



*Polytechnique,
Premier partenaire
des Professionnels*

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT SCIENCE DES MATERIAUX ET
METALLURGIE

*MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME D'ÉTUDES APPROFONDIES EN SCIENCE DES
MATÉRIAUX*

“ COMPARAISON DE MATERIAUX COMPOSITES RENFORCES DE FIBRES VEGETALES ”

Présenté par : BINGUIRA Djack Kelly Henderson Wang

Rapporteur : Docteur RANARIVÉLO Michel

Soutenu le 22 Décembre 2014

Promotion 2013



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT SCIENCE DES MATERIAUX ET
METALLURGIE

*MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME D'ÉTUDES APPROFONDIES EN SCIENCE DES
MATÉRIAUX*

« COMPARAISON DE MATÉRIAUX COMPOSITES RENFORCES DE FIBRES VÉGÉTALES »

Présenté par : BINGUIRA Djack Kelly Henderson Wang

Rapporteur : Docteur RANARIVELO Michel

Devant les membres de Jury composé de :

- ✦ Docteur RANDRIANARIVELO Frédéric
- ✦ Docteur RANAIVOSON Andriambala
- ✦ Docteur RAKOTOARISON Simon

Promotion 2013

À toute ma famille,

À Felana

REMERCIEMENTS

Ce mémoire n'aurait pas pu s'achever sans l'Amour de DIEU. Je tiens donc à remercier DIEU pour tout ce qu'Il m'a donné afin de mener à terme ce mémoire.

J'adresse mes vifs et profonds remerciements aux personnes suivantes :

- ✉ Monsieur **ANDRIANARY** Philippe, Professeur Titulaire et Directeur de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui m'a autorisé à étudier au sein de l'École ;
- ✉ Monsieur **ANDRIANARIVelo** Frédéric, Docteur-Ingénieur, Maître de conférences à l'E.S.P.A. et Chef de Département Science des Matériaux et Métallurgie, qui a bien voulu m'autoriser à soutenir ce présent mémoire ;
- ✉ Monsieur **ANARIVelo** Michel, Docteur-Ingénieur, Maître de conférences et Encadreur de ce présent mémoire, qui n'a pas ménagé son temps afin de mener à bien ce travail, par ses précieux conseils et ses critiques constructives malgré ses diverses fonctions.

Mes profondes reconnaissances vont également à l'endroit des membres du Jury :

- ✉ Monsieur **RAKOTOARISON** Simon, Docteur-Ingénieur et Maître de conférences à l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui a accepté de présider ce mémoire ;
- ✉ Monsieur **RANAVOSON** Andriambala, Docteur-Ingénieur et Maître de conférences au sein de l'E.S.P.A.

Je remercie aussi le Corps Enseignant du département S.M.M.

J'exprime aussi mes profondes gratitudes au Chef de département du Génie Mécanique et productique ; ainsi qu'au personnel du laboratoire du Génie Chimique, surtout à Monsieur Prosper, et au personnel du Bloc

technique d'Ankatso et de Vontovorona ; plus particulièrement à Monsieur Landry.

Je ne saurais comment exprimer toute ma reconnaissance à mes parents qui m'a toujours soutenu financièrement et moralement ; toute ma famille qui m'a toujours encouragée à approfondir mes études.

Enfin, j'exprime mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

SOMMAIRE

ACRONYMES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES GRAPHIQUES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PARTIE I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1: GÉNÉRALITÉS SUR LES COMPOSITES À FIBRES NATURELLES

CHAPITRE 2: MATÉRIAUX COMPOSITES À RENFORT FIBRES VEGETALES

CHAPITRE 3: POLYESTER INSATURÉ

CHAPITRE 4: BAMBOU

PARTIE II : ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE 5: MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE 6: MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES

CHAPITRE 7: COMPARAISON DES MATÉRIAUX COMPOSITES OBTENUS

CHAPITRE 8: ÉVALUATION TEMPORELLE POUR LA MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES ET GESTION DES MATIÈRES PREMIERES

CHAPITRE 9: SÉLECTION DES COMPOSITES À RENTABILISER

CHAPITRE 10: ÉTUDES D'IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

BIBLIOGRAPHIES

WEBOGRAPHIES

TABLE DES MATIÈRES



ACRONYMES

A.S : armure satin

A.U : armure unidirectionnelle

EP : époxydes

EPI : équipements de protection individuelle

FUR : résines furaniques

MF : mélamine-formaldéhyde

M.O.J : main d'œuvre journalière

PBo : peroxyde de benzoyle

P.C : polycarbonate

P.DAP : polyesters allyliques

P-F : phénol-formaldéhyde

PME : petite moyenne entreprise

PMec : peroxyde de methyl-éthyl cétone

PMic : peroxyde de methyl-isobutyl-cétone

P.S : polystyrène

P.V.C : polychlorure de vinyle

RN : route nationale

T.D : thermodurcissable

U.D : unidirectionnel

U.P : polyester insaturé

VE.S : vinylesters copolymère avec le styrène

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1. Liste des résines thermodurcissables
- Tableau 2. Valeurs des décochements possibles pour un métier à tisser à 13 cadres
- Tableau 3. Classification des fibres extraites suivant leurs longueurs
- Tableau 4. Utilisation des produits selon le type de transformation
- Tableau 5. Production de bagasse par site en 2013
- Tableau 6. Production de raphia à Madagascar
- Tableau 7. Masses des différentes parties de la noix de coco obtenues à partir de 1000 noix
- Tableau 8. Utilisation des fibres de coco
- Tableau 9. Utilisation des fibres de sisal suivant le type
- Tableau 10. Liste non exhaustive des plantes à fibres malgaches et de leurs utilisations
- Tableau 11. Traitement des fibres végétales
- Tableau 12. Polymérisation à froid
- Tableau 13. Présentation des avantages et des limites d'utilisation du polyester insaturé
- Tableau 14. Utilisation du bambou selon l'espèce
- Tableau 15. Matériels et leurs utilisations
- Tableau 16. Solutions à chaque problème repéré lors du moulage
- Tableau 17. Origine des fibres étudiées
- Tableau 18. Dimensions des matières premières
- Tableau 19. Modes de broyage des fibres
- Tableau 20. Dimensions de l'éprouvette de flexion
- Tableau 21. Mode d'acquisition des fibres
- Tableau 22. Longueur **L** des fibres végétales acquises
- Tableau 23. Couleur des fibres végétales traitées
- Tableau 24. Caractéristique des entre-nœuds des deux espèces de bambou
- Tableau 25. Masse linéique des éclisses de bambou
- Tableau 26. Caractéristiques des tissus de fibres
- Tableau 27. Masse surfacique des tissus
- Tableau 28. Masse volumique des fibres végétales
- Tableau 29. Masse volumique des constituants de la matrice
- Tableau 30. Masse volumique des composites UD
- Tableau 31. Masse volumique des composites à renfort tissé et à renfort composé
- Tableau 32. Test d'usinage
- Tableau 33. Aptitude à l'assemblage
- Tableau 34. Taux de compression pour un taux de renfort à 30 %
- Tableau 35. Taux d'absorption en eau des composites
- Tableau 36. Propriétés mécaniques des fibres végétales
- Tableau 37. Désignation des différentes fibres végétales
- Tableau 38. Contrainte à la rupture des composites unidirectionnels UD
- Tableau 39. Contrainte à la rupture du composite renforcé par deux couches d'armure satin
- Tableau 40. Désignation des composites à renfort composé
- Tableau 41. Contrainte à la rupture des composites à renfort composé
- Tableau 42. Déformation en surface des composites U.D

- Tableau 43. Déformation en surface du composite renforcé par deux couches d'armure satin
- Tableau 44. Déformation en surface des composites à renfort composé
- Tableau 45. Composition chimique des fibres étudiées
- Tableau 46. Résultats de l'essai de flexion des refus 1 et 2
- Tableau 47. Origine des matériaux caractérisés
- Tableau 48. Masse des matériaux couramment utilisés
- Tableau 49. Test d'usinabilité et aptitude à l'assemblage des matériaux courants
- Tableau 50. Résultats de l'essai de flexion de quelques matériaux
- Tableau 51. Estimation de la durée de l'extraction de 100 g de fibres
- Tableau 52. Durée de la mise en œuvre des différents tissus de dimensions 20 cm x 18cm
- Tableau 53. Mode de séchage des fibres et tissus
- Tableau 54. Mise en place du renfort dans le moule
- Tableau 55. Durée de la mise en œuvre des composites à renfort unidirectionnel avec un taux de renfort à 30 % (sans séchage à l'étuve)
- Tableau 56. Durée de la mise en œuvre des composites à renfort tissé avec un taux de renfort à 30 %
- Tableau 57. Durée de la mise en œuvre des composites à renfort composé
- Tableau 58. Durée de l'obtention des fibres non cardées du bambou et de coco
- Tableau 59. Évaluation des différentes masses durant l'extraction des fibres végétales
- Tableau 60. Rendement des fibres cardées extraites sur 100 g de plantes à fibre
- Tableau 61. Rendement des fibres non cardées extraites sur 100 g de plantes à fibre
- Tableau 62. Rendement théorique des fibres achetées par feuille fraîche
- Tableau 63. Renouvellement des plantes à fibres
- Tableau 64. Durée d'un cycle de moulage
- Tableau 65. Données récapitulatives à chaque type de composite
- Tableau 66. Nature de charge éventuelle
- Tableau 67. Formulation retenue en fonction du type d'utilisation
- Tableau 68. Devis pour l'acquisition de 100 g des différentes fibres végétales unidirectionnelles
- Tableau 69. Devis pour la confection de tissus de fibres végétales
- Tableau 70. Estimation des prix de revient de chaque gamme de composite ayant une dimension de 20 cm x 18 cm x 0,7 cm

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Représentation schématique d'un tissu
- Figure 2. Taffetas
- Figure 3. Mise en carte taffetas
- Figure 4. Armure satin de 5
- Figure 5. Construction de satin de 5 avec décochement de 3
- Figure 6. Armure sergé de 2x2
- Figure 7. Armure unidirectionnelle
- Figure 8. Armure haut module
- Figure 9. Production mondiale de fibres végétales 2001-2008
- Figure 10. Classification des fibres végétales suivant leurs origines
- Figure 11. Tige de canne à sucre
- Figure 12. Coupe transversale d'une tige
- Figure 13. Procédé industriel pour la fabrication du sucre
- Figure 14. Utilisation des différentes parties du raphia
- Figure 15. Feuille adulte
- Figure 16. Coupe transversale d'une noix de coco arrivée à maturité
- Figure 17. Utilisation des fruits et des palmes
- Figure 18. Différentes sortes de fibres à l'intérieur d'une feuille de sisal
- Figure 19. Procédés d'extraction des fibres végétales
- Figure 20. Coupe dans le sens de l'épanouissement des ramuscules
- Figure 21. Coupe dans le sens contraire de l'épanouissement
- Figure 22. Fendage d'un chaume lourd
- Figure 23. Réalisation de l'entaille
- Figure 24. Maintien de l'ouverture de l'entaille
- Figure 25. Fendage d'un bambou avec une machette
- Figure 26. Appui adopté pour l'essai de flexion
- Figure 27. Présentation des deux directions possibles de coupe
- Figure 28. Traitement des fibres de sisal
- Figure 29. Processus de mise en place des constituants
- Figure 30. Représentation schématique de la mise en œuvre d'un composite
- Figure 31. Résumé des processus de mise en œuvre des composites

LISTE DES PHOTOS

- Photo 1. Raphia se trouvant sur le bord de la RN2
- Photo 2. Présentation d'une foliole non épanouie
- Photo 3. Récolte des jeunes feuilles de raphia (Côte d'Ivoire)
- Photo 4. Moule formé par le cadre et la partie inférieure
- Photo 5. Immersion de fibres de coco
- Photo 6. Machine utilisée pour l'essai de flexion
- Photo 7. Positionnement de l'éprouvette sur les deux appuis
- Photo 8. Éprouvette en rupture
- Photo 9. Récolte de bambusa vulgaris
- Photo 10. Raphia
- Photo 11. Rachis de coco
- Photo 12. Armure taffetas de lattes de bambou
- Photo 13. Armure satin de 5 avec décochement 3 de lattes de bambou
- Photo 14. Armure unidirectionnelle
- Photo 15. Mise en place des fibres cardées dans le moule
- Photo 16. Composite renforcé de fibres de sisal à 30 %
- Photo 17. Composite renforcé de coïr à 15 %
- Photo 18. Composite renforcé de fibres de sisal traité à 15 %
- Photo 19. Composite renforcé de fibres de bambusa vulgaris à 15 %
- Photo 20. Composite renforcé de raphia à 20 %
- Photo 21. Défauts de surface des composites renforcés de raphia
- Photo 22. Composite renforcé de tissu à armure taffetas
- Photo 23. Composite renforcé de tissu à armure satin
- Photo 24. Composite à armure satin

LISTE DES GRAPHIQUES

- Graphique 1. Contrainte à la rupture des composites unidirectionnels en fonction du taux en renfort
- Graphique 2. Contrainte à la rupture des composites à renfort tissé et à renfort composé
- Graphique 3. Déformation en surface des composites unidirectionnels
- Graphique 4. Déformation en surface des composites à renfort tissé et à renfort composé
- Graphique 5. Données sur l'extraction des fibres de bambou 1 sur 100 g de lamelle
- Graphique 6. Données sur l'extraction des fibres 2 sur 100 g de lamelle
- Graphique 7. Données sur l'extraction des fibres de coco sur 100 g de bourre
- Graphique 8. Données sur l'extraction des fibres de rachis sur 100 g

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au niveau international, les matériaux ont connu un essor considérable ces dernières années. En effet, de nombreuses recherches ont été faites pour satisfaire les besoins des gens de plus en plus croissants. Ces nouveaux matériaux ont été développés en tenant compte des conventions adoptées lors des sommets internationaux sur l'environnement. Ces recherches concernent surtout les pays développés.

Les pays en développement se réfèrent aussi à ces diverses conventions internationales. À Madagascar, malgré le fait que le domaine des matériaux est en plein essor avec l'apparition de nouveaux matériaux comme les fibrociments, les tuiles en béton, les briques compressées ; la plupart des anciens matériaux comme les briques et les tuiles en argile cuite, les parpaings et la plus importante le bois restent largement utilisés. D'autres matériaux sont également élaborés et ils sont fabriqués à partir de la valorisation matière de certains déchets disponibles en quantité importante ou industrielle.

Le bois constitue la principale matière d'œuvre utilisée par les Malgaches. Pour le bois en question, l'âge moyen d'abattage s'étend de 20 ans à 100 ans. La période de 20 ans correspond au peuplier et 100 ans à celle du sapin et du tilleul. [15] [U] Les plantes à croissance rapide comme le bambou sont alors promues pour remplacer le bois dans le domaine de la construction. En citant par exemple, le cas de Madagascar Bamboo qui transformait les éclisses de bambou en madriers et parquets. Ces matériaux constituent ce que l'on appelle matériaux composites.

À part le bambou, d'autres plantes à fibre constituent une alternative viable à l'utilisation du bois. D'ailleurs, Madagascar compte une grande variété de plantes à fibres.

D'où l'objet de ce mémoire qui recherche les fibres les plus performantes, c'est-à-dire ayant d'excellentes propriétés mécaniques satisfaisant quelques paramètres caractéristiques. Pour se faire, ce mémoire sera axé sur deux grandes parties.

La première partie concernera l'étude bibliographique et traitera les différents constituants des matériaux composites renforcés de fibres végétales, en faisant d'abord un bref aperçu de leur état des lieux ainsi que la présentation des différentes sortes de fibre disponible à Madagascar, ensuite l'importance et les caractéristiques de la résine polyester ; et enfin l'utilisation du bambou ainsi que les divers processus liés à la transformation du bambou.

Comparaison de matériaux composites renforcés de fibres végétales

La seconde et dernière partie abordera les études expérimentales. Ces études parleront en premier lieu des matériels utilisés et les méthodes adoptées pour l'extraction des fibres et la détermination des propriétés physico-mécaniques. En second lieu, la mise en œuvre des composites sera nécessaire avant de les comparer en prenant comme critères de comparaison en plus des propriétés ci-dessus, la durée de leur mise en œuvre et le renouvellement des plantes à fibres afin de déterminer les formulations à rentabiliser. Cette partie se terminera par l'étude d'impacts socio-économiques et environnementaux.

Partie I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1: GÉNÉRALITÉS SUR LES COMPOSITES À FIBRES NATURELLES

1. Composites à Madagascar

1.1. Champs d'application :

À Madagascar, contrairement à la plasturgie qui est en plein essor pour la fabrication de matelas, de sachets plastiques et autres matériels quotidiens ; le marché du composite est assez stagnant puisque peu de nouveaux matériaux sont promus.

On utilise surtout le matériau composite dans les secteurs suivants :

- Génie civil : confection de béton armé, toiture... ;
- Décoration : faux plafond, pot de fleurs... ;
- Navale : construction de bateaux en fibre de verre... ;
- Automobile : réparation des carrosseries... ;

Les principales résines ou liants utilisés pour la fabrication de ces composites sont le ciment, le plâtre, le polyester insaturé. Pour les renforts, on retrouve l'acier, la fibre de verre et le sisal.

Parmi ces renforts, le plus utilisé est la fibre de verre et l'acier.

1.2. Recyclage :

Comme on le sait, la Grande Ile ne dispose officiellement d'aucune unité de traitement de déchets qu'il s'agisse de déchets organiques, de déchets métalliques et de déchets plastiques. En s'intéressant plus particulièrement à la dernière catégorie de déchets, seules quelques entreprises procèdent à leur recyclage.

D'une part, les emballages ou des sachets plastiques à base de polyéthylène constituent une source importante de déchets malgré le fait qu'ils sont recyclables. D'autre part, la fibre de verre incorporée à la résine polyester n'est guère recyclable.

2. Situation des fibres naturelles à Madagascar :

2.1. Ressources en fibre naturelle :

Madagascar renferme une grande variété de fibres naturelles qu'ils soient des fibres végétales ou des fibres animales. On constate que les fibres végétales occupent une place prépondérante. Parmi eux, il y a entre autres les fibres généralement utilisées dans l'artisanat comme le raphia et le bambou.

Mais d'autres fibres peuvent être encore sélectionnées avec les deux déjà citées pour une utilisation éventuelle dans le domaine du composite.

Voici une liste non exhaustive des plantes à fibre disponible :

- Le bambou ;
- Le cocotier ;
- Le raphia ;
- La bagasse ;
- Le sisal ;
- La paille de riz ;
- Le kapokier ;
- Le cotonnier ;
- Le bois
- Le chanvre.

En effet, des recherches ont déjà été entreprises par les pays développés pour incorporer ces fibres dans les résines pour l'obtention de matériaux composites.

2.2. Potentiel et localisation :

Évaluer ou établir le potentiel de chaque fibre à Madagascar s'avère être une tâche assez ardue parce que peu d'ouvrages ou d'études ont été faits vers ce sens.

3. Situation de la consommation des bois d'œuvre à Madagascar :

Comme on le sait, Madagascar est un pays en voie de développement et il fait actuellement partie des pays les plus pauvres du monde. La croissance économique y est faible avec une forte croissance démographique. Pour subvenir à cette forte croissance, deux domaines vont être particulièrement cités qui sont le logement et l'énergie.

Le logement ou l'habitation sont faits en général soit en briques, soit en béton, soit en bois. Ce dernier reste le plus utilisé actuellement que ce soit dans la construction du logement lui-même ou les meubles qu'ils contiennent.

Chapitre 2: MATÉRIAUX COMPOSITES À RENFORT FIBRES VEGETALES

1. Matériau composite :

Un matériau composite est en général formé par l'association de deux matériaux de même ou de différentes familles. Il en résulte un matériau ayant de meilleures propriétés que ceux des matériaux de départ.

Il est constitué par :

- Une matrice ;
- Un renfort ;
- Un catalyseur ;
- Un accélérateur ;
- Une charge.

La matrice et le renfort vont être approfondis plus en détail dans ce qui suit.

1.1. Matrice : [1] [A]

La matrice est la dénomination du liant ou de la résine utilisée dans le domaine du matériau composite. En effet, elle relie les fibres entre elles, transfère aussi les sollicitations vers ces fibres et assure une protection vis-à-vis des agressions mécaniques.

Comme on l'a déjà vu dans le travail précédent, selon l'origine, on peut classer la résine en deux catégories à savoir la résine d'origine naturelle et la résine synthétique.

Mais, une classification très importante doit être abordée, la classification selon le mode de comportement de ces résines arrivées en fin de vie.

On distingue alors :

- Les polymères recyclables ;
- Les polymères non recyclables ;
- Les polymères biodégradables ;
- Les polymères compostables ;
- Les polymères biofragmentables ;
- Les polymères oxodégradables.

Dans ce présent travail, on va apporter davantage d'informations sur les deux premiers polymères cités.

1.1.1. Polymères recyclables : [2]

Ils se définissent comme l'ensemble des polymères qui peuvent être réutilisés dans une nouvelle vie d'un cycle de matériau. Il s'agit de la valorisation matière. Mais, ils peuvent aussi être valorisés énergétiquement ; c'est-à-dire qu'ils sont utilisés comme combustible pour la production d'énergie.

Les polymères recyclables regroupent surtout les thermoplastiques.

Les thermoplastiques sont des polymères qui se ramollissent et se fluidifient sous l'action de la chaleur, et reprenant leurs formes initiales une fois refroidies ; et ses transformations sont réversibles.

Parmi une large gamme de T.P, les plus utilisées sont :

- Le polystyrène (P.S) ;
- Les polyoléfinés ;
- Le polychlorure de vinyle (PVC) ;
- Le polycarbonate (P.C).

1.1.2. Polymères non recyclables : [2]

Ils regroupent les polymères qui sont difficilement recyclables. Leurs modes de valorisation sont surtout énergétiques. Mais ils peuvent être broyés et incorporés dans de nouveaux composites comme charges.

Les polymères non recyclables sont généralement des thermodurcissables. Sous l'action de la chaleur, les T.D s'assouplissent, mais ils ne peuvent plus revenir à l'état initial, car il y aurait destruction du réseau.

Les différentes familles de résines thermodurcissables sont données dans le tableau suivant :

Tableau 1. Liste des résines thermodurcissables [2]

Famille de résines	Polymères		Désignation normalisée
Polyesters insaturés	Résines polyesters insaturées condensées		UP
	Vinylesters	Copolymère avec le styrène	VE.S.
		Homopolymère 2	VE.
	Polyesters allyliques		P.DAP
Résines de condensation	Résines phénol-formaldéhyde		P-F
	Résine mélamine-formaldéhyde		MF
	Résines furaniques		FUR
Résines époxydes	Résines époxydes		EP

1.2. Renfort : [2]

1.2.1. Architecture des fibres :

En s'intéressant à la forme commerciale, on constate trois formes principales. On peut alors citer :

- Les ensembles linéaires ;
- Les ensembles surfaciques ;
- Les ensembles multidirectionnels.

On portera une attention particulière sur les ensembles surfaciques.

1.2.2. Ensembles surfaciques :

Ils sont obtenus à partir des ensembles linéaires qui se présentent généralement sous formes filamentaire. À son tour, ces ensembles regroupent les tissus et les mats.

1.2.2.1. Tissus :

L'opération correspondante à l'obtention de tissus est le « tissage ». Un tissu est formé par un entrecroisement perpendiculaire de deux ensembles de fils, les fils de chaîne dans le sens longitudinal et les fils de trame dans le sens transversal. Suivant le motif réalisé, c'est-à-dire à la façon dont s'entrecroisent les fils de chaîne et de trame, on parle souvent d'armures.

a) Terminologie du tissage : [B] [C] [D]

☞ **Chaîne** : fils parallèles au sens de fabrication du tissu ;

☞ **Trame ou duite** : fils perpendiculaires aux fils de chaîne ;

☞ **Pris** : passage du fils de chaîne au-dessus du fil de trame ;

☞ **Laissé** : passage du fils de chaîne en dessous du fil de trame ;

☞ **Flotté** : nombre des laissés entre deux pris ;

☞ **Rapport d'armure** : plus petit motif répétitif d'un tissu seulement valable avec les conditions comme l'entrecroisement de tous les fils de chaîne avec la trame au moins fois, la présence d'au moins un pris et un laissé sur chaque duite et un nombre important des points de liage disposés régulièrement.

☞ **Décochement** : gradation de liage des chaînes avec les trames lors de la construction du tissu ;

☞ **Mise en carte** : représentation schématique de l'armure sur un papier quadrillé, représentant un fil de chaîne par une rangée longitudinale et un fil de trame par une rangée transversale.

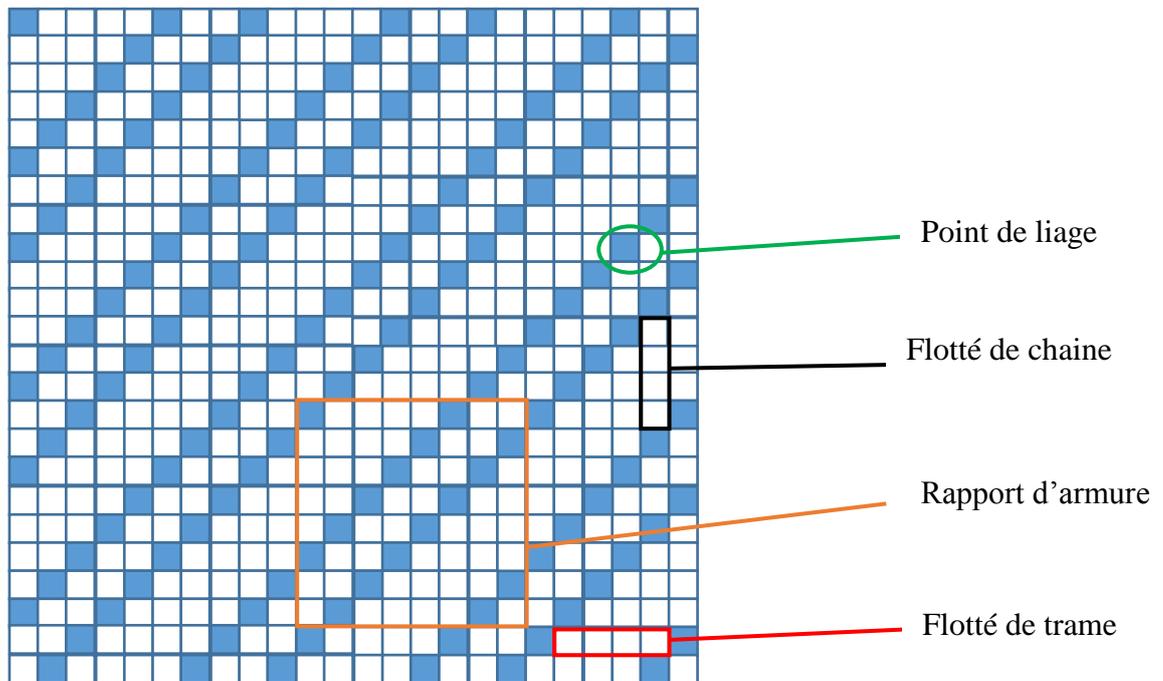


Figure 1. Représentation schématique d'un tissu

b) Armures fondamentales :

On distingue trois types d'armure fondamentale :

- ☞ Armure sergé ;
- ☞ Armure satin ;
- ☞ Armure toile ou taffetas ;

Il y en a aussi d'autres comme l'armure unidirectionnelle et l'armure haut module.

i. Armure toile : [E]

Elle est tissée de manière à ce que chaque fil de chaîne passe alternativement au-dessus puis en dessous de chaque fil de trame, et réciproquement.

