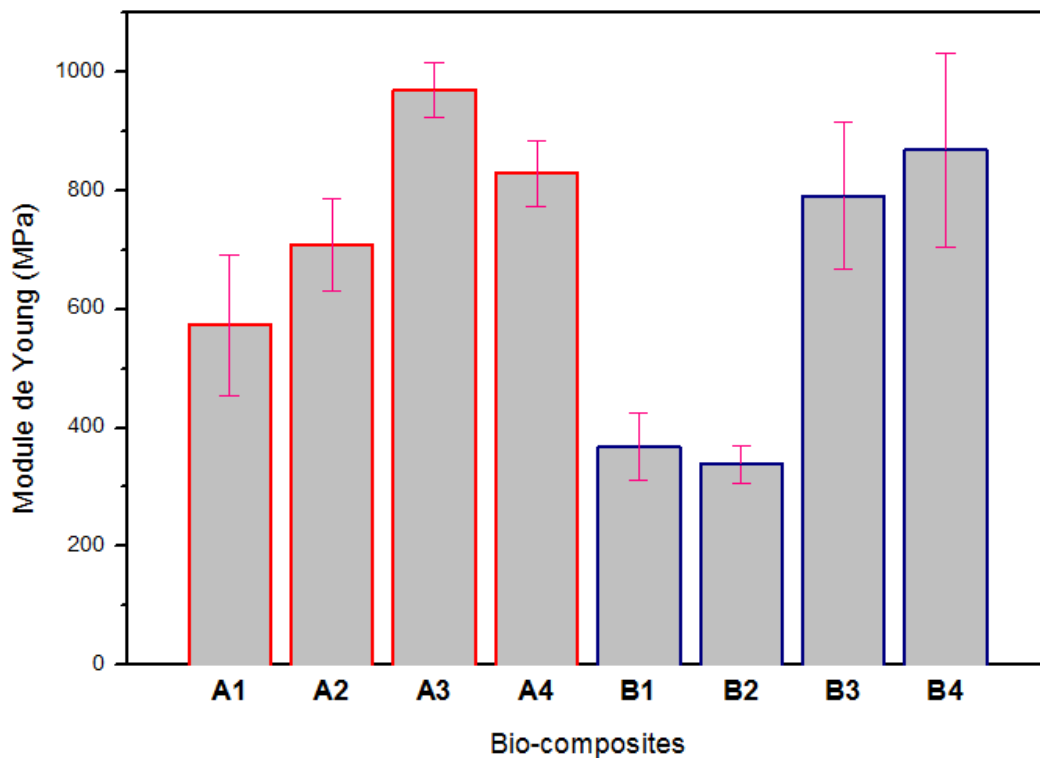


Fig. V.4. Histogrammes de l'évolution des modules de Young des éprouvettes PP/Jute.

La même figure, (**Fig.V.4**), représente l'évolution des modules de Young des éprouvettes PP/Jute à pression variable (**10 à 40 bars** à température constante **200°C**). Cette figure montre que dans le cas des bio-composites **B₁**, **B₂**, **B₃** et **B₄** le module de Young augmente progressivement avec la pression. Cela semble plus logique, car la pression à 200°C permet la résine PP de s'infiltrer de plus en plus dans la structure filamentaire du tissu de Jute ce qui a conduit à ces résultats.

L'histogramme de la figure.V.5 illustre l'évolution des contraintes des différentes éprouvettes PP/Jute. Cette figure montre que, dans le cas d'une pression constante (**20 bars**), la contrainte diminue une fois que la température augmente. Cela peut être expliqué par le durcissement de résine Polypropylène en fonction de la température. Par une autre explication, le thermoplastique PP perd son élasticité au fur et à mesure que la température augmente. De plus le PP se durcis et devient fragile une fois la température augmente. Ce comportement peut être facilement déduit de la figure.V.6. Dans cette figure, On voit clairement que les allongements à la rupture des bio-composites **A₁**, **A₂**, **A₃** et **A₄** sont *inversement proportionnels* aux températures. Ces réductions peuvent dans de l'ordre de 65%.

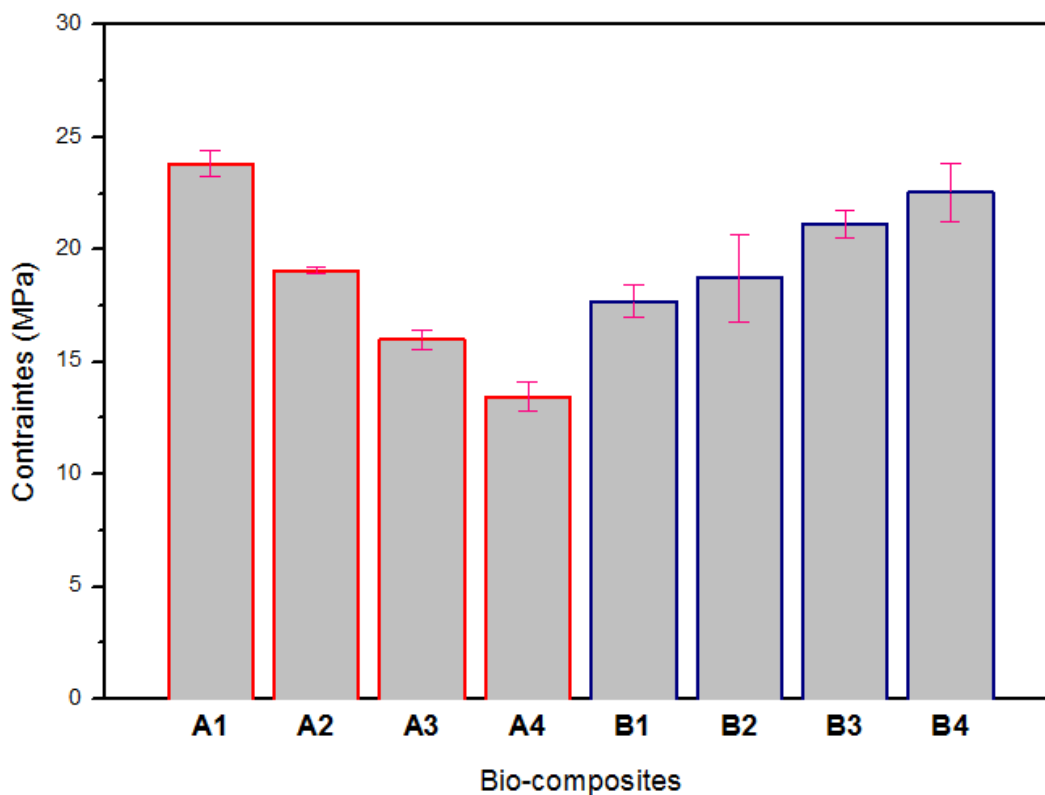


Fig. V.4. Histogrammes de l'évolution des contraintes des éprouvettes PP/Jute.

Par contre, dans le cas des bio-composites **B1**, **B2**, **B3** et **B4**, les contraintes à la rupture sont proportionnelles à la pression appliquée. Puisque, chaque fois que la pression augmente, le bio-composite est plus compacté, cela permet une bonne cohésion fibre de Jute/PP.

D'autres parts, les allongements à la rupture sont inversement proportionnels à la pression appliquée (cas de **B1**, **B2**, **B3** et **B4**). Mais, ces réductions ne sont pas remarquables (17%) comme dans le cas des bio-composites **A1**, **A2**, **A3** et **A4**. La réduction de l'allongement à la rupture, dans le cas des bio-composites **B1**, **B2**, **B3** et **B4** est due à la compression des fibres de Jute.

