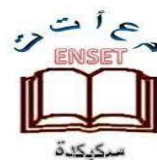




République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement
Technologique-Skikda



Département de Technologie

Filière : Geine des procédée

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de professeur de l'enseignement
secondaire

Thème :

**Caractérisation mécanique et physique d'un bio-composite à base
de résine vinyle ester renforcée par les fibres de palmier dattier**

Présenté par :

- Bououda Rachid
- Rouabhia Manel
- Senouci Raounak

Encadrant(e) :

- Dr. Dehas Ouided

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Role
Zenikheri Fahima	M.C.B	ENSET Skikda	Président
Dehas Ouided	M.C.B	ENSET Skikda	Encadrant
Babouri Laidi	PR	ENSET Skikda	Examineur
Djedid Nabil	M.A.A	ENSET Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous souhaitons remercier le docteur DEHAS OUIDED qui a encadré cette thèse, Elle nous a soutenue tout au long de ce travail, sa disponibilité et son soutien constant, son assistance, sa confiance et ses conseils instructifs et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines

Nous tenons à exprimer toutes nos gratitudeux aux membres du jury. Tout d'abord, au Dr. ZENIKHERI FAHIMA pour avoir accepté de présider notre jury de soutenance, nos remerciements s'adressent également à Dr. BABOURI LAIDI et Dr. DJEDID NABIL d'avoir accepté de rapporter cette thèse.

*Nous tenons à remercier les enseignants du département de technologie de
ENSET SKIKDA*

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté leur aide et leur encouragement.

Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Sans oublier aussi de dédier ce travail à nos parents et qui m'ont nos familles qui nous avons toujours soutenu et encouragé dans nos différents choix d'études.

إِهْدَاء

الحمد لله الذي وفقنا لإتمام هذا العمل أما بعد:
أهدي ثمرة تخرجي المتواضع هذا إلى " أمي " من علّمتني العطاء، وغمرتني بخنائها وكرمها.
إلى روح والدي العزيز رحمه الله
إلى إخوتي سندي وعضدي ومشاطري أفراحي وأحزاني " الحبيب "، " عبد المجيد " " فتيحة "، " صفية "
إلى أخي الأصغر الذي لا تحلو الحياة الي به " بو عبد الله "
إلى كبيرة المقام ذات السيرة العطرة " جدتي " الغالية
إلى عمّي " العيد " الذي كان على الدوام ناصحًا أمينًا بعد وفاة والدي، فهو بمثابة الأب والصديق
إلى أولئك الذين يفرحهم نجاحنا، ويحزنهم فشلنا إلى " عمي أحمد وأولاده وزوجته "، " عمتي فاطمة "
إلى أصدقاء الطرق جميعًا، الوعة والسهلة، والمظلمة والمشرقة، أهدي هذا البحث إذ أقدم هذا الإهداء تعبيرًا
عن امتناني لوجودهم في حياتي " مصطفى دفاف "، " العيد باشا "، " عاشور حمداوي "
إلى رفقاء الدرب الرائعين " بن يوسف بن عثمان "، " حسام زروتي "، " إبراهيم مرحوم "، " سفيان جيلح "
إلى زميلاتي " رونق سنوسي "، " منال رواجية " اللاتان تبادلنا معي الأفكار الثرية والمناقشات البناءة والعمل
الجماعي الذي أثرى بحثنا وجعله أكثر اتساقًا وقوة.
إلى أساتذتي الافاضل من بداية المشوار وحتى هذه اللحظة الجميلة وأشكر كل شخص وقف معي وسانديني
على طوال مسيرتي الدراسية
وأبارك لكل أصدقائي الذين تخرجوا معي وأبارك لأهلهم وان شاء الله التعيين لخدمة بلدنا العزيز.

رشيد

إِهْدَاء

الحمد لله الذي وفقنا لإتمام هذا العمل أما بعد:

لا شيء أعز من رب الكون الذي لم ييخل علي برحمته و نعمته فله الشكر و له الحمد حمدا كثيرا لا نهاية له. أهدي ثمرة تخرجي المتواضع هذا إلى من علمتني الصمود والأمل إلى أعظم وأحن إنسانة في الوجود إلى " أمي الحبيبة " أطال الله في عمرها.

إلى من كابد الصعوبات وقهر المستحيالات من أجلي " والدي العزيز " حفظه الله ورعاه.

إلى أغلى وأعز ما أملك في هذه الدنيا إخوتي وأخواتي " شيماء "، " عبد الحكيم "، " ريتاج "، " سفيان "

إلى من كاتفني ونحن نشق الطريق معا نحو النجاح في مسيرتنا العلمية، إلى رفيقة دربي " رواجية منال "

إلى زميل العمل والجهد والمثابرة " بوعودة رشيد "

إلى صديقتي المقربة " نجلاء " وفقها الله في مسيرتها المتبقية.

إلى كل من جمعني بهم المشوار الدراسي من بدايته إلى اليوم.

إلى كل الأهل والأقارب من قريب أو بعيد.

إلى كل من علمني حرفا وانطبق عليه القول " أطهر الناس أعراقا أحسنهم أخلاقا " أساتذتي الكرام.

إلى كل هؤلاء وبكل معاني الحب والوفاء أهدي ثمرة جهدي هذا.

وأبارك لكل أصدقائي الذين تخرجوا معي وأتمنى لهم التوفيق والسداد في مسيرتهم المهنية.

رونق سنوسي

إِهْدَاء

الحمد لله الذي أحاط بكل شيء علما. الحمد لله الذي جعل العلم تاجا
وجعل له مجلي ومعراجا. الحمد لله الذي علم بالقلم. علم الانسان ما لم يعلم.
إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة ونصح الأمة وكشف الغمة ومحا الظلمة
نبينا محمد صلى الله عليه وسلم نور هذه الأمة

إلى قلبي ابي بل قدوتي، بل قوتي، بل مسندي وإذا ذكرت خصاله من اي فضلا ابتدي
جمع الحنان كغيمة في قلبه العذب الندي من جاد لي من من دون حدٍ من بداية مولدي

حسي الله نعيما في حياتي أن هذا والدي (محمد رواجية)

إلى امي (جوهرة) يا جنانا يا حنانا

يا عيوننا باتت لنا ساهرة يا ملاذا يا أمانا

يا رحيقا من زهور عاطرة

لن أوفيك شكر كفيك

فالله يجزيك جنان الآخرة

إلى التي وجودها في الحياة نعمة وقوة وإلهام جدتي الغالية.

إلى الأمان إلى الظهر الذي لا يميل إلى إخوتي الأعمام و خاصة بذكر (نذيرة و ايمان).

إلى سندي في كل خطوة من خطواتي مشواري خالتي الحبيبة (سامية بلبخوش) وابنتي خالتي (زينة توابتية)

إلى صديقتي ورفيقة دربي سندي في الطريق في السراء والضراء إلى غاليتي (رونق سنوسي)

إلى صديقتي الغالية والعزيزة على قلبي الأستاذة (شهيدة رانية)

إلى زميل الدراسة والعمل والثبات والاستمرارية زميلي (بوعودة رشيد)

إلى الذين حملوا أقدس رسالة في الحياة إلى اللذين مهدوا لنا طريق العلم والمعرفة إلى أساتذتي الأفاضل.

منال رواجية

Résumé

RESUME

L'étude pratique abordée par le présent mémoire a consisté à mettre en évidence les effets du taux de la fibre de palmier dattier (PD), ajouté comme renfort, sur les caractéristiques mécaniques et physiques des bio-composites à matrice vinyle ester (RVE), fabriqués par le procédé de moulage au contact. Les résultats des essais mécaniques ont montré l'augmentation des caractéristiques en traction et l'augmentation de la résilience des composites avec le taux de la fibre. La densité de la résine vinyle ester a été légèrement affectée par l'ajout de la fibre PD et ce à cause de la faible densité de cette dernière. Par ailleurs, Les composites à base de fibres de palmier dattier présentent des taux d'absorption d'eau plus élevés en raison de la nature hydrophile de la cellulose.

Mots clés : Composite, Matrice, Renfort, Propriétés physiques et mécaniques, Palmier dattier (PD), Résine vinyle ester, Charge végétale, Matériaux bio-composites.

المخلص

تتناول الدراسة العملية التي تم تناولها في هذا البحث إبراز تأثيرات نسبة ألياف نخيل التمر (PD)، المضافة كتعزيز، على الخصائص الميكانيكية والفيزيائية للمواد الحيوية المركبة ذات مصفوفة الفينيل إستر (RVE)، المصنوعة بواسطة عملية التشكيل بالاتصال. أظهرت نتائج الاختبارات الميكانيكية زيادة في خصائص الشد وزيادة في مقاومة الصدمات للمواد المركبة مع زيادة نسبة الألياف. كما تأثرت كثافة راتنج الفينيل إستر بشكل طفيف بإضافة ألياف نخيل التمر بسبب كثافتها المنخفضة. علاوة على ذلك، فإن المواد المركبة المصنوعة من ألياف نخيل التمر تظهر معدلات امتصاص ماء أعلى بسبب الطبيعة المحبة للماء للسليولوز.

الكلمات المفتاحية: مركب، مصفوفة، تعزيز، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، ألياف نخيل التمر (PD)، راتنج فينيل إستر، حشوة نباتية، مواد حيوية مركبة.

Abstract

Abstract

The practical study addressed in this dissertation highlights the effects of the date palm fiber (DPF) content, added as reinforcement, on the mechanical and physical properties of vinyl ester matrix bio-composites (VEBCs), manufactured by the hand lay-up process. The results of the mechanical tests showed an increase in tensile properties and resilience of the composites with the fiber content. The density of the vinyl ester resin was slightly affected by the addition of DPF due to its low density. Furthermore, the DPF-based composites exhibited higher water absorption rates due to the hydrophilic nature of cellulose.