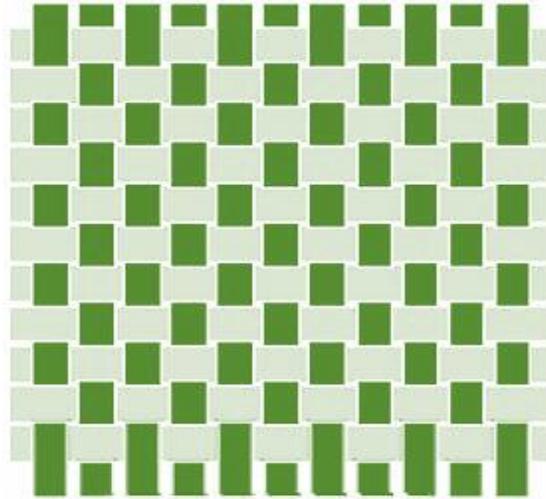


Figure 2. Taffetas [F]

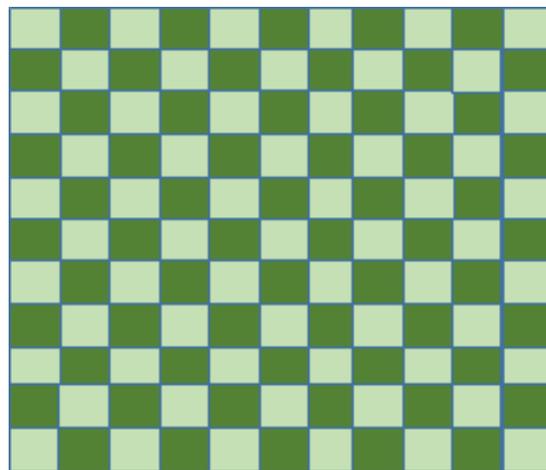


Figure 3. Mise en carte taffetas

ii. Armure satin :

- Description : [D] [E] [3] [G]

C'est un tissu uni dans lequel les points de liage ne se touchent jamais. Dans le rapport d'armure, il n'y a qu'un seul point de liage sur chaque fil de chaîne et chaque fil de trame. Les tissus à armure satin sont beaucoup plus déformables qu'une toile. Il est adapté à la mise en forme de pièces à surfaces complexes grâce à sa souplesse.

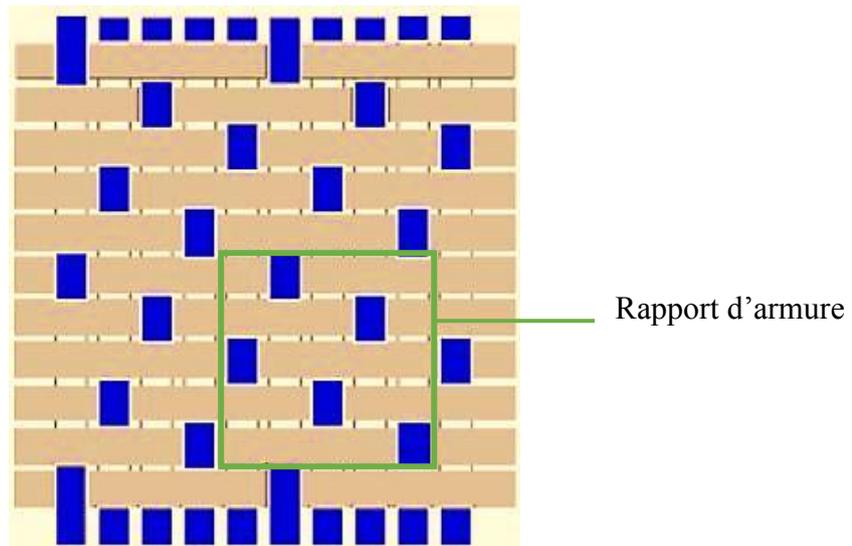


Figure 4. Armure satin de 5 [F]

- Construction : [D]

On veut par exemple construire un satin de 5 ayant les caractéristiques suivantes :

- + 5 cadres ;
- + Rapport d'armure : carré de 5 sur 5 ;
- + Effet de trame ;
- + Décochement de 3.

On procède de la manière suivante :

- + Pour réaliser le décochement, on part de A, puis on change de fil de trame en se déplaçant de 3 cases ;
- + En arrivant au bord du rapport, on reprend à gauche de la même duite.

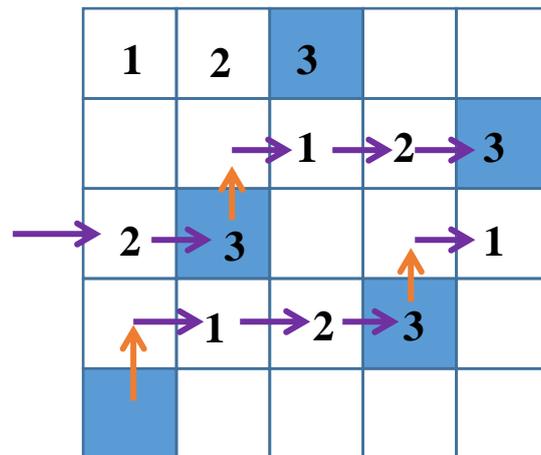


Figure 5. Construction de satin de 5 avec décochement de 3

- Décochement :

Pour réaliser un décochement, il faut remplir les conditions suivantes :

- ✚ Le décochement est supérieur à 1 ;
- ✚ Le décochement ne doit pas être un diviseur du rapport d'armure.

Tableau 2. Valeurs des décochements possibles pour un métier à tisser à 13 cadres [C]

Satin	Valeurs de décochement												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4													
5		X	X										
6													
7		X	X	X	X								
8			X		X								
9		X		X	X		X						
10			X				X						
11		X	X	X	X	X	X	X	X				
12					X		X						
13		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		

X : décochement possible
 : décochement irrégulier

iii. Armure sergé : [R]

Le sergé se différencie du sergé uniquement par le nombre de décochements. En effet, le sergé est une armure satin avec un décochement de 1.

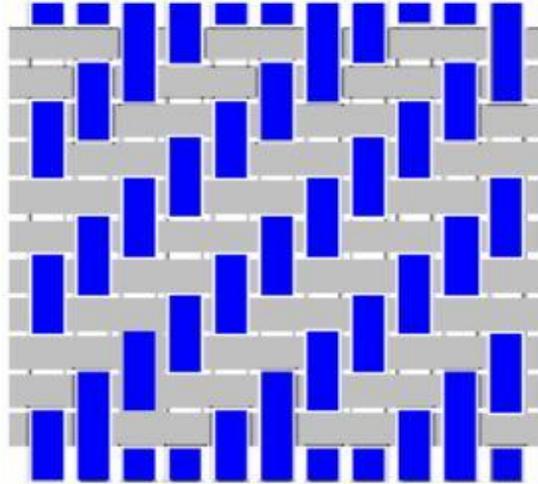


Figure 6. Armure sergé de 2x2 [F]

iv. Armure unidirectionnelle : [E]

Elle est constituée par des fils maintenus parallèles entre eux par un fil fin.



Figure 7. Armure unidirectionnelle [E]

v. Armure haut module : [E]

Elle est caractérisée par des fils de chaîne et des fils de trame qui ne s'entrecroisent pas et qui sont maintenus par des fils fins.

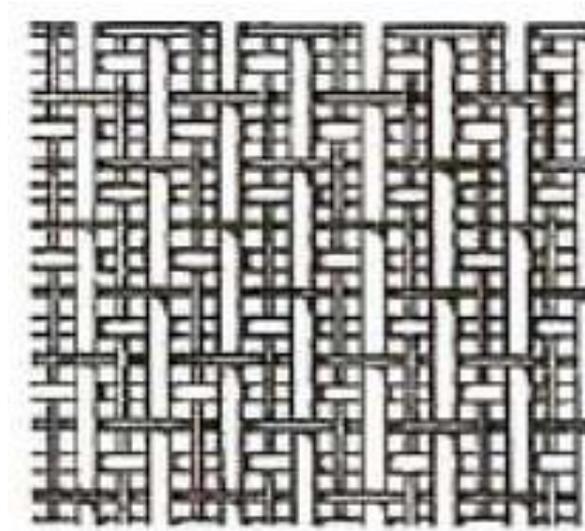


Figure 8. Armure haut module [E]

1.2.2.2. Mats : [2]

Un mat est obtenu à partir de l'ensemble linéaire. Ensemble qui peuvent être des fils discontinus ou des fils de base.

On distingue trois types de mat :

- ⤴ Mat à fils coupés : construit à partir des fils de quelques centimètres ou des fils continus et maintenus ensemble par un liant soluble dans les résines ou non ;
- ⤴ Mat de surface : couche mince ou compacte de fibres discontinues ou de fils liés entre eux ;
- ⤴ Mat aiguilleté : fils de base enchevêtré entre eux ou au travers d'un support.

2. Fibre végétale : [H]

Quand on fait référence à une fibre végétale, il s'agit surtout de faisceaux de fibres. D'ailleurs, un faisceau de fibre est formé par des fibres unitaires.

2.1. Production mondiale de fibres végétales :

Récemment, la production annuelle de fibres végétales atteignait les 6 200 kt en excluant de ces estimations le coton et le bois.

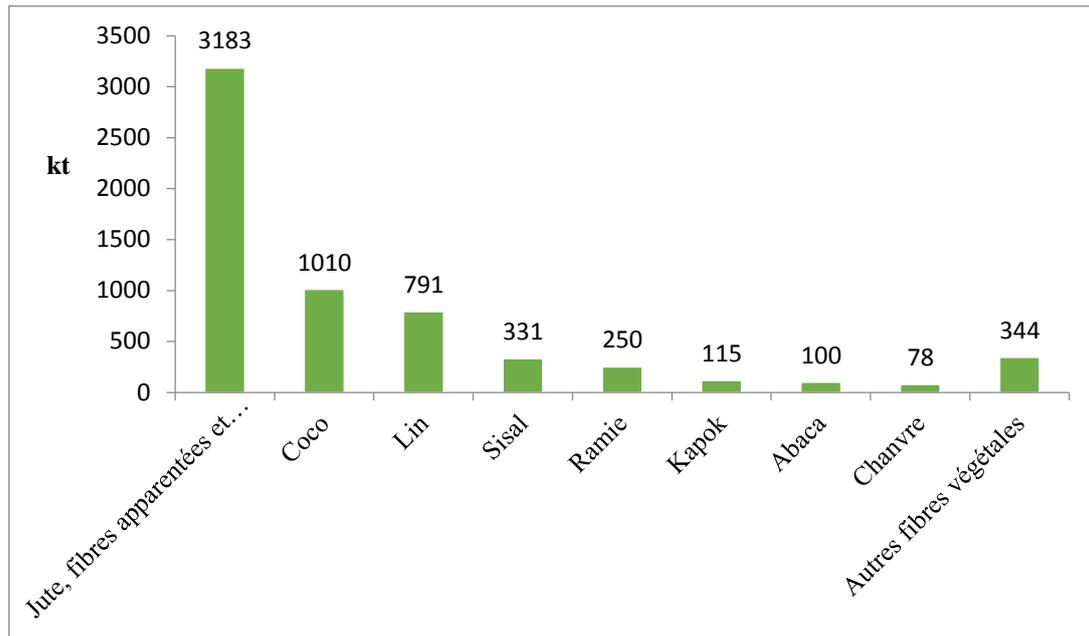


Figure 9. Production mondiale de fibres végétales 2001-2008 [H]

2.2. Classification des fibres végétales :

On s'intéressera à la classification de ces fibres selon leurs origines et leurs longueurs.

Les fibres peuvent être extraites à partir de :

- La tige ;
- La feuille ;
- La graine ;
- Le fruit ou encore son enveloppe.

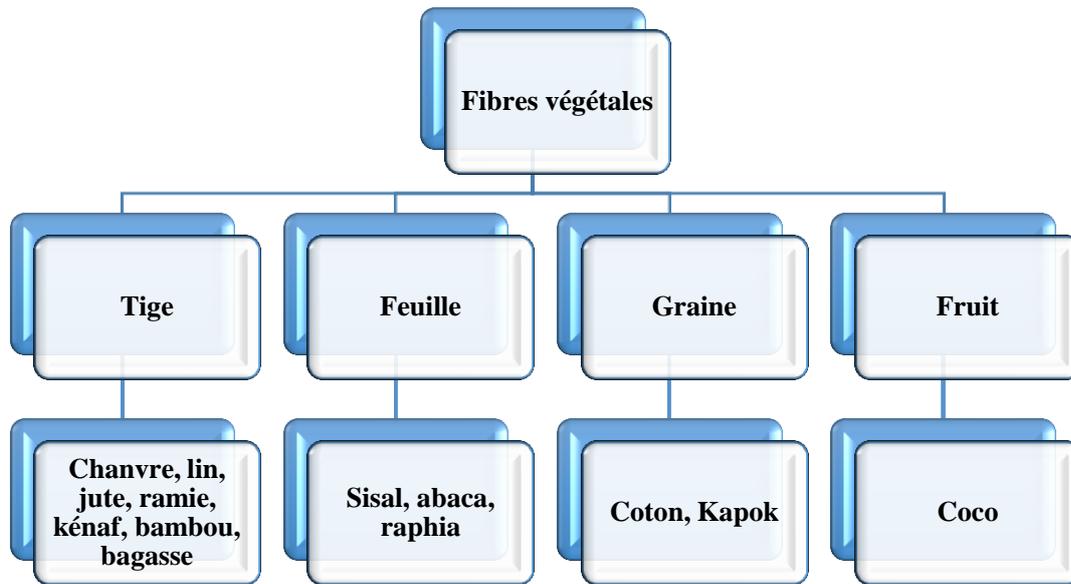


Figure 10. Classification des fibres végétales suivant leurs origines [H]

Lors de l'extraction des fibres végétales, en s'intéressant à leurs classifications, on distingue :

- Les fibres décimétriques ou fibres [dm] ;
- Les fibres centimétriques ou fibres [cm] ;
- Les fibres millimétriques ou fibres [mm].

Tableau 3. Classification des fibres extraites suivant leurs longueurs

Type de fibres	Longueur moyenne des fibres après extraction
Décimétrique	Décimètre [dm]
Centimétrique	Centimètre [cm]
Millimétrique	Millimètre [mm]

2.3. Bagasse de la canne à sucre :

2.3.1. Canne à sucre :

2.3.1.1. Classification botanique : [4]

Elle fait partie de la famille des *Graminacées* et du genre *Saccharum*.

Son nom malgache est le fary.

a) Description :

La canne à sucre est constituée par :

- ☞ Les racines ;
- ☞ Les tiges ;
- ☞ Les feuilles ;
- ☞ Les inflorescences ;
- ☞ Les fruits.

Dans ce qui suit, on portera une attention particulière sur les tiges.

b) Tige de la canne à sucre : [5]

La canne à sucre regroupe touffe de 12 à 15 tiges par pied. Une tige de 2 à 4 cm de diamètre peut atteindre une hauteur moyenne de 2,5 à 3,5 m ; avec une succession de 20 à 30 nœuds et un nombre variable d'entre-nœuds.

Elle est formée par des entre-nœuds de 6 à 25 cm de long séparés par des nœuds et possède des diamètres moyens variant de 3 à 4 cm.

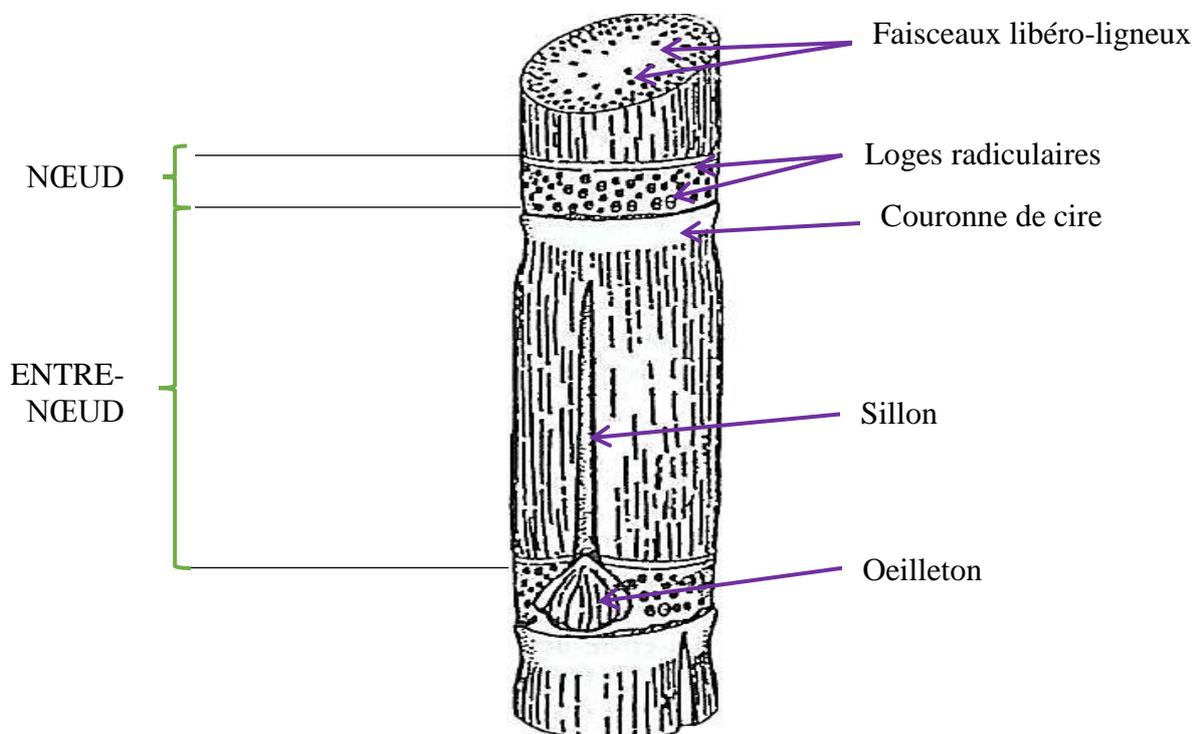


Figure 11. Tige de canne à sucre

Une coupe transversale sur la tige montre, de l'extérieur à l'intérieur, qu'elle est composée par un enduit cireux, un épiderme épais, une écorce et des cellules saccharifères.

Et la coupe longitudinale présente les faisceaux libéro-ligneux.

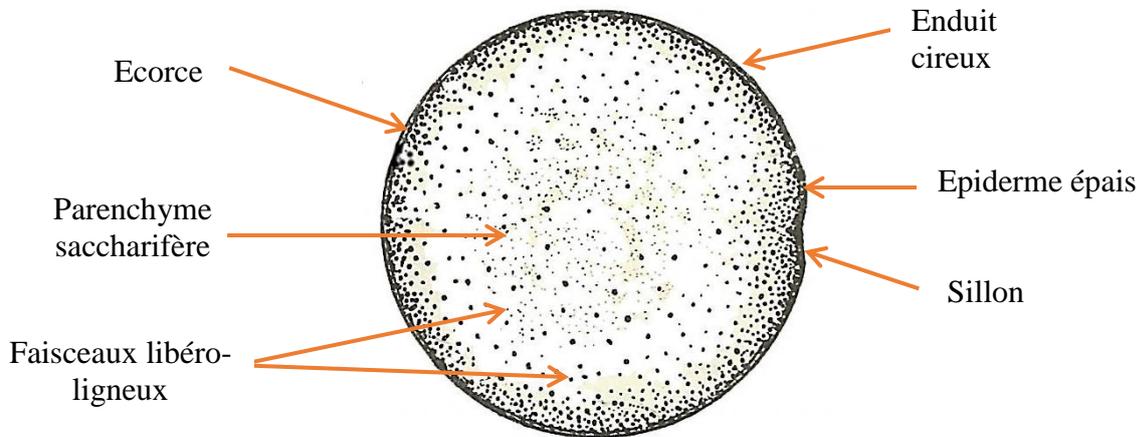


Figure 12. Coupe transversale d'une tige [4]

2.3.1.2. Utilisation de la canne à sucre :

Le tableau suivant illustre l'utilisation de la canne à Madagascar.

Tableau 4. Utilisation des produits selon le type de transformation [E]

Type de transformation	Produits	Sous-produit
Artisanale	Betsabetsa, toaka gasy, siramamy gasy	-
Industrielle	Sucre	Mélasses, Bagasse

a) Production du sucre : [5]

Avec la betterave, la canne à sucre constitue ce que l'on appelle « plante saccharifère ». À Madagascar, elle est la seule utilisée pour la production du sucre.

La canne à sucre arrive à maturité entre 9 à 11 mois. La période de récolte survient quant à elle entre 11 et 12 mois. Elle contient d'ailleurs 10 à 18 % de saccharose et 10 à 15 % de fibres.

La canne à sucre est un produit périssable. C'est pourquoi elle doit être broyée au plus tard 2 jours pour la coupe en paille et une journée après une coupe en brûlé.

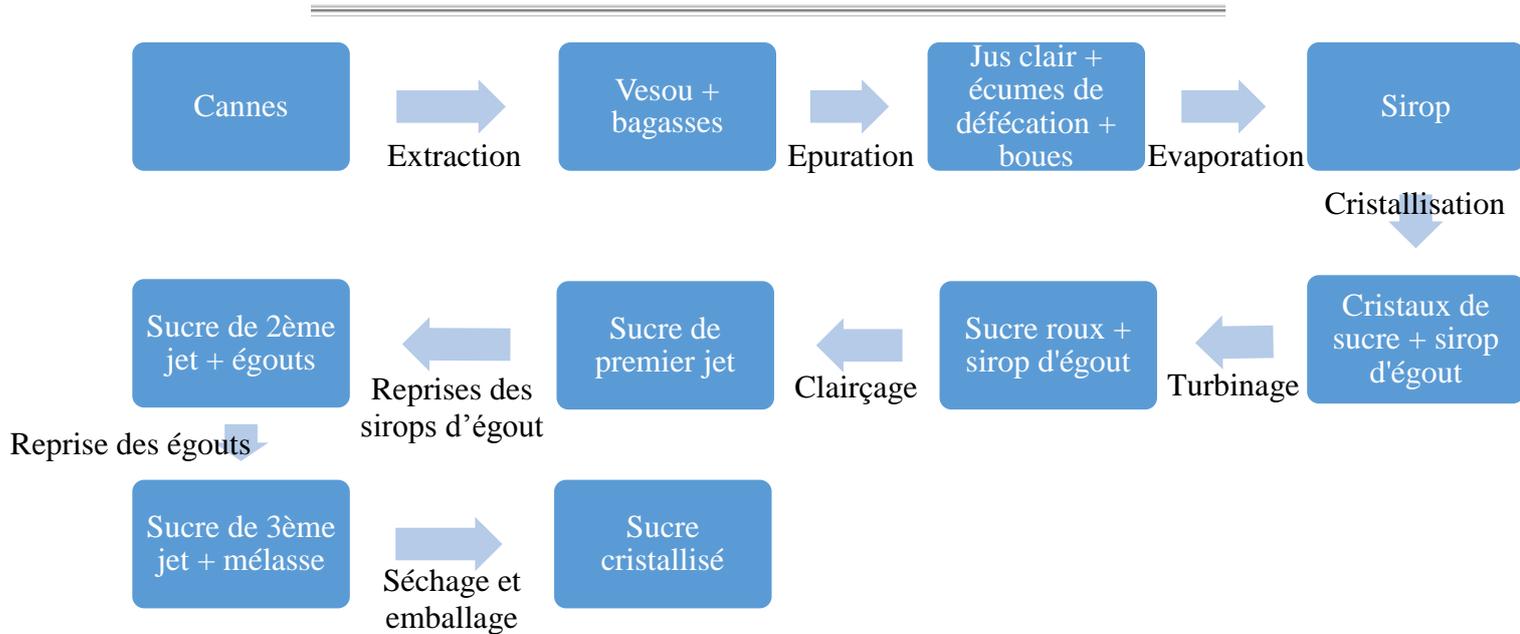


Figure 13. Procédé industriel pour la fabrication du sucre

b) Bagasse :

Elle est le résidu cellulosique de la canne à sucre une fois le saccharose extrait. En effet à l'issue du broyage de la canne, on obtient du jus de canne et de la bagasse. [I]

La bagasse sert généralement à alimenter les chaudières ou les centrales thermiques en combustible en produisant par exemple de l'électricité ; mais ces derniers temps, elle est encore utilisée dans le domaine des matériaux composites.

D'ailleurs, à partir de 8000t de canne à sucre, on obtient 2400t de bagasse. Des résidus non négligeables puisqu'ils représentent 30 % de la matière de départ. [J]

La période de coupe de la canne se situe entre mai et septembre.

Les zones de production industrielle de la canne à sucre sont Ambilobe, Namakia, Morondava et Ranomafana (Région Atsinanana). [6]

Tableau 5. Production de bagasse par site en 2013 [6]

Usine	Quantité de bagasse [t/an]
Ambilobe	150 000
Namakia	67 500
Morondava	67 500
Ranomafana	-

2.4. Fibres de Raphia :

2.4.1. Raphia :

2.4.1.1. Origine : [5] [K]

Les opinions diffèrent sur l'origine du raphia. Certains auteurs affirment que la plante est originaire d'Afrique centrale (bassin du Congo) et d'Afrique de l'ouest et d'autres, de l'Île Madagascar.

2.4.1.2. Localisation du Raphia à Madagascar :

Une enquête réalisée auprès des vendeurs de ces fibres a montré qu'ils proviennent dans la plupart des cas de Toamasina et de Mahajanga.

2.4.1.3. Description : [5] [L]

Il existe plusieurs espèces de raphia à Madagascar comme le *Raphia Ruffia Mart.* et le *Raphia farinifera*.

La première espèce est endémique à Madagascar.

Le raphia fait partie des palmiers ramifiés à la base qui forment des touffes de tiges.

Il est constitué de :

- △ Racines ;
- △ Stipe ;
- △ Feuilles.

2.4.1.4. Feuilles ou palmes.

La fibre de raphia ou raphia est extraite à partir de la plante du même nom ou plus précisément des folioles.



Photo 1. Raphia se trouvant sur le bord de la RN2

Elles ont des longueurs entre 10 à 20 m pour des largeurs de 1 à 3 m.
Elles possèdent des folioles de plus de 1 m de long.

2.4.1.5. Utilisation du raphia :

On utilise souvent le raphia dans le domaine de l'artisanat notamment la vannerie, la fabrication de cordage et de rabane. Mais les autres parties de la plante sont aussi utilisées dans d'autres domaines.