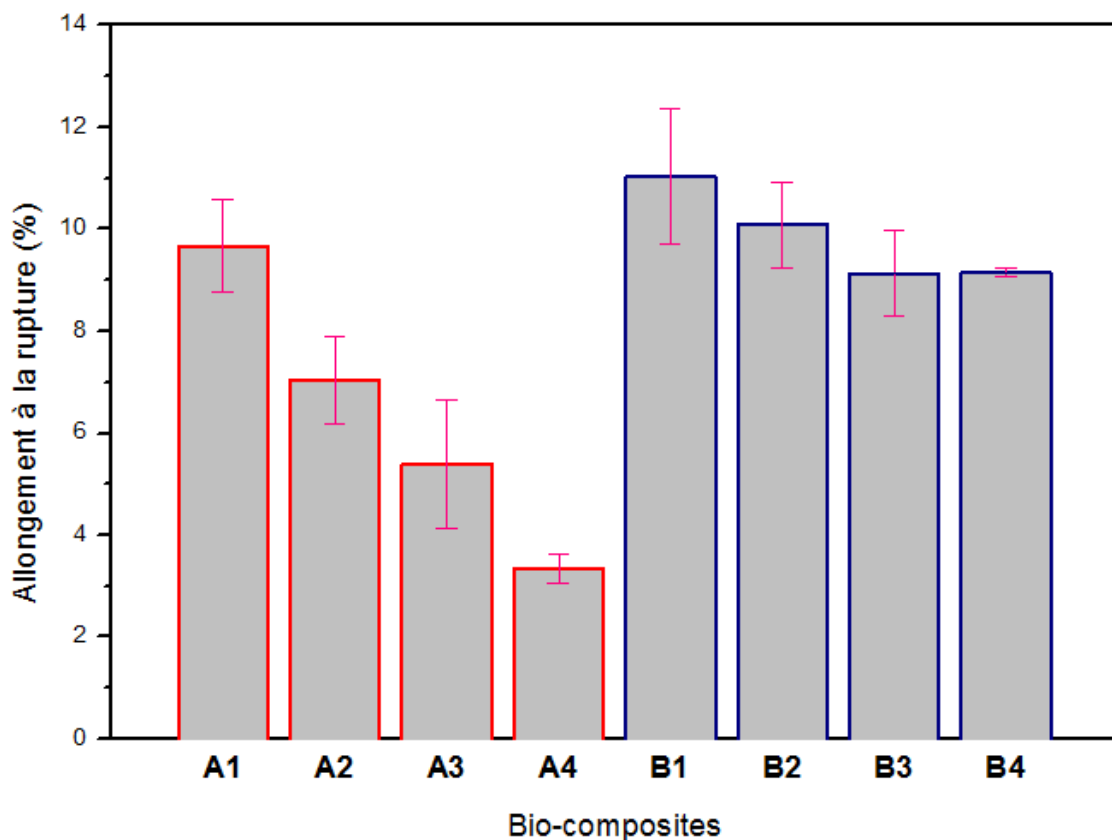


Fig. V.6. Histogrammes de l'évolution des allongements à la rupture des éprouvettes PP/Jute.

4.3. Analyse des faciès de rupture

L'analyse des faciès de rupture, des différents éprouvettes bio-composites après rupture, montre que la rupture de ces bio-composites ne se manifeste pas de la même manière. Les faciès de ruptures observées sont liés directement à la procédure

d'élaboration. Deux types de faciès de rupture sont distingués lors de l'élaboration des bio-composites à pression constante.

a) Cas des bio-composites A_1 , A_2 et A_3

Pour ces bio-composites, les faciès de rupture se caractérisent par la présence de mèches (**Fig.V.7**). Il semble que les torons de fibres ont prouvé une résistance jusqu'à la rupture des fibres. Il est à signaler que les fibres des torons de Jute ne sont pas rompues dans le même plan de cisaillement. Ce mode de rupture est pareil pour les bio-composites A_1 , A_2 et A_3 .

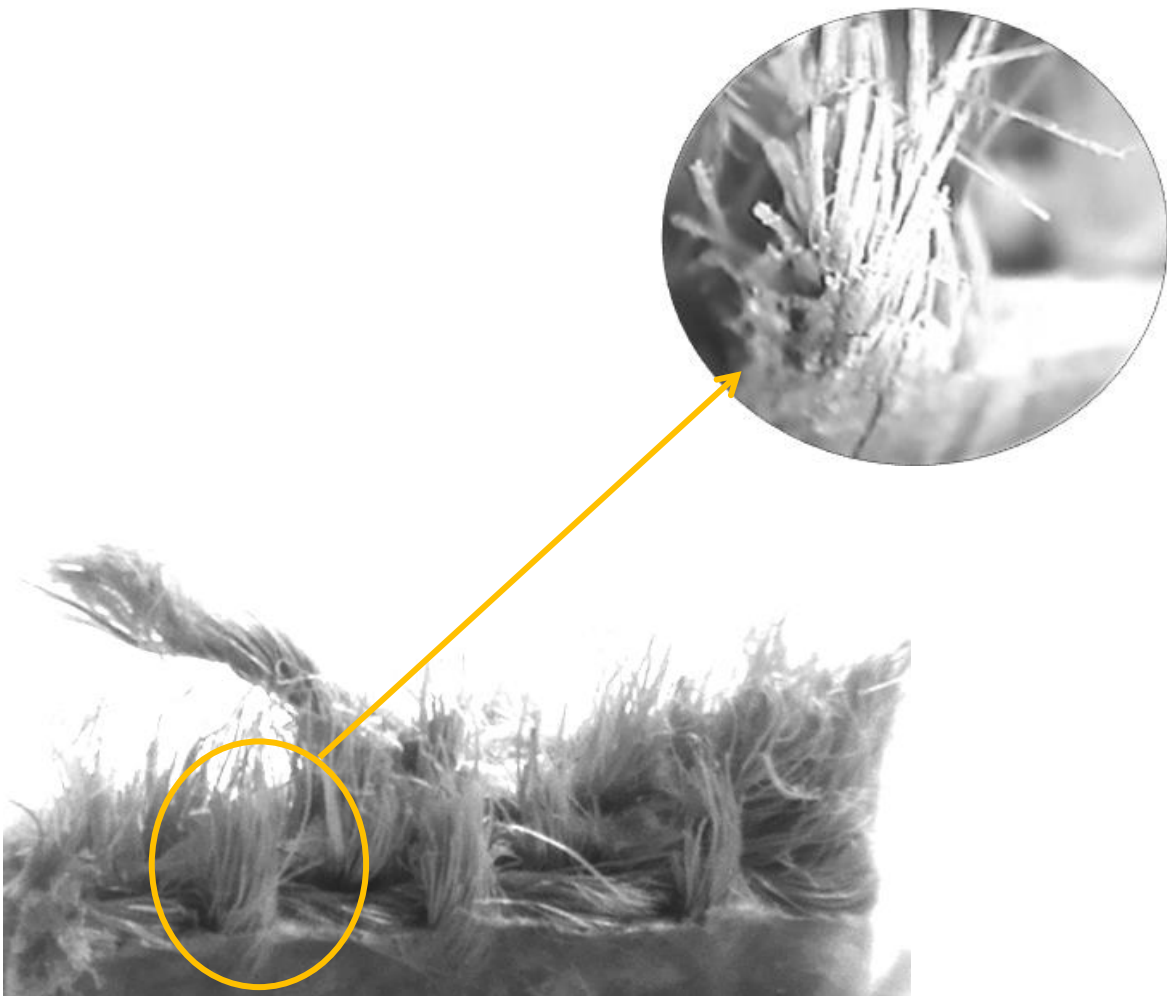


Fig. V.7. Vue microscopique des faciès de bio-composites PP/Jute (A_1 , A_2 et A_3).