Keywords: Composite, Matrix, Reinforcement, Physical and mechanical proprieties, Date palm fibres (PD), Vinyl ester resin, plant filler, Bio-composite materials.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Les matériaux composites

I.1.	Introduction.....	3
I.2.	Définition d'un matériau composite	3
I.3.	Composants des matériaux composites	3
I.3.1.	Les Matrices	3
I.3.2.	Renfort.....	6
I.3.3.	Les charges :	7
I.3.4.	Les additifs	7
I.4.	Type des matériaux composites	8
I.4.1	Composite hautes performances (HP).....	8
I.4.2.	Les composites grandes diffusions	8
I.5.	Classification des composites	8
I.5.1	Selon la géométrie	8
I.5	Selon la nature des constituants.....	9
I.6.	Procédés de mise en œuvre des composites.....	11
I.6.1.	Moulage au contact	11
I.6.2.	Moulage par injection basse pression de résine - RTM.....	11
I.6.3.	Moulage par injection de compound - BMC	11
I.6.4.	Moulage par compression de mat préimprégné – SMC	12
I.6.5.	Moulage par pultrusion	12
I.6.6.	Moulage par injection.....	12
I.7.	Avantages et inconvénients des matériaux composites :	13
I.8.	Application des matériaux composites :	13
I.9.	Conclusion	15

Chapitre II : Renforts et les charges

II.1.	Renforts	17
II.1.1.	Définition.....	17
II.1.2.	Types des renforts.....	17
II.2.	Les charges	21
II.2.1.	Définition.....	21
II.2.2.	Types des charges	21
II.3.	Fibres naturelles	22

Sommaire

II.3.1.	Classification de fibres naturelles.....	22
II.4.	Les Fibres végétales	23
II.4.1.	Classification des fibres végétales.....	23
II.4.2.	Composition chimique des fibres végétales	24
II.4.3.	Propriétés des fibres végétales.....	27
II.4.4.	Application des fibres végétales.....	28
II.4.5.	Avantages et inconvénients des fibres végétales	28
II.4.6.	Présentations des différentes fibres végétales : [26].....	29
II.5.	Biocomposites	33

Chapitre III : Travaux de recherche

III.1.	Définition et classification des composites	35
III.1.1.	Classification selon le type de matrice	35
III.1.2.	Classification selon la catégorie du renfort	36
III.1.3.	Classification selon la forme du renfort	36
III.1.4.	Classification selon le marché	37
III.2.	Matériaux composites bio-sourcés	37
III.2.1.	Renforts à fibres végétales.....	37
III.2.2.	Matrices	44
III.3.	Procédés de fabrication des composites	46
III.4.	Matériaux végétaux du palmier dattier.....	48
III.4.1.	La palme.....	50
III.4.2.	Composition chimique de la palme	51
III.4.3.	Déchet du palmier dattier	51
III.4.4.	Domaines d'utilisation des déchets de palmier dattier	52
III.5.	Synthèse des travaux réalisés	53
III.5.1.	Renforts issus de palmier dattier	53
III.5.2.	Composites à base de renforts de palmier dattier	57
III.6.	Composite de structure sandwich.....	60
III.6.1.	Caractéristiques des structures sandwichs.....	61
III.6.2.	Classification des structures sandwichs.....	61
III.6.3.	Domaine d'utilisation	62
III.7.	Conclusion.....	63

Chapitre IV : Matériaux et techniques expérimentales

IV.1.	Introduction	66
IV.2.	Présentation des matériaux utilisés	66

Sommaire

Résine vinyle ester accélérée	66
Catalyseur P MEC (1,5 pcr).....	66
IV.2.1. Résine vinyle ester.....	67
IV.2.2. Système catalytique Catalyseur/accélérateur.....	67
IV.2.3. Charge utilisée et son prétraitement	67
IV.3. Elaboration des composites	68
IV.4. Préparation des échantillons.....	69
IV.5. Essais expérimentaux effectués.....	70
IV.5.1. Analyse structurale par la spectroscopie IRTF	70
IV.5.2. Essais mécaniques	70
IV.5.3. Essais physiques	71
Chapitre V : Résultats et discussion	
V.1.....Caractérisation de la fibre de palmier dattier (PD) et de la résine vinyle ester par IRTF	73
V.2. Propriétés mécaniques des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD).....	73
V.2.1. Propriétés en traction.....	74
V.2.2. Résultats de l'essai de choc	75
V.2.3. Etude de la dureté SHORE :	76
V.3. Propriétés physiques des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD).....	76
V.3.1. Densités des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD).....	76
V.4. Influence du taux de fibre sur l'absorption d'eau des bio-composites vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) :	77
Conclusion générale	79
Références	81
Perspective	80
ANNEXES.....	lxxxix

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Les matériaux composites

Figure I-1: Schéma descriptif de la structure d'un matériau composite.	3
Figure I-2: Classification des matrices.	4
Figure I-3: différents types de résines.	5
Figure I-4: Les différents types de renfort de bas	7
Figure I-5: Schéma de différents types de matériaux composites.	8
Figure I-6: différents types de matériaux composites.	9
Figure I-7: Classification des matériaux composites.	10
Figure I-8 : Représentation schématique de la technique de moulage au contact.	11
Figure I-9: Représentation schématique de la technique de moulage par injection.	11
Figure I-10: <i>Représentation schématique de la technique de moulage par compression</i>	12
Figure I-11 : Moulage par injection	13
Figure I-12: turboréacteur GE90.....	13
Figure I-13: Composites dans l'aéronautique civile	14
Figure I-14 Exemples d'utilisation des matériaux composites dans l'industrie du sport.	14

Chapitre II : Renforts et les charges

Figure II-1: Fibres de verre.....	17
Figure II-2: Procédés d'élaboration des fibres de carbone	18
Figure II-3 : Structure chimique des aramides.	18
Figure II-4 : Classification des fibres naturelles.....	22
Figure II-5 : Structure chimique de la cellulose.....	24
Figure II-6 : Liaisons hydrogènes intra- et intermoléculaires dans la cellulose.	25
Figure II-7 : Structure chimique d'une classe des hémicelluloses.	25
Figure II-8 : Structure chimique des lignines.	26
Figure II-9 : Structure de la paroi cellulaire de la fibre végétale.	27
Figure II-10: Plante de chanvre et les fibres de chanvre.	29
Figure II-11: Plante du lin et les fibres de lin.	29
Figure II-12 : Plante et fibres naturelles de coton.....	30
Figure II-13: Plante de l'abaca et fibres de l'abaca.	30
Figure II-14: Plante de Kénaif avec ces fibres.....	31
Figure II-15: Jute :(a) plante, (b) tisse, (d) fibre.	31
Figure II-16: Plante de Ramie et les fibres naturelles de la Ramie.	31
Figure II-17: Fibre naturelles de la plante du coco.....	32
Figure II-18 : fibres naturelles du sisal.	32
Figure II-19: Palmier et les fibres de palmier dattier.....	32
Figure II-20 : La plante et les fibres l'Alfa.	33

Chapitre III : Travaux de recherche

Figure III-1: Matériaux composites à particules, à fibres et stratifiés.....	35
Figure III-2 Classification des composites selon la matrice.	36
Figure III-3. Classification des composites selon la catégorie du renfort	36
Figure III-4. Classification des composites selon la forme des renforts.....	37
Figure III-5. Classification des fibres naturelles selon l'origine	38

Liste des figures

Figure III-6. Classification des fibres végétales selon l'origine.....	39
Figure III-7. Structure schématique d'une fibre végétale.....	40
Figure III-8. Molécule de la cellulose.....	40
Figure III-9. Structure d'un type de xyloglucane	41
Figure III-10. Structure des précurseurs de la lignine a) ρ -coumaryl alcohol, b) coniferyl alcohol, c) sinapyl alcohol	41
Figure III-11. Structure d'une chaîne de pectine (acide polygalacturonique)	42
Figure III-12. Différentes techniques d'extraction des fibres végétales.....	43
Figure III-13. Matrice utilisée pour les matériaux composites bio-sourcés.	45
Figure III-14. Structures moléculaires des polymères : a) polymère thermoplastique, b) polymère thermodurcissable.....	45
Figure III-15. Mise en œuvre des matériaux composites selon la nature de la matrice.	47
Figure III-16. Quelques procédés de mise en œuvre des composites.....	48
Figure III-17. Répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014	49
Figure III-18. Répartition de palmier dattier en région de Biskra.	49
Figure III-19. Proportion de variétés des palmiers dattiers à Biskra.	49
Figure III-20. Différentes parties d'un palmier dattier et l'évolution naturelle d'une palme.	50
Figure III-21. <i>Les quatre parties de la palme mûre</i>	51
Figure III-22. <i>Composition chimique des fibres de palmier (% en poids)</i>	51
Figure III-23: Déchets des palmiers dattiers : a) palmes sèches, b) stipes.	52
Figure III-24. Quelques utilisations traditionnelles des déchets de palmier dattier	52
Figure III-25. Bois MDF à base de palmier dattier.	52
Figure III-26. Schéma représentatif d'une structure sandwich.....	61
Figure III-27. Classification des structures sandwichs selon la nature de matériau utilisé.	62
Figure III-28. Quelques utilisations de structure sandwich a) bâtiment, b) transport, c) sport ..	62

Chapitre IV : Matériaux et techniques expérimentales

Figure IV-1: Préparation des composites à matrice vinyle ester renforcée par La fibre de palmier dattier (PD) orientation aléatoire.....	66
Figure I-1: La fibre de palmier dattier (PD) ainsi que le moulin à café.....	115
Figure I-2 : opération de tamisage avec une tamiseuse d'analyse (AS200 basic).....	116
Figure I-3: Préparation de composite en résine vinyle ester par le procédé de moulage au contact.....	117

Chapitre V : Résultats et discussion

Figure V-1. Variations de la contrainte à la rupture des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre.	74
Figure V-2. Variations de la déformation à la rupture des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre.	75
Figure V-3: Variations de la résilience des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre.....	75
Figure V-4 : Variations de la dureté Shore des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre.	76

Liste des figures

Figure V-5 : Variations de la densité des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre.....	77
Figure V-6 : Influence du taux de fibre sur l'absorption des bio-composites. résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD).....	77
Figure V-7 : Spectres IRTF de palmier dattier (PD).....	73