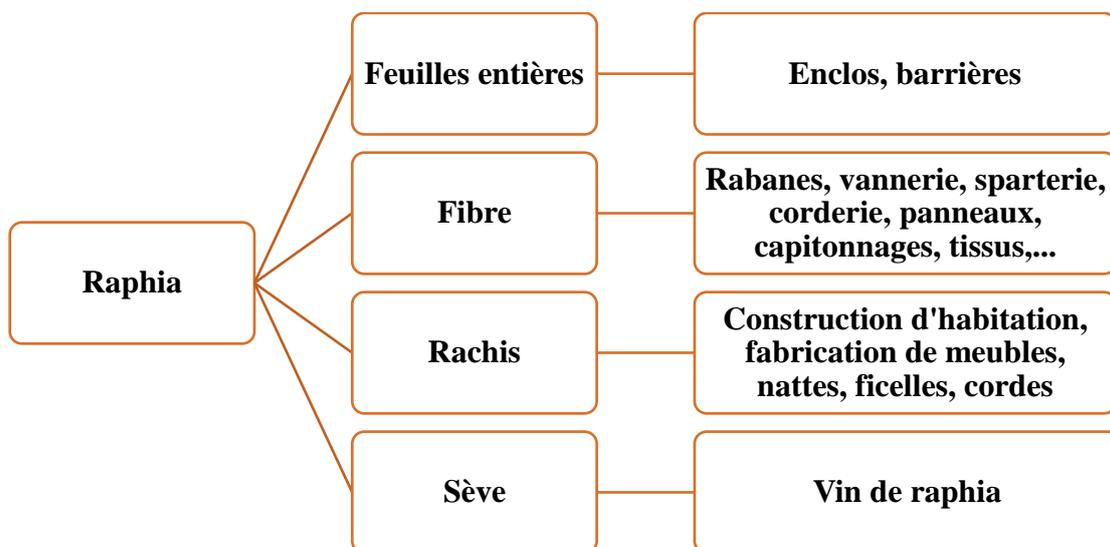


Figure 14. Utilisation des différentes parties du raphia [5]

2.4.2. Extraction des fibres de raphia : [5]

Pour l'obtention des fibres, il faut récolter les folioles ou bourgeons verts non épanouis se trouvant au centre du bouquet, en arrachant avec un couteau l'épiderme inférieur et le sclérenchyme sous-jacent. Ensuite, les fibres sont séchées à l'ombre pour leur donner de la résistance.



Foliole non épanouie

Photo 2. Présentation d'une foliole non épanouie



Photo 3. Récolte des jeunes feuilles de raphia (Côte d'Ivoire) [M]

2.4.3. Production de raphia :

À Madagascar, la principale zone de production du raphia est la province de Mahajanga. En 2006, elle représentait 44,3 % de la production nationale.

Tableau 6. Production de raphia à Madagascar (Source : Eaux et forêts, 2006)

Province	Volume collecté
Antsiranana	190
Antananarivo	200
Toamasina	375
Toliara	985
Fianarantsoa	100
Mahajanga	1464

2.5. Fibres de bambou :

Aucune entreprise ne commercialise les fibres de bambou. C'est pourquoi elles ont été extraites à partir des chaumes de bambou en utilisant la soude, procédé qui est encore appelé la mercerisation. L'étude déjà réalisée au préalable a déterminé les conditions optimales à l'extraction à savoir une concentration de 3 % pour une durée de 16 h.

2.6. Fibres de coco :

2.6.1. Cocotier :

2.6.1.1. Systématique : [7]

Elle est la suivante :

- ♣ Monocotylédone ;
- ♣ Ordre : *palmales* ;
- ♣ Famille : *palmées* (ou *palmacées*) ;
- ♣ Groupe : *cocosoïdes* ;
- ♣ Genre : *cocos*
- ♣ Espèce : *cocos nucifera Linn.*

2.6.1.2. Classification du cocotier : [7] [5]

Selon la hauteur, on distingue les cocotiers grands, les cocotiers nains et les cocotiers hybrides.

En s'intéressant aux cocotiers nains, ils sont également classés suivant la couleur. Il y a alors le nain vert, jaune, rouge (orange) et brun.

2.6.1.3. Différentes parties du cocotier :

L'appareil végétatif du cocotier, comme celui des arbres, comprend le quatre grandes parties :

- △ Les feuilles ou les palmes ;
- △ Le tronc ou le stipe ;
- △ Les régimes ;
- △ Le système racinaire.

À l'aisselle des palmes apparaissent les inflorescences qui vont porter les futures noix.

a) Les palmes : [7]

Une feuille adulte comprend à son tour :

- ∞ Le rachis ;
- ∞ Les folioles.

La longueur d'une feuille mesure entre 4 et 4,5 m pour les variétés naines et 6 à 7 m pour les variétés grandes.



Figure 15. Feuille adulte

b) *Les noix de coco* : [7]

Ils sont constitués par :

- ☞ L'épiderme ;
- ☞ Le mésocarpe ;
- ☞ L'endocarpe ;
- ☞ L'albumen ;
- ☞ L'embryon.

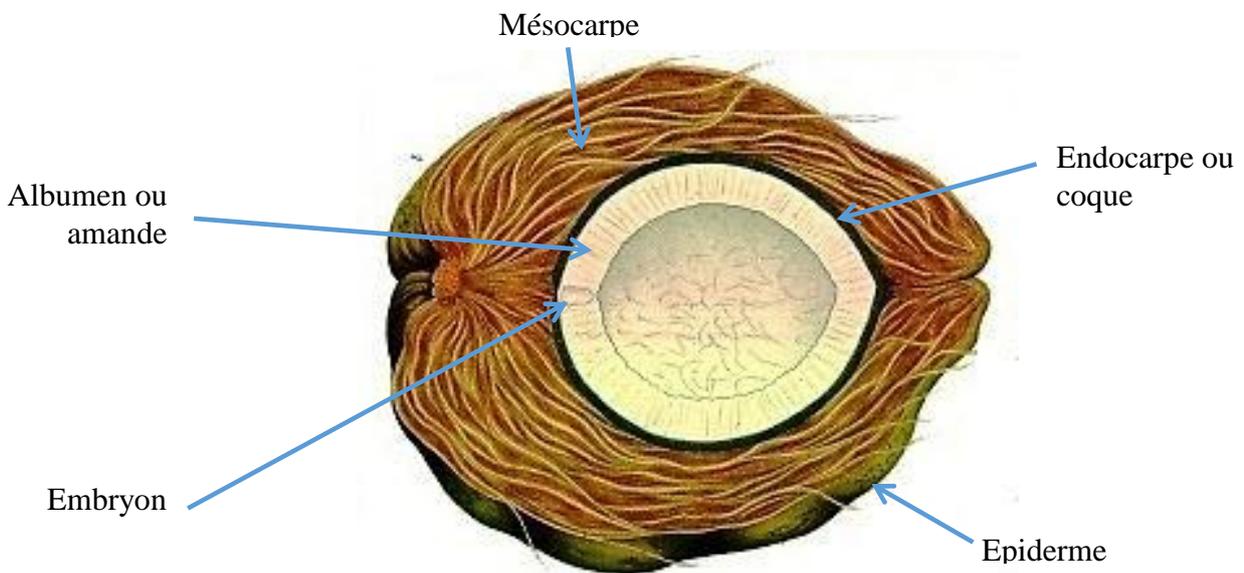


Figure 16. Coupe transversale d'une noix de coco arrivée à maturité [1]

Les noix de coco sont principalement cultivées pour leurs amandes.

Tableau 7. Masses des différentes parties de la noix de coco obtenues à partir de 1000 noix [5]

Nombre de noix de coco	Masse de noix [kg]	Masse de bourres [kg]	Masse de coques [kg]	Masse d'eau de coco [kg]	Masse d'amandes [kg]
1000	1100	370	160	241	329

2.6.1.4. Utilisation des différentes parties de la plante : [7]

Une présentation des principales parties du cocotier est présentée ci-dessous :

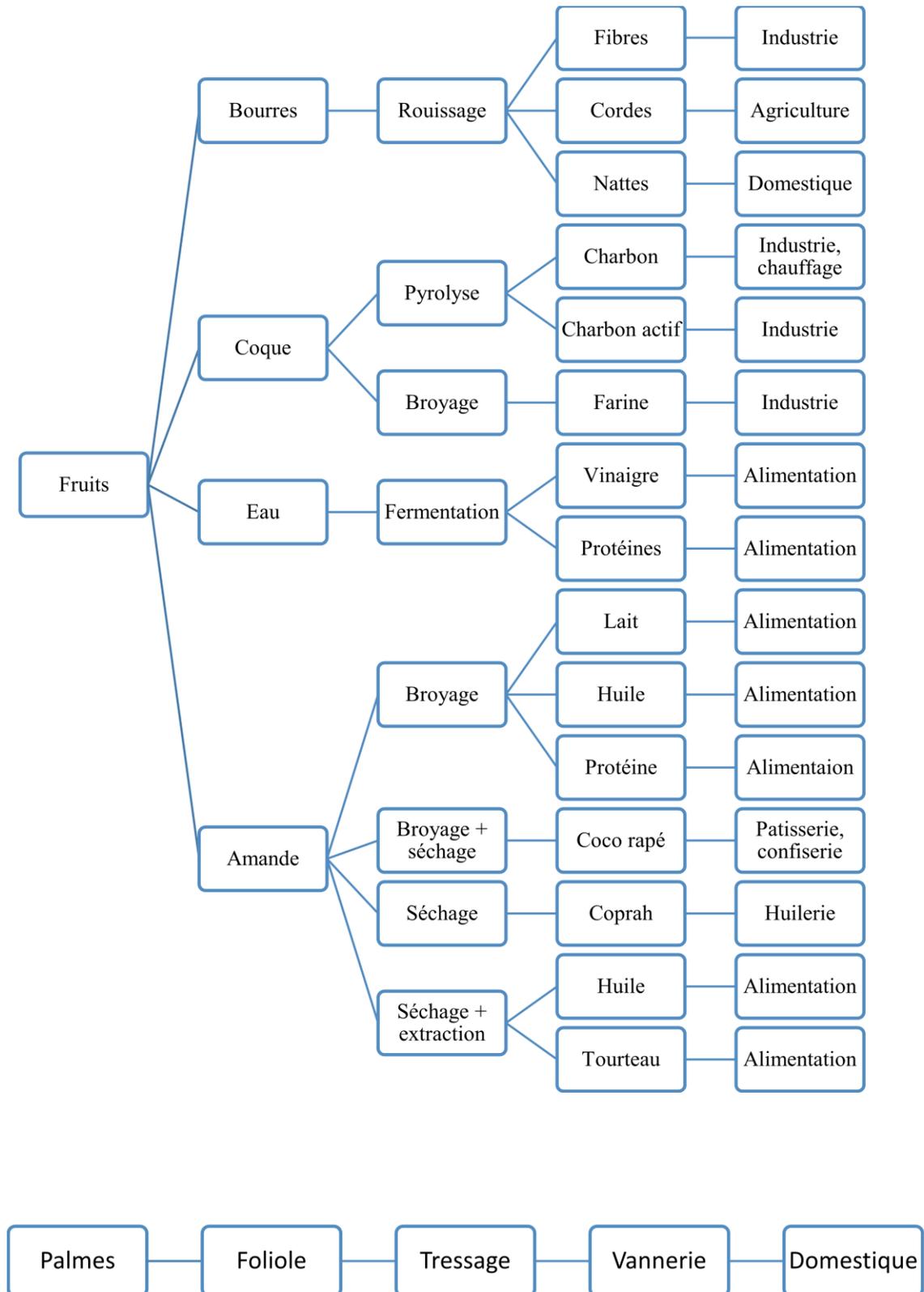


Figure 17. Utilisation des fruits et des palmes [7]

2.6.2. Bourre de coco : [7] [O] [P]

2.6.2.1. Utilisation de la bourre :

La cosse ou l'enveloppe de la noix de coco ou encore la bourre est peu valorisée à Madagascar. Une enquête auprès des marchands de ces noix sur les bords de mer de Toamasina nous a renseigné qu'une fois la pulpe consommée, le résidu comprenant le mésocarpe et l'épicarpe peuvent entrer dans la fabrication d'engrais ou encore peuvent être utilisés comme remblai.

Le mésocarpe dur peut être utilisé comme combustible. En effet, son pouvoir calorifique se situe entre 3600 à 4600 kcal.

2.6.2.2. Fibres de coco :

Les fibres de coco ou coïr sont extraites de l'enveloppe fibreuse de la noix de coco. L'opération la plus utilisée pour l'extraction des fibres est surtout le rouissage. Pour l'obtention de ces fibres, deux voies peuvent être utilisées mécanique ou manuelle. C'est principalement, la seconde voie qui est la plus exploitée ; et c'est pourquoi les principaux pays producteurs sont le Sri Lanka et l'Inde, car ils disposent de mains-d'œuvre à faibles coûts salariaux.

Normalement, on distingue :

- △ Les fibres brunes ou fibres sèches : les cosses fibreuses ne nécessitent que peu de temps pour leur imprégnation et leur défibrage. Une période 3 à 6 semaines suffit pour le rouissage ;
- △ Les fibres blanches ou fibres trempées : la durée d'extraction de ces fibres à partir des enveloppes des noix vertes est relativement longue à raison de 10 mois. Ces fibres peuvent être filées.

Tableau 8. Utilisation des fibres de coco [8]

Lieu	Utilisation
Pays en voie de développement	Cordages marins, cordes pour l'industrie du bois, liens pour l'horticulture, sacs pour la récolte des algues, brosses, balais, nattes, paillasons, carpettes, rembourrages...
Pays développés	Paillasons, faux plafonds, isolations acoustiques, tapis, plastiques laminés...

2.7. Fibre de sisal : [9]

2.7.1. Présentation :

Le sisal fait partie de la famille *Amaryllidacées* et du genre *Agave*. À Madagascar, son nom vernaculaire est le « taretra ». Il est originaire d'Amérique Centrale. C'est à partir de ses feuilles que l'on extrait les fibres.

On distingue deux types de fibres :

- Les fibres longues ;
- Les fibres courtes.

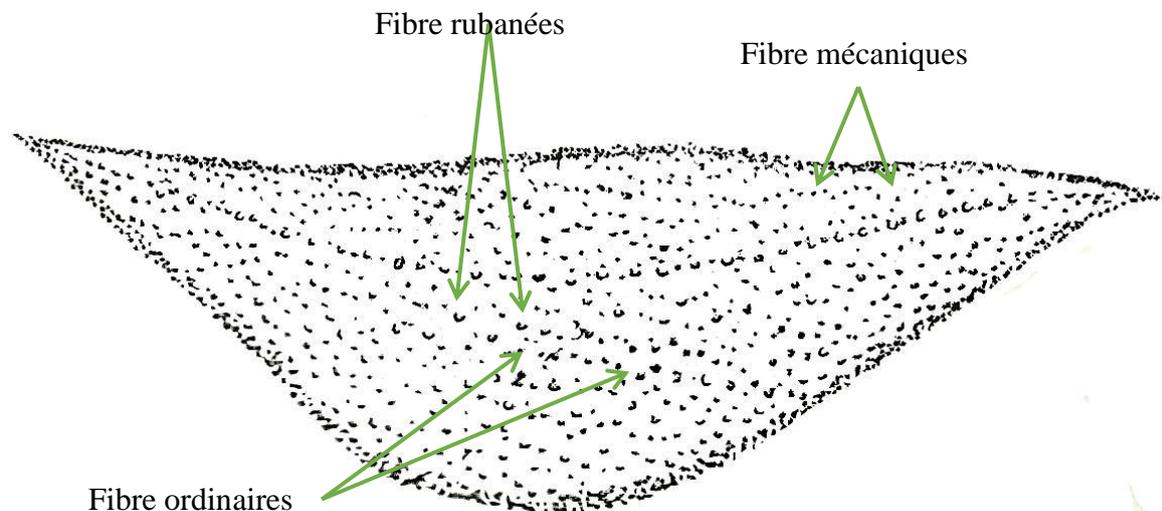


Figure 18. Différentes sortes de fibres à l'intérieur d'une feuille de sisal [9]

2.7.1.1. Utilisation du sisal :

Les fibres de sisal sont principalement utilisées en corderie.

Tableau 9. Utilisation des fibres de sisal suivant le type [9]

Type de fibres	Utilisation
Longue	Cordages marine, cordes, ficelles, sacs, nattes, tapis, tentures...
Courte	Rembourrages, tissus légers, matériaux de revêtement mural...

Mis à part l'utilisation des feuilles pour l'extraction de fibres, d'autres parties de la plante sont aussi valorisées comme les racines et les hampes florales. Elles sont utilisées respectivement pour la fabrication de médicaments, la préparation de teinture rouge ; et pour la fabrication de panneaux insonores et isolants thermiques.

2.7.1.2. Principaux Agavées rencontrés à Madagascar :

On s'intéressera surtout à deux genres. Il s'agit de l'*Agave sisalana* et de l'*Agave elongata*. Le premier se cultive dans les grandes plantations tandis que le second, très épineux et poussant spontanément, se rencontre surtout sur les Hauts-Plateaux et le Sud.

2.7.2. Processus pour l'extraction des fibres :

Il y a trois grandes étapes jusqu'à l'obtention des fibres :

- Le défibrage ;
- Le séchage ;
- Le brossage.

2.8. *Récapitulation de l'utilisation des fibres naturelles :*

Le tableau suivant récapitule les différentes utilisations des fibres énoncées plus haut :

Tableau 10. Liste non exhaustive des plantes à fibres malgaches et de leurs utilisations

Plante à fibres	Utilisations actuelles
Bambou	Panier, meuble, clôture, mur, poutre
Coco	Remblai, engrais
Raphia	Vannerie, corderie
Bagasse	Combustible
Sisal	Corderie
Paille de riz	Alimentation animale, toiture
Kapok	Rembourrage, huile alimentaire
Coton	Habillement
Chanvre	Drogue
Bois	Matériau de construction, meuble

3. Composite renforcé de fibres végétales

3.1. *Traitement des fibres naturelles :*

Les fibres naturelles sont traitées pour améliorer leurs adhésions avec la matrice. En effet, les fibres ont un caractère hydrophile et les matrices hydrophobes. Il existe de nombreux traitements qu'ils soient physiques ou chimiques. Les différents traitements chimiques ont été déjà abordés antérieurement.

Deux traitements chimiques les plus utilisés sont l'alcalisation et l'acétylation.

Le tableau suivant va résumer les caractéristiques de chaque traitement.

Tableau 11. **Traitement des fibres végétales** [10]

Traitement	Produit utilisé	But
Alcalisation	Soude ou hydroxyde de sodium, hydroxyde de potassium	Améliorer les propriétés mécaniques
Acétylation	Acide acétique et anhydride acétique	Améliorer la stabilité dimensionnelle et les propriétés mécaniques des composites

3.2. Composition chimique : [10] [Q] [11]

Les trois principaux composants de toute fibre sont la cellulose, la lignine et l'hémicellulose.

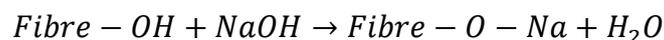
3.2.1. Cellulose :

Elle est en relation directe avec les propriétés mécaniques. Plus une fibre possède un taux élevé en cellulose, plus elle va avoir de meilleures propriétés mécaniques.

La cellulose a comme propriété de résister aux bases fortes et d'être hydrolysée par les acides.

À l'état natif, la cellulose se présente sous la forme de cellulose I. Mais elle peut être transformée en cellulose II par un traitement alcalin. En effet, la cellulose II est plus stable que la cellulose I.

Après le traitement à la soude, nous obtenons l'alcali-cellulose ou cellulose II :



3.2.2. Lignine :

Elle a comme fonction principale d'assurer la rigidité de la plante pour qu'elle atteigne une hauteur conséquente et de protéger cette dernière contre l'attaque des organismes pathogènes.

Contrairement à la cellulose, la lignine est soluble à chaud dans la soude et n'est pas hydrolysée par les acides. Elle est également amorphe et hydrophobe.

3.2.3. Hémicellulose :

Elle constitue avec la cellulose un composite dont elle est la matrice. L'hémicellulose est hydrophile, hydrolysée par les acides et soluble en milieu alcalin.

3.3. Extraction des fibres naturelles : [12]

Divers procédés existent pour l'extraction des fibres. Ils sont surtout dépendants de la plante à défibrer. Ils peuvent être groupés en quatre :

- Le procédé traditionnel ;
- Le procédé mécanique ;
- Le procédé chimique ;
- Le procédé par explosion vapeur.

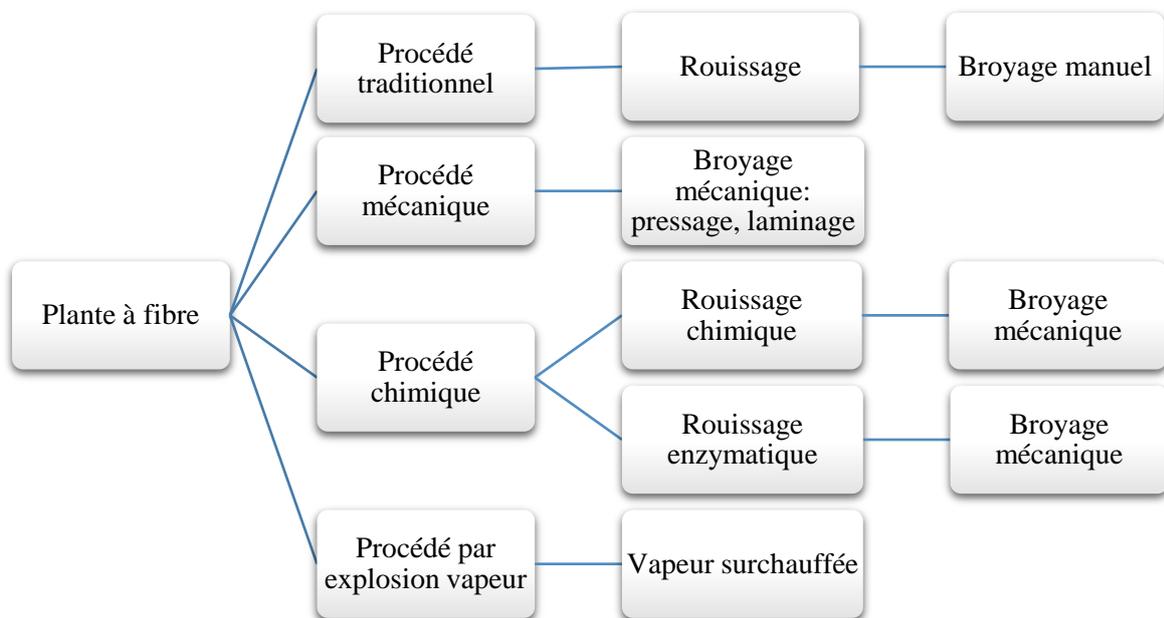


Figure 19. Procédés d'extraction des fibres végétales

Chapitre 3: POLYESTER INSATURÉ

1. Présentation : [2]

Le polyester classique est en général le maléate-fumarate phtalate de propylène glycol 1-2 réticulé par du styrène. Il est désigné sous le sigle U.P.

Il est obtenu par polycondensation du propylène glycol, l'anhydride maléique et phtaléique. L'utilisation du monomère styrène lors de la synthèse de la résine assure le pontage entre les chaînes condensées.

2. Durcissement maximum :

Dans le cas des polyesters classiques, c'est-à-dire des résines non promotorisées, une recuisson supplémentaire peut être nécessaire pour atteindre des propriétés maximales.

3. Catalyseur et accélérateur : [2]

3.1. Réactions radicalaires :

Elles comportent plusieurs phases :

- La phase d'initiation : elle est amorcée par les initiateurs ou encore des catalyseurs ;
- La phase de propagation : la chaîne va croître de proche en proche ;
- La phase de désactivation : elle se caractérise par le couplage des radicaux libres.

3.2. Quelques exemples de catalyseur :

Les principaux catalyseurs les plus utilisés sont du type peroxyde.

On distingue entre autres :

- Le peroxyde de méthyl-éthyl cétone ou PMec ;
- Le peroxyde de méthyl-isobutyl-cétone ou PMic ;
- Le peroxyde de benzoyle ou PBo.

3.3. Système catalyseur – accélérateur :

L'apport d'énergie sous forme de chaleur suffit à décomposer le peroxyde. À froid, pour décomposer le peroxyde, on utilise souvent des accélérateurs métalliques ou organiques. C'est pourquoi l'utilisation d'un accélérateur trouve peu d'intérêt lors des polymérisations à chaud et à moyenne température.

4. Étude du phénomène de polymérisation à froid : [2]

4.1. Influence de la température de travail sur le choix du système catalyseur-accélérateur :

La température à laquelle on travaille joue un rôle important dans le choix des accélérateurs et des catalyseurs.

Le tableau suivant va récapituler les différents paramètres de moulage en fonction de la température de travail.

Tableau 12. Polymérisation à froid [2]

Accélérateurs	Température de travail [°C]		Catalyseur		Type de moulage
	Min	Max	Type	Exemple	
Sels de cobalt	0	30	Peroxydes de cétones et hydroperoxydes	Peroxyde de méthyl-éthyl-cétone	Moulage au contact, projection, centrifugation, injection de résine, presse à froid
Amines tertiaires	-20	30	Peroxydes de diacycle	Peroxyde de benzoyle	

4.2. Influence du taux de catalyseur :

Le taux de catalyseur joue rôle important sur le temps de gel, le temps de pic de polymérisation et l'exothermie.

L'étude de la résine maléate-fumarate de propylène glycol 1-2 et du PMec à 50 % avec un taux de catalyseur donné ont montré que l'optimum pour le taux du catalyseur d'après la courbe ci-dessus se situe entre 1 % et 2 %.

5. Avantages et limites d'utilisation : [2]

Le tableau va rassembler les différents avantages ainsi que les limites d'utilisation de la résine polyester insaturé.

Tableau 13. Présentation des avantages et des limites d'utilisation du polyester insaturé [2]

Avantages	Limites d'utilisation
<ul style="list-style-type: none">➤ Résines bon marché➤ Polyvalence sur le type de moulage➤ Bonnes résistances aux intempéries➤ Bonnes propriétés mécaniques, thermiques et électriques.	<ul style="list-style-type: none">➤ Dosages délicats➤ Exothermie élevée➤ Retrait important pouvant provoquer la déformation des pièces➤ Mauvaise tenue aux acides forts, aux alcalis, aux solvants➤ Inflammabilité

Chapitre 4: BAMBOU

1. Utilisation du bambou à Madagascar : [13]

Le bambou est largement utilisé dans la vie quotidienne des Malgaches surtout ceux qui se trouvent en milieu rural.

Le tableau suivant va donc présenter les espèces couramment utilisées ainsi que leurs utilisations.

Tableau 14. Utilisation du bambou selon l'espèce

Espèce	Utilisation
<i>Bambusa vulgaris</i>	Usages multiples
<i>Hickelia madagascariensis</i>	Paniers
<i>Valiha diffusa</i>	Construction, instruments musicaux
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	Madrier en bambou

Le *bambusa vulgaris* est le plus répandu à Madagascar. En effet, seul le centre de Madagascar ne l'abrite pas.

2. Processus de transformation du bambou : [R]

Selon l'utilisation du bambou, on compte 3 étapes de transformation :

- La collecte ;
- La première transformation ;
- La deuxième transformation.