De plus, le phénomène de pullout est observé sur l'ensemble des faciès des bio-composites A_1 , A_2 et A_3 mais la présence de ce phénomène est de plus en plus moins remarque chaque

fois que la température augmente. Ceci s'explique par la pénétration de la résine polypropylène au sein des torons de Jute une fois on augmente la température d'élaboration de nos bio-composites. Ces constatations confirme une fois de plus nos résultats signaler plus haut et qui se rapport à l'augmentation du module de Young une fois que la température augmente (de 190°C à 230°C).

b) Cas des bio-composites A₄

Dans ce type de bio-composite, les observations microscopiques montrent que les fibres de Jute ont subi un début de calcination à la suite de la haute température (250°C) (**Fig.V.8**). Ce qui confirme nos résultats plus haut (la fibre de Jute est stable thermiquement jusqu'au 245°C). Au-delà de cette température, une dégradation de la fibre de Jute est observée, basse valeur du module de Young.

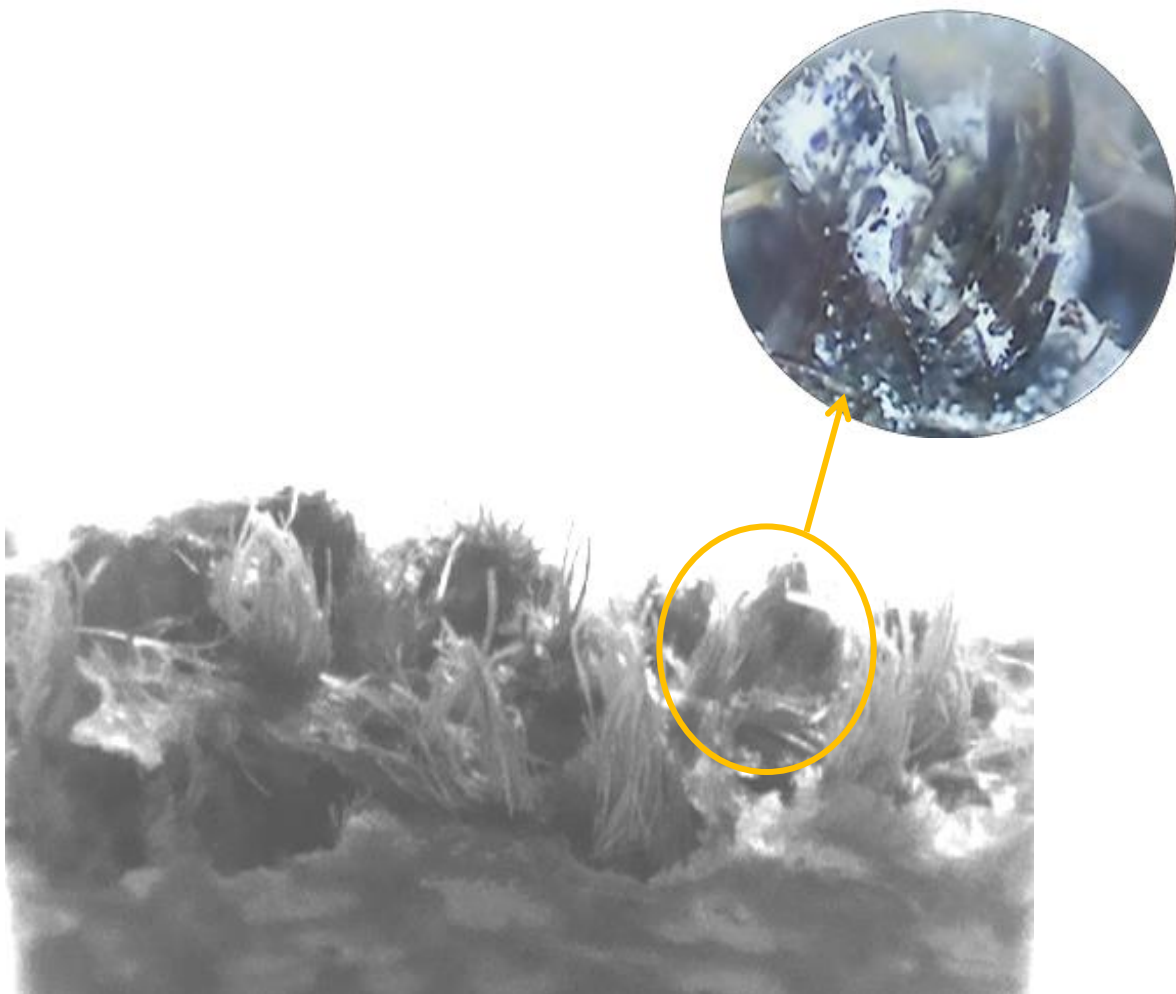


Fig. V.8. Vue microscopique des faciès de bio-composites PP/Jute (A₄).

c) Cas des bio-composites B_1 et B_2

L'observation microscopique des bio-composites B_1 et B_2 montre que l'effet de pression n'est pas remarquable. On voit toujours la présence des mèches suite au phénomène de pull out (**Fig. V.9**).