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I-1 Caractéristiques des résines thermoplastiques.	5
Tableau I-2: Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables.	6
Tableau II-1 : Récapitulatif des principales propriétés mécaniques des renforts	20
Tableau II-2: Comparaison des propriétés mécaniques des fibres	20
Tableau II-3: Composition chimique des fibres végétales	26
Tableau II-4 : Domaines d'application des fibres végétales	28
Tableau II-5: Les principaux avantages et les inconvénients des fibres végétales.....	29
Tableau III-1 : Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales	44
Tableau IV-1: Caractéristiques générales de cette résine vinyle ester	67
Tableau V-1: Attribution des bandes infrarouges de palmier dattier (PD).....	73

Liste des abréviations

Liste des abréviations

TP	Thermoplastiques
PVC	Polychlorures de vinyle
GD	Grandes diffusions
HP	Hautes performances
CMO	Composites à matrices organiques
CMC	Composites à matrices céramiques
RTM	Résine Transfert Molding
BMC	Bulk Molding Compound
SMC	Sheet Molding Compound
MEB	Microscopie électronique à balayage
PET	Polyéthylène téréphtalate
AA	Acide acrylique
PMMA	Poly méthacrylate de méthyle
RTF	Infrarouge à transformée de Fourier
RVE	Résine vinyle ester
PD	Fibre de palmier dattier
PMEC	Peroxyde de méthyléthylcétone
FTIR	Infrarouge à transformée de Fourier

Liste des symboles

Liste des symboles

σ_r	la rupture
ϵ_r	déformation à la rupture
F	Charge de traction supportée par l'éprouvette (N),
S	Section initiale (m ²).
ΔL	Allongement,
L₀	Longueur initiale de l'éprouvette,
L	Longueur finale de l'éprouvette
A_n	l'énergie cinétique en joule absorbée par l'éprouvette au moment de l'impact
d	masse volumique de l'échantillon exprimée en g/cm ³
$\rho(fl)$	masse volumique du liquide d'immersion exprimée en g/cm ³
W_a	poids de l'échantillon dans l'air, exprimé en g
W_{fl}	Valeur absolue de la poussée hydrostatique, exprimé en (g)

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Ces dernières années, l'utilisation de matériaux bio-composite (parfois aussi appelé les composites bio-sources) s'est généralisée en raison de leur faible coût, leur densité peu élevée, leur biodégradabilité, leur disponibilité, leur facilité de mise en œuvre et leur capacité à être recyclés, Les matériaux bio-composite impliqué dans de nombreux secteurs : aéronautique, automobiles, bâtiment...etc. La dépendance aux ressources locales disponibles est devenue une nécessité, en particulier dans la construction.

L'orientation actuelle de l'exploitation et l'utilisation des matériaux naturels disponibles et durables est vivement encouragée dans divers secteurs industriels. Plusieurs raisons expliquent cette incitation puisque ces éco-matériaux présentent des avantages, telles que leurs disponibilités à faible coûts d'une part, ses performances mécaniques et thermiques et son faible poids d'autre part. De plus, les matériaux naturels ne sont pas seulement écologiques, mais aussi biodégradables et recyclables. Ces propriétés sont très importantes actuellement pour éviter les dommages relatifs à l'environnement et à la santé humaine causés par l'utilisation des matériaux synthétiques.

Parmi les industries intéressées par l'utilisation de matériaux naturels, en particulier de matériaux composés de végétaux, on peut citer l'industrie des matériaux composites, des revêtements, de la papeterie et du textile. Ainsi que la fabrication de différents panneaux de bois industriels, principalement basés sur le recyclage des déchets de bois. Ces matériaux bio-sourcés sont utilisés dans divers secteurs (bâtiments, transports, mobilier et les éléments isolants...). Mais ces industries se heurtent au problème de la disponibilité des matières premières. Par exemple, pour la fabrication de panneaux de bois industriels, les arbres devraient être utilisés comme sources primaires de bois. Cela affecte négativement l'environnement et détruit les forêts et engendrent ainsi des tensions sociales et professionnelles qui peuvent dégénérer. Dans la plupart des cas, l'utilisation de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, nécessite la replantation des végétations. De plus, l'extraction de ces fibres végétales à partir des plantes nécessite souvent des techniques spécifiques et complexes l'emploi parfois des méthodes chimiques. Les méthodes d'extraction chimiques affectent les propriétés naturelles des matériaux et augmentent directement le coût de fabrication.

Nous intéresserons dans cette étude aux matériaux renforcés par les fibres de palmier dattier qui constitue l'une des richesses végétales les plus abondantes dans notre pays. Le palmier produit annuellement de grandes quantités de déchets qui sont exploités en très petites quantités qui peuvent être utilisées comme renfort dans les matériaux.

Le mémoire a été structuré en trois chapitres théoriques, dans lesquels nous avons tenu à présenter des généralités sur les matériaux composites, les caractéristiques, les propriétés des charges et des renforts et des travaux de recherche. Dans le quatrième chapitre, nous avons décrit les matériaux utilisés, la méthodologie expérimentale adoptée ainsi que les techniques de caractérisation. Le dernier chapitre concerne les résultats et leurs discussions et se termine par une conclusion générale.

L'objectif tracé dans ce travail est d'étudier les propriétés physico-mécaniques d'un matériau composite bio-source; Ce matériau est basé sur une matrice thermodurcissable et une fibre végétale. Les plaques en matériau composite (résine vinyle ester /fibre de palmier dattier) ont été élaborées avec différentes fractions massiques de fibres (1 ,2 ,3, 4 et 5 pcr).

Chapitre I :
Les matériaux composites

I. Les matériaux composites

I.1. Introduction

Les polymères sont des matériaux très versatiles, mais ils présentent également certaines limites. En particulier, ils sont souvent relativement faibles et peu résistants aux chocs. La technologie moderne a besoin de matériaux qui combinent à la fois une rigidité, une résistance mécanique, une ténacité élevée et une grande légèreté. Aucun matériau simple ne permet de combiner ces caractéristiques physiques. C'est pourquoi, depuis un certain nombre d'années, on cherche à obtenir des matériaux combinant différentes propriétés : les matériaux composites.

Les matériaux composites sont constitués de deux ou plusieurs matériaux distincts, appelés renfort et matrice. Le renfort est généralement une fibre, qui apporte la rigidité et la résistance mécanique au composite. La matrice est un matériau continu, qui relie les fibres entre elles et assure la cohésion du matériau. En combinant les propriétés du renfort et de la matrice, on peut obtenir des matériaux aux propriétés exceptionnelles. Par exemple, les composites à base de fibres de carbone sont très résistants, légers et rigides. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment l'aéronautique, l'automobile et le sport. [1]

Les matériaux composites sont une technologie en plein développement. De nouvelles applications sont développées en permanence, et les performances des composites ne cessent de s'améliorer. Les composites sont en train de révolutionner de nombreux secteurs industriels, et ils sont susceptibles de jouer un rôle de plus en plus important dans l'avenir. [2]

I.2. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est tout alliage ou matière première comportant un renfort sous forme Filamentaire. Il nécessite l'association intime d'au moins deux composants : le renfort (la fibre) et La matrice (**Figure 1.1**), qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la Notion d'un agent de liaison, l'interface.

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou Plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun Des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des Arrangements de fibres, les renforts qui sont noyés dans une matrice dont la résistance mécanique Est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces [3].

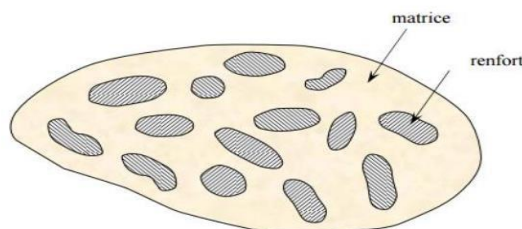


Figure I-1: Schéma descriptif de la structure d'un matériau composite. [4]

I.3. Composants des matériaux composites

I.3.1. Les Matrices

La matrice est l'un des constituants de base des matériaux composites, elle a pour rôle de donner la forme désirée au produit, assurer la cohésion des fibres renforts pour une meilleure homogénéisation de l'ensemble, répartir les charges mécaniques et les contraintes encaissées,

apporter la tenue chimique de la structure et la protection des renforts vis-à-vis du milieu extérieur (chocs thermiques ou mécaniques). La classification des types de matrices couramment rencontrés est donnée sur la **figure I-2**. [5]

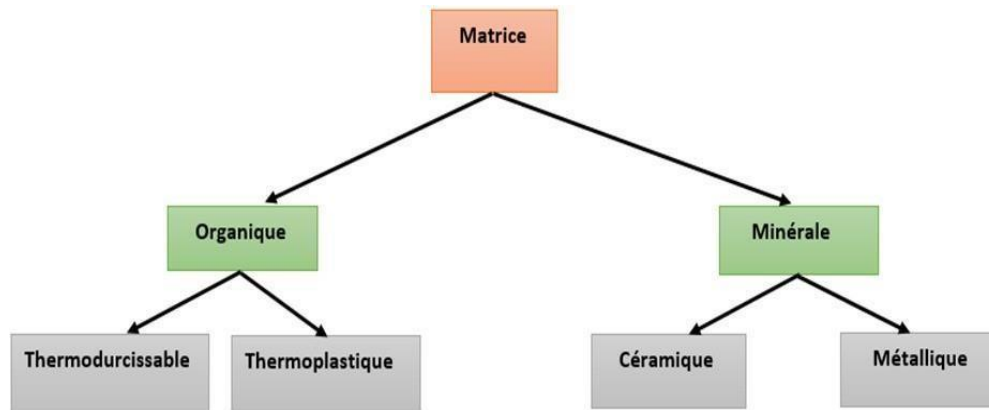


Figure I-2: Classification des matrices. [6]