2.1. Collecte :

2.1.1. Recommandations à adopter pour la coupe :

Ces dernières années, le bambou a fait l'objet de nombreuses recherches et par la même occasion de coupes importantes. Donc, pour éviter toutes surexploitations de cette graminée, certains pays comme l'Inde ont prescrit des recommandations pour la coupe du bambou :

- Aucune coupe n'est autorisée durant la période de floraison du bambou ;

- Au moins, trois chaumes matures en bonnes santés et d'une hauteur de plus de 3 m doivent être laissés par touffe ;
- Aucun prélèvement de rhizome n'est autorisé ;
- La canne doit être coupée à une hauteur d'au moins 15 cm à 30 cm en partant du sol ; sauf dans le cas où il y a un encombrement majeur au niveau de la touffe ;
- Il est recommandé d'utiliser des outils bien aiguisés.

2.1.2. Enlèvement des ramuscules :

Deux possibilités existent pour enlever les ramuscules :

- Dans le sens de leur épanouissement ;
- Dans le sens contraire.

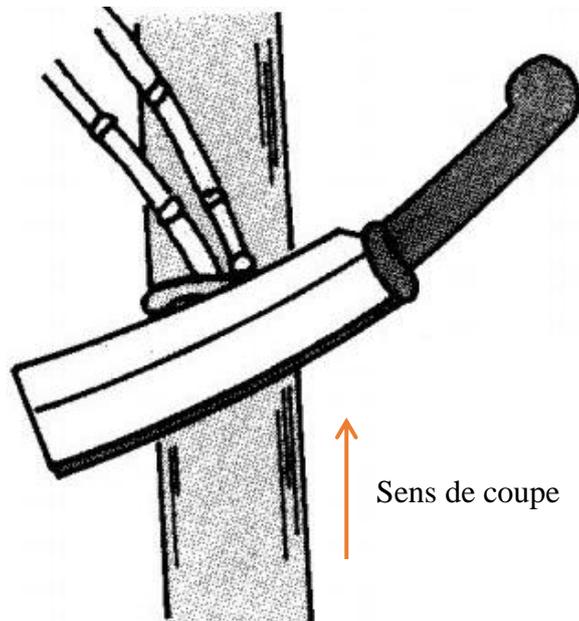


Figure 20. Coupe dans le sens de l'épanouissement des ramuscules

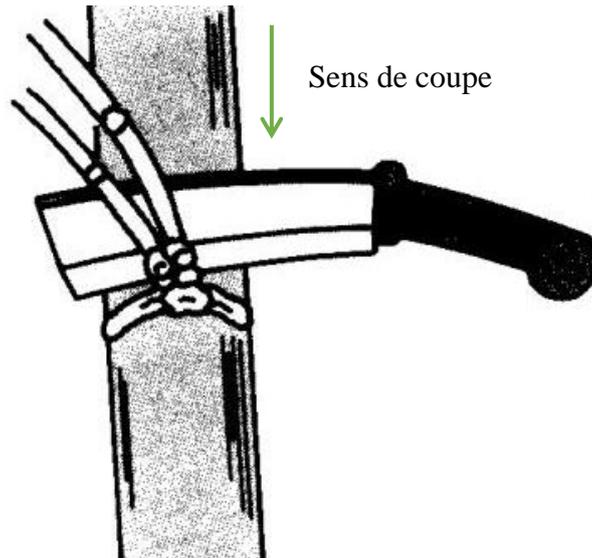


Figure 21. Coupe dans le sens contraire de l'épanouissement

Lors de la coupe des ramuscules, il est alors conseillé d'adopter la première possibilité pour ne pas endommager le chaume.

2.2. Première transformation :

Elle regroupe trois opérations fondamentales :

- Le fendage du bambou ;
- La découpe en lamelle ;
- Le tressage ou le tissage.

2.2.1. Fendage du bambou :

Pour fendre le bambou, il suffit de le couper dans le sens longitudinal. À l'issue du fendage, on obtient des éclisses.

Pour ce faire, il existe diverses méthodes dont en voici quelques-unes.

- La 1re méthode : elle est rudimentaire et elle est surtout utilisée pour des chaumes lourds. On emploie alors des objets métalliques ou en bois en forme de croix.

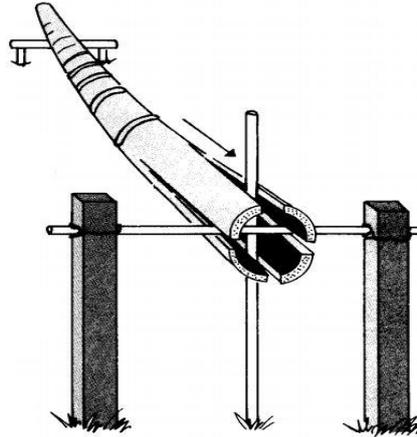


Figure 22. Fendage d'un chaume lourd [R]

- La 2e méthode : on pratique sur le chaume deux entailles perpendiculaires dans lesquelles on place un objet en forme de croix pour maintenir les deux fentes ouvertes.

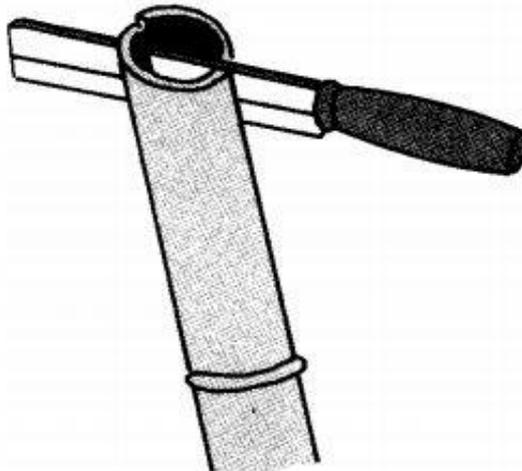


Figure 23. Réalisation de l'entaille [R]

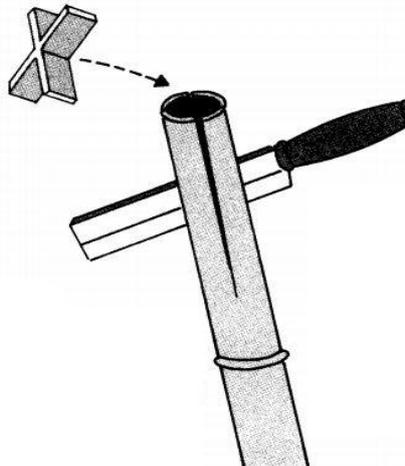


Figure 24. Maintien de l'ouverture de l'entaille [R]

- La 3e méthode : On positionne le chaume à la verticale ou à l'horizontale puis on pratique une incision avec un couteau ou une machette. Une hauteur inférieure à 1m50 peut être travaillée à la verticale. Pour fendre complètement le bambou, on place alors dans l'entaille le couteau puis on appuie dessus en maintenant ce dernier horizontalement.

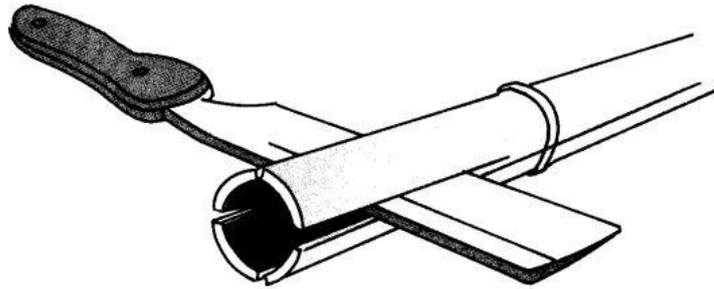


Figure 25. Fendage d'un bambou avec une machette [R]

2.2.2. Découpe des entre-nœuds en lamelle : [14]

Du fait de la structure des fibres à l'intérieur du chaume, on peut obtenir des lattes de largeur ou d'épaisseur différentes.

On pratique une fente à l'aide d'un couteau puis on saisit une extrémité de la latte entre les dents pendant que le couteau glisse le long des fibres. Cette technique est utilisée par les artisans vietnamiens.

2.2.3. Tressage : [14]

Une fois obtenues, les lattes peuvent être tressées, car elles sont souples et résistantes.

Comme les tissus déjà énoncés plus haut, il existe pour le tressage une large gamme de motifs.

Voici quelques conseils pour le tressage :

- Il est préférable de tresser les lattes humides ou mouillées et ensuite procéder au séchage de l'ouvrage réalisé ;
- il est utile, à la fin du tressage, de recourber le bout de la latte et de la faire entrer dans la tresse.

2.3. Seconde transformation : [R]

On y a souvent recours dans le domaine de l'artisanat. Elle rassemble tous les procédés afin d'améliorer la qualité visuelle du chaume.

Ces procédés sont :

- la décoloration ;
- la teinture ;
- la carbonisation ;
- la coloration avec les acides.

Partie II : ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

Chapitre 5: MATERIELS ET METHODES

1. Matériels :

1.1. Présentation des différents matériels utilisés :

Nous présentons ci-contre les matériels utilisés pour la réalisation de cette étude.

Tableau 15. Matériels et leurs utilisations

Matériels	Utilisation
Seau	Mercerisage
Cuvette	
Machette	Découpe des entre-nœuds en lamelle
Marteau	Broyage des fibres
Laminoir	
Meule	Découpe des éprouvettes
Disque diamanté	
Paire de gants	Équipements de Protection Individuelle (EPI)
Paire de lunettes	
Masque	
Balance ± 1 g	Évaluation du rendement, moulage
Balance de précision $\pm 0,0001$ g	Détermination de la masse volumique, taux d'absorption d'eau
Règle, mètre	Mesure de la longueur des fibres
Chronomètre	Mesure de la durée des opérations
Peigne	Cardage des fibres
Presse	Moulage de matériau composite

1.2. Modification au niveau de la presse composite :

1.2.1. Problèmes repérés :

Lors de l'utilisation antérieure de la presse, on a relevé quelques problèmes comme :

- La flexion du plateau de compression ;
- La fuite de résine ;
- La difficulté au niveau du démoulage de la pièce obtenue.

1.2.2. Solutions adoptées :

Par rapport à ces problèmes, on a adopté des mesures pour y remédier. On remarque d'ailleurs une relation entre les deux problèmes. En effet, on peut pallier la perte de résine par la mise en œuvre d'un moule formé de deux parties, mais qui va par contre gêner le démoulage.

Tableau 16. Solutions à chaque problème repéré lors du moulage

Problèmes	Solutions
Flexion du plateau de compression	Réduire la dimension du plateau de compression ;
Fuite de résine	Ajuster les bords inférieurs du cadre
Démoulage	Utiliser une surface intermédiaire entre le moule et la pièce comme l'huile ou la colle transparente pour bureau

1.3. Réalisation du moule :

Le moule est constitué de 3 parties principales. Ce sont :

- La partie supérieure ;
- Le cadre ;
- La partie inférieure.

Les différents éléments constitutifs de chaque partie sont soudés. Les soudures de la partie inférieure sont ébarbées puis meulées pour assurer son emboîtement avec le cadre.



Photo 4. Moule formé par le cadre et la partie inférieure

1.3.1. Amélioration de l'état de surface :

Les défauts dus aux opérations d'usinage sont atténués par l'utilisation de papiers abrasifs. Il s'agit du papier P80 et P40.

1.3.2. Dimensions du matériau composite :

Après le moulage, les dimensions de la pièce sont 200 mm x 180mm x 7mm.

1.4. Sélection des matériaux :

1.4.1. Matrice :

On a choisi comme résine pour la mise en œuvre du composite le polyester orthophtalique insaturé préaccélééré "ULTRASET 694 PA – ORTHO – PREACCELEREE" de la société MCI sise à Tanjombato.

1.4.2. Catalyseur :

Il provient de la même société. Il s'agit du peroxyde de méthyl-éthyl-cétone ou PMec désigné sous le nom commercial butanox M 50. Le taux de catalyseur est fixé à 2 % en masse.

1.4.3. Renfort :

Pour le renfort, on a indiqué dans le tableau 17 les fibres choisies ainsi que leurs origines.

Tableau 17. Origine des fibres étudiées

Type de fibres	Origine
<i>Bambusa vulgaris</i>	Fanandrana – Toamasina
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	
Coco	Toamasina
Sisal	Soavinandriana – Itasy
Raphia	Toamasina
Rachis de coco	Toamasina
Bagasse	Antananarivo

Remarque :

Lors de l'acquisition de la bagasse, on a constaté que quel que soit le mode de broyage de la canne à sucre, elle se rompt au niveau des nœuds. Par conséquent, la longueur maximale des fibres obtenue serait alors égale à celle de l'entre-nœud. Or, comme on le verra plus bas, cette longueur est toujours inférieure à celle de l'éprouvette de flexion pour les types de

composites étudiés. Alors, on peut prévoir qu'il conviendra pour des composites renforcés de mats ou de fibres coupées.

2. Méthodes :

2.1. Extraction des fibres végétales :

2.1.1. Conditionnement à l'extraction :

Les différentes parties de la plante dont on extrait les fibres ont besoin d'être conditionnées pour faciliter leurs imprégnations. En effet, il convient de les écorcer et de diminuer leurs dimensions à savoir la longueur, la largeur et l'épaisseur. Le conditionnement a pour buts de faciliter et diminuer la durée de l'opération d'extraction de fibres.

Le bambou, le rachis et la bourre de coco sont tous les trois écorcés.

Les dimensions du bambou et du rachis pour l'immersion dans la solution de soude sont consignées dans le tableau ci-contre.

Tableau 18. Dimensions des matières premières

Matières premières	Dimensions [cm]		
	Longueur	Largeur	Épaisseur
Bambou	Variable	1	0,5
Rachis		1-1,5	0,5-1

2.1.2. Mercerisage :

Les fibres sont obtenues par mercerisage qui consiste en une immersion dans une solution de soude caustique. La concentration utilisée est obtenue à l'issue du travail antérieur et est de l'ordre de 3 % en masse. La durée de l'immersion est de 24 h

2.1.3. Broyage :

Les fibres sont alors séparées entre elles par laminage ou broyage. Suivant le type des fibres et la dimension des échantillons préparés et immergés, on a pu utiliser ou non un laminoir. Les autres fibres sont broyées manuellement par un marteau.

D'après les données du tableau, seul le bambou peut être laminé. Le rachis et le coco vont être broyés manuellement.

Tableau 19. Modes de broyage des fibres

Laminage	Broyage
Bambou	Coco, rachis

Le broyage va permettre de séparer les différents composants de la fibre entre eux.

2.1.4. 1er Cardage :

À l'issue du broyage, on procède au cardage. Ce premier cardage est un processus très important, car il permet :

- D'isoler les fibres de cellulose ;
- D'enlever les fibres courtes.



Photo 5. Immersion de fibres de coco

2.1.5. Modification de l'état de surface :

Évidemment, elle est réservée aux lattes ainsi qu'aux fibres commerciales. On utilise pour cela un traitement identique à celui pour l'extraction de fibres à savoir une solution de soude caustique à 3 %. La durée du traitement est d'une heure.

2.1.6. Neutralisation :

Après chacune des deux opérations ci-dessus, les fibres ou les lattes sont neutralisées par l'acide acétique et ensuite lavées abondamment à l'eau.

2.2. Taux volumique en renfort et débitage des éprouvettes :

2.2.1. Taux volumique du renfort :

On peut utiliser tout autant le taux volumique que le taux massique pour la mise en œuvre d'un matériau composite. Or, comme on sait déjà la dimension du matériau

que nous rappelons 200 mm x 180mm x 7mm, on peut alors évaluer son volume soit V_c ; et par la même occasion en choisissant un taux en volumique adéquat, le volume que va occuper le renfort V_f . En connaissant sa masse volumique, on peut alors peser les fibres qui vont constituer le renfort.

$$V_f = v_f \cdot V_c$$

$$m_f = \gamma_f \cdot V_f$$

V_f : volume des fibres

V_c : volume du matériau composite ;

v_f : taux volumique en fibre ;

m_f : masse des fibres ;

γ_f : masse volumique des fibres

2.2.2. Débitage des éprouvettes :

Les éprouvettes sont obtenues en utilisant un disque diamanté et leurs dimensions seront vues plus bas en abordant la partie sur les essais mécaniques.

2.3. **Propriétés physiques :**

2.3.1. Mesure de la masse linéique des fibres :

La mesure de la longueur des fibres se fait par une règle ou encore par un mètre.

La masse linéique est un des paramètres pour caractériser les fibres industrielles à l'état de fil ou de mèche. On se contentera de citer des exemples sur ces paramètres comme l'indice de rigidité et la longueur à la rupture.

On va noter T la masse linéique :

$$T = \frac{\text{masse}}{\text{longueur}}$$

Les unités utilisées sont :

- Le tex : masse en gramme de 1000mètres de fil, 1 tex = 1g/km ;
- Le décitex (dtex) ;
- Le denier : la masse en gramme de 9000mètres de fil, 1 tex = 9 den.

2.3.2. Mesure de la masse surfacique ou le grammage :

La mesure de la masse surfacique doit se faire sur un tissu carré. La masse surfacique M est obtenue par :

$$M = 0,1[N_c T_c(1 + e_c) + N_t T_t(1 + e_t)]$$

Avec :

$$e_c = 1 - \left(\frac{l}{l_0}\right) \quad \text{et} \quad l > l_0$$

M : grammage en g/m^2

N_c, N_t : nombre de fils par centimètre respectivement pour la chaîne et la trame

T_c, T_t : masse linéique en tex de la chaîne et de la trame

e_c : taux d'embuvage de la chaîne

l : longueur réelle d'un fil de chaîne extraite du tissu en appliquant une tension suffisante pour supprimer l'ondulation

l_0 : longueur selon la chaîne d'un échantillon de tissu.

2.3.3. Mesure de la masse volumique :

2.3.3.1. Masse volumique des fibres :

Évaluer la masse volumique des fibres par la formule $\rho = \frac{m}{V}$ n'est pas pratique ; c'est pourquoi on adoptera le même processus que lors du travail précédent lors de la recherche de la masse volumique des fibres de bambou. À savoir,

- ▲ Prendre une éprouvette graduée d'une contenance de 50mL ;
- ▲ Peser l'éprouvette m_{ep} ;
- ▲ Ajouter une certaine quantité de l'espèce à analyser (fibre ou charge) ;
- ▲ Peser à nouveau m_{ep+i} ;
- ▲ Ajouter de l'eau de quantité suffisante, de façon à immerger complètement l'espèce à analyser ;
- ▲ Peser le tout m_{totale} ;

- ^ Repérer alors la hauteur d'eau V_{totale} .
- ^ Secouer énergétiquement l'éprouvette pour évacuer les gaz éventuels pouvant fausser la lecture du volume.

On utilise alors les formules :

$$\gamma_c = \frac{m_c}{V_c}$$

Avec :

$$m_c = m_{ep+c} - m_{ep}$$

$$V_{eau} = m_{eau} = m_{totale} - m_{ep+c}$$

$$V_c = V_{totale} - V_{eau}$$

2.3.3.2. Masse volumique des constituants de la matrice :

a) Polyester insaturé :

La masse volumique de la résine est déterminée expérimentalement.

Les protocoles suivis pour la mesure sont les suivants :

- ∞ Avec une seringue, on a prélevé un volume V de 4mL ;
- ∞ Dans un récipient, initialement taré sur la balance de $\pm 0,1$ g, on verse le volume de catalyseur ;
- ∞ On relève la valeur de m_i sur la balance.
- ∞ D'après la formule :

$$\rho = \frac{m_i}{V}$$

m : masse de la résine ;

V : volume de la résine prélevé.

b) Catalyseur :

La masse volumique du catalyseur est fournie avec la fiche technique du catalyseur.

2.3.3.3. Masse volumique des composites :

Elle est directement calculée par la formule :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

m : masse du composite ;

V : volume du composite

2.3.4. Test d'usinabilité et aptitude à l'assemblage :

Le test d'usinabilité comprend toutes les opérations d'usinage comme l'ébarbage, le sciage, etc.

L'aptitude à l'assemblage concerne le vissage, le collage et le boulonnage.

2.3.5. Taux de compression t :

Il est défini comme étant le rapport de la densité initiale avant pressage sur la densité initiale après pressage ou encore le rapport entre la hauteur initiale et la hauteur finale après pressage.

$$t = \frac{h_i}{h_f}$$

t : taux de compression ;

h_i : hauteur initiale avant pressage

h_f : hauteur finale après pressage

2.3.6. Absorption d'eau :

Elle est déterminée par immersion dans l'eau froide. L'éprouvette est un rectangle de 30 mm x 40mm et 7 mm d'épaisseur.

Selon la méthode 1, après étuvage des éprouvettes pendant 5 h à 50 °C, ils sont pesés m_s puis immergée dans l'eau distillée à 25 ± 2 °C pendant 20 h. Puis, les éprouvettes sont à nouveau pesées m_h .

Le taux d'absorption est donné par la formule :

$$H[\%] = \frac{m_h - m_s}{m_s} 100$$

2.4. Essais de flexion à trois pannes :

Ils sont réalisés au sein du bloc technique Ankatso. On réalise l'essai de flexion avec une machine testwell.



Photo 6. Machine utilisée pour l'essai de flexion

Le tableau suivant donne les dimensions de l'éprouvette de flexion pour des composites UD et des composites renforcés de tissus dont toutes les dimensions sont en millimètre. Ces dimensions sont à peu près conformes aux éprouvettes de flexion hors normes selon EN ISO 14125.

Cette norme se réfère principalement aux essais de flexion de composites utilisant les fibres de verre.

Pour un composite à un taux de renfort donné, l'essai est répété 5 fois.

Tableau 20. Dimensions de l'éprouvette de flexion

<i>L</i>	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>h</i>
140±1	200±2	30±2	7±0,2

La contrainte à la rupture et la déformation en surface sont données par les formules :

$$\sigma = \frac{3}{2} \cdot \frac{FL}{bh^2}$$

$$\varepsilon = 6 \frac{wh}{L^2}$$

ε : déformation en surface

L : distance entre appuis

F : charge

h : épaisseur

b : largeur

w : flèche à l'axe neutre

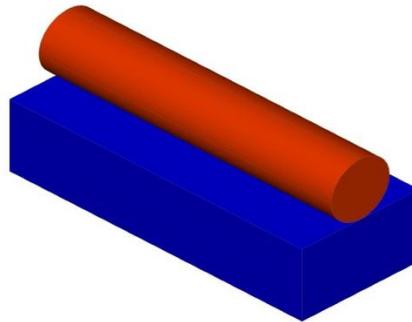


Figure 26. Appui adopté pour l'essai de flexion



Photo 7. Positionnement de l'éprouvette sur les deux appuis



Photo 8. Éprouvette en rupture

Chapitre 6: MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES

1. Mise en œuvre du composite :

La mise en œuvre regroupe quatre procédés majeurs :

- La préparation du renfort ;
- Le Moulage ;
- Le démoulage du composite et le nettoyage du moule ;
- La postcuisson.

1.1. Préparation du renfort :

Elle concerne toutes les étapes précédant le moulage.

1.1.1. Acquisition du renfort :

1.1.1.1. Renfort unidirectionnel :

Selon la disponibilité ou non des fibres sur le marché, certaines fibres sont alors extraites et d'autres achetées.

Le procédé pour l'extraction des fibres est déjà énoncé dans le chapitre précédent.

On va regrouper dans le tableau suivant le mode d'acquisition des fibres.

Tableau 21. Mode d'acquisition des fibres

Fibres extraites	Fibres achetées
Bambou, rachis, coco	Sisal, canne à sucre, raphia



Photo 9. Récolte de bambusa vulgaris



Photo 10. Raphia



Photo 11. Rachis de coco

1.1.1.2. Renfort tissé :

Le bambou subit seulement jusqu'à la première transformation. C'est dire jusqu'à l'obtention des lattes. En effet, les éclisses, dont la longueur correspond à celui de l'entre-nœud et la largeur d'environ 1 cm, vont être fendues dans l'épaisseur.

a) Armure adoptée :

Deux types d'armure sont choisis. Ce sont l'armure taffetas et l'armure satin de 5 à décochement 3.

b) Tissage :

Les bambous à notre disposition sont exempts de nœud et sont stockés depuis 1 mois et demi. On a constaté que tisser directement les lattes à l'état sec peut altérer la qualité du tissu par rupture des fibres.

Pour y remédier et suivant les recommandations pour le tissage, on a immergé les lattes dans l'eau pendant 24 h. Ce traitement a pour but de plus ou moins assouplir les fibres lors du tissage.

La trame et la chaîne sont formées par des lattes de bambou.



Photo 12. Armure taffetas de lattes de bambou



Photo 13. Armure satin de 5 avec décochement 3 de lattes de bambou

1.1.1.3. Renfort composé :

Ce composite est formé par plusieurs couches et par principalement deux types de fibre. C'est une combinaison d'armures unidirectionnelles et d'armures satin de bambou avec des fibres de sisal.

On va étudier un composite renforcé de lattes de bambou et cela suivant la direction x pour l'obtention des lattes.

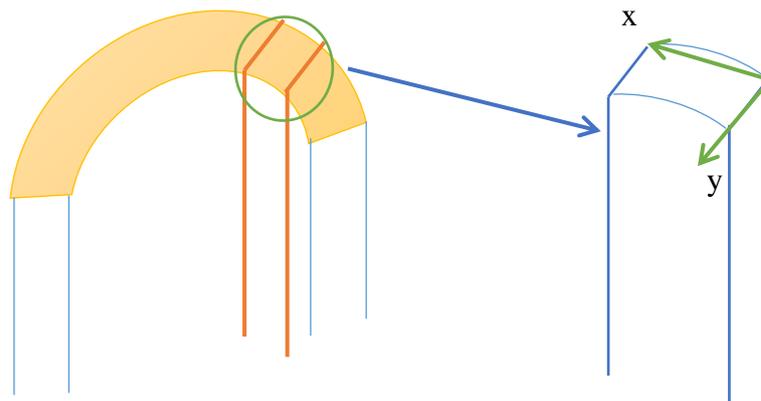


Figure 27. Présentation des deux directions possibles de coupe

Les lattes de bambou sont maintenues parallèlement entre elles par le raphia.

On va mettre en œuvre des composites à 3 couches et à 5 couches dont les orientations respectives sont $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ et $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$. La première et la dernière couche sont en sisal, et les autres couches sont formées par des lattes de bambou.



Photo 14. Armure unidirectionnelle

1.1.2. Traitement des fibres achetées et des tissus :

1.1.2.1. Ire Découpe des renforts

Les fibres longues et les bords des tissus sont coupés à une longueur supérieure à celle du moule à savoir 23cm.

Les fibres sont rassemblées ensemble à l'aide d'un petit caoutchouc pour faciliter de cardage.

1.1.2.2. Alcalisation :

Comme le coïr, les fibres de bambou et de rachis sont extraits à partir de l'hydroxyde de sodium alors elles ne nécessitent plus de traitement alcalin.

Le traitement est identique à celui à l'extraction c'est-à-dire 3 % d'une solution de soude. La durée de l'opération est d'une heure et comme précédemment il est suivi par une neutralisation à l'acide acétique.

Évidemment pour l'étude, certaines fibres ne seront pas traitées expressément.