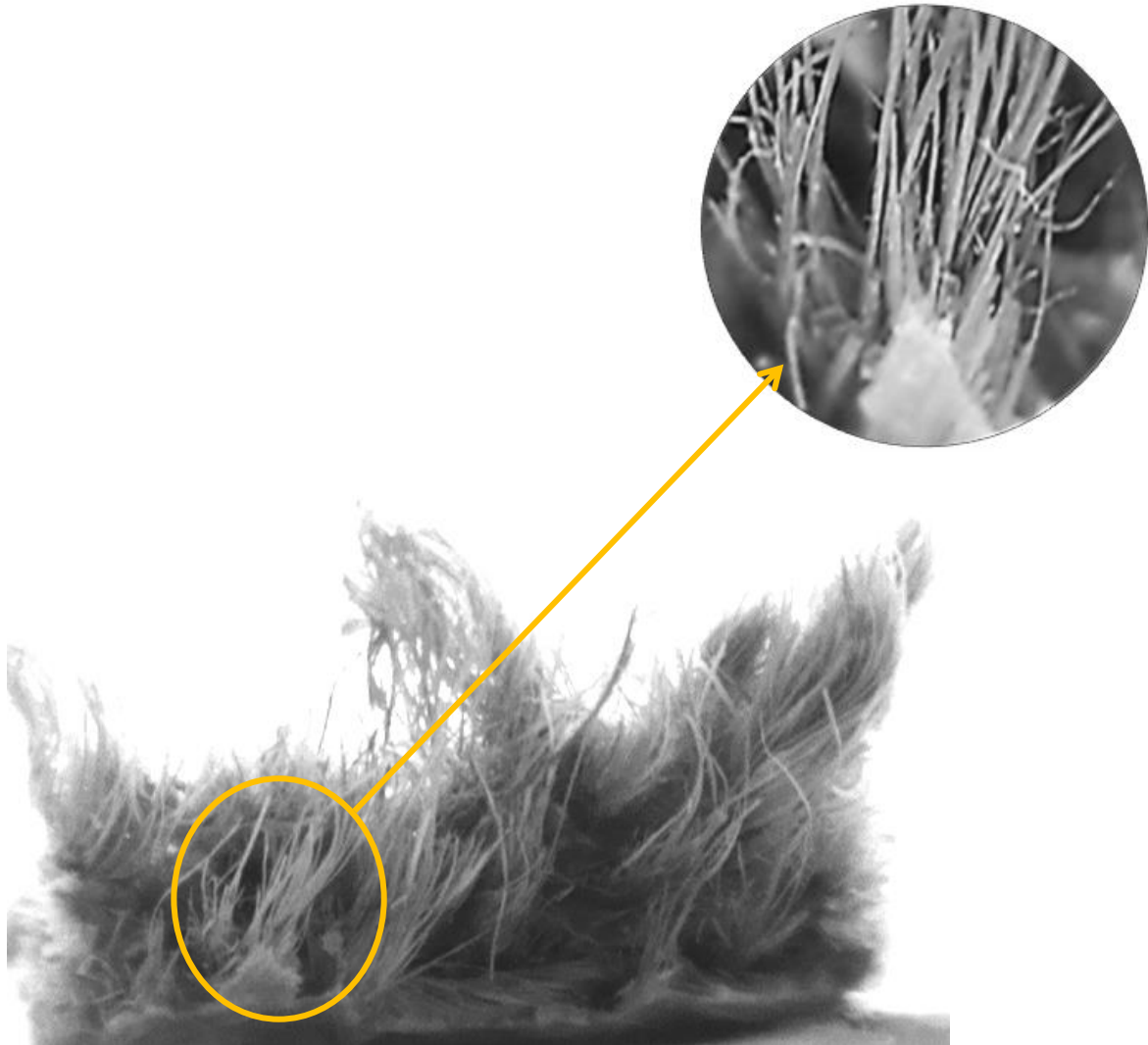


Fig. V.9. Vue microscopique des faciès de bio-composites PP/Jute (B_1 et B_2).

d) Cas des bio-composites B_3 et B_4

Il est important de signaler que, dans le cas des bio-composites B_3 et B_4 , les torons restent unis après la rupture de ses bio-composites, cela se traduit par la haute pression appliquée lors de l'élaboration de ses matériaux (**Fig. V.10**).

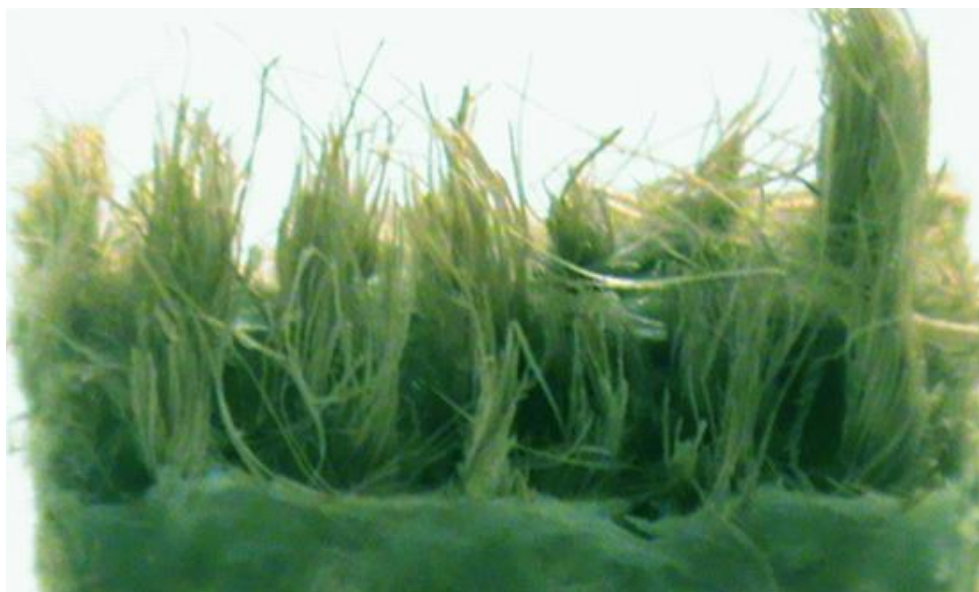


Fig. V.10. Vue microscopique des faciès de bio-composites PP/Jute (**B3** et **B4**).

PARTIE NUMERIQUE

A.1.Introduction

Dans ce chapitre, on présente la simulation des essais de façon général dans le champ d'étude des matériaux est le logiciel ANSYS.

ANSYS est un logiciel qui résout les problèmes de diverse champs par la technique des éléments finis. Cette étude repose principalement sur ANSYS et sur les résultats trouvés, et il faut toujours comparer avec des essais réels pour bien soutenir les faits exprimés ici. On va se concentrer sur les résultats des bio-composites obtenus pour les contraintes et déplacements en traction statique.

A .2.Présentation de ANSYS

Pour déterminer les distributions des contraintes, le logiciel ANSYS a été adopté. Ce code général de calcul est basé sur la méthode des Eléments Finis et conçu pour l'analyse des structures. Il permet de traiter des problèmes d'élasticité linéaire, et non linéaires (élastovisco-plastique), des problèmes dynamiques transitoires et stationnaires, des problèmes thermiques transitoires et stationnaires, des problèmes mécaniques du fluide et des problèmes acoustiques [53].

Pour effectuer un calcul, ce logiciel passe par trois stades :

- **Stade I** : définition de la géométrie du modèle.
 1. Introduction des éléments convenables pour le type d'analyse considéré.
 2. Définition des données caractérisant le modèle :
 - ✓ Coefficients des matériaux utilisés pour le modèle.
 - ✓ Construction de la géométrie dans les cas bidimensionnel et tridimensionnel (surfaces, volumes et combinaison des surfaces et volumes).
 - ✓ Maillages du modèle considéré.
 - ✓ Vérification des tailles de maillages obtenues.

- **Stade II** : solution du problème défini.
 - ✓ Application des conditions aux limites.
 - ✓ Application des chargements.
 - ✓ Arrangement des types d'analyse.
 - ✓ Vérification complète du modèle avant la solution.

- ✓ Solution du problème :
 - Assemblage des matrices de rigidité et de masse de la structure complète.
 - Application des conditions aux limites.
 - Application des chargements externes.

- **Stade III** : analyse et post-traitement des résultats qui peuvent être, soient des quantités locales tels les déplacements, les contraintes, les déformations, soient des quantités globales, telle l'énergie de déformation.

A .3.Simulation ANSYS

La simulation de cet essai a été faite par le logiciel de simulation par éléments finis ANSYS. Ce logiciel est très important dans le champ des simulations pour obtenir des résultats sur les diverses variables, et pouvoir comprendre le comportement des matériaux. Pendant cette étude, on va changer les différents paramètres pour connaître l'effet de ceux-ci dans les résultats numériques obtenus.

Les paramètres choisis pour l'étude sont le maillage, le coefficient de poisson et module de Young.

A.3.1. Évaluation des propriétés mécaniques apparentes

- **Module de Young** : Le module d'Young est le facteur de proportionnalité entre la contrainte (σ) et la déformation (ϵ).
- **coefficient de Poisson (ν)** : Le coefficient de Poisson représente le rapport entre les déformées transversale et longitudinale. Pour ce calcul, la moyenne des déformations transversales (ϵ_x, ϵ_y) a été divisée par la déformation longitudinale

(ϵ_z):

$$\nu = -(\epsilon_x + \epsilon_y) / 2 / \epsilon_z$$

A.3.2. Géométrie

Dans notre étude, nous avons utilisé les dimensions des mêmes éprouvettes citées dans la partie expérimentales selon ASTM D638-03 (**Fig. A1**).