❖ Matrices minérales

a) Matrice métallique

Les composites à matrice métallique ont été développés pour améliorer certaines caractéristiques des métaux, ainsi que pour pallier certains inconvénients des composites à matrice organique (température d'utilisation limitée, vieillissement). Le renforcement des métaux et de leurs alliages par des fibres permet une amélioration de la rigidité, de la résistance mécanique et de la tenue à la fatigue à température ambiante. Ces matériaux ont une excellente tenue à l'environnement, sont insensibles aux rayons UV, et présentent une bonne stabilité dimensionnelle ainsi qu'une bonne conductivité électrique et thermique. [7]

b) Matrice céramique

Pour les composites à matrice céramique (CMC), le matériau est utilisé pour des applications à très haute résistance. Les céramiques sont des matériaux fragiles. Avec les CMC, les renforts permettent d'avoir un matériau plus ductile. Les matrices les plus utilisées sont composées de carbone, de silicium de carbure (SiC), d'alumine ou de verre. Les renforts plus utilisés sont les fibres de carbone et les fibres de silicium de carbure. Les applications des CMC sont entre autres les disques de freinage d'avion et de voiture. [7]

❖ Matrices organiques

La matrice organique est la partie polymère du système qui se divise en deux familles principales thermoplastiques et thermodurcissables. Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.
- La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se ponte (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

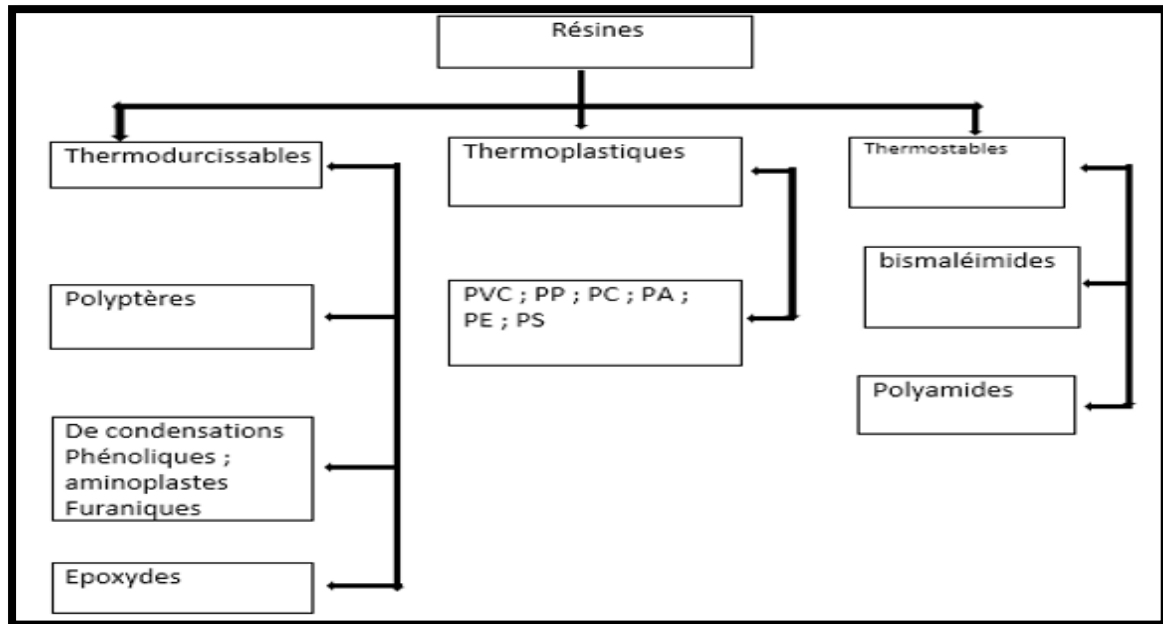


Figure I-3: différents types de résines. [8]

a) Les résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B.

De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le **tableau I-1**. [9]

Tableau I-1 Caractéristiques des résines thermoplastiques. [9]

Résine	Tf(°C)	ρ (Kg/m ³)	ϵ_r^R (MPa)	E(GPa)
Polyamide	65 à100	1140	60 à 85	1,2 à 2,5
Polypropylène	900	1200	200 à 35	1,1 à 1,4

b) Résines thermodurcissables

Les résines Thermodurcissables (TD) sont, en général, associées à des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se pont (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. La transformation est irréversible Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

- **Résines polyesters**

Les polyesters insaturés sont les résines les plus utilisées dans les applications GD. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide plus polyalcool qui se rigidifie sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficiles à stocker.

- Résine époxyde

C'est la plus utilisée dans l'aéronautique ; elle présente un bon accrochage sur les fibres et de bonnes propriétés mécaniques. Elle possède de bonnes propriétés jusqu'à une température de 170°C mais elle est plus coûteuse que la résine polyesters.

- Résine phénolique

Les résines phénoliques sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre.

- Résine thermostable

Polymère présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000 Heures sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques.

- Résine vinylesters

Les vinylesters sont des dérivés de polyesters et d'acide acrylique; ils ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustible [10]. Les propriétés mécaniques des principaux types de matrices organiques sont résumées dans le tableau suivant

Tableau I-2: Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables. [11]

	Polyesters	Phénoliques	Époxydes	Polyimides
Caractéristiques mécaniques	Moyennes	Faibles	Très bonnes	Excellentes
Tenue aux chocs	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
Tenue en fatigue	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
Pouvoir adhésif	Moyen	Moyen	Très bon	Très bon
Température maxi d'utilisation	140°C	130°C	190°C	260°C
Tenue au feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
Retrait	Important	Faible	Très faible	Très faible
Durée de polymérisation	Courte	Courte	Longue	Moyenne
Mise en œuvre	Très facile	Difficile	Facile	Difficile

I.3.2. Renfort

C'est le principal porteur constitutif dans le composite (forme, volume). Il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté. Ces renforts

permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible coût. En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines diverses comme il est indiqué sur la **figure 1.3**

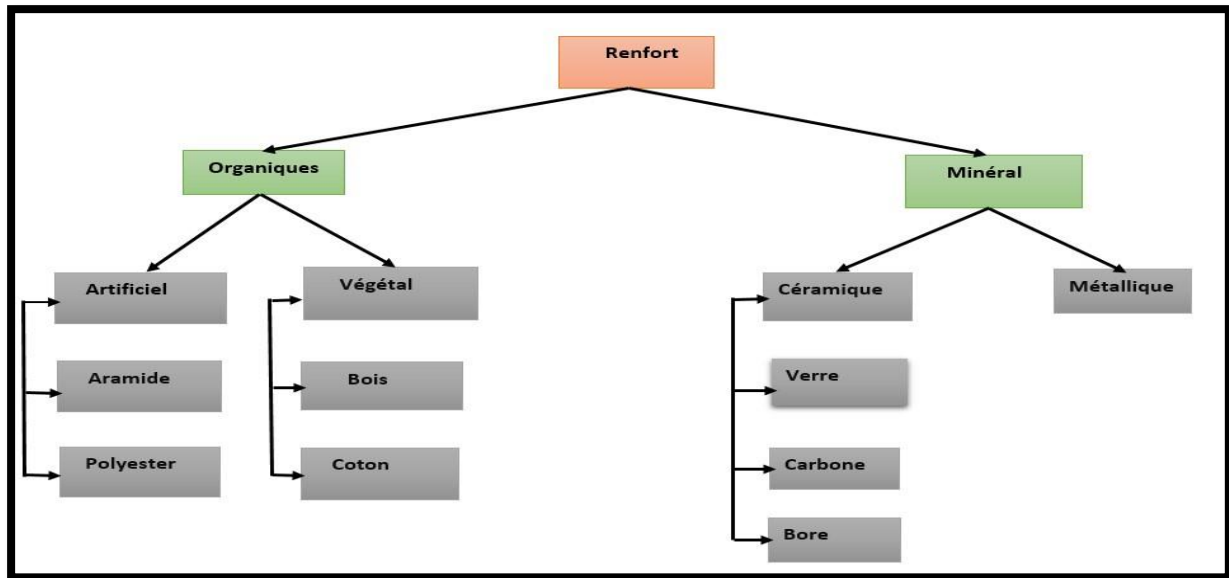


Figure I-4: Les différents types de renfort de base. [12]

Les propriétés physiques et mécaniques sont fortement influencées par la nature des fibres. La forme du renfort est fonction de l'application et du volume de pièces à réaliser, elle permet de distinguer deux grandes familles. [13]

I.3.3. Les charges :

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui est ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électrique ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

A l'inverse des matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ont toujours contenu des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse, dépassant ce pourcentage le composite arrive à saturation.

Pour un matériau donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Compatibilité avec la résine de base ;
- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient [14]

I.3.4. Les additifs

a) Les lubrifiants et agents de démoulage

Ils sont utilisés pour faciliter le façonnage de la résine et réduire sa tendance à adhérer aux moules et mandrins.

b) Les pigments et colorants

En fonction de la nature de la résine et de l'utilisation du matériau composite, ce dernier est coloré soit par des pigments (particules insolubles d'oxydes ou de sels métalliques) dispersés dans une pâte, soit par des colorants (composés organiques solubles dans l'eau ou dans un solvant).

c) Les agents anti-retraits

Le retrait de la résine après polymérisation peut aboutir à un mauvais état de surface, à un gauchissement ou à des microfissurations des pièces moulées. L'ajout de produits spécifiques anti-retrait, à base de thermoplastiques ou d'élastomères, permet de diminuer ou même d'annuler le phénomène.

d) Les agents anti-ultraviolets

Ils ont pour rôle de protéger la résine des rayons ultraviolets contenus dans le rayonnement solaire. En les absorbant, ils évitent une dégradation prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par photo-oxydation. [15]

I.4. Type des matériaux composites

Bien qu'il existe de nombreux types de composites, on peut remarquer que deux familles sont développées selon des objectifs différents.

I.4.1. Composite hautes performances (HP)

Ces composites possèdent des caractéristiques spécifiques supérieures à celle Des aciers, et à l'exemple des composites (Carbone/Carbone), certains d'entre eux peuvent même Supporter des températures très élevées (1000°C). Mais, du fait de la difficulté de fabrication de ces matériaux, leur prix est souvent très élevé.