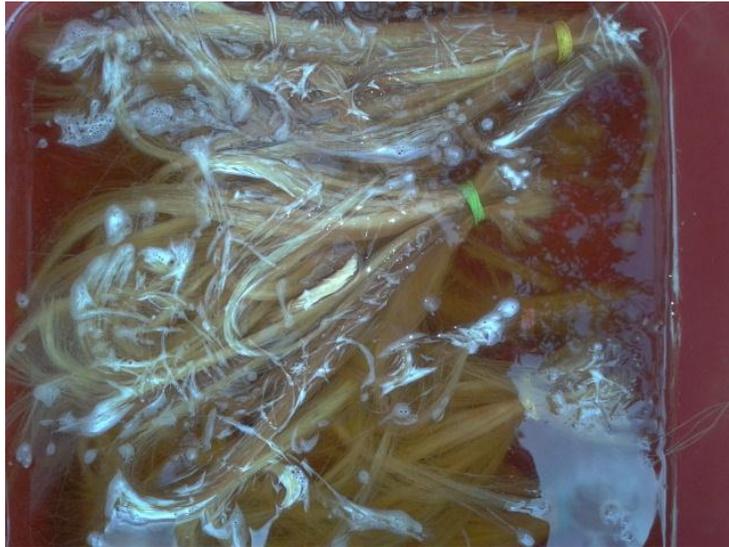


Figure 28. Traitement des fibres de sisal

1.1.2.3. Séchage :

C'est une étape très importante pour optimiser la performance du matériau composite.

Deux modes de séchage ont été utilisés. Ce sont :

- ♣ Le séchage à l'air ambiant ;
- ♣ L'étuvage.

1.2. Moulage :

1.2.1. Application d'agents de démoulage :

Des expériences ont montré que pour faciliter l'opération de démoulage, il convient de combiner deux agents de démoulage :

- Colle transparente ;
- Huile alimentaire.

La colle est appliquée à l'aide d'un pinceau et l'huile avec un chiffon, un mouchoir ou un coton.

Après un grand nombre de moulages, l'huile alimentaire peut remplir à elle seule le rôle d'agent de démoulage.

1.2.2. Mise en place des constituants dans le moule :

1.2.2.1. 2e cardage :

Aussi important que le premier, le second cardage assure l'orientation unidirectionnelle des composites ainsi moulés et la diminution de la largeur des fibres dans le cas du raphia.

1.2.2.2. 2e découpe :

Les fibres et les tissus sont coupés pour les ajuster aux dimensions du moule notamment la longueur de 20cm. Une longueur supérieure à 20 cm entrainerait une légère augmentation dans l'épaisseur.

1.2.2.3. Pesage :

Les renforts sont pesés pour constituer les différentes formulations en taux volumiques. On utilise pour cela une balance $\pm 1g$.

1.2.2.4. Disposition du renfort :

Les fibres pesées sont disposées dans le moule en faisant plus particulièrement attention à l'orientation des fibres.

1.2.2.5. Étalement de la matrice :

La matrice catalysée à 2 % est répartie sur toute la surface du renfort.

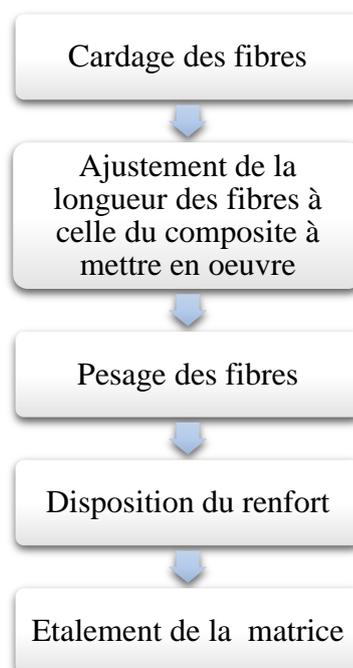


Figure 29. Processus de mise en place des constituants



Photo 15. Mise en place des fibres cardées dans le moule

Pour le cas des composites renforcés de tissus, le processus se résume à trois étapes puisque les tissus n'ont pas besoin d'être cardés.

1.2.2.6. Pressage :

Lors de la conception de la presse dans le travail précédent, on a trouvé que la force de compression était de 4810N. Et comme la pression s'exprime par la formule :

$$P = \frac{F}{S}$$

Donc, pour notre moule qui a une surface de 0,25 m x 0,18 m, la valeur de la pression de moulage est de :

$$P = \frac{4810}{0,25 * 0,18}$$

$$P = 106\ 889Pa$$

$$P = 1,1bar$$

La durée de la pression est de 1 h 30 min

1.3. Démoulage du composite et nettoyage du moule :

À la sortie de la presse, on procède au démoulage du produit fini. Il s'opère manuellement. Le nettoyage du moule se fait également à la main avec un chiffon et un couteau.

1.4. Postcuisson :

Le fabricant de la résine polyester recommande de procéder à une cuisson de 3 h à 80 °C ou 16 h à 40 °C et cela après 24 h de la gélification.

On a opté pour une durée à 5 h et une température de 50 °C.

2. Formulation :

Diverses formulations ont été adoptées pour comparer les composites unidirectionnels, les composites renforcés de tissus et les composites à renfort composé.

2.1. Composite à renfort unidirectionnel :

Les taux de fibres énoncés ici sont des taux volumiques. Les pourcentages étudiés sont de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 25 %, 30 %.

Des moulages pour la mise en œuvre de composites renforcés de 5 % ont été effectués et on a constaté qu'ils ne présentent aucun intérêt vis-à-vis de la comparaison des matériaux composites puisqu'à raison de 5 %, certaines parties du composite vont être exemptes de fibres.

On va alors réduire les taux de renforcement à 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %.

Pour les fibres de rachis, vu la rareté de ces dernières (qui sera détaillée dans la partie renouvellement), on se contentera d'un taux en renfort de 10 % afin de vérifier la possibilité de mettre en œuvre un composite à base de ces fibres.

2.2. Composite renforcé de tissus :

On a cherché à déterminer l'influence de l'utilisation d'un tissu sur les propriétés mécaniques d'un composite ayant un taux de renfort à 20 %.

2.3. Composite à renfort composé :

Il s'agit d'une combinaison des fibres de sisal avec l'armure unidirectionnelle et l'armure satin en cherchant l'influence de leurs utilisations sur le comportement mécanique du composite.

3. Résumé des procédés de mise en œuvre :

Le schéma suivant résume les procédés de mise en œuvre des composites.

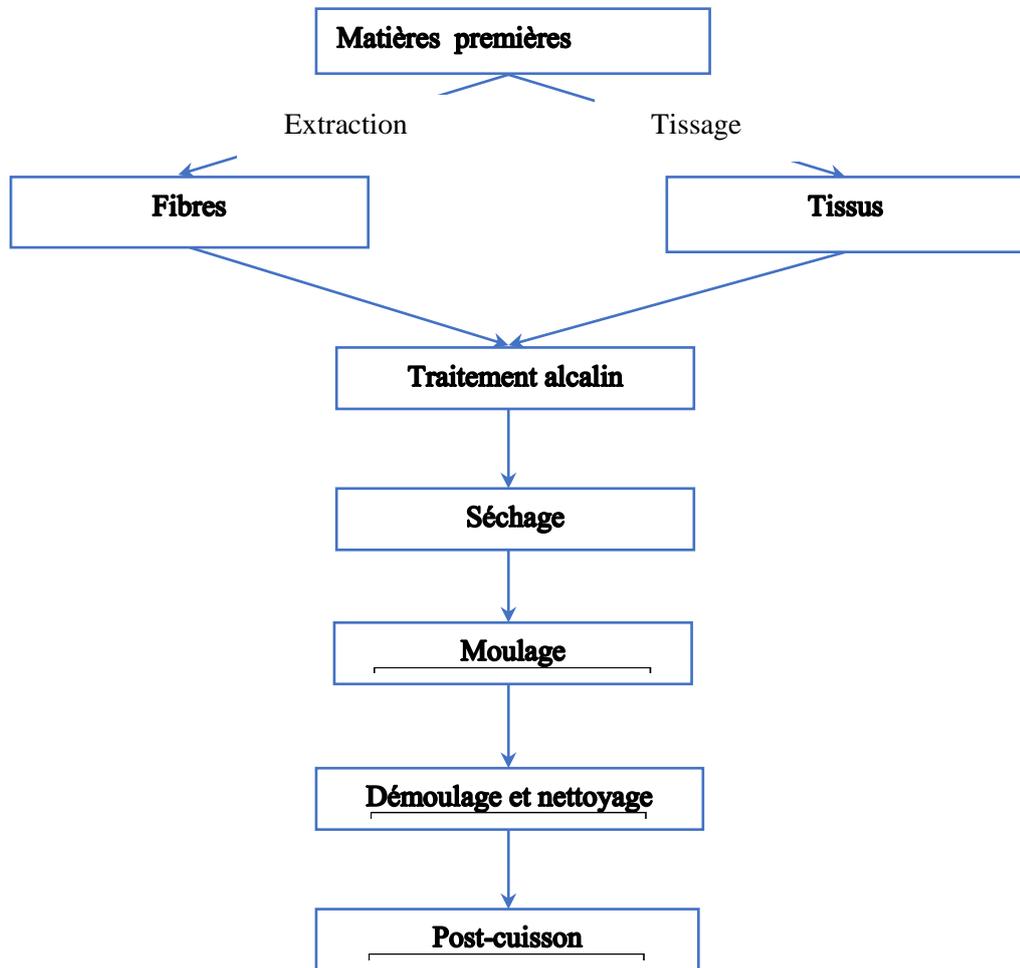


Figure 30. Représentation schématique de la mise en œuvre d'un composite

Chapitre 7: COMPARAISON DES MATÉRIAUX COMPOSITES OBTENUS

1. Caractérisation des matières premières et des composites obtenus :

1.1. Propriétés physiques :

1.1.1. Appréciation visuelle des composites mis en œuvre :

1.1.1.1. Composites UD :

Tous les composites possèdent un bon état de surface et présentent peu de bulles en surface sauf pour les composites renforcés de raphia. En effet, lors du moulage, les bulles d'air entre les fibres de raphia restent emprisonner dans le composite.



Photo 16. Composite renforcé de fibres de sisal à 30 %



Photo 17. Composite renforcé de coïr à 15 %

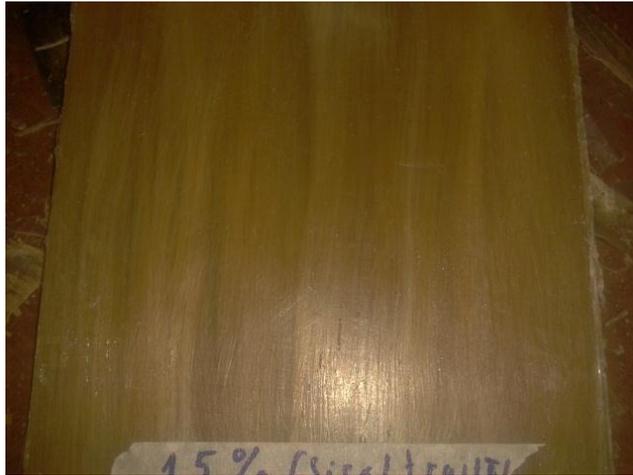


Photo 18. Composite renforcé de fibres de sisal traité à 15 %



Photo 19. Composite renforcé de fibres de bambusa vulgaris à 15 %



Photo 20. Composite renforcé de raphia à 20 %



Photo 21. Défauts de surface des composites renforcés de raphia

1.1.1.2. Composites renforcés de tissus :

Ces composites ont tendance à se courber puisque les deux tissus à taffetas et satin ne sont pas planes. Et suivant l'armure du tissu, on distingue deux formes.



Photo 22. Composite renforcé de tissu à armure taffetas



Photo 23. Composite renforcé de tissu à armure satin



Photo 24. Composite à armure satin

1.1.2. Longueur des fibres acquises et couleur des fibres :

Il sert surtout à évaluer la possibilité de réalisation de pièces à grande dimension.

Dans le tableau suivant, toutes les dimensions sont en centimètre.

Tableau 22. Longueur L des fibres végétales acquises

Types de fibre	Longueur [cm]
Bambou 1	30 – 34
Bambou 2	34 - 40
Coco	21 – 25
Sisal	110 - 120
Sisal traité	
Raphia	100 - 120
Raphia traité	
Rachis de coco	30 - 50

Par évaluation visuelle, on obtient le tableau suivant qui récapitule la couleur des différentes fibres obtenues.

Tableau 23. Couleur des fibres végétales traitées

Types de fibres	Couleur
Bambou 1	Jaune
Bambou 2	Jaune-orange
Coco	Jaune, marron, orange
Sisal	Blanche
Sisal traité	Jaune, orange
Raphia	Jaune
Raphia traité	Orange
Rachis de coco	Marron

1.1.3. Différences entre les deux espèces de bambou :

Les deux espèces déjà citées plus hauts se différencient par la longueur et l'épaisseur des entre-nœuds. Les mesures ont été faites jusqu'aux entre-nœuds N° 7 à partir de la base.

Tableau 24. Caractéristique des entre-nœuds des deux espèces de bambou

Espèce	Longueur [mm]		Épaisseur [mm]	
	Minimale	Maximale	Minimale	Maximale
Bambou 1	300 ± 5	335 ± 5	10 ± 2	15 ± 2
Bambou 2	340 ± 2	403 ± 3	10 ± 2	12 ± 2

1.1.4. Masse linéique :

Sa détermination permettra de calculer la masse surfacique des tissus de fibres.

On a pesé alors 10 lattes obtenues à partir des éclisses d'un même nœud divisé dans son épaisseur ayant 0,340 m de longueur.

Tableau 25. Masse linéique des éclisses de bambou

Latte	Masse [g]	Masse linéique [g/m]	Masse linéique [tex]
N° 1	1,3522	3,97706	3977,06
N° 2	1,4215	4,18088	4180,88
N° 3	1,6211	4,76794	4767,94
N° 4	1,2481	3,67088	3670,88
N° 5	1,2627	3,71382	3713,82
N° 6	1,3051	3,83852	3838,52
N° 7	1,9033	5,59794	5597,94
N° 8	1,5994	4,70411	4704,11
N° 9	1,6660	4,9	4900
N° 10	1,5158	4,45759	4457,59
Moyenne	1,48952	4,380874	4380,87

1.1.5. Masse surfacique :

Elle est utile pour caractériser les tissus de fibres.

Tableau 26. Caractéristiques des tissus de fibres

	Nombre de fils par cm		Masse linéique [tex]		Longueur réelle l [cm]		Longueur l_0 [cm]		Taux d'embuvage e	
	Chaîne	Trame	Chaîne	Trame	Chaîne	Trame	Chaîne	Trame	Chaîne	Trame
UD	1	0	4380,87		20	-	20	-	0	-
Satin	1	1			19,7	19,6	19,5	19,5	-0,010	-0,005

Tableau 27. Masse surfacique des tissus

Armure	Masse surfacique [g/m ²]
UD	438
Satin	869

1.1.6. Masse volumique :

Le tableau suivant donne la valeur de la masse volumique des fibres végétales, des constituants de la matrice et celle des composites.

La masse volumique du catalyseur donnée sur la fiche technique est de l'ordre de $1,18g/cm^3$.

Tableau 28. Masse volumique des fibres végétales

Types de fibres	Masse volumique [g/cm^3]					
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Moyenne
Bambou 1	1,391	1,498	1,405	1,233	1,197	1,345
Bambou 2	1,345	1,527	1,285	1,269	1,259	1,337
Coco	1,098	1,097	0,961	1,150	1,155	1,092
Sisal	1,320	1,200	1,986	1,635	1,551	1,539
Sisal traité	1,939	1,515	1,384	1,882	1,882	1,689
Raphia	0,285	0,231	0,389	0,276	0,334	0,303
Raphia traité	1,108	0,863	1,184	0,748	1,032	0,987
Rachis de coco	1,593	1,594	1,926	2,260	1,625	1,799

Tableau 29. Masse volumique des constituants de la matrice

Constituant	Masse volumique [g/cm^3]					
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Moyenne
U.P	1,088	1,095	1,0959	1,097	1,093	1,094
Catalyseur	-	-	-	-	-	1,18

Tableau 30. Masse volumique des composites UD

Types de Composite	Masse volumique [g/cm^3]					
	0 %	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %
Résine pure	1,133	-	-	-	-	-
Composite B₁	-	1,172	1,192	1,238	1,274	1,301
Composite B₂	-	1,161	1,181	1,212	1,264	1,298
Composite C	-	1,125	1,136	1,147	1,180	1,219
Composite S	-	1,217	1,231	1,288	1,323	1,507
Composite S_t	-	1,251	1,263	1,297	1,342	1,517
Composite R	-	1,114	1,110	1,105	1,102	1,1
Composite R_t	-	1,125	1,119	1,113	1,111	1,107
Composite R_c	-	1,270	-	-	-	-

Tableau 31. Masse volumique des composites à renfort tissé et à renfort composé

Types de Composite	Masse volumique [g/cm ³]
Composite T	1,157
Composite Co1	1,150
Composite Co 2	1,217
Composite Co3	1,190

1.1.7. Test d'usinage et aptitude à l'assemblage :

Les tests suivants ont été réalisés sur des matériaux composites UD jusqu'à un taux en renfort à 30 %, des composites renforcés de tissu et des composites à renfort composé.

Tableau 32. Test d'usinage

Usinage	Possibilité
Ébarbage	Possible
Sciage	Possible
Perçage	Possible
Ponçage	Impossible

Tableau 33. Aptitude à l'assemblage

Assemblage	Possibilité
Vissage	Impossible
Collage	Possible
Boulonnage	Possible

1.1.8. Taux de compression

La hauteur finale des composites est fixée à 7mm. Seule la hauteur initiale varie en fonction du type de fibre.

Tableau 34. Taux de compression pour un taux de renfort à 30 %

Type de fibre	Hauteur initiale h_i	Hauteur finale h_f	Taux de compression
Bambou 1 et 2	37	7	5,29
Sisal natif et traité	45		6,43
Coco	37		5,29
Rachis	35		5
Refus 1	43		6,14
Refus 2	43		3,14

A raison d'un taux de compression de 6,43, l'obtention de composites renforcés de fibres de sisal nécessite donc davantage de pression.

1.1.9. Absorption d'eau :

Les résultats de l'absorption en eau sont évalués en pourcentage et sont donnés dans le tableau 34 :

Tableau 35. Taux d'absorption en eau des composites

Composites		Taux d'absorption en eau [%]			
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
Unidirectionnels	30% B ₁	1,22	1,37	1,21	1,27
	30% B ₂	1,85	1,54	1,52	1,64
	30% C	4,65	3,39	2,90	3,65
	20% S	4,90	3,03	5,49	4,47
	30% S	3,47	3,52	5,02	4,00
	30% S _t	4,72	4,45	5,51	4,89
	30% R	2,58	2,19	3,18	7,95
	30% R _t	3,12	2,74	3,46	3,11
	10% R _c	1,67	1,58	1,23	1,49
Composés	Co1	7,21	5,2	4,12	5,51
	Co2	3,78	6,68	5,50	5,32
	Co3	11,13	9,2	7,31	9,21
Parkex		12,41	11,94	11,80	12,05
Résine pure		0,58	0,40	0,34	0,44

1.2. Propriétés mécaniques :

1.2.1. Propriétés mécaniques théoriques des fibres végétales étudiées :

Comme il est difficile, voire impossible, d'évaluer expérimentalement les propriétés mécaniques des fibres végétales avec les moyens techniques dont on dispose ; alors on s'est contenté de faire une approche bibliographique du sujet.

Tableau 36. Propriétés mécaniques des fibres végétales [10]

Fibre	Déformation [%]	Résistance à la rupture [MPa]
Bambou	2	500 – 740
Sisal	2 – 5	300 – 500
Coco	20 – 40	150 – 180
Raphia	-	-

1.2.2. Essais de flexion à trois points :

L'essai de flexion à trois points donne la contrainte à la rupture et la déformation en surface des éprouvettes sollicitées.

1.2.2.1. Contrainte à la rupture en flexion :

a) *Composites à renfort unidirectionnel :*

Les résultats de l'essai de flexion des composites UD sont consignés dans les tableaux suivants :

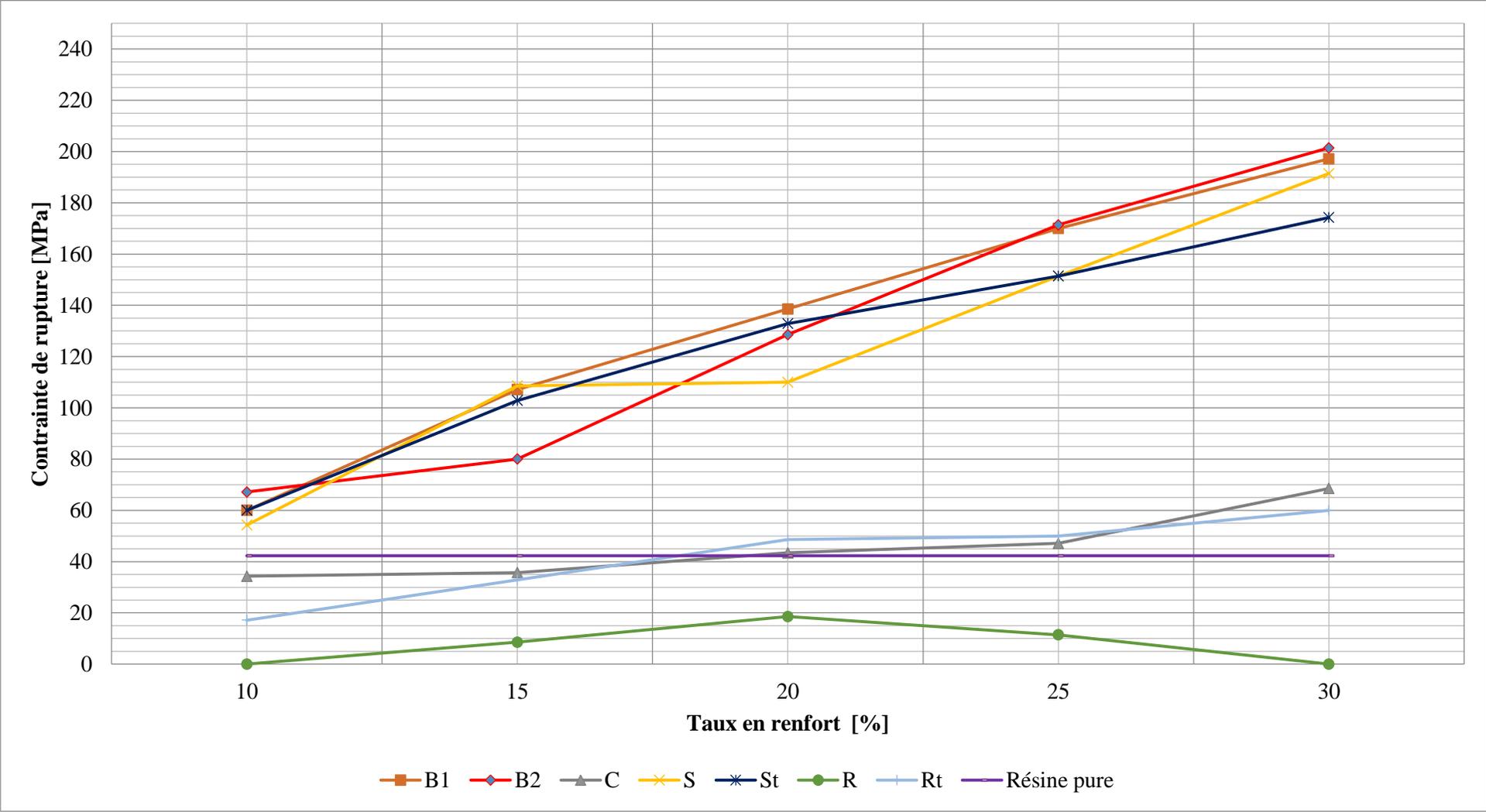
Tableau 37. Désignation des différentes fibres végétales

Fibre	Désignation
<i>Bambusa vulgaris</i>	B ₁
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	B ₂
Coco	C
Sisal	S
Sisal traité	S _t
Raphia	R
Raphia traité	R _t
Rachis	R _c

Tableau 38. Contrainte à la rupture des composites unidirectionnels UD

Types de composites	Taux de renfort [%]	Contrainte à la rupture σ [MPa]					Valeur adoptée
		Essai N° 1	Essai N° 2	Essai N° 3	Essai N° 4	Essai N° 5	
Résine pure	0	42,9	44,3	44,3	41,4	38,6	42,3
Composite B₁	10	50	64,3	71,4	50	64,3	60
	15	114,3	100	107,1	100	114,3	107,1
	20	121,4	128,6	142,9	142,9	157,1	138,6
	25	200	142,9	171,4	142,9	192,9	170
	30	185,7	185,7	200	200	214,3	197,1
Composite B₂	10	71,4	57,1	71,4	64,3	71,4	67,1
	15	71,4	71,4	85,7	100	71,4	80
	20	128,6	128,6	142,9	128,6	114,3	128,6
	25	171,4	185,7	171,4	171,4	157,1	171,4
	30	185,7	185,7	200	214,3	221,4	201,4
Composite C	10	28,6	28,6	35,7	42,9	35,7	34,3
	15	28,5	35,7	35,7	35,7	42,9	35,7
	20	35,7	38,6	50	42,9	50	43,4
	25	57,1	35,7	50	42,9	50	47,1
	30	64,3	71,4	71,4	71,4	64,3	68,6
Composite S	10	57,1	57,1	57,1	50	50	54,3
	15	114,3	107,1	128,6	92,9	100	108,6
	20	128,6	107,1	114n3	100	100	110
	25	135,7	135,7	171,4	171,4	142,9	151,4
	30	185,7	228,6	171,4	157,1	214,3	191,4
Composite S_t	10	50	57,1	71,4	50	71,4	60
	15	85,7	121,4	114,3	107,1	85,7	102,9
	20	128,6	142,9	142,90142	128,6	121,4	132,9
	25	135,7	135,7	171,4	171,4	142,9	151,4
	30	171,4	185,7	185,7	171,4	157,1	174,3
Composite R	10	-	-	-	-	-	-
	15	14,3	14,3	-	-	14,3	8,6
	20	14,3	21,4	21,4	14,2	21,4	18,6
	25	14,3	-	-	14,3	28,6	11,4
	30	-	-	-	-	-	-
Composite R_t	10	42,9	42,9	-	-	-	17,1
	15	35,7	28,6	28,6	35,7	35,7	32,8
	20	42,9	42,9	57,1	42,9	57,1	48,6
	25	50	57,1	50	42,9	50	50
	30	71,4	57,1	57,1	57,1	57,1	60
Composite R_C	10	57,1	57,1	57,1	50	57,1	55

Comparaison de matériaux composites renforcés de fibres végétales



Graphique 1. Contrainte à la rupture des composites unidirectionnels en fonction du taux en renfort

b) Composites à renfort tissé :

Seul le composite renforcé par deux couches d'armure satin a subi l'essai de flexion à 3 points en raison de la déformation des composites renforcés respectivement par une couche d'armure taffetas et satin.

Tableau 39. Contrainte à la rupture du composite renforcé par deux couches d'armure satin

Types de composite	Contrainte à la rupture σ [MPa]					Valeur adoptée
	Essai N° 1	Essai N° 2	Essai N° 3	Essai N° 4	Essai N° 5	
Composite T	71,4	85,7	71,4	100	85,7	82,9

c) Composites à renfort composé :

Des composites à trois couches et à cinq couches ont été mis en œuvre à partir des fibres de sisal à 20 %.