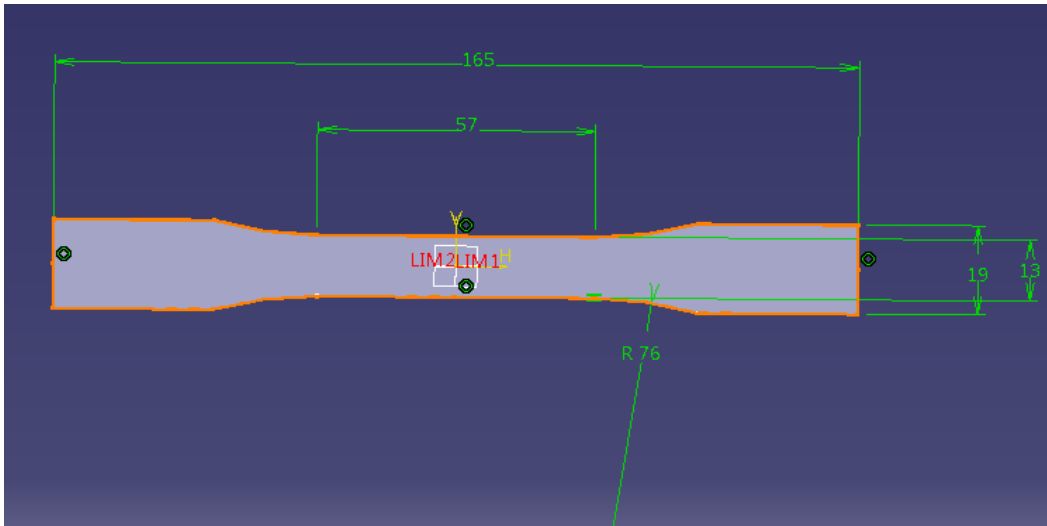


Fig. A.1. Intégration des dimensions de l'éprouvette dans la base ANSYS.

La vue globale de l'éprouvette est représentée par **la figure A.2.**

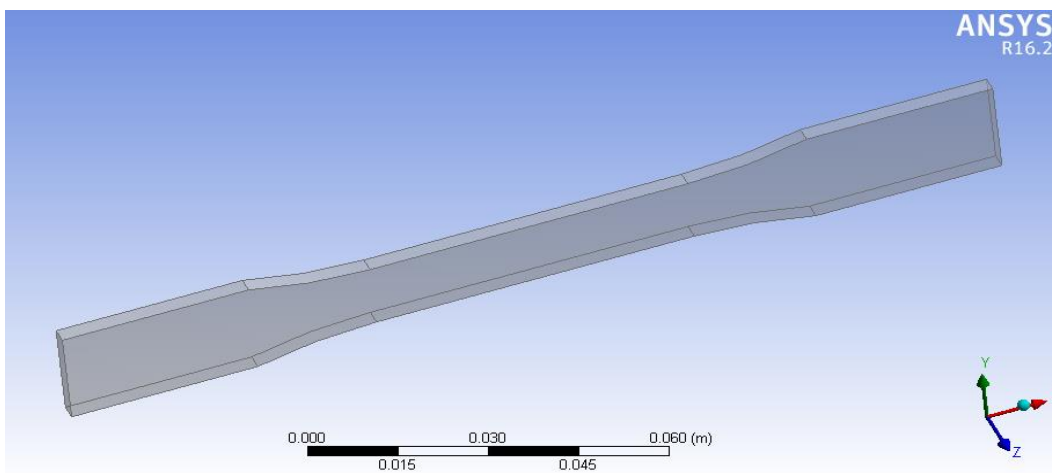


Fig. A.2. Vue globale de l'éprouvette en utilisant ANSYS.

Toutes les dimensions sont exprimées en millimètres et l'épaisseur = 3mm

A.3.3. Effet du maillage

Dans ce travail, nous avons utilisé un maillage quadratique parce que ce maillage nous permet une répétition régulière de motifs identiques. Pour en savoir le maillage pour donner une valeur approximative de contrainte par rapport la valeur expérimental. Par ailleurs, le maillage 1115 nœuds et 132 éléments représenter le meilleur choix qui donner les valeurs plus proche par rapport l'expérimental (**Fig. A3**).