I.4.2. Les composites grandes diffusions

Ces composites possèdent de faibles caractéristiques mécaniques. Ils sont utilisés pour leur coût global compétitif (matériau + fabrication), et leur faible poids (ex: les pare-chocs automobiles).[16]

I.5. Classification des composites

I.5.1. Selon la géométrie

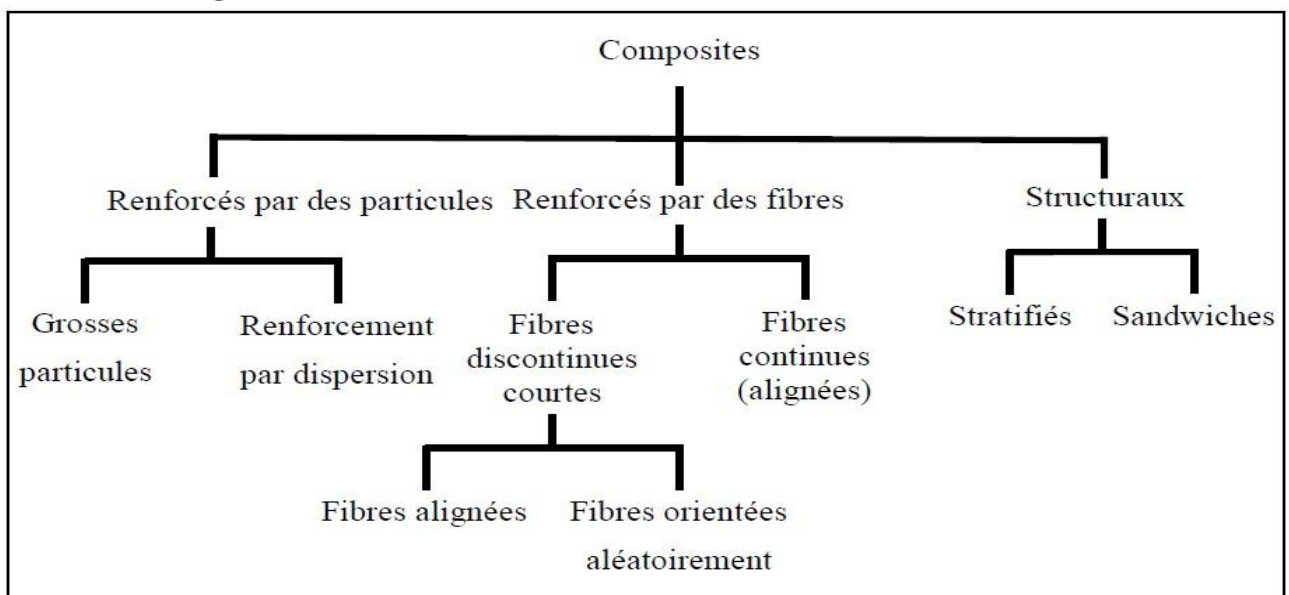


Figure I-5: Schéma des différents types de matériaux composites. [17]

- **Composites à fibres :**

On appelle composite à fibre, si le renfort se trouve sous forme de fibre (soit fibres continues, soit fibres discontinues, coupées ou courtes)

- **Composites à particules :**

On appelle composite à particule, lorsque le renfort se trouve sous forme de particule. Au contraire à une fibre, la particule n'a pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion...etc. mais dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Ce type de composite recouvre un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse. [18]

- **Composites à renforts de paillettes :**

Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.

- **Composites stratifiés :**

Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification. [19]

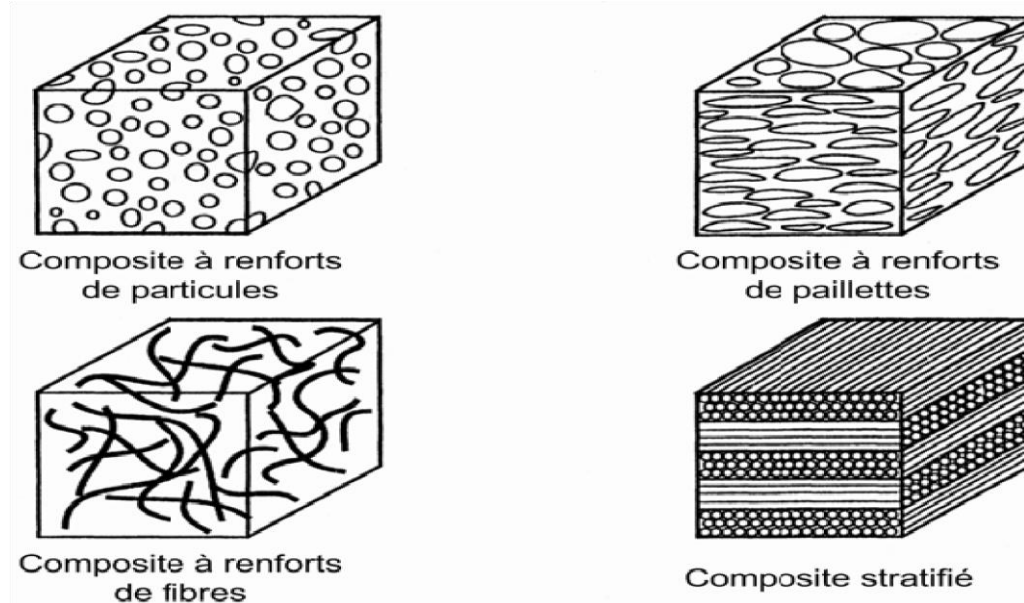


Figure I-6: différents types de matériaux composites. [19]

I.5.2. Selon la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices.

Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autre faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvons citer

❖ **Composites à matrice organique**

Résine et charge, avec :

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

❖ **Composites à matrice métallique**

Alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane, avec

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

❖ **Composites à matrice minérale**

Matrice céramique, avec :

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

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les matériaux à matrice métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600°C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000°C pour une matrice minérale. [17]

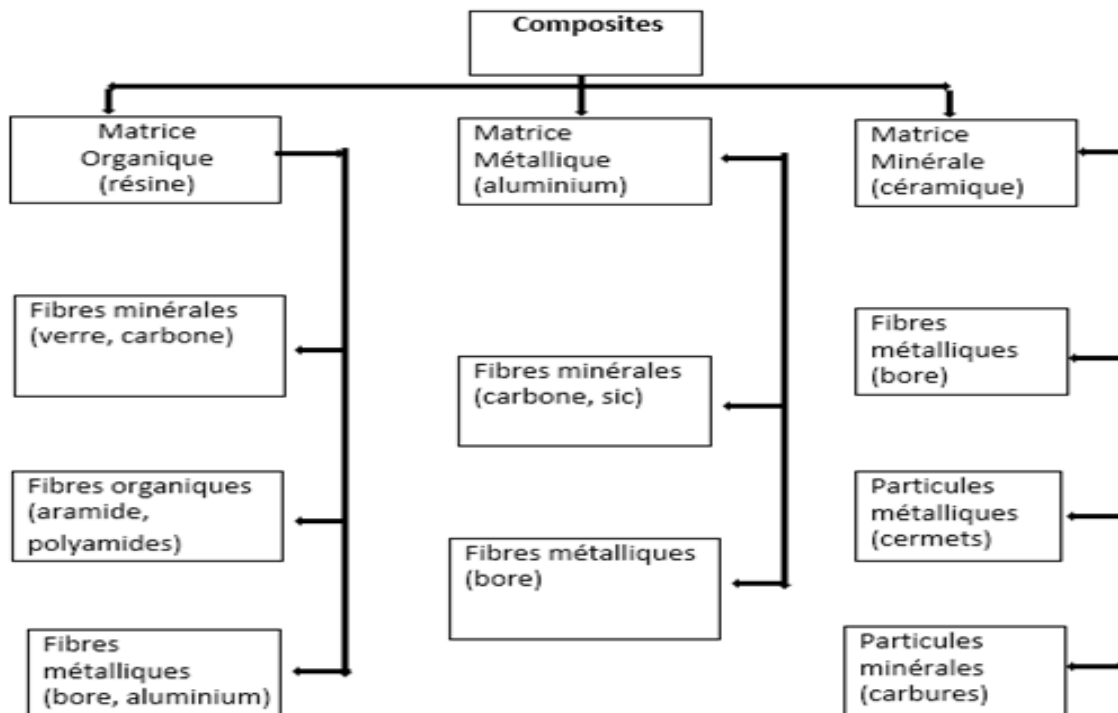


Figure I-7: Classification des matériaux composites. [8]

I.6. Procédés de mise en œuvre des composites

I.6.1. Moulage au contact

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression (**figure I-10**). Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée

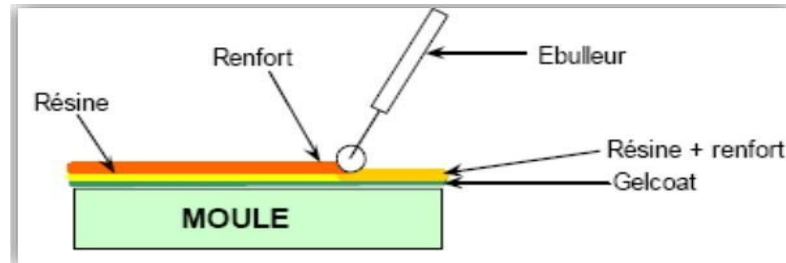


Figure I-8 : Représentation schématique de la technique de moulage au contact. [7]

Cas d'utilisation :

- Procédé pour petites séries : de 1 à 1000 pièces / an.
- Pièces de grandes à très grandes dimensions.
- Revêtement sur supports divers et in situ.

Domaines d'application :

Nautisme ; Piscine ; Génie chimique ; Transport, carrosserie (petites séries) ; Bâtiment, travaux public (coffrage). [20]

I.6.2. Moulage par injection basse pression de résine - RTM

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s'effectue entre moule et contre-moule rigides. Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est disposé dans l'entrefer du moule. Une fois celui-ci solidement fermé, la résine, accélérée et catalysée, est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte. Après durcissement de la résine, le moule est ouvert et la pièce démoulée comme la montre la (**figure I.12**).