Tableau 40. Désignation des composites à renfort composé

Désignation	Composites	Structure	Architecture
Co1	3 couches	Sisal – armure unidirectionnelle - Sisal	0°/90°/0°
Co2		Sisal – armure satin – Sisal	
Co3	5 couches	Sisal – 3 armures unidirectionnelles – Sisal	0°/90°/0°/90°/0°

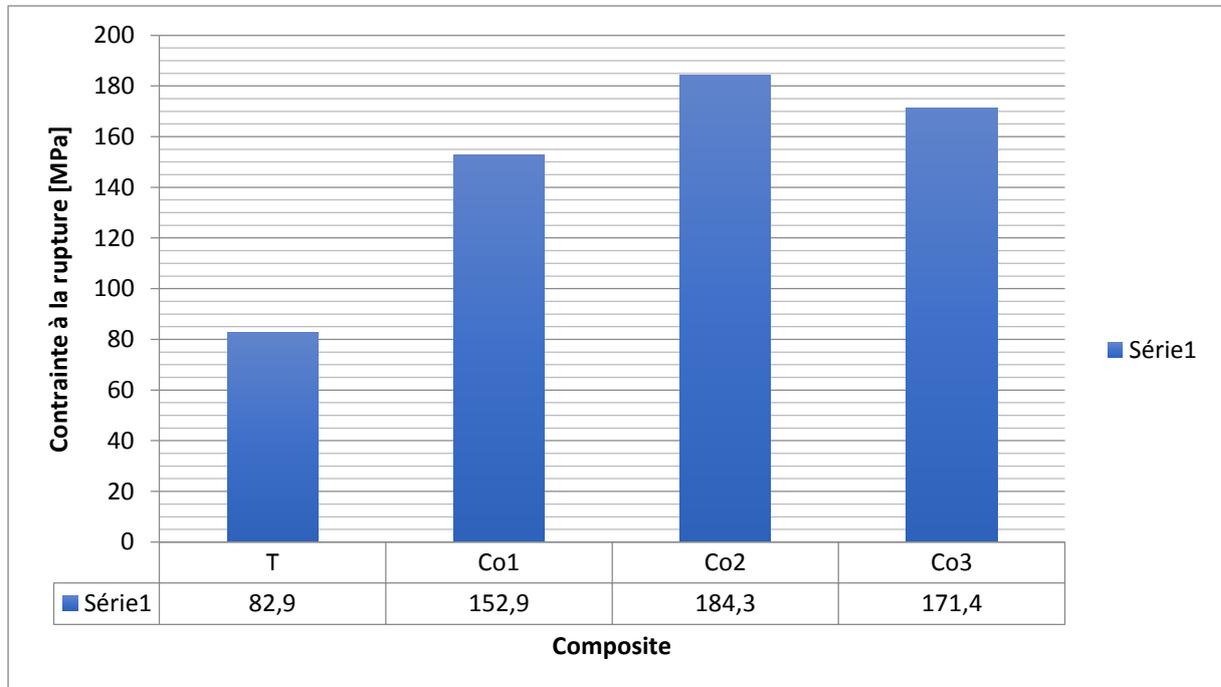
Tableau 41. Contrainte à la rupture des composites à renfort composé

Types de composites	Contrainte à la rupture σ [MPa]					Valeur adoptée
	Essai N° 1	Essai N° 2	Essai N° 3	Essai N° 4	Essai N° 5	
Composite Co1	164,3	142,9	142,9	142,9	171,4	152,9
Composite Co2	185,7	178,6	200	185,7	171,4	184,3
Composite Co3	157,1	171,4	142,9	185,7	200	171,4

Comparaison de matériaux composites renforcés de fibres végétales

d) Comparaison de la contrainte à la rupture des composites à renfort tissé et composé :

À partir des données ci-dessus, on peut tracer un diagramme permettant de mieux comparer les deux types de composite.



Graphique 2. *Contrainte à la rupture des composites à renfort tissé et à renfort composé*

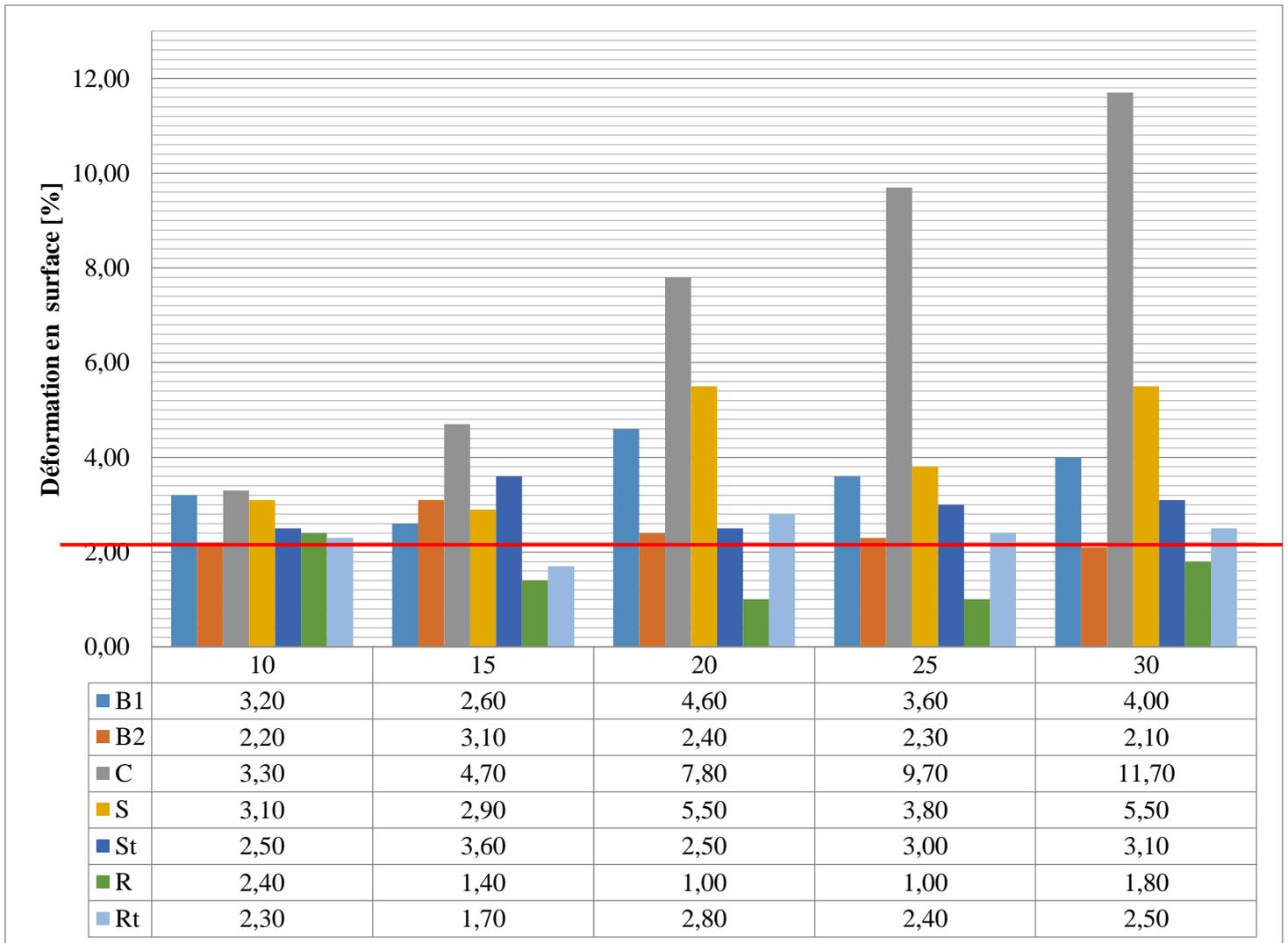
1.2.2.2. Déformation en surface :

a) *Composites à renfort unidirectionnel :*

Les différentes déformations en surface des composites UD sont consignées dans le tableau suivant.

Tableau 42. Déformation en surface des composites U.D

Types de composites	Taux de renfort [%]	Déformation en surface ε [%]					
		Essai N° 1	Essai N° 2	Essai N° 3	Essai N° 4	Essai N° 5	Valeur adoptée
Résine pure	0	2,4	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2
Composite B ₁	10	3,6	3,6	3,2	2,8	2,8	3,2
	15	2,8	2,4	2,6	2,8	2,6	2,6
	20	4,5	4,7	4,5	4,9	4,3	4,6
	25	3,9	3,2	3,4	3,9	3,9	3,6
	30	4,1	4,3	4,1	3,2	4,3	4
Composite B ₂	10	2,4	2,1	2,4	1,9	2,4	2,2
	15	3,0	3,0	3,0	3,2	3,2	3,1
	20	2,4	2,4	2,1	2,6	2,8	2,4
	25	2,1	2,4	2,4	2,1	2,4	2,3
	30	2,1	1,9	2,1	2,4	1,9	2,1
Composite C	10	3,9	3,2	3,0	3,2	3	3,3
	15	5,4	4,7	4,3	4,3	4,7	4,7
	20	6,4	7,1	8,6	9,6	7,5	7,8
	25	10,7	8,6	9	10,3	9,9	9,7
	30	10,7	11,8	12,9	11,8	11,1	11,7
Composite S	10	2,8	3,4	3,2	3,2	2,8	3,1
	15	2,8	2,6	3,2	3,2	2,8	2,9
	20	4,9	5,6	4,9	5,1	5,6	5,2
	25	4,3	3,2	4,3	3,9	3,2	3,8
	30	5,8	5,8	5,6	5,6	4,9	5,5
Composite S _t	10	2,6	2,1	3,2	2,1	2,6	2,5
	15	3	4,1	3,6	3,9	3,4	3,6
	20	2,8	2,6	2,4	2,6	2,4	2,5
	25	3,2	3,2	2,6	2,4	3,4	3
	30	3,2	3,2	2,8	3,4	3	3,1
Composite R	10	2,4	2,4	2,6	2,4	2,1	2,4
	15	1,3	1,3	1,7	1,5	1,3	1,4
	20	0,9	1,1	1,1	1,1	1,1	1
	25	1,1	1,1	0,9	0,6	1,3	1
	30	1,9	1,9	1,3	1,9	1,9	1,8
Composite R _t	10	2,1	2,1	2,1	2,8	2,1	2,3
	15	2,1	1,7	1,7	1,3	1,5	1,7
	20	2,6	3,2	2,8	2,8	2,6	2,8
	25	2,1	2,4	2,6	2,6	2,4	2,4
	30	2,1	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5
Composite R _c	10	1,5	1,7	1,5	1,5	1,9	1,6



Graphique 3. Déformation en surface des composites unidirectionnels

b) Composites à renfort tissé et à renfort composé :

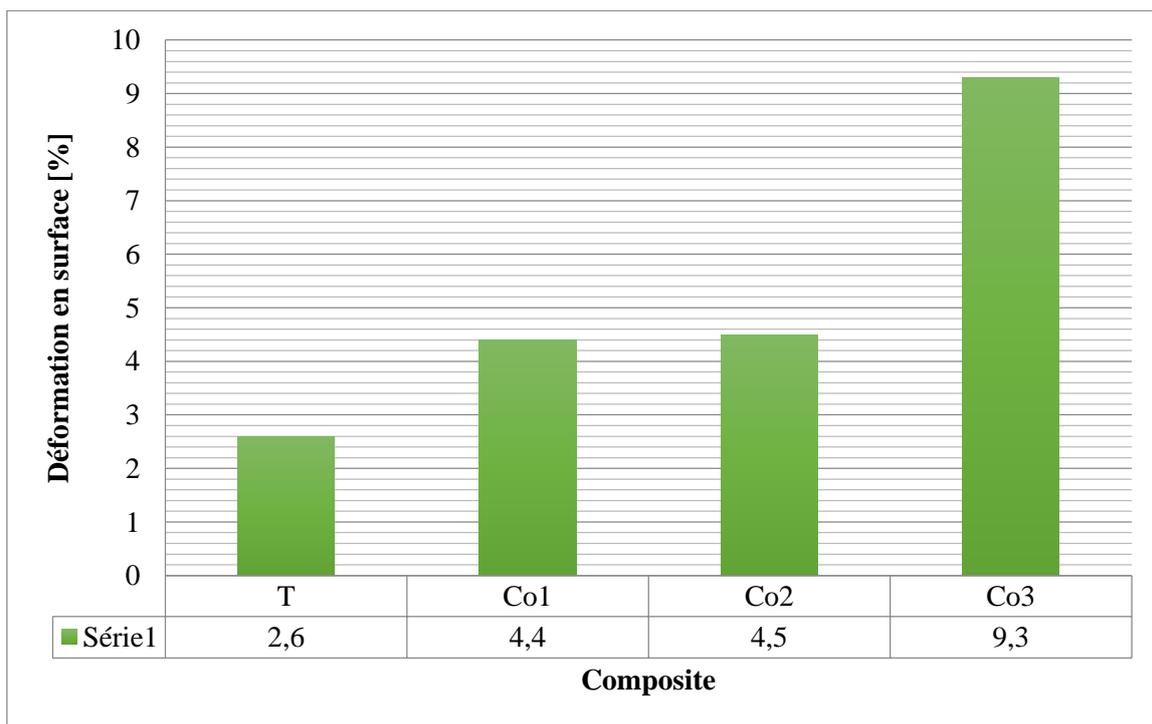
La déformation en surface est très importante pour évaluer l'importance du renforcement par des tissus.

Tableau 43. Déformation en surface du composite renforcé par deux couches d'armure satin

Types de composite	Déformation ϵ [%]					Valeur adoptée
	Essai N° 1	Essai N° 2	Essai N° 3	Essai N° 4	Essai N° 5	
Composite T	2,1	2,6	2,1	3,2	3	2,6

Tableau 44. Déformation en surface des composites à renfort composé

Types de composites	Déformation en surface ε [%]					Valeur adoptée
	Essai N° 1	Essai N° 2	Essai N° 3	Essai N° 4	Essai N° 5	
Composite Co1	4,7	4,3	4,5	4,3	4,3	4,4
Composite Co2	4,3	4,7	4,5	4,7	4,3	4,5
Composite Co3	8,6	9,4	8,8	9,9	9,6	9,3



Graphique 4. Déformation en surface des composites à renfort tissé et à renfort composé

1.3. Composition chimique :

La composition chimique est en corrélation directe avec les propriétés mécaniques des fibres ou plus précisément avec la teneur en cellulose.

Tableau 45. Composition chimique des fibres étudiées

Fibre	Cellulose [%]	Lignine [%]	Hémicellulose [%]	Pectine [%]	Cendre [%]	Référence
Bambou	46 - 58	20 - 22	16 - 20	8 - 10	-	[10]
Sisal	47 - 78	7 - 11	10 - 24	10	0,6 - 1	
Coco	32 - 43	40 - 45	0,15 - 0,25	-	1,44	[3]
Raphia	58,5	26,8	13,4	-	-	[12]

2. Valorisation des sous-produits et réalisation de l'essai flexion

Les sous-produits énoncés ici sont les résidus du processus d'extraction des fibres végétales, dont le bambou, le coco et le rachis.

Ils sont constitués par les résidus du 1^{er} et du 2^e cardage. Ils peuvent être incorporés à la matrice polyester pour constituer des composites renforcés de mat de fibres.

Les résultats de l'essai de flexion à trois points, pour une masse de 40g des refus 1 et 34 g des refus 2 sont les suivants :

Tableau 46. Résultats de l'essai de flexion des refus 1 et 2

Type de renfort	Valeur moyenne	
	Contrainte à la rupture [MPa]	Déformation en surface [%]
Refus 1	21,4	1,1
Refus 2	32,9	1,8

3. Propriétés de quelques matériaux :

3.1. Description :

Le parkex est en bois massif en palissandre d'épaisseur 10mm.

La tuile artisanale est fabriquée à partir d'argile puis subit une cuisson à 800 °C.

La tuile industrielle est du type béton.

Les fibres de verre en question constituent un composite de 3 mm d'épaisseur composé d'un mat 300g/m² et d'un tissu 450g/m².

3.2. Origine :

Il s'avère indispensable d'indiquer l'origine des matériaux sélectionnés pour apporter plus de précision sur la caractérisation.

Tableau 47. Origine des matériaux caractérisés

Matériau	Origine
Parkex	Anosizato
Tuile artisanale	
Tuile industrielle	-
Fibre de verre	Mise en œuvre

3.3. Propriétés physiques :

On a déterminé les caractéristiques d'une tuile artisanale et industrielle, d'une parkex, et d'un composite renforcé de fibres de verre.

3.3.1. Masse :

La masse de chacun de ces matériaux est donnée ci-contre.

Tableau 48. Masse des matériaux couramment utilisés

Matériau	Masse [g]
Parkex	60
Tuile artisanale	500 à 550
Tuile industrielle	4500
Fibre de verre	-

3.3.2. Test d'usinabilité et aptitude à l'assemblage :

Ils sont réalisés pour étudier les différentes mises en œuvre et notamment la technique de pose de chaque matériau.

Tableau 49. Test d'usinabilité et aptitude à l'assemblage des matériaux courants

Matériau	Usinage possible	Assemblage possible
Parkex	Coupe, perçage, ponçage	Collage, Vissage, boulonnage
Tuile en argile artisanale	Aucun	Collage
Tuile industrielle	Aucun	Collage
Fibre de verre	Coupe, perçage	Collage, boulonnage

3.4. Propriétés mécaniques :

Les dimensions de la fibre de verre et du parkex sont celles de l'éprouvette de flexion déjà énoncée plus haut. Tandis qu'on a directement soumis la tuile artisanale à l'essai de flexion.

Tableau 50. Résultats de l'essai de flexion de quelques matériaux

		Matériau			
		Parhex	Tuile en argile artisanale	Tuile en béton industrielle	Fibre de verre
Contrainte à la rupture [MPa]	Essai N° 1	87,5	-	-	155,6
	Essai N° 2	101,5	-	-	77,8
	Essai N° 3	140	-	-	155,6
	Moyenne	109,7	-	-	129,6
Déformation en surface [%]	Essai N° 1	2,1	-	-	4,6
	Essai N° 2	4	-	-	6
	Essai N° 3	3,1	-	-	4,1
	Moyenne	3,1	-	-	4,9
Poids moyens correspondants à la rupture [N]		1570	-	1800	170

4. Résultats et discussions :

4.1. Contrainte à la rupture :

4.1.1. Composites UD :

On remarque, premièrement, d'après le graphique 1 relatif aux composites unidirectionnels que l'augmentation du taux en renfort entraîne proportionnellement l'augmentation de contrainte à la rupture. Et deuxièmement, le graphique regroupe trois zones :

- Les zones en dessous de la courbe de la résine pure polymérisée ;
- Les zones proches de la courbe de la résine pure polymérisée ;
- Les zones au-dessus de la courbe de la résine non renforcée.

Pour la première zone, les fibres de raphia non traitées possèdent une contrainte à la rupture inférieure à celle de la résine pure polymérisée. Il en est de même pour les fibres de raphia traité et de coco pour des taux en renfort inférieurs entre 17,5 % et 20 %. Ce résultat est contradictoire aux données (tableau 45), les fibres de raphia présentant une teneur en cellulose plus élevée devraient avoir une contrainte à la rupture supérieure à celle des fibres de coco. Mais l'appréciation visuelle a montré qu'en effet, les composites renforcés de raphia présentent à l'intérieur un nombre important de bulles, ce qui influence sa performance mécanique.

Pour la seconde zone, les taux supérieurs à 20 %, les fibres de coco et de raphia traité ont une contrainte supérieure à celle de la résine. Ce qui traduit, d'un côté, l'efficacité du traitement alcalin sur les fibres ; et de l'autre côté, l'influence des bulles sur la performance mécanique des fibres de raphia.

Pour la dernière zone, on constate que les quatre courbes présentent à peu près la même allure. Sur les taux en renfort étudiés, le bambou 1 à savoir le *bambusa vulgaris* possède une bonne résistance à la rupture. Entre le bambou 1 et le bambou 2, le plus grand écart est de 34 %, ce qui peut être dû à la variation inter-espèce de chacun des bambous. En effet, les propriétés mécaniques du bambou varient suivant la position des fibres dans le bambou. Les fibres de bambou sélectionné sont un mélange de fibres de la paroi interne ou externe. Mais dans cette étude, on n'a pas tenu compte de la position de ces fibres vis-à-vis des entre-nœuds. Pour étudier le comportement mécanique, par l'essai de flexion des quatre fibres, on a décidé d'étudier les courbes de tendance linéaire.

Pour de faibles teneurs en renfort, inférieures à 17,5 %, après les fibres de bambou 1, les fibres de sisal traité surpassent les fibres de sisal non traité à la soude et les fibres de bambou 2.

Pour un taux en fibre supérieur à 17,5 %, la résistance à la rupture par traction des fibres de bambou 2 se rapproche de celle des fibres de bambou 1.

Pour les fibres de sisal avec des taux en renfort supérieurs à 22,5 %, les fibres non traitées avec la soude présentent une meilleure contrainte à la rupture que les fibres traitées. En fait, les fibres de sisal fraîchement extraites sont lavées avec du détergent pour éliminer tout risque de coloration provenant des feuilles. Le détergent pourrait alors améliorer l'état de surface des fibres. Mais cela devra être vérifié par des recherches supplémentaires.

En considérant maintenant les propriétés mécaniques des matériaux du tableau 50, notamment pour le parkex et la fibre de verre, les fibres proches de ces valeurs sont les fibres de bambou 1 avec un taux en renfort supérieur à 15 %, les fibres de bambou 2 avec un taux supérieur ou égal à 20 %, les fibres de sisal non traité supérieur à 15 % et traité supérieur à 20 %.

4.1.2. Composites à renfort tissé et composé :

Sur les quatre composites présentés sur le graphique 2, on constate que le composite Co2, un composite à renfort composé avec armure satin et fibres de sisal, possède

la plus grande valeur de la contrainte à la rupture à raison de 184,3 MPa. En effet, d'une part, le graphique 1 par l'étude des différents taux de renforcement a montré que les fibres de sisal ont des propriétés mécaniques intéressantes ; et d'autre part, l'armure satin offre une forte masse spécifique.

Rappelons les contraintes à la rupture d'un composite renforcé de fibres de sisal respectivement à 20 % et à 30 % sont de 110MPa et 191,4 MPa.

En se basant sur les fibres de sisal à taux de renfort à 20 %, l'ajout supplémentaire des différentes armures a grandement amélioré leurs comportements mécaniques. Cette amélioration est de 39 % pour une armure unidirectionnelle, 68 % pour une armure satin et de 56 % pour trois armures unidirectionnelles de direction $0^\circ/90^\circ/0^\circ$.

4.2. Déformation en surface :

4.2.1. Composites U.D :

Les résultats des essais de flexion sont plus ou moins conformes aux données théoriques pour les fibres de sisal et du bambou. Ici, dans le graphique 3, la déformation des fibres de sisal se situe entre 2,90 et 5,5 % et celle des fibres de bambou aux environs de 2 %. Les fibres de raphia sont peu déformables en raison d'une déformation en surface inférieure à celle du composite obtenu à partir de la résine pure.

Pour les fibres de coco, les valeurs expérimentales sont inférieures aux valeurs théoriques puisque la valeur maximale de la contrainte est de 11,7 %. Ceci pourrait s'expliquer lors de la tenue des essais qui à cause de notre appareillage, cette valeur trouvée est la maximale que l'on puisse obtenir. Dès lors, au-delà de cette valeur, l'éprouvette de flexion ne tiendrait plus sur les deux appuis.

Le traitement alcalin a tendance à améliorer la souplesse des fibres de raphia par une augmentation jusqu'à 40 % de la valeur de la déformation des composites correspondants ; et au contraire diminue la déformation des fibres de sisal qui se réduit à un intervalle de 2,5 % à 3,6 %.

4.2.2. Composites à renfort tissé et composé :

Le graphique 4 montre tout de suite que les tissus, que ce soient composés ou à armure satin, présentent une déformation importante.

En comparant avec les fibres de bambou, les tissus à base de bambou possèdent de meilleures déformations.

L'utilisation des tissus de lattes de bambou en supplément du sisal comme renfort améliore généralement la déformation des composites renforcés seulement de fibres de sisal. L'architecture en question sujette à cette amélioration pour le taux de fibres de sisal à 20 % est l'ensemble d'armures unidirectionnelles. L'armure satin et l'armure unidirectionnelle à 90° abaissent le taux de déformation au profit de la contrainte à la rupture.

5. Conclusion partielle :

Globalement, une déformation importante traduit une faible résistance à la rupture et inversement. Ceci est particulièrement vérifié pour les fibres unidirectionnelles. L'augmentation du taux en renfort améliore la résistance à la rupture du composite et il en est de même pour le traitement alcalin.

L'utilisation des fibres de raphia comme renfort unidirectionnel dans un composite présente peu d'intérêt à moins de trouver un moyen de réduire de manière radicale l'épaisseur de ces fibres pour diminuer les bulles.

Les renforts composés à base de lattes de bambou augmentent la résistance à la rupture et par la même occasion la déformation en surface des composites.

En plus des paramètres liés aux propriétés mécaniques du composite déjà abordés, comme la variété inter-espèce par exemple, d'autres peuvent énoncés comme la distribution uniforme des fibres lors de leur mise en place et l'obtention de la direction unidirectionnelle des fibres.

Chapitre 8: ÉVALUATION TEMPORELLE POUR LA MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES ET GESTION DES MATIÈRES PREMIÈRES

1. Évaluation temporelle de mise en œuvre :

Le temps est un facteur important lors de la mise œuvre de différents composites.

Il va intervenir durant les différents procédés :

- La préparation du renfort ;
- Le traitement des fibres achetées ;
- Le séchage ;
- Le moulage ;
- La postcuisson.