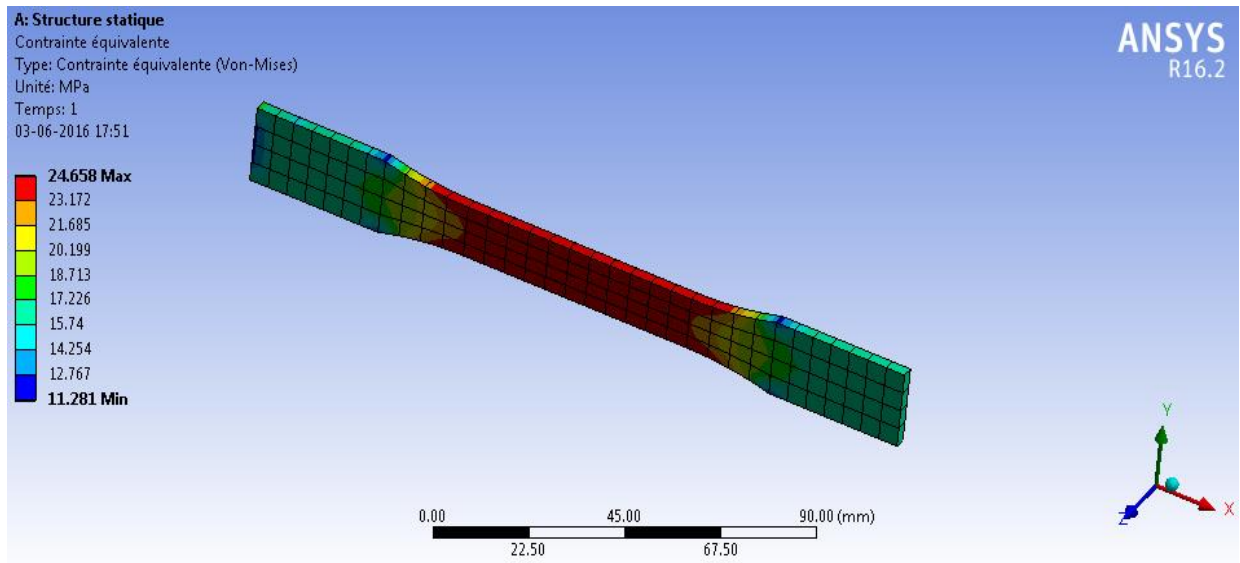


Fig. A.3. Effet de maillage sur l'évaluation des résultats

A.3.4. Obtention des résultats

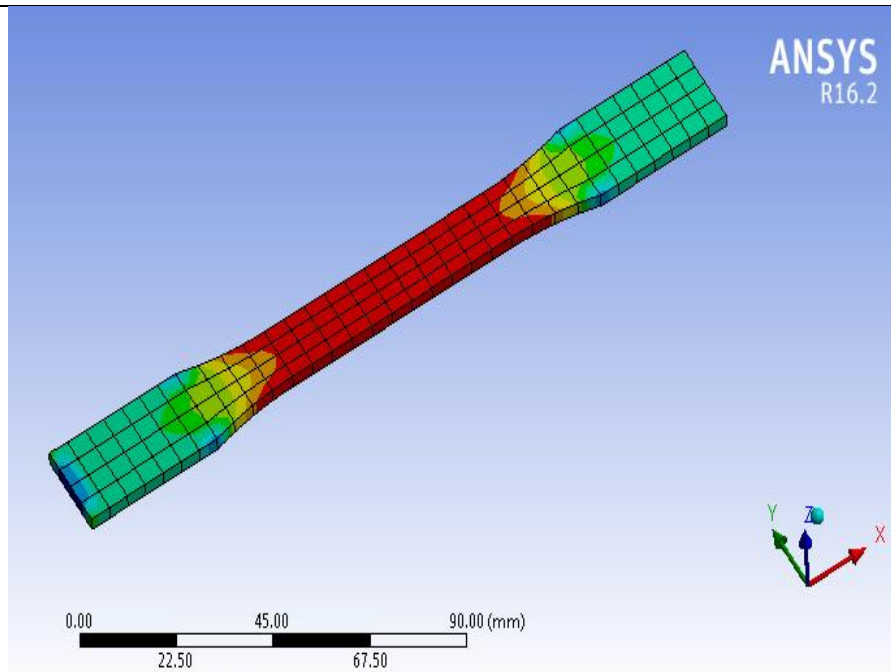
La compilation du modèle numérique proposé, en utilisant le code de calcul ANSYS, nous a permis de déduire les valeurs numériques des contraintes de rupture de nos bio-composites. Ces résultats sont obtenus par l'introduction des paramètres expérimentaux tels que :

- Les modules de Young relatifs à chaque bio-composite ;
- Les coefficients de poisson relatifs à chaque bio-composite ;

Le **tableau A1** représente les résultats numériques obtenus pour les bio-composites testés.

TabA1 : Résultats numériques obtenus.

Pression constante (P=20 bar)			
A1 (190°C)	A2 (210°C)	A3 (230°C)	A4 (250°C)
<p>24.658 Max 23.082 21.507 19.931 18.356 16.78 15.205 13.629 12.054 10.478 Min</p>	<p>19.721 Max 18.461 17.201 15.941 14.681 13.421 12.16 10.9 9.6404 8.3803 Min</p>	<p>16.562 Max 15.504 14.446 13.388 12.329 11.271 10.213 9.1546 8.0964 7.0381 Min</p>	<p>13.908 Max 13.019 12.131 11.242 10.353 9.4648 8.5762 7.6875 6.7989 5.9102 Min</p>



Température constante (T=200°C)			
B1 (10 bar)	B2 (20 bars)	B3 (30 bar)	B4 (40 bar)
<p>18.314 Max 17.144 15.974 14.804 13.633 12.463 11.293 10.123 8.9527 7.7825 Min</p>	<p>19.376 Max 18.138 16.9 15.662 14.424 13.186 11.948 10.71 9.4717 8.2337 Min</p>	<p>21.844 Max 20.448 19.053 17.657 16.261 14.866 13.47 12.074 10.678 9.2826 Min</p>	<p>23.012 Max 21.542 20.071 18.601 17.131 15.66 14.19 12.72 11.249 9.7789 Min</p>

Les superpositions des courbes contraintes/bio-composites relative aux deux types d'élaboration (à pression ou à température constantes) montrent que le modèle de calcul en utilisant le code de calcul ANSYS a conduit à des résultats très satisfaisants avec une erreur maximale de 3% (cas de (A1, A2, A3et A4) (**Fig. A4**).

En même pour les contraintes des bio-composites (**B1, B2, B3et B4**) l'erreur de calcul entre les valeurs expérimentales et numériques est très réduite elle est de l'ordre de 0,02 à 0,03 %, (**Fig. A5**).

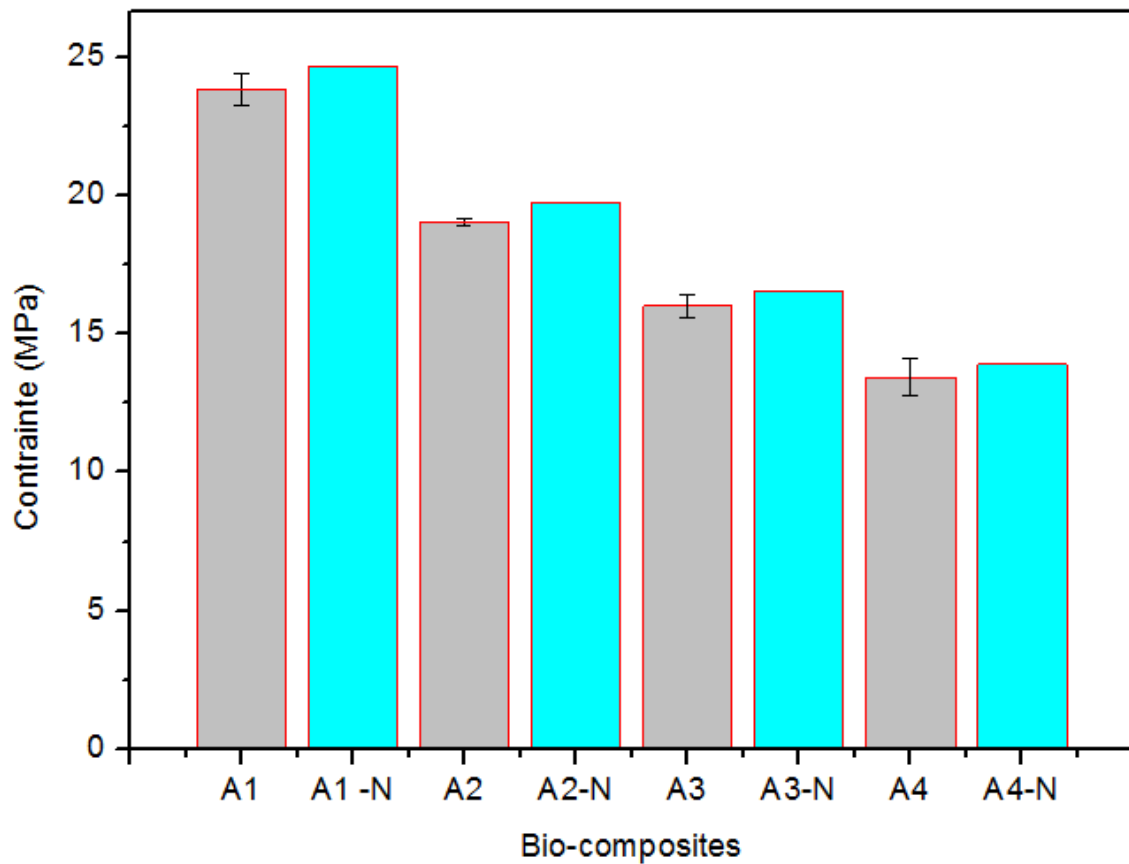


Fig. A.4. Comparaison entre les contraintes expérimentales et celles numériques des bio-composites (A1, A2, A3et A4) élaborés à pression constante