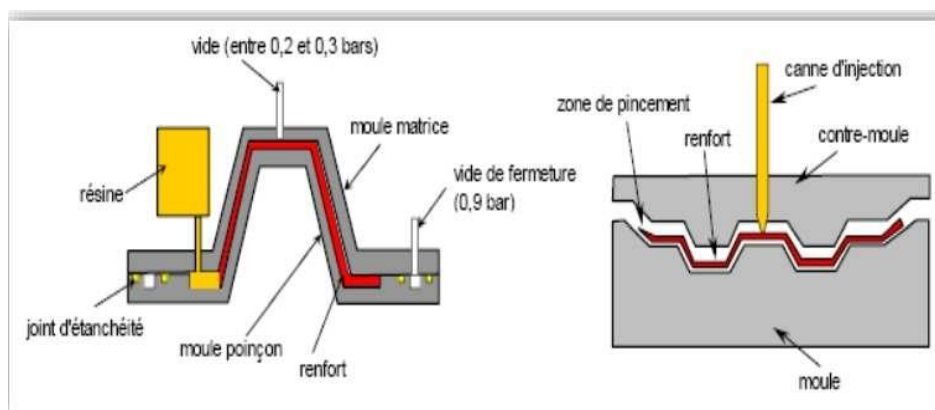


Figure I-9 : Représentation schématique de la technique de moulage par injection. [21]

I.6.3. Moulage par injection de compound - BMC

Le compound B.M.C (Bulk Molding Compound ou préimprégné en vrac) préparé dans un malaxeur est une masse à mouler constituée de résine, de charges et d'adjuvants divers, renforcée par des fils de verre coupés.

Le compound est moulé à chaud (130 - 150°C) par injection (principalement) entre moule et contre-moule en acier usiné. La pression (50 à 100 bars) de fermeture du moule entraîne le fluage de la matière préalablement dosée et le remplissage de l'empreinte. Le temps de durcissement très court permet un démoulage rapide.

I.6.4. Moulage par compression de mat préimprégné – SMC

Le mat préimprégné SMC (Sheet Molding Compound ou préimprégnés en feuilles), est constitué d'une nappe de fils coupés ou continus, imprégnée par un mélange de résine polyester, de charges et d'adjuvants spécifiques divers. Découpé en flans de masse et dimensions déterminées, le mat préimprégné est moulé à chaud (140 à 160°C) par compression entre un moule et un contre-moule en acier usiné (figure I.15). La pression (50 à 100 bars) entraîne le fluage de la matière et le remplissage de l'empreinte. Le temps de durcissement très court (en fonction de l'épaisseur) permet un démoulage rapide. [21]

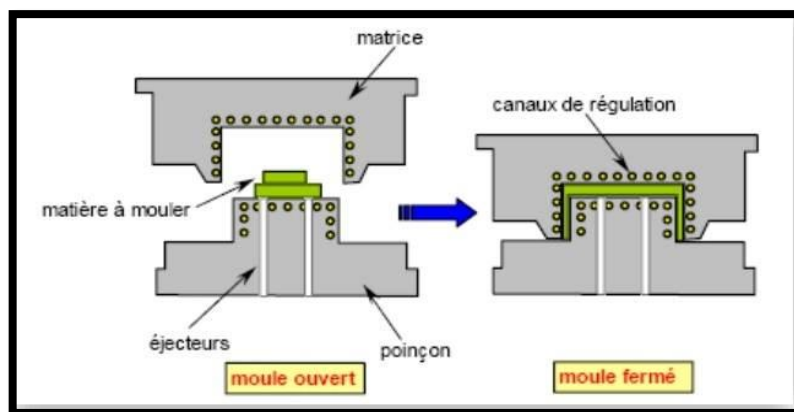


Figure I-10: Représentation schématique de la technique de moulage par compression [21]

I.6.5. Moulage par pultrusion

Ce procédé est utilisé pour les matériaux composites à hautes performances industrielles [22]. Il est destiné à la réalisation en continu de profilés de sections constantes. Des renforts continus, ovings divers, mats et tissus en bandes de largeurs appropriées, tirés par un banc de traction situé en fin de ligne de production, sont successivement prédisposés de façon précise, imprégnés de résine et mis à la forme désirée par passage à ravers une filière chauffée dans laquelle s'effectue le durcissement de la résine. [21]

I.6.6. Moulage par injection

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

Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques. Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats préimprégnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation.

Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé « plastiques renforcés » que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries. [23]

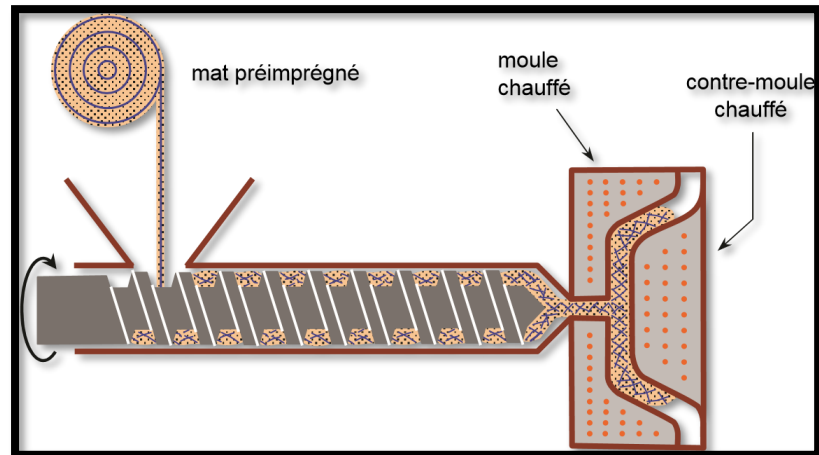


Figure I-11. Moulage par injection.

I.7. Avantages et inconvénients des matériaux composites :

❖ Les avantages

- Bonne résistance et rigidité spécifique élevée.
- Légèreté.
- Bonne tenue au feu (attention aux dégagements toxiques).
- Très bonne résistance à la fatigue.
- Insensibles aux produits chimiques mécanique comme les graisses et les huiles.
- Possibilité de comportement matériel particulier.

❖ Les inconvénients

- Pas de plastification.
- Sensibilité aux agents atmosphériques (rayons UV, humidité, température).
- Tenue aux chocs et impact moyenne par rapport aux métalliques. [24]

I.8. Application des matériaux composites :

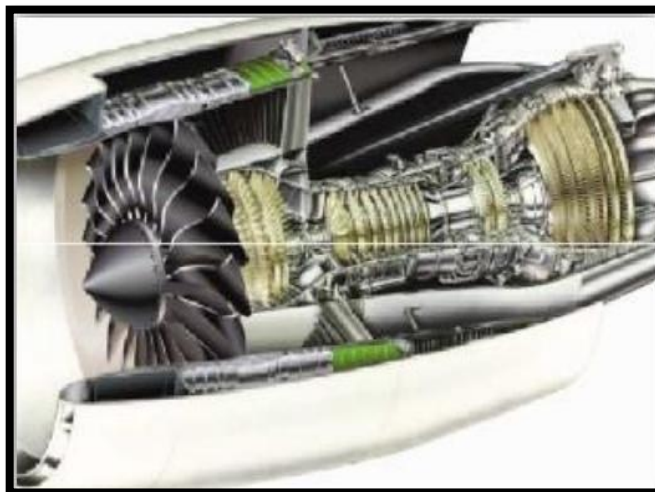


Figure I-12: turboréacteur GE90 [25]

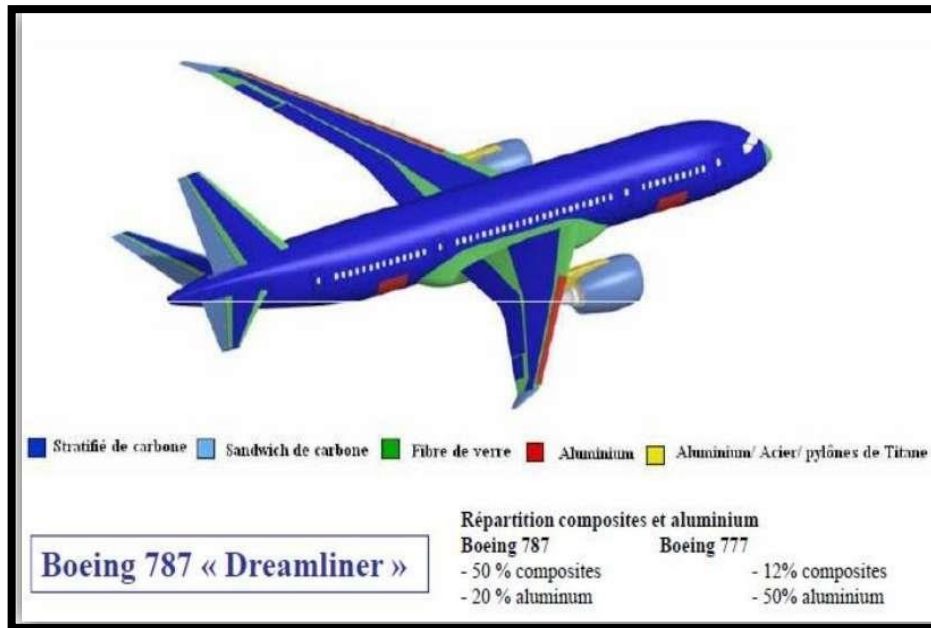


Figure I-13: Composites dans l’aéronautique civile (Boeing 787 « Dreamliner ») [25]

- Dans le sport, on retrouve les composites en remplacement du bois ou du métal dans les raquettes de tennis, les cadres de vélo, les manches de clubs de golf, dans les chaussures d’athlétismes, les casques, les archers, les skis...grâce à leur légèreté, leur résistance et la facilité dans le design des pièces (Figure 24).