Pour avoir une vue d'ensemble et mieux apprécier la durée de chaque procédé, on va schématiser les procédés de mise en œuvre de composite

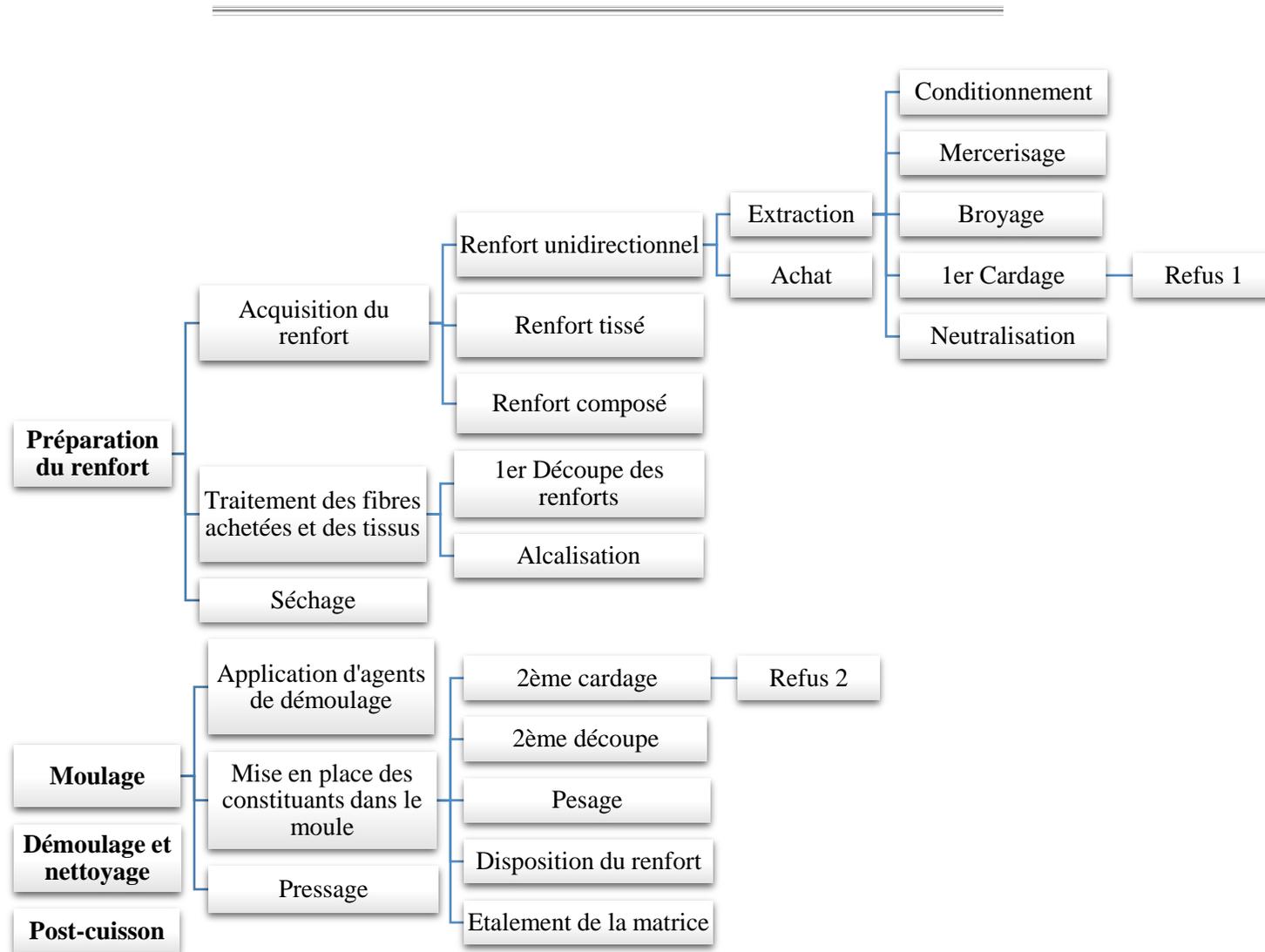


Figure 31. Résumé des processus de mise en œuvre des composites

1.1. Préparation du renfort :

1.1.1. Acquisition du renfort :

1.1.1.1. **Renfort unidirectionnel :**

Il regroupe le processus de l'extraction des fibres du conditionnement jusqu'à la neutralisation.

Tableau 51. Estimation de la durée de l'extraction de 100 g de fibres

Fibres		Bambou 1	Bambou 2	Coco	Rachis
Quantité de fibres extraite [g]		100			
Durée	Conditionnement [min]	40	45	30	90
	Mercerisage [h]	24			
	Broyage [min]	60	70	45	40
	1 ^{er} Cardage [min]	120	130	120	140
	Neutralisation [min]	30			

1.1.1.2. **Renfort tissé :**

La mise en œuvre des tissus comprend la 1^{re} transformation du bambou, c'est-à-dire le fendage, la découpe en lamelle et le tissage.

Tableau 52. Durée de la mise en œuvre des différents tissus de dimensions 20 cm x 18cm

	Armure taffetas	Armure satin	Armure unidirectionnelle
Fendage [min]	7	15	5
Découpe en lamelle [min]	20	35	15
Tissage	10	20	15

1.1.1.3. **Renfort composé :**

Comme il s'agit d'une combinaison d'armures unidirectionnelles de bambou et des fibres de sisal ; donc il est inutile de mentionner la durée de mise en œuvre du renfort.

1.1.2. Traitement des fibres achetées et des tissus au moulage :

1.1.2.1. 1re Découpe des renforts :

Cette étape concerne les fibres de sisal et de raphia, ainsi que les différents tissus. Sa durée varie proportionnellement à la quantité de fibre.

1.1.2.2. Alcalisation :

La durée de l'alcalisation est fixée à 1heure. Elle est suivie par une neutralisation de 30minutes.

1.1.3. Séchage :

Le séchage s'étale de 24 h à 48 h suivant le mode de séchage adopté.

Tableau 53. Mode de séchage des fibres et tissus

Mode de séchage	Durée [h]
Air ambiant	48-72
Étuvage	24

1.2. Moulage :

1.2.1. Application d'agents de démoulage :

Elle est relativement courte à raison de 5minutes.

1.2.2. Mise en place du renfort dans le moule :

Elle est fonction du type et de la quantité de renfort à mettre en place.

Tableau 54. Mise en place du renfort dans le moule

Renfort pour composite	Fibres							Tissus	Tissus composés	
	B ₁	B ₂	C	S	S _t	R	R _t			R _c
2e cardage	5 – 8		3-8	5 – 13		7 – 20		3	-	10
2e découpe	1 – 4							1	2	1 – 5
Pesage	1-3							2	1	1
Disposition du renfort [min]	1 – 2		1 – 2	3 – 4		2 – 7		5	0,5	7 – 10
Étalement de la résine	2 – 5									

1.2.3. Pressage :

Déjà énoncé plus haut, le pressage dure 1 h 30

1.3. Démoulage du composite et nettoyage du moule :

Il varie entre 5 à 15minutes.

1.4. Postcuisson :

Le traitement des composites s'effectue 5 h à l'étuve.

2. Estimation de la durée de mise en œuvre :

En connaissant ces données, on peut maintenant évaluer la durée nécessaire pour mettre en œuvre les composites.

On a alors fait l'évaluation pour la mise en œuvre d'un composite avec un taux de renfort à 20 % et 30 %.

Tableau 55. Durée de la mise en œuvre des composites à renfort unidirectionnel avec un taux de renfort à 30 % (sans séchage à l'étuve)

Procédé		B ₁	B ₂	C	R _c	S	S _t	R	R _t
Préparation du renfort	Acquisition du renfort	28 h 10 min	28 h35 min	27 h 07 min	29 h 40 min	-	-	-	-
	Traitement	-	-	-	-	-	2 h	-	2 h
	Séchage	48 h							
Moulage	Application d'agents de démoulage	5 min							
	Mise en place du renfort	22 min	22 min	22 min	23 min	29 min		45 min	
	Pressage	1 h 30 min							
Démoulage et nettoyage		10 min							
Postcuisson		5 h							
<i>Durée totale</i>		83 h 17 min	83 h 42 min	82 h 14 min	84 h 08 min	55 h 09 min	57 h 09 min	55 h 30 min	57 h 30 min

Tableau 56. Durée de la mise en œuvre des composites à renfort tissé avec un taux de renfort à 30 %

Procédé		Armure taffetas	Armure satin	
			1 couche	2 couches
Préparation du renfort	Acquisition du renfort	37 min	1 h 10 min	2 h 20 min
	Traitement	1 h 40 min	1 h 40 min	1 h 50 min
	Séchage	48 h		
	Application d'agents de démoulage	5 min		
	Mise en place du renfort	8 min	8 min	11 min
	Pressage	1 h 30 min		
Démoulage et nettoyage		10 min		
Postcuisson		5 h		
Durée totale		57 h 10 min	57 h 34 min	59 h 06 min

Tableau 57. Durée de la mise en œuvre des composites à renfort composé

Procédé		3 couches						5 couches				
		Co 1			Co 2			Co 3				
		0°	90°	0°	0°	90°	0°	0°	90°	0°	90°	0°
		Sisal	A.U.	Sisal	Sisal	A.S.	Sisal	Sisal	A.U.		Sisal	
Préparation du renfort	Acquisition du renfort	35 min			70 min			1 h 45 min				
	Traitement	1 h 40 min										
	Séchage	48 h										
Moulage	Application d'agents de démoulage	5 min										
	Mise en place du renfort	23 min			25 min			30 min				
	Pressage	1 h 30 min										
Démoulage et nettoyage		10 min										
Postcuisson		5 h										
Durée totale		57 h 23 min			58 h 00 min			58 h 30 min				

On établit la durée de mise en œuvre des composites renforcés par les refus du 1^{er} cardage et du 2nd cardage. Évaluer la durée de l'obtention des fibres non cardées de bambou et de coco équivaldrait à évaluer la durée de l'extraction en s'arrêtant à l'opération de broyage. Pour se faire, deux voies peuvent être envisagées : L'extraction à la soude et le laminage suivi d'un traitement à la soude. Ces deux modes d'obtention peuvent être considérées comme ayant la même durée puisqu'avant le laminage, les lamelles de bambou et les bourres de coco ont besoin d'être immergées dans l'eau.

On va alors voir la durée de l'obtention des fibres non cardées après immersion dans la soude.

Tableau 58. Durée de l'obtention des fibres non cardées du bambou et de coco

Procédé		Bambou 1	Bambou 2	Coco
Préparation du renfort	Acquisition du renfort	26 h 10 min	26 h 20 min	25 h 45 min
	Traitement	-	-	-
	Séchage	48 h		
Moulage	Application d'agents de démoulage	5 min		
	Mise en place du renfort	5 min		
	Pressage	1 h 30 min		
Démoulage et nettoyage		10 min		
Postcuisson		5 h		
<i>Durée totale</i>		81 h 00 min	81 h 10 min	80 h 35 min

3. Gestion des matières premières

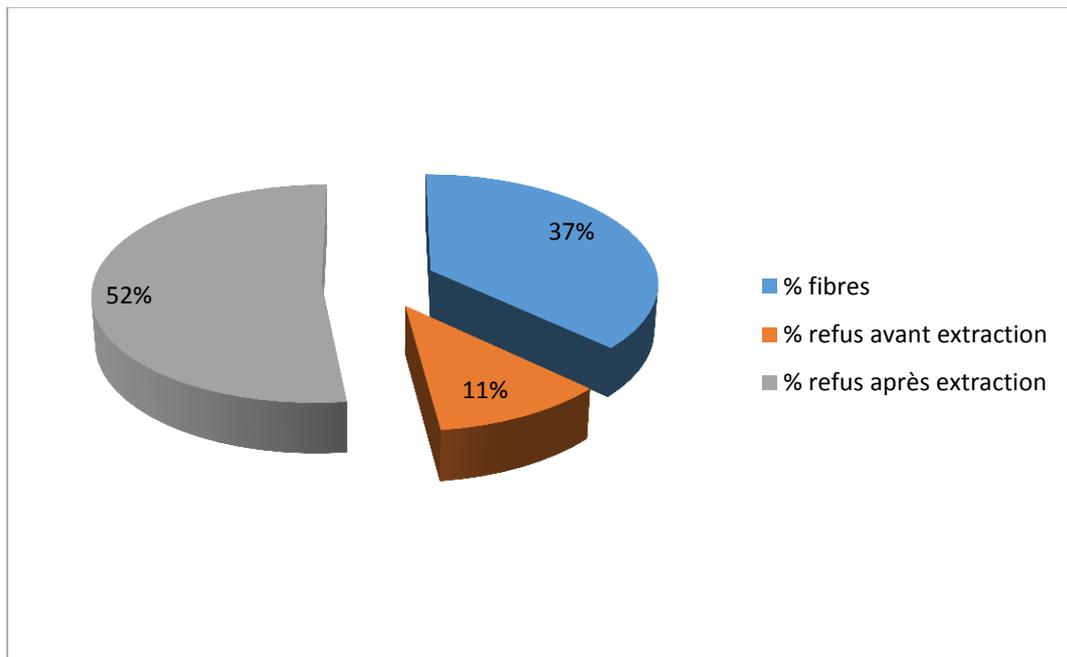
3.1. Rendement :

Le rendement de l'extraction des fibres végétales est un paramètre très important. Comme l'extraction se fait en grande partie manuellement, l'opérateur va donc influencer directement sur le rendement.

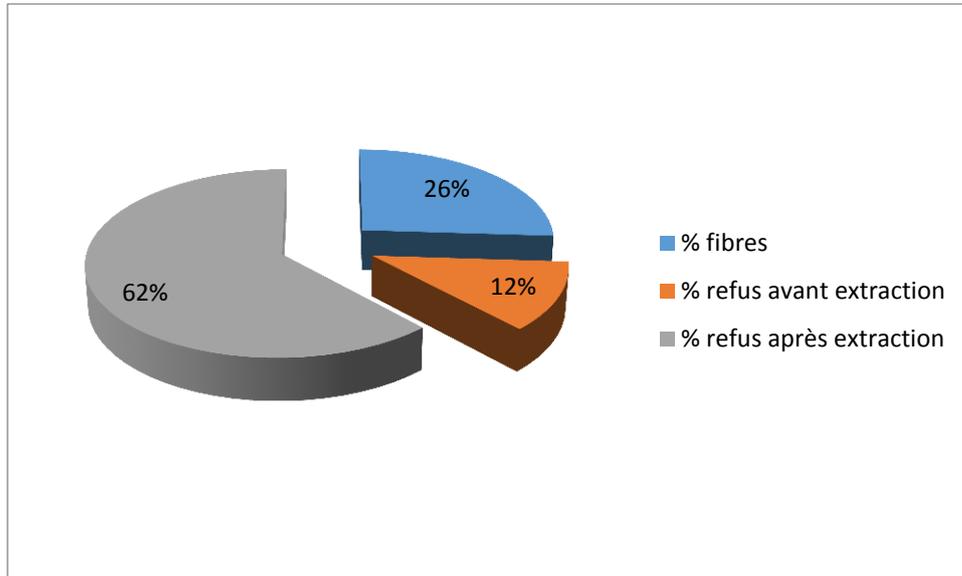
Le tableau ci-dessous récapitule les différents rendements de chaque fibre.

Tableau 59. Évaluation des différentes masses durant l'extraction des fibres végétales

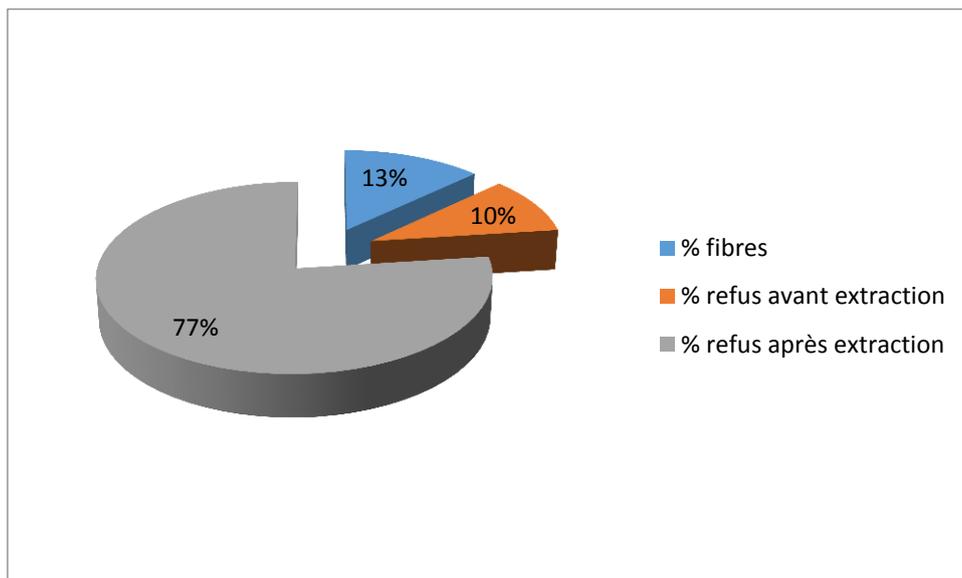
		B 1	B2	C	Rc
Masse de départ		658	645	1676	501
Masse avant immersion		584	569		401
Masse de fibres sèches		243	168	215	37
Masse de refus	En amont de l'immersion	74	76	162	100
	En aval de l'immersion (Refus 2)	341	401	1299	364
Pourcentage	Refus avant extraction	11,3	11,8	9,7	20
	Refus après extraction	51,8	62,2	77,5	72,7
	Fibre	36,9	26	12,8	7,4



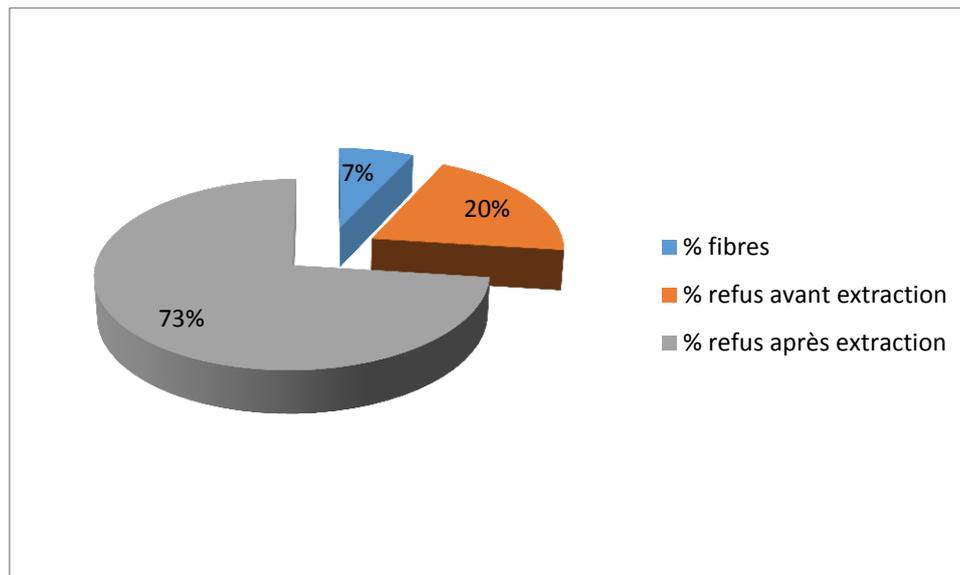
Graphique 5. Données sur l'extraction des fibres de bambou 1 sur 100 g de lamelle



Graphique 6. Données sur l'extraction des fibres 2 sur 100 g de lamelle



Graphique 7. Données sur l'extraction des fibres de coco sur 100 g de bourre



Graphique 8. Données sur l'extraction des fibres de rachis sur 100 g

Sur tous ces diagrammes, le refus en aval ou encore le refus 1 constitue une proportion importante de l'extraction des fibres de bambou, de coco et de rachis.

Tableau 60. Rendement des fibres cardées extraites sur 100 g de plantes à fibre

	B₁	B₂	C	R_c
Rendement [%]	29,5 - 36,9	22,5 – 26	12,4 - 12,8	7,4 - 14,2

Tableau 61. Rendement des fibres non cardées extraites sur 100 g de plantes à fibre

	B₁	B₂	C	R_c
Rendement [%]	86 - 89	88 – 89	90 – 92	80 – 83

Tableau 62. Rendement théorique des fibres achetées par feuille fraîche [9] [T]

	S	R
Rendement [%]	3 % - 4 %	3 %

3.2. Renouvellement des plantes à fibres :

On va étudier dans cette section le temps nécessaire au renouvellement

Une évaluation de la durée de maturation et du temps de la récolte est très importante pour les fibres malgaches afin de mieux apprécier leurs disponibilités.

Tableau 63. Renouveaulement des plantes à fibres

Plante		Maturation	Disponibilité de récolte sur une plante	Durée d'une plantation	Référence
Bambou		3 à 4ans	Tout au long de l'année	70ans	
Coco	Naines	3 à 7ans	Tous les mois	50 à 80ans	[7] [S]
	Grandes		Tous les 2 mois		
	Hybrides				
Raphia	<i>Raphia fanifera</i>	10ans	Tous les 6mois ou 4mois	20 à 30ans	[T]
Sisal		3ans	Tous les 6mois	8 à 10ans	[9]
Bois	Peuplier	20 à 25ans	-	-	[15]
	Bois de rose	67ans	-	-	
	Palissandre	53ans	-	-	
	Pin sylvestre	70 à 80ans	-	-	[U]
	Sapin	100ans	-	-	
	Sycomore	50ans	-	-	

4. Cycle de moulage :

4.1. Processus du cycle :

Un cycle de moulage va regrouper tous les processus mécaniques du moulage et du démoulage, en excluant les opérations de cardage, de découpe et de pesage. En effet, ces opérations peuvent être entreprises entre chaque pressage pour le prochain moulage.

Le cycle de moulage comprend alors :

- La disposition du renfort ;
- L'étalement de la matrice ;
- Le pressage ;
- Le démoulage du composite et le nettoyage du moule.

4.2. Durée d'un cycle de moulage et capacité de production journalière :

4.2.3. Durée d'un cycle de moulage :

On peut estimer cette durée à partir des données ci-dessus.

Tableau 64. Durée d'un cycle de moulage

Étape	Durée
Disposition du renfort	1 – 10 min
Étalement de la matrice	2 – 5 min
Pressage	1 h 30 min
Démoulage et nettoyage	5 – 15 min

La durée d'un cycle de moule se situe donc entre 1 h 30 min et 2 h.

N.B :

D'après les moulages effectués, les composites subissent des déformations. Effectivement, les coins utilisés lors du démoulage imposent des forces sur le composite encore flexible. Un cycle de moulage de 2 h est possible pour un démoulage à l'eau ou à l'air sous pression. Mais il est préférable de ne procéder au moulage qu'après gélification complète de la résine.

Les composites mis en œuvre ont montré que la durée optimale du pressage est de 2 h et 3 h.

4.2.4. Capacité de production journalière :

Le moulage que nous avons réalisé est à échelle laboratoire. Avec un seul moule et un cycle de moulage de 3 heures, la capacité de production est de 4 pièces de composites de dimension 20cm x 18cm et des heures de travail s'étalant de 8 h à 17 h.

4.3. Niveau d'amélioration envisageable :

À l'échelle industrielle, il est préférable de travailler avec plusieurs moules, y incorporer un dispositif permettant le démoulage sous pression et également un système thermique pour diminuer la durée d'étuvage.

Chapitre 9: SÉLECTION DES COMPOSITES À RENTABILISER

1. Récapitulation des données relatives à chaque composite :

Les paramètres et les caractéristiques précédents sont alors regroupés afin de tirer les formulations intéressantes. Ce sont :

- La contrainte à la rupture et la déformation en surface ;
- La durée de mise en œuvre de chaque composite ;
- La disponibilité des fibres et le rendement

On portera une attention particulière sur les composites avec un taux de renfort à 30 %.

Tableau 65. Données récapitulatives à chaque type de composite

Composite	Contrainte à la rupture [MPa]	Déformation en surface [%]	Durée de mise en œuvre	Rendement	Disponibilité	Maturation
B ₁	197,1	4	83 h 17 min	29,5 – 36,9	Tout au long de l'année	3 à 4 ans
B ₂	201,4	2,1	83 h 42 min	22,5 – 26		
C	68,6	11,7	82 h 14 min	12,4 – 12,8	Tous les 2 mois	3 à 7 ans
S	191,4	5,5	55 h 09 min	3 - 4	Tous les 6 mois	3 ans
S _t	174,3	3,1	57 h 09 min			
R	-	1,8	55 h 30 min		Tous les 4 ou 6mois	10 ans
R _t	60	2,5	57 h 30 min			
R _c	55	1,6	84 h 08 min	7,4 – 14,2	Tous les 25 à 30mois	
T	82,9	2,6	59 h 06 min	-	-	-
Co1	152,9	4,4	57 h 23 min	-	-	-
Co2	184,3	4,5	58 h 00 min	-	-	-
Co3	171,4	9,3	58 h 30 min	-	-	-
Refus 1	21,4	1,1	81 h 10 min	> 80	-	-
Refus 2	32,9	1,8	83 h 42 min	-	-	-

2. Possibilité d'ajout de charge :

Des charges peuvent être ajoutées pour réduire le prix de revient de chaque matériau composite et modifier certaines de ses propriétés. Des charges organiques et minérales peuvent être incorporées à la matrice et cela en fonction des modifications souhaitées.

Tableau 66. Nature de charge éventuelle

Charge	Exemple	Propriété
Organique	Farine de bois, bambou	Abaissement du prix de revient avec diminution de la masse
Minérale	Ciment, sable siliceux	Abaissement du prix de revient et augmentation de la masse

3. Formulations adoptées en fonction des utilisations envisagées :

Les formulations retenues sont les suivantes :

Tableau 67. Formulation retenue en fonction du type d'utilisation

Utilisation	Composite	Formulation	Spécificité
Recouvrement de sol	Sisal 30 %	30 % en volume	-
Toiture	Co2	20 % en volume + A.S.	-
Porte	Co3	20 % en volume + 3 A.U	Souple
Plafond	T	2 armures satin	-
	Refus 1	-	Aspect visuel

Chapitre 10:ÉTUDES D'IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

1. Estimation du coût de réalisation :

On essaiera d'établir le prix de revient de chaque gamme de composite. Pour se faire, il est utile d'estimer les quantités des différentes matières premières.

Tableau 68. Devis pour l'acquisition de 100 g des différentes fibres végétales unidirectionnelles

Fibres		Prix unitaire plante à fibre	Prix unitaire par kilogramme	Prix Traitement	M.O.J pour une personne	Quantité de fibre extraite par jour [g]	Quantité de fibres extraites par plante [g]	Nombre de jours nécessaire à l'extraction de la plante	M.O Totale	Prix total	Prix pour 100 g
Bambou 1	Cardées	1000	-	1000	4000	200	1200	6	24 000	26000	2167
Bambou 2	Cardées	1000	-			200	1200	6		26000	2167
Coco	Cardées	-	-			200	-	-	4000	5000	2500
Rachis		-	-			150	-	-	4000	5000	3333
Sisal	Natif	-	-	-	4000	1000	-	-	4000	5000	500
	Traité	-	-	1000	4000	1000	-	-	4000	5000	600
Raphia	Natif	-	5000	-	-	-	-	-	-	5000	500
	Traité	-	5000	1000	-	-	-	-	-	6000	600
Refus 1		-	-	1000	4000	2000	-	-	4000	5000	2,50

Tableau 69. Devis pour la confection de tissus de fibres végétales

Armure	Prix Traitement	M.O.J pour une personne	Nombre de tissus par jour [g]	Prix total	Prix pour un tissu 20cm x 18cm
Satin	1000	4000	24	5000	250
Longitudinale			32	5000	200

**Tableau 70. Estimation des prix de revient de chaque gamme de composite ayant une
dimension de 20 cm x 18 cm x 0,7 cm**

Composite		Unité			Prix unitaire du renfort		Prix unitaire matrice	Prix renfort		Prix matrice	Prix total
		Fibre	Tissu	Matrice	Fibre	Tissu		Fibre	Tissu		
UD	B ₁	100 g	U	Kg	2167	-	10494	2167	-	2309	4476
	B ₂				2167	-		2167	-		4476
	C				2500	-		2063,4	-		4372,4
	S				500	-		581,7	-		2890,7
	S _t				600	-		766,13	-		3075,1
	R				500	-		115	-		2424
	R _t				600	-		450	-		2759
Tissé					-	250	-	500			2809
Composé	Co1					200		200			2897
	Co2				500	250	388	250			2947
	Co3					200		600			3297
Refus 1					2,5	-		-			2311,5

2. Impacts sur le plan socio-économique :

La promotion du domaine des composites utilisant les plantes à fibre offre de nombreux avantages. On peut citer :

- La création d'une PME et par la même occasion création d'emploi ;
- La disponibilité des produits avec une large gamme de prix ;
- Le développement local et national ;

- L'utilisation de nouveaux matériaux de plusieurs gammes ;
- La valorisation des fibres dans le domaine des composites ;
- La contribution à la préservation de l'environnement par la diminution de la coupe des arbres.