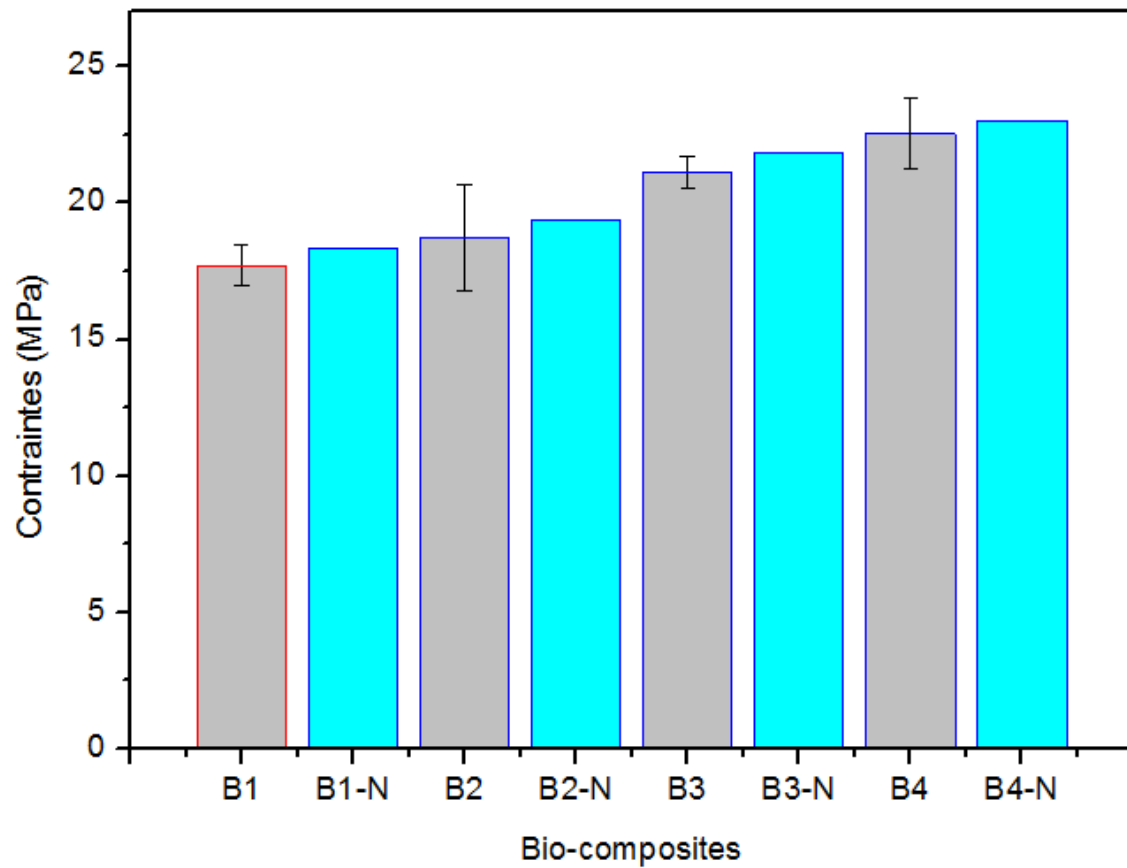


Fig. A.4. Comparaison entre les contraintes expérimentales et celles numériques des bio-composites (**B1**, **B2**, **B3** et **B4**) élaborés à température constante.

Conclusion Générale

Les matériaux composites à matrice thermoplastique renforcée par des fibres naturelles sont de plus en plus utilisés grâce à leurs multiples avantages. Cependant, dans ce type de bio-composites, les problèmes d'interface sont couramment rencontrés. Ceci est dû à l'incompatibilité entre la matrice et le renfort. Notre travail traite le vif de ce sujet tout en proposant la variation de deux paramètres essentiels lors de l'élaboration de tels matériaux. En vertu de notre collaboration, nous présentons les conclusions suivantes :

L'analyse structurale nous permet de voir de près la constitution de fibre de Jute. En outre, l'analyse thermogravimétrique nous a donné plus de détails sur le comportement thermique de la fibre de Jute afin de prévoir sa défaillance (dégradation) lors de l'élaboration de nos bio-composites. Il est à signaler que la fibre de Jute est stable thermiquement jusqu'au 245°C, ce qui nous laisse dire qu'elle peut être utilisée pour le renforcement des matrices thermoplastiques telle que le polypropylène.

Les résultats des tests en traction statique sur les différents bio-composites PP/Jute élaborés montrent que la variation de la température ainsi que la pression, lors de l'élaboration de nos bio-composites ont un effet significatif sur les paramètres de rupture de ses derniers. Plusieurs constatations peuvent être déduites :

- Chaque fois que la température augmente (de **190°C** à **230°C**) le module de Young augmente.
- Au-delà de **230°C** ou plus, le module de Young relatif au bio-composite élaborée à **250°C** chute brusquement (14%), cela semble être du au début de détérioration des fibres.
- Le module de Young est proportionnel à la pression d'élaboration.
- La contrainte à la rupture est inversement proportionnelle à la température d'élaboration.
- La contrainte à la rupture est proportionnelle à la pression d'élaboration.
- L'allongement à la rupture des bio-composites est inversement proportionnel à la fois à la température, et à la pression d'élaboration.

Les observations microscopiques montrent que les faciès de rupture sont fortement influencés par le mode d'élaboration des bio-composites. La rupture de tels matériaux est caractérisée par plusieurs phénomènes : pull out, déchaussement et rupture des fibres. Une fois de plus, ces observations microscopiques confirme nos résultats déjà cités lors des analyses de la fibre de Jute.

Références Bibliographiques

- [1] **Rokbi. M**, «Comportement à la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-fibres de verre», thèse Magister, M'sila, 2001.
- [2] **Prombut. P**, «caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels», thèse Doctorat, Toulouse, 2007.
- [3] **BOUZIT. F**, «élaboration et caractérisation mécanique, en statique et en fatigue, des panneaux sandwichs à base de renforts naturels», thèse Magister, BOUMERDES 2015
- [4] **BARRAU. J.J**, «Structures en matériaux composites», Éditions Techniques de l'Ingénieur, bm5080, 2004
- [5] **RIGAL. J.C, NEGRIER. A**, «Présentation des matériaux composites», Éditions Techniques de l'Ingénieur, a7790, 2013
- [6] **PERROT. Y**, «Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites», thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, 2006.
- [7] **CARAMARO. L**, «Fibres et fils à usage technique», Éditions Techniques de l'Ingénieur, n2510, 2005.
- [8] **BOISSE. P**, «Mise en forme des renforts fibreux de composites», Éditions Techniques de l'Ingénieur, am3734, 2004.
- [9] **LAAREJ. M**, «Etude Par Spectroscopie Raman Et Modélisation D'une Résine Composite RTM », thèse Doctorat, Tlemcen, 2010.
- [10] **HADDADI .M**, «étude numérique avec comparaison expérimental des propriétés thermoplastique des matériaux composites à matrice polymère», université Al Hadj Lakhdar, Batna, 2011.
- [11] **ROKBI. M**, «étude du comportement mécanique du stratifié polyester-fibre de verre», thèse Doctorat m'sila ,2012
- [12] **SAHIR. M**, «Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite», thèse Doctorat, Sfax, 2013

- [13] **WEISS. J, BORD. C**, «Les matériaux composites: Calculs, Essais et contrôles», Conception, Paris, édition de L'USINE, 1983.
- [14] **BERTHELOT. J.M**, «Matériaux composites-Comportement mécanique et analyse des structures», 3ème édition. Paris Editions Tech. & Doc., 1999.
- [15] **NECHAD. H**, «Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante», Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 2004.
- [16] **MOEVUS. M, GODIN. N, R'MILI. M, ROUBY. D, REYNAUD. P, FANTOZZI. G, FARIZY. G**, «Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiCf/[Si-B-C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part II: Unsupervised acoustic emission data clustering», Composites Science and Technology, 2008.
- [17] **GODIN. N, HUGUET. S, GAERTNER. R.**, «Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites», NDT&E International, 2005.
- [18] **GOIDESCU. C**, «Caractérisation et modélisation de l'endommagement par microfissuration des composites stratifiés: Apports des mesures de champs et de l'homogénéisation», Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011, 180p.
- [19] **LADEVEZE. P, ALLIX. O, DEÛ. J.F ET LEVEQUE. D**,«A mesomodel for localisation and damage computation in laminates», Comput. Method. Appl. M., 183(1-2):105–22, 2000.
- [20] **Gabriel Oliveira Glória**, «Charpy Impact Tests of Epoxy Composites Reinforced with Giant Bamboo Fibers» , Materials Research. 2015; 18(Suppl 2): 178-184