Figure I-14 Exemples d’utilisation des matériaux composites dans l’industrie du sport.

a) Le cadre du vélo Trek est réalisé en fibre de carbone ; b) Le manche du club de golf Yonex est réalisé en fibres de carbone. [26]

Et plusieurs applications comme :

- Electricité : éoliennes, antennes...
- Bâtiment : portes, cellules d’habitation...
- Automobile : carrosserie, arbre de transmission...
- Transport ferroviaire : wagons, avants de motrices...
- Transport aérien : avions de tourisme, planeurs...
- Transport spatial : corps de propulseurs, corps d’entrée dans l’atmosphère...
- Transport maritime : hovercrafts, canoës...
- Mécanique générale et divers : engrenages, carters,...[27]

I.9. Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout, et connaissent actuellement un essor important dans tous les domaines d'application, particulièrement dans la construction navale, vu leurs très bonnes performances mécaniques. Leurs caractéristiques mécaniques dépendent :

1. Des propriétés intrinsèques des constituants de base,
2. Des distributions géométriques des constituants,
3. De l'interaction entre les différents constituants, etc.

Le choix des constituants de base ainsi que les techniques et le procédé de mise en œuvre ont une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau composite.

Chapitre II : **Renforts et les charges**

II. Renforts et les charges

II.1. Renforts

II.1.1. Définition

Le but des renforts dans les matériaux composites est essentiellement d'accroître leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer des propriétés physiques, tels les comportements au feu et à l'abrasion, la tenue en température (conservation des caractéristiques mécaniques à haute température) ou les propriétés électriques. Outre les propriétés mécaniques élevées qu'ils procurent, les caractéristiques recherchées dans les renforts sont une masse volumique faible, une compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre. Les renforts peuvent provenir d'origines diverses (animale, végétale, synthétique, etc.).

II.1.2. Types des renforts

II.1.2.1. Les fibres de verre

Actuellement, c'est de loin le renfort le plus utilisé dans les matériaux composites en raison du rapport performance mécanique/prix. Suivant leur composition, on distingue généralement différents types de verre, notamment le verre E qui rassemble presque l'ensemble de la production (~98%) ; le reste étant réparti entre les verres A, C, D, R et S qui sont utilisés pour des applications spécifiques. Les caractéristiques majeures de ces fibres de verre sont répertoriées dans **Figure II-1**

Type	Caractéristiques générales
A	Haute teneur en alcali
C	Bonne résistance chimique
D	Hautes propriétés diélectriques
E	A usage général ; bonne propriétés électriques
R, S	Haute résistance mécanique

Figure II-1: Fibres de verre.

Ces fibres sont composées principalement d'oxydes, généralement de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3), de magnésie (MgO), de chaux (CaO) et d'oxyde de bore (B_2O_3). On y retrouve aussi, autres oxydes (Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 , etc.) et du fluor en très faibles proportions. Les fibres de verre sont élaborées par vibrage du verre fondu à travers des filières à environ 1250°C . Au refroidissement, l'étirage du verre fondu, qui peut être mécanique ou pneumatique, à des vitesses diverses permet d'obtenir des filaments continus ou discontinus. Les fibres sont traitées au préalable avant toute utilisation à cause, entre autres, de leur forte sensibilité à l'abrasion et à l'eau mais aussi à l'absence de cohésion entre les filaments. Le traitement le plus utilisé est l'ensimage qui consiste à revêtir la surface des filaments par un agent de couplage à base de silane. Cette couche améliorera la compatibilité avec les résines et permettra d'éviter la création de charges électrostatiques, et de pallier aux problèmes cités précédemment. Les propriétés mécaniques des fibres de verres sont assez intéressantes. Par exemple, leur module d'élasticité avoisine les 100 GPa et leur contrainte à la rupture est de l'ordre de 3 à 4 GPa. Leur problème majeur réside cependant dans leur recyclabilité.

II.1.2.2. Les fibres de carbone

Les fibres de carbone ont la structure du graphite. Elles proviennent de fibre acrylique et du brai. Actuellement, il existe deux procédés de préparation de la fibre de carbone l’une des voies permet d’obtenir les fibres de types HM (Haut Module) et THM (Très Haut Module) ; l’autre donne les fibres HR (Haute résistance) et HT (Haute Ténacité). Une étape de graphitisation, réalisée après les étapes d’oxydation et de carbonisation, dans le procédé de préparation des fibres HM et THM différencie les deux voies (Figure I-17). Une phase d’oxydation ménagée en présence HNO3 suit les étapes précédentes. La graphitisation permet d’obtenir les fibres HM et THM.

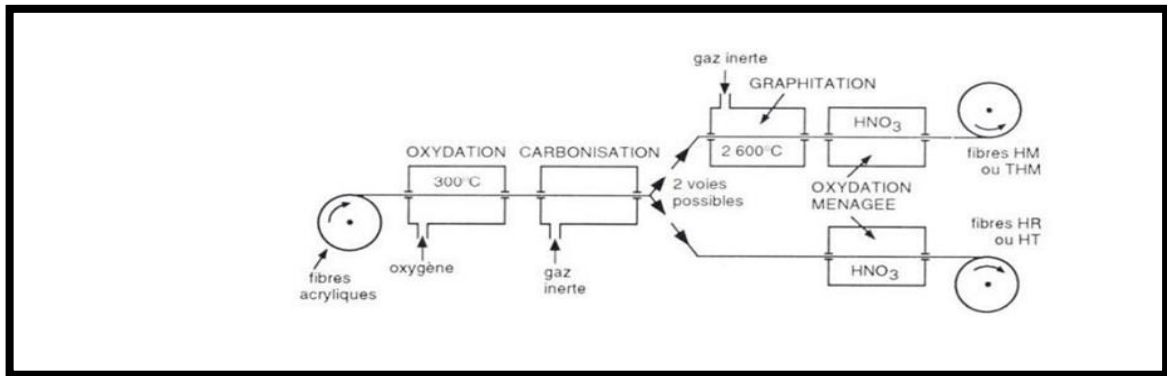


Figure II-2: Procédés d’élaboration des fibres de carbone. [28]

La graphitisation qui consiste en une carbonisation suivie d’une pyrolyse à 2600°C, est à l’origine des hauts modules d’élasticité du fait que la structure hexagonale du réseau de carbone se réoriente suivant l’axe de la fibre. Mais cette réorientation n’est pas toujours favorable car des défauts se créent et ainsi une diminution de l’allongement à la rupture est observée. Les modules d’élasticité de ces fibres sont de quelques centaines de GPa.

II.1.2.3. Les fibres aramides

Ce sont des fibres de poly-aramides ou polyamides aromatiques de synthèse dont les cycles aromatiques sont reliés par des groupes CO et NH (Figure II-3).

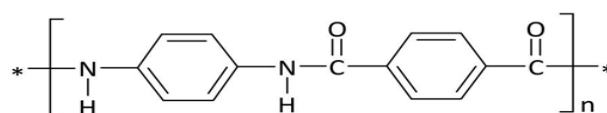


Figure II-3 : Structure chimique des aramides.

L’obtention des fibres aramides se fait à basse température (-10°C) puis par filage en solution. Les fibres sont ensuite étirées et traitées thermiquement pour augmenter leur module d’élasticité.

Les fibres aramides les plus connues sont le Kevlar mais elles existent sous d’autres noms commerciaux comme le Technora et le Twaron. Le comportement des fibres aramides est semblable à celui des métaux car sous faible charge elles sont élastiques et deviennent plastiques quand elles sont soumises à de fortes contraintes. Elles constituent un bon compromis entre les fibres de carbone et celles à base de verre. Les fibres aramides ont une bonne tenue au feu. Par contre dans leurs composites on observe une faible résistance à la compression et à la flexion, sans doute du fait d’une mauvaise adhérence avec les résines. C’est pourquoi de nouvelles fibres hybrides, en l’occurrence des fibres verre-kevlar et carbone-kevlar, sont élaborées pour améliorer leur adhérence.

Les fibres aramides sont exploitées industriellement en vertu de leur résistance au choc et de leur légèreté. Elles entrent dans la composition des produits de protection (blindages, gilets pare-balle, casques, gants, etc.) mais aussi des articles de sport (raquettes de tennis, les pièces de skis), et dans nombreux autres produits de l'industrie aéronautique.

II.1.2.4. Les fibres céramiques

Les renforts céramiques proviennent de matériaux réfractaires et sont des fibres de type carbure, borure et nitrure. Elles sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Les plus couramment produites sont :

- les fibres de bore ;
- les fibres carbure de silicium ;
- les fibres de bore - carbure de bore (B₄C) ;
- les fibres de bore – carbure de silicium : BorSiC.

Ces fibres de matériaux réfractaires sont formées en couche. Leurs caractéristiques mécaniques respectives sont assez voisines (~ 100 GPa : voir **Tableau I-10**) et se conservent à des températures pouvant aller de 500°C à 1000°C. Les fibres céramiques sont souvent associées à des résines thermodurcissables de type époxyde à cause de leur bonne adhérence avec ces dernières. Elles peuvent également être mélangées avec des thermoplastiques.

Dans cette catégorie de renfort une nouvelle génération de fibre est développée par un procédé similaire à celui des fibres de carbone. Ces nouvelles fibres possèdent, en plus des caractéristiques des fibres usuelles de la famille, une tenue en température plus élevée (1200°C à 1600°C). C'est le cas des fibres en carbotitanate de silicium (SiCTi) appelées Tyranno, le carbure de silicium « Nicalon ». Des fibres céramiques à base d'alumine existent comme les borosilico-aluminates (Al₂O₃, SiO₂, B₂O₃), les aluminosilicates ou les alumines (Al₂O₃). Actuellement, des fibres comme les HPZ (SiNC) sont en cours de développement aux états unis.

II.1.2.5. Les fibres synthétiques thermostables

Ces fibres organiques obtenues par synthèse ont la particularité de conserver leurs propriétés mécaniques à des températures élevées. Si elles sont associées à des résines thermostables, elles produisent des matériaux composites à haute tenue en température. Par contre leurs propriétés mécaniques sont nettement plus faibles que celles des fibres usuelles.

Dans cette famille, nous retrouvons les fibres Kernel (polyamide imides), les fibres Nomex (polyamides aromatiques) et Apyeil (polyméthaphénylène téréphtalamide) de formulation proche du kevlar. Les fibres Kynol constituées de groupes phénoliques liés par des méthylènes tandis que les fibres PBI (polybenzimidazole) sont formées de groupes aromatiques cycliques.

Les fibres thermostables sont très utilisées dans les isolants et les protections thermiques, dans les boucliers de missiles et dans l'aérospatial. [29]

II.1.2.6. Les autres types de fibres

Cette partie rassemble toutes les fibres qui ne se retrouvent pas dans les autres groupes. Généralement ces fibres sont utilisées pour des applications spécifiques (papiers spéciaux, pour une bonne conductivité électrique). Ces fibres possèdent des modules d'élasticités très faibles comparés aux autres fibres. Les fibres concernées sont :

- les fibres d'origine végétale (cellulose, lin, chanvre, etc.) ;
- les fibres d'origine minérale (amiante, silice) ;

- les fibres synthétiques (tergal, spectra, dacron, etc.) issus des polyesters, de polypropylène ou de polyéthylène ;
- les fibres métalliques (acier, cuivre, aluminium) qui sont utilisées souvent avec des matrices métalliques.

Ces fibres sont appréciées pour diverses raisons par exemple :

- leur prix de revient assez bas ;
- leur haute capacité d'isolation thermique,
- leur bonne conductivité thermique et électrique ;
- leur propriété d'isolation acoustique ;

Dans ce paragraphe, nous avons tenté de décrire les différents types de renfort fibreux usuels existant dans les matériaux composites.

Le tableau ci-après regroupe différentes propriétés mécaniques obtenues par des tests de traction sur les fibres des matériaux composites :

Tableau II-1 : Récapitulatif des principales propriétés mécaniques des renforts [3, 1]

	ρ (Kg/m ³)	E (GPa)	σ (MPa)	ϵ (%)
Verre E	2600	76	3400	4,4
Verre R	2550	86	4400	5,2
Carbone HR	1750	230	3000 – 4000	-
Carbone HM	1810	400	2800	-
Carbone HM (brai)	2000	280	2000 – 2400	-
Carbone THM	1950	600	2000	-
Kevlar 29	1440	60	3000	3,6
Kevlar 49	1450	120	3000	1,9
kevlar 149	1470	160	2400	1,5
Bore	2600	430	3800	-
SiC	3000	410	3900	-
SiC (Nicalon)	2550	200	3000	-
Alumine (Al ₂ O ₃)	3400 – 3950	300 - 390	1500 – 2000	-
Kernel	1350	7	470	20
Kynol	1270	4,5	280	20 – 60
Apyeil	1380	17	660	40

Tableau II-2: Comparaison des propriétés mécaniques des fibres [30, 31]

Fibres	ρ (g/cm ³)	E (GPa)	σ (GPa)
Verre E	2,5	70	2 – 3,5
Aramide	1,4	63 - 67	3 – 3,2
Carbone	1,7	230 - 240	4
Coton	1,5 – 1,6	5 – 13	0,2 – 0,8
Ramie	1,5	61 - 128	0,4 – 1
Lin	1,4	12 - 85	0,3 – 1,1
Jute	1,3 – 1,5	10 – 30	0,4 – 0,8
Sisal	1,5	9 - 22	0,4 – 0,6
Coco	1,2	4 - 6	0,1 – 0,2

II.2. Les charges

II.2.1. Définition

Les composites peuvent être renforcés par un autre matériau se présentant sous forme de fines particules : ce sont les charges. Apportent des propriétés particulières ou complémentaires, leur rôle est de modifier les caractéristiques des matériaux et permettent un abaissement du prix de revient. Elles sont utilisées surtout dans les composites de grande diffusion, elles peuvent remplir différentes fonctions.[32]

II.2.2. Types des charges

II.2.2.1. Les charges organiques

Ce sont des Charges cellulosiques, utilisées en tant que charges des résines thermodurcissables (phénoplastes et aminoplastes). Les avantages de ces matières cellulosiques sont leur coût peu élevé et leur faible densité. On peut distinguer les farines de bois, les farines d'écorces de fruit et de noyaux, les fibres végétales, les pâtes de cellulose, et les amidons. [33]

II.2.2.2. Les charges minérales

Elles se présentent sous forme de Craies et carbonates : La craie ou blanc de champagne peut contenir jusqu'à 99 % de calcite, de la silice et d'autres corps minéraux. La taille moyenne de ses particules varie de 1 à 3 µm. Le calcaire et le marbre contiennent 80 à 90 % de calcite et des quantités variables d'oxyde de magnésium et de silice. La taille des particules est comprise entre 0,5 et 30 µm. Le carbonate de calcium-magnésium ($MgCO_3.CaCO_3$) est préparé à partir des minerais de dolomite. On l'utilise comme charge et aussi comme retardateur de flamme, ajouté à du trioxyde d'antimoine. Le carbonate de calcium précipité est un mélange pratiquement pur à 99,00 % de calcite et d'aragonite, obtenu sous forme de particules très fines (0,05 à 16 µm). Il est surtout utilisé avec le PVC et dans les matières thermodurcissables (SMC, BMC) ainsi que les polyuréthanes (RIM) en raison de son caractère hydrophobe. Les charges minérales existent aussi sous forme de Silices, Tales et Wollastonite :

- **Les silices :**

La silice (SiO_2), à l'état pur ou combinée avec des oxydes métalliques, est utilisée comme charge sous différentes formes, suivant son origine, sa cristallinité, sa dureté et la taille des particules. Son incorporation dans la résine améliore les propriétés diélectriques, la résistance à la chaleur et à l'humidité des objets moulés, par exemple ceux en poly (méthacrylate de méthyle). On constate également l'augmentation de la température de transition vitreuse, du module d'Young et de la résistance en compression, ainsi que la réduction du gonflement dans les solvants.

- **Talcs :**

Les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage. Le talc est la charge la plus utilisée dans les thermoplastiques. Il leur confère une meilleure résistance au fluage ainsi qu'une plus grande rigidité. Notons également que l'introduction de talc facilite l'usinage des produits finis.

- **La wollastonite :**

Cette charge se présente sous différentes formes : aiguilles, granulés, fibres. Elle est surtout utilisée dans les polyamides, les ABS et les polysulfones, également en remplacement des fibres de verre dans les SMC et les BMC. Elle améliore en particulier la résistance au rayonnement ultraviolet et à l'hydrolyse. Elle est aussi employée dans les résines époxydes pour assurer une bonne stabilité dimensionnelle ainsi que l'isolation thermique et électrique, et permet un contrôle du

retrait au moulage. On cite aussi les argiles et alumino-silicates. Ces substances minérales sont en grande partie constituées par de la silice (42 à 70 %) et de l'alumine (14 à 45%).

- **Le kaolin**

Le kaolin contribue à une meilleure résistance chimique et électrique, et diminue l'absorption d'eau. On peut l'ajouter à des taux atteignant 60 % dans les compositions à base d'esters polyvinyliques, mais habituellement les poudres à mouler en contiennent de 20 à 45 %. Le kaolin calciné est utilisé dans les mélanges pour l'isolation de câbles et dans les isolants. Mélangé à de l'alumine et de la silice, le kaolin calciné est utilisé pour assurer la résistance aux acides.

- **La vermiculite**

La vermiculite est utilisée comme charge de faible densité (2,4) dans les plastiques renforcés de fibres de verre.

- **Le mica**

Le mica augmente la stabilité dimensionnelle des pièces moulées ; il améliore les propriétés électriques et thermiques, la résistance aux acides et aux bases, et diminue la reprise d'eau. [34]

II.3. Fibres naturelles

II.3.1. Classification de fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine : les fibres végétales qui comprennent :

- Les fibres provenant des poils séminaux de gaines (coton kapok).
- Les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie).
- Les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille) d'enveloppes de fruits (noix de coco).
- Les fibres animales qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et sécrétions telle que la soie.
- Les fibres minérales telles que le basalte. [35]

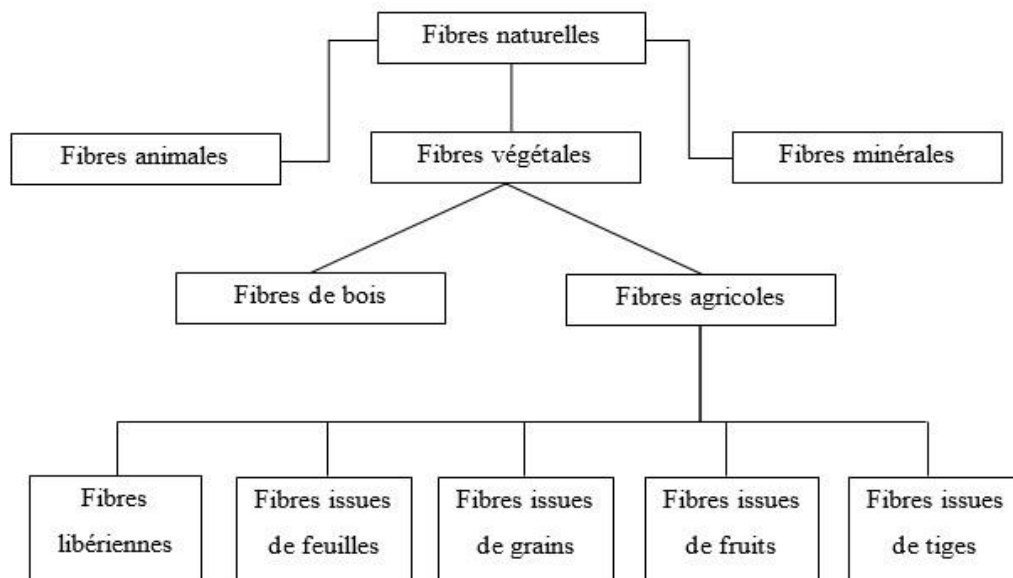


Figure II-4 Classification des fibres naturelles. [36]

II.4. Les