Au vu des différents prix et la durée de mise en œuvre, les inconvénients majeurs sont :

- Le prix de revient un peu élevé ;
- L'utilisation des alcalins dans le traitement des fibres ;
- La non-recyclabilité des composites. La faible capacité de production ;
- La mode d'extraction fastidieuse des fibres ;

3. Impacts sur le plan environnemental :

2.1. Impacts positifs :

On peut énumérer :

- La diminution de la consommation des bois d'œuvre et par la même occasion de l'effet de serre notamment l'utilisation de ces composites dans le domaine de l'ébénisterie ;
- La valorisation des résidus de l'extraction des fibres (bourre de coco, nœud de bambou, reste de rachis) comme combustible réduisant la consommation en bois de chauffe ;
- La valorisation des plantes à renouvellement rapide relative aux bois ;
- La promotion du développement durable par une bonne gestion des plantes à fibres ;
- La valorisation des déchets comme la bourre et le rachis de coco ;
- L'utilisation des ressources locales (le sisal, le raphia...) ;
- L'utilisation d'un type de fibre dans un domaine précis.

2.2. Impacts négatifs :

2.2.1. Épuisement de ressources naturelles :

Une surexploitation des plantes à fibres va entraîner leurs épuisements ou même la disparition des espèces. Cela menace particulièrement le bambou exploité pour sa canne, le raphia et le sisal pour ses feuilles.

2.2.2. Effets directs sur la santé :

- **Corrosion de la peau :** il s'agit de l'irritation de la peau au contact de la soude ;
- **Infection respiratoire :** elle est causée par deux facteurs, la réaction de dissolution de la soude dans l'eau ; l'ébarbage et la coupe des éprouvettes de flexion.

2.2.3. Pollution du sol et de l'eau :

Le déversement de la solution de soude dans le sol va engendrer des conséquences graves. Il s'agit de l'alcalinisation du sol et la pollution de l'eau de la nappe phréatique.

2.2.4. Pollution de l'air :

Elle est engendrée par l'odeur du styrène lors de l'opération de moulage et les poussières engendrées lors de la coupe des éprouvettes.

2.3. Mesures d'atténuation des impacts négatifs :

Des mesures ont été déjà citées dans le travail antérieur. Mesures que l'on pourrait classer en général de provisoires.

Comme on l'a vu, trois points sont source des impacts négatifs :

- La mauvaise gestion des plantes à fibre par la surexploitation ;
- L'utilisation de la soude comme produit d'extraction ;
- L'utilisation du polyester insaturé comme matrice.

Des mesures permanentes peuvent être entreprises comme :

- La gestion des plantes à fibre ;
- L'adoption d'autres voies d'extraction ;
- L'utilisation d'autres résines moins polluantes.

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

On a mis en œuvre des composites renforcés de fibre végétale. Les fibres végétales proviennent du bambou, de la bourre et du rachis de coco, du sisal et du raphia. Les essais de flexion réalisés ont montré que les fibres provenant du *bambusa vulgaris* et du *dendrocalamus giganteus* possèdent d'excellentes propriétés mécaniques suivies de près par les fibres de sisal. Mais que malgré tout on a choisi de promouvoir les fibres de sisal par rapport aux fibres de bambou à cause de sa mise en œuvre relativement facile.

Les études expérimentales de la seconde partie ont été orientées de manière à déterminer les fibres offrant une meilleure rentabilité économique et temporelle.

Les fibres ont été soit extraites, soit achetées. Les fibres une fois acquises ont été incorporées dans le polyester insaturé afin de constituer des matériaux composites.

L'essai de flexion à trois pannes montre l'intérêt que présentent les fibres du *bambusa vulgaris* vis-à-vis de son homologue le *dendrocalamus giganteus* et des autres fibres comme le sisal, le coco et le raphia.

Des composites ont été élaborés à partir de renfort constitué de fibres de sisal avec un taux de renfort à 20 % et une armure unidirectionnelle ou satin afin de déterminer l'importance de leur utilisation avec les fibres de sisal. L'essai mécanique indique l'intérêt d'une telle utilisation puisqu'on constate une amélioration de la contrainte à la rupture des composites renforcés de sisal à 20 % à raison de 39 % pour une armure unidirectionnelle, 68 % pour une armure satin et 56 % pour trois armures unidirectionnelles.

L'essai de flexion nous a également permis de déterminer les composites les plus déformables qui sont les composites renforcés de fibres de coco avec un taux de renfort de 30 % et les composites à renfort composés de 20 % de fibres de sisal et de trois couches d'armure unidirectionnelle.

En prenant en compte cette fois-ci le temps de mise en œuvre des composites et du renouvellement des plantes à fibre qui sont des paramètres importants au même titre que la performance mécanique, on a pu tirer que cinq composites présentaient d'énormes potentialités en fonction du domaine d'utilisation éventuelle. Ce sont les composites renforcés :

- ☞ De fibres de sisal à 30 % ;

- ☞ De tissu satin ;
- ☞ De fibre de sisal et d'armure satin ;
- ☞ De fibre de sisal et de trois armures unidirectionnelles ;
- ☞ De refus du 1^{er} cardage.

Ce qui nous a alors conduit à faire une étude économique pour évaluer le prix de chacun des composites. L'étude a alors montré que les composites à bas prix de revient et offrant des propriétés plus ou moins acceptables sont les composites renforcés par les refus du 1^{er} cardage avec un prix à 2311,5Ar, suivis par les composites renforcés de fibres de sisal avec 2890,7Ar, ensuite les composites à renfort composé de fibre de sisal et d'armure unidirectionnelle à 2897Ar et enfin les composites à renfort composé de fibre de sisal et d'armure satin à 2947Ar. L'étude d'impacts évoque d'une part les différents méfaits liés à l'élaboration des composites renforcés de fibre végétale. Mais d'autre part, elle souligne à plus forte raison l'attrait que représente la substitution du bois par ces composites.

De nombreuses améliorations peuvent être envisagées en vue de diminuer le prix de revient de ces composites comme l'utilisation moule à deux parties limitant ainsi les pertes de résine, la diminution de l'épaisseur des composites par l'utilisation de presse développant une pression plus importante.

Un défi de taille concerne les impacts environnementaux. Ces composites, rappelons-le, ne sont guère recyclables. Par rapport aux mesures draconiennes adoptées par Madagascar vis-à-vis de sachets plastiques et par tous les autres pays du monde relativement aux réchauffements climatiques, l'utilisation des résines biodégradables s'avère être plus que nécessaire.

BIBLIOGRAPHIES

[1] **BINGUIRA Kelly**

« Conception de tuile composite à renfort fibres de bambou », Mémoire de fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur, Option Science et Ingénierie des Matériaux, 2014

[2] **WEISS Jean**

« Les matériaux composites : Structure – Constituants – Fabrication », Volume 1, Paris CETIM, 1991, 596p

[3] **MOKHTARI ABDESSAMED**

« Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier », Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER, Université de Kasdi Merbah Ouargla, Département de Hydraulique et Génie Civil, 2006, 80pages

[4] **Paul HUBERT**, Ingénieur d'Agronomie et Professeur au Lycée Agricole d'Ambatobe

« La canne à sucre », Agence du B.D.P.A. Madagascar, 1970, 122p

[5] **Anonyme**

« Memento de l'Agronome », Quae, Ministères des Affaires Etrangères, CIRAD – GRET

[6]

Données Sociétés Malgaches de la Canne et du Sucre

[7] **Gabriel de Taffin**

« Le Technicien d'Agriculture Tropicale : Le cocotier », Editions Maisonneuve et Larose, Programme Cocotier de CIRAD-CP, 1993, 166p

[8] **Anonyme**

« Fibres de coco : caractéristiques, tendances et problèmes économiques », Monographie de produits, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome 1969, 84p

[9]

HUBERT Paul, Ingénieur d'Agronomie et Professeur au Lycée Agricole d'Ambatobe
« Le sisal », Fiche technique, Agence du B.D.P.A. Madagascar, Janvier 1971, 317p-345p

[10] **DO THI Vi Vi**

« Matériaux composites fibres naturelles/polymères biodégradables ou non », Thèse de Doctorat, Matériaux polymères et composites, Universités de Grenoble et de l'Université des Sciences de Hochiminh Ville, 2011, 182p

[11] **LE DIGABEL Fédérique– HOULIER**

« Incorporation de co-produits de paille de blé dans des matrices thermoplastiques : approche de la compatibilité charge-matrice et propriétés des composites », Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2004, 171p

[12] **NTENGA Richard**

« Modélisation multi-échelles et caractérisation de l'anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites », Thèse en cotutelle de doctorat, Université Blaise Pascal (UBP) – Université de Yaoundé I, 2007, 164p

[13] **Nadia Bystriakova, Valerie Kapos, Igor Lysenko**

« Bamboo diversity Africa, Madagascar and the Americas », Publication de International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), 2004, 90p

[14] **Philippe Casanova**

« Le bambou : du développement durable à la création d'objet », Eyrolles, 2010, 127p

[15] **RAKOTO Joseph Felana Niaina**

« Anatomie et analyse de la croissance en épaisseur de *Dalbergia baronii* (Baker) et de *Dalbergia monticola* (Bossert et R. Rabev.) dans la forêt classée d'Ambohilero, Didy Ambatondrazaka », Mémoire pour l'obtention du DEA en Biologie et Ecologie Végétales, Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, 2013, 62pages

WEBOGRAPHIES

- [A] 10-3-quelques-aspect-des-agro-ressources.pdf
- [B] <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2010ISAL0041/these.pdf>
- [C] https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/841290/filename/2012MULH5011_these_DALAL.pdf
- [D] http://tricofolk.free.fr/files/armure_satin.pdf
- [E] http://julien.caulier.free.fr/images/doc_tech/FdV_tech.pdf
- [F] Partie1.pdf
- [G] http://www.materiatech-carma.net/html/pdf/GlossaireMateriauxComposites_CARMA.pdf
- [H] <http://www.ademe.fr/evaluation-disponibilite-laccessibilite-fibres-vegetales-a-usage-materiaux-france>
- [I] <http://etabs.ac-martinique.fr/hnero/rhum/techniquesucre.htm#arrive>
- [J] <http://www.courantpositif.fr/avec-la-bagasse-la-canne-a-sucre-devient-electricite/>
- [K] http://fr.horticalia.org/Wiki/Palmier_%C3%A0_raphia
- [L] http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1933_num_42_236_10594
- [M] http://www.ville-ge.ch/cjb/cdec/pdf_cdec/la-gazette-du-raphia.pdf

[N] <http://www.agriculture.gov.mg/communication/wp-content/uploads/sites/2/2014/06/103-Fili%C3%A8re-Canne-%C3%A0-sucre.pdf>

[O] http://www.heds-ge.ch/diet/encyclopedie/noix_de_coco05.pdf

[P] http://cemadoc.irstea.fr/exl-php/docs/PUB_DOC/36392/2013/gr2013-pub00039945_PDF.txt

[Q]

http://www.researchgate.net/publication/252916893_PERSPECTIVES_ON_THE_PERFORMANCE_OF_NATURAL_PLANT_FIBRES

[R] inbar_technical_report_no09.pdf

[S] http://fr.wikipedia.org/wiki/Cocos_nucifera

[T]

http://books.google.mg/books?id=lspmAgAAQBAJ&pg=PA435&lpg=PA435&dq=r%C3%A9colte+du+raphia&source=bl&ots=eWRbr-E0mZ&sig=PyK_oqEgOqX44nyydSE47ogQCMo&hl=fr&sa=X&ei=rgWBVPSgAoi-PP-xgMgG&ved=0CBsQ6AEwADgK#v=onepage&q=r%C3%A9colte%20du%20raphia&f=false

[U] http://www.lescopeaux.asso.fr/Rombauts/PDF/Rombauts_11.pdf

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	I
ACRONYMES	II
LISTE DES TABLEAUX	III
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES PHOTOS	VI
LISTE DES GRAPHIQUES	VII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PARTIE I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
CHAPITRE 1: GÉNÉRALITÉS SUR LES COMPOSITES À FIBRES NATURELLES 4	
1. COMPOSITES A MADAGASCAR.....	4
1.1. <i>Champs d'application</i> :.....	4
1.2. <i>Recyclage</i> :	4
2. SITUATION DES FIBRES NATURELLES A MADAGASCAR :	4
2.1. <i>Ressources en fibre naturelle</i> :	4
2.2. <i>Potentiel et localisation</i> :	5
3. SITUATION DE LA CONSOMMATION DES BOIS D'ŒUVRE A MADAGASCAR :	5
CHAPITRE 2: MATÉRIAUX COMPOSITES À RENFORT FIBRES VEGETALES ... 6	
1. MATERIAU COMPOSITE :	6
1.1. <i>Matrice</i> : [1] [A]	6
1.1.1. Polymères recyclables : [2]	7
1.1.2. Polymères non recyclables : [2]	7
1.2. <i>Renfort</i> : [2]	8
1.2.1. Architecture des fibres :	8
1.2.2. Ensembles surfaciques :	8
1.2.2.1. Tissus :	8
1.2.2.2. Mats : [2]	14
2. FIBRE VEGETALE : [H].....	14
2.1. <i>Production mondiale de fibres végétales</i> :	14
2.2. <i>Classification des fibres végétales</i> :	15
2.3. <i>Bagasse de la canne à sucre</i> :	16
2.3.1. Canne à sucre :	16
2.3.1.1. Classification botanique : [4]	16
2.3.1.2. Utilisation de la canne à sucre :	18
2.4. <i>Fibres de Raphia</i> :	20
2.4.1. Raphia :	20
2.4.1.1. Origine : [5] [K]	20
2.4.1.2. Localisation du Raphia à Madagascar :	20
2.4.1.3. Description : [5] [L]	20
2.4.1.4. Feuilles ou palmes.	20
2.4.1.5. Utilisation du raphia :	21
2.4.2. Extraction des fibres de raphia : [5]	22
2.4.3. Production de raphia :	23
2.5. <i>Fibres de bambou</i> :	23
2.6. <i>Fibres de coco</i> :	23

2.6.1. Cocotier :.....	23
2.6.1.1. Systématique : [7].....	23
2.6.1.2. Classification du cocotier : [7] [5].....	23
2.6.1.3. Différentes parties du cocotier :	24
2.6.1.4. Utilisation des différentes parties de la plante : [7].....	25
2.6.2. Bourre de coco : [7] [O] [P]	27
2.6.2.1. Utilisation de la bourre :.....	27
2.6.2.2. Fibres de coco :	27
2.7. <i>Fibre de sisal</i> : [9]	28
2.7.1. Présentation :.....	28
2.7.1.1. Utilisation du sisal :.....	28
2.7.1.2. Principaux Agavées rencontrés à Madagascar :.....	29
2.7.2. Processus pour l'extraction des fibres :.....	29
2.8. <i>Récapitulation de l'utilisation des fibres naturelles</i> :	29
3. COMPOSITE RENFORCE DE FIBRES VEGETALES	29
3.1. <i>Traitement des fibres naturelles</i> :.....	29
3.2. <i>Composition chimique</i> : [10] [Q] [11]	30
3.2.1. Cellulose :.....	30
3.2.2. Lignine :	30
3.2.3. Hémicellulose :.....	31
3.3. <i>Extraction des fibres naturelles</i> : [12]	31
CHAPITRE 3: POLYESTER INSATURÉ.....	32
1. PRESENTATION : [2]	32
2. DURCISSEMENT MAXIMUM :.....	32
3. CATALYSEUR ET ACCELERATEUR : [2]	32
3.1. <i>Réactions radicalaires</i> :	32
3.2. <i>Quelques exemples de catalyseur</i> :	32
3.3. <i>Système catalyseur – accélérateur</i> :.....	32
4. ÉTUDE DU PHENOMENE DE POLYMERISATION A FROID : [2].....	33
4.1. <i>Influence de la température de travail sur le choix du système catalyseur-accélérateur</i> :	33
4.2. <i>Influence du taux de catalyseur</i> :	33
5. AVANTAGES ET LIMITES D'UTILISATION : [2]	33
CHAPITRE 4: BAMBOU	35
1. UTILISATION DU BAMBOU A MADAGASCAR : [13].....	35
2. PROCESSUS DE TRANSFORMATION DU BAMBOU : [R]	35
2.1. <i>Collecte</i> :	35
2.1.1. Recommandations à adopter pour la coupe :	35
2.1.2. Enlèvement des ramuscules :	36
2.2. <i>Première transformation</i> :.....	37
2.2.1. Fendage du bambou :	37
2.2.2. Découpe des entre-nœuds en lamelle : [14]	39
2.2.3. Tressage : [14].....	39
2.3. <i>Seconde transformation</i> : [R].....	40
PARTIE II : ÉTUDES EXPÉRIMENTALES.....	41
CHAPITRE 5: MATERIELS ET METHODES.....	42
1. MATERIELS :	42
1.1. <i>Présentation des différents matériels utilisés</i> :	42

1.2.	<i>Modification au niveau de la presse composite :</i>	42
1.2.1.	Problèmes repérés :	42
1.2.2.	Solutions adoptées :	43
1.3.	<i>Réalisation du moule :</i>	43
1.3.1.	Amélioration de l'état de surface :	44
1.3.2.	Dimensions du matériau composite :	44
1.4.	<i>Sélection des matériaux :</i>	44
1.4.1.	Matrice :	44
1.4.2.	Catalyseur :	44
1.4.3.	Renfort :	44
2.	METHODES :	45
2.1.	<i>Extraction des fibres végétales :</i>	45
2.1.1.	Conditionnement à l'extraction :	45
2.1.2.	Mercerisage :	45
2.1.3.	Broyage :	45
2.1.4.	1er Cardage :	46
2.1.5.	Modification de l'état de surface :	46
2.1.6.	Neutralisation :	46
2.2.	<i>Taux volumique en renfort et débitage des éprouvettes :</i>	46
2.2.1.	Taux volumique du renfort :	46
2.2.2.	Débitage des éprouvettes :	47
2.3.	<i>Propriétés physiques :</i>	47
2.3.1.	Mesure de la masse linéique des fibres :	47
2.3.2.	Mesure de la masse surfacique ou le grammage :	48
2.3.3.	Mesure de la masse volumique :	48
2.3.3.1.	Masse volumique des fibres :	48
2.3.3.2.	Masse volumique des constituants de la matrice :	49
2.3.3.3.	Masse volumique des composites :	49
2.3.4.	Test d'usinabilité et aptitude à l'assemblage :	50
2.3.5.	Taux de compression t :	50
2.3.6.	Absorption d'eau :	50
2.4.	<i>Essais de flexion à trois pannes :</i>	50
CHAPITRE 6: MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES.....		53
1.	MISE EN ŒUVRE DU COMPOSITE :	53
1.1.	<i>Préparation du renfort :</i>	53
1.1.1.	Acquisition du renfort :	53
1.1.1.1.	Renfort unidirectionnel :	53
1.1.1.2.	Renfort tissé :	55
1.1.1.3.	Renfort composé :	56
1.1.2.	Traitement des fibres achetées et des tissus :	57
1.1.2.1.	1re Découpe des renforts.....	57
1.1.2.2.	Alcalisation :	57
1.1.2.3.	Séchage :	58
1.2.	<i>Moulage :</i>	58
1.2.1.	Application d'agents de démoulage :	58
1.2.2.	Mise en place des constituants dans le moule :	59
1.2.2.1.	2e cardage :	59
1.2.2.2.	2e découpe :	59
1.2.2.3.	Pesage :	59
1.2.2.4.	Disposition du renfort :	59

1.2.2.5.	Étalement de la matrice :	59
1.2.2.6.	Pressage :	60
1.3.	Démoulage du composite et nettoyage du moule :	60
1.4.	Postcuisson :	61
2.	FORMULATION :	61
2.1.	Composite à renfort unidirectionnel :	61
2.2.	Composite renforcé de tissus :	61
2.3.	Composite à renfort composé :	61
3.	RESUME DES PROCEDES DE MISE EN ŒUVRE :	62

CHAPITRE 7: COMPARAISON DES MATÉRIAUX COMPOSITES OBTENUS 63

1.	CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES ET DES COMPOSITES OBTENUS :	63
1.1.	Propriétés physiques :	63
1.1.1.	Appréciation visuelle des composites mis en œuvre :	63
1.1.1.1.	Composites UD :	63
1.1.1.2.	Composites renforcés de tissus :	65
1.1.2.	Longueur des fibres acquises et couleur des fibres :	66
1.1.3.	Différences entre les deux espèces de bambou :	67
1.1.4.	Masse linéique :	68
1.1.5.	Masse surfacique :	68
1.1.6.	Masse volumique :	69
1.1.7.	Test d'usinage et aptitude à l'assemblage :	70
1.1.8.	Taux de compression.....	70
1.1.9.	Absorption d'eau :	71
1.2.	Propriétés mécaniques :	71
1.2.1.	Propriétés mécaniques théoriques des fibres végétales étudiées :	71
1.2.2.	Essais de flexion à trois points :	72
1.2.2.1.	Contrainte à la rupture en flexion :	72
1.2.2.2.	Déformation en surface :	76
1.3.	Composition chimique :	79
2.	VALORISATION DES SOUS-PRODUITS ET REALISATION DE L'ESSAI FLEXION.....	80
3.	PROPRIETES DE QUELQUES MATERIAUX :	80
3.1.	Description :	80
3.2.	Origine :	80
3.3.	Propriétés physiques :	81
3.3.1.	Masse :	81
3.3.2.	Test d'usinabilité et aptitude à l'assemblage :	81
3.4.	Propriétés mécaniques :	81
4.	RESULTATS ET DISCUSSIONS :	82
4.1.	Contrainte à la rupture :	82
4.1.1.	Composites UD :	82
4.1.2.	Composites à renfort tissé et composé :	83
4.2.	Déformation en surface :	84
4.2.1.	Composites U.D :	84
4.2.2.	Composites à renfort tissé et composé :	84
5.	CONCLUSION PARTIELLE :	85

CHAPITRE 8: ÉVALUATION TEMPORELLE POUR LA MISE EN ŒUVRE DES COMPOSITES ET GESTION DES MATIÈRES PREMIERES..... 86

1.	ÉVALUATION TEMPORELLE DE MISE EN ŒUVRE :	86
1.1.	Préparation du renfort :	88
1.1.1.	Acquisition du renfort :	88

1.1.1.1. Renfort unidirectionnel :	88
1.1.1.2. Renfort tissé :	88
1.1.1.3. Renfort composé :	88
1.1.2. Traitement des fibres achetées et des tissus au moulage :	89
1.1.2.1. 1 ^{re} Découpe des renforts :	89
1.1.2.2. Alcalisation :	89
1.1.3. Séchage :	89
1.2. Moulage :	89
1.2.1. Application d'agents de démoulage :	89
1.2.2. Mise en place du renfort dans le moule :	89
1.2.3. Pressage :	90
1.3. Démoulage du composite et nettoyage du moule :	90
1.4. Postcuisson :	90
2. ESTIMATION DE LA DUREE DE MISE EN ŒUVRE :	90
3. GESTION DES MATIERES PREMIERES	93
3.1. Rendement :	93
3.2. Renouvellement des plantes à fibres :	96
4. CYCLE DE MOULAGE :	97
4.1. Processus du cycle :	97
4.2. Durée d'un cycle de moulage et capacité de production journalière :	98
4.2.3. Durée d'un cycle de moulage :	98
4.2.4. Capacité de production journalière :	98
4.3. Niveau d'amélioration envisageable :	98
CHAPITRE 9: SÉLECTION DES COMPOSITES À RENTABILISER.....	99
1. RECAPITULATION DES DONNEES RELATIVES A CHAQUE COMPOSITE :	99
2. POSSIBILITE D'AJOUT DE CHARGE :	101
3. FORMULATIONS ADOPTEES EN FONCTION DES UTILISATIONS ENVISAGEES :	101
CHAPITRE 10: ÉTUDES D'IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX.....	102
1. ÉSTIMATION DU COUT DE REALISATION :	102
2. IMPACTS SUR LE PLAN SOCIO-ECONOMIQUE :	104
3. IMPACTS SUR LE PLAN ENVIRONNEMENTAL :	105
2.1. Impacts positifs :	105
2.2. Impacts négatifs :	106
2.2.1. Épuisement de ressources naturelles :	106
2.2.2. Effets directs sur la santé :	106
2.2.3. Pollution du sol et de l'eau :	106
2.2.4. Pollution de l'air :	106
2.3. Mesures d'atténuation des impacts négatifs :	106
CONCLUSION ET PERSPECTIVE	107
BIBLIOGRAPHIES.....	109
WEBOGRAPHIES.....	111

Auteur : BINGUIRA Djack Kelly Henderson Wang



Titre du mémoire: « *COMPARAISON DE MATERIAUX COMPOSITES A RENFORT FIBRES VEGETALES* »

Nombre de pages : 112

Nombre de tableaux : 70

Nombre de figures : 31

Nombre de photos : 24

Nombre de graphiques : 08

RESUME

Madagascar possède une énorme potentielle en fibres végétales qui sont peu valorisées dans le domaine des matériaux composites. Ce mémoire recherche les fibres, qui étant incorporées avec le polyester insaturé, donnent des composites offrant de meilleures performances mécaniques, avec une durée de renouvellement le plus court et un prix de revient le moins cher possible. Les essais de flexion sur les éprouvettes avec un taux variable en renfort ont permis de déduire que parmi les fibres étudiées à savoir, les fibres de bambou, de coco, de sisal, de raphia, celles qui sont sélectionnées sont les fibres de sisal. Des essais supplémentaires ont été menés avec les fibres de sisal en y incorporant des armures unidirectionnelles et satins afin d'en déterminer l'influence sur la contrainte à la rupture et la déformation en surface. Ce qui a montré que l'armure unidirectionnelle influence principalement la déformation en surface, et le satin la contrainte en rupture.

Mots-clés : Polyester insaturé, composite, bambou, raphia, sisal, coco, fibres, armure unidirectionnelle, armure satin.

SUMMARY

Madagascar owns tremendous potential of plant fibers which so far are not exploited as composite materials yet. The present work is related to use fibers from bamboo, coconuts, sisal and raffia as supports of material composites stabilized with unsaturated polyester.

Different assays were carried out on these different types of fibers to improve the mechanical performances of the composite materials but at the end and as our conclusion, the sisal fibers were chosen when mixed with unidirectional "satin tex weave" which has improved mainly on the surface deformation of the composite material.

Keys words : Unsaturated polyester, composite, bamboo, raffia, sisal, coir, fibers, unidirectional weave, satin weave.

Title : « *COMPOSITE MATERIAL COMPARISON WITH REINFORCEMENT VEGETALES FIBERS* »

Rapporteur du mémoire : Docteur RANARIVÉLO Michel

Adresse de l'auteur : Lot 25 47 pcellle 21/11 Morarano Toamasina

Contact/E-mail : 033 08 628 93/djackkelly@gmail.com