- [21] **Jamal Fajoui, Nicolas Terrien, Fethi Dahmene**, «Aur'élie Cordelle, Xavier Chapleau, et al.. Suivi d'endommagement par EA dans un composite obtenu par pultrusion et soumis à un chargement en flexion 3 points», *Revue des composites et des matériaux avancés*, 2013, 2 (23), pp. 331-334.
- [22] **Sabu Thomas**, «le nouveau destin des feuilles ,des tiges et des pépins, Des fibres végétales dans le domaine des matériaux» ,MAI2010,N°276.
- [23] **Kuruvilla Joseph**, «Modélisation du comportement des composites stratifiés pour les simulations d'impact sur véhicules» ,université de valenciennes, UMR CNRS 8201
- [24] **Camille. M**, «Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base d'agro-ressources», thèse Doctorat TOULOUSE,2010.
- [25] **MICHAUD. F**, «Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique» , thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [26] **NENONENE. A. Y.**, «Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kéraf et de bio-adhésifs à base de colle d'os'», thèse de doctorat, Toulouse, 2009.
- [27] **CHARLE. K, MORVAN. C., BREARD. J, JERNOT. JP, GOMINA. M**, «Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin, revue des composites et des matériaux avancés», Vol16, pp11-24,2006.
- [28] **VERVERIS. C, GEORGHIOU. K, CHRISTODOULAKIS. N, SANTAS. P, SANTAS. R**, «lignin and cellulose content of various plant materials and their Suitability for paper production», *Industrial Crops and Products* 19, 2004.
- [29] **VALLADE. J.**, «Structure et développement de la plante. Morphogénèse et biologie de la reproduction des angiospermes», Dunod , Paris, 1999.

- [30] **PERSSON. K.**, «Micromechanical modelling of wood and fibre properties», PhD thesis, Department of Mechanics and Materials - Lund University, 2000.
- [31] **THIERY. J.P.**, «Mise en évidence des polysaccharides sur coupes fines en microscopie électronique», *J. Microsc.*, p987, 1967.
- [32] **BOSSUYT. V.**, «Étude de la structure et des propriétés mécaniques de la fibre de lin», PhD thesis, Lille, 1941.
- [33] **BRETT. C.T. AND WAMDRON. K.W.**, «Physiology and biochemistry of plant cell walls», Chapman et Hall, 1996.
- [34] **NILSSON. T AND GUSTAFSSON. P.J.**, «Influence of dislocation and plasticity on the tensile behaviour of flax and hemp fibres», *Composites: Part A*, p1722-1728, 2007.
- [35] **SEDAN. D.**, «Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composites», thèse doctorat de l'université de limoges, matériaux céramiques et traitement de surface, 2007.
- [36] **HATSCH. D.**, «étude du modèle *Cumulus lupulus Fusarium graminearum*. Identification, génomique et transcriptomique du pathogène», thèse de doctorat, Sciences du Vivant – Aspects moléculaires et cellulaires de la biologie.2004.
- [37] **MONTIES. B.**, «Les polymères végétaux - Polymères pariétaux et alimentaires non azotés», Gauthier Villars (ed), Paris (1980).
- [38] **THIEBAUD. S.**, «Valorisation chimique de composés lignocellulosiques», thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, Sciences des Agro-ressources, 1995.
- [39] **BOUSTINGORRY. P.**, «Élaboration d'un matériau composite à matrice gypse renforcé par bois fragmenté -amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqué en gypse», thèse de doctorat, Génie des procédés, 2002.
- [40] **COUHERT. C.**, «Pyrolyse flash à haute température de la biomasse lignocellulosique et de ses composés », Thèse de Doctorat.2007.

- [41] **MOKTARI Abdessamed**, «influence des ajouts de fins minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcé de fibre végétales de palmier dattier», université de Kasdi Merbah Ouargla option génie civil, novembre 2006.
- [42] **BLEDZKI. A.K, GASSAN. J**, «Composites reinforced with cellulose based fibres», Prog. Polym. Sci. 24 221–274, 1999.
- [43] **MALHA Mustapha**, «Mise en œuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de Doum», Université Mohammed V –AGDAL, Mars 2013.
- [44] **RICHARD Nteng**, «Modélisation multi-échelle et caractérisation de L’anisotropie élastique de fibre végétales pour le renforcement de matériaux composites », université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II; Université de Yaoundé, 2007.
- [45] **JACKY Aubr** , « Les matières plastiques », Technologie les matériaux.
- [46] **ELOUAER Abdelmonem**, « Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales », Thèse de Doctorat de l’Université de Reims Champagne-Ardenne, Janvier 2011.
- [47] **Ernst & Young**, «Étude de marché des nouvelles utilisations des fibres végétales», ADEME, décembre 2005.
- [48] **CARMA**, « Glossaire des matériaux composites renforcés des fibres d’origine renouvelable », centre d’animation régional en matériaux avancés, Décembre 2006.
- [49] **HAMMICHE Dalila**, « Synthèse d’un nouvel agent de couplage PVC-g-MA et son utilisation dans les composites P VC/Alfa », Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, novembre 2010.
- [50] **BELOUADAH. Z**, «Characterization of new natural cellulosic fiber from *Lygeum spartum L*», Article , M’sila 2015
- [51] **Nicolas Tessier- Doyen**, « Etude expérimentale et numérique du comportement thermomécanique de matériaux réfractaires modèles », L’université de limoges, 2003.

[52] **AICHE.F**, «Caractérisation d'un matériau bio-composite et comportement mécanique», thèse Master, Université de M'sila, 2015.

[53] **ZALT Abdulkader**, «Endommagement par Fatigue et Prédiction de la durée de vie des joints Soudés de type Caisson», thèse Doctorat, L'Université de LORRAINE, 2012.

Résumé

L'objectif principal de ce projet est de mieux comprendre les phénomènes relatifs à la mise en œuvre et l'utilisation des matériaux bio-composites à base de polypropylène renforcé par des fibres de Jute en utilisant une presse à chaud. L'influence des paramètres de fabrication des bio-composites à base de la résine polypropylène renforcée par des tissu de Jute est présenté en détail. Les essais mécaniques sur les bio-composites ont montré que les paramètres de mise en œuvre de nos bio-composites ont un effet significatif sur les paramètres de rupture de tels matériaux. Ces résultats sont en concordances avec l'ensemble des analyses présentés entre autres l'analyse structurale et thermique de la fibre de Jute ainsi les faciès microscopiques des bio-composites rompus.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو الفهم الحسن لكل ما هو متعلق بتصنيع واستعمال المواد المتركبة والمتكونة من البوليبروبيلان المدعم بالخيش وذلك باستعمال ضاغطة حرارية. حيث يرد تأثير متغيرات التصنيع bio-composites على البلاستيك (polypropylène) مقوى بالخيش المنسوج، وأظهرت الاختبارات الميكانيكية على أن المركبات الحيوية لها تأثير كبير على الخصائص لكسر هذه المواد. هذه النتائج تتوافق مع التحليلات المعروضة بين التحليل البنيوي والحراري الآخر من ألياف الخيش و bio-composites المجهرية المكسورة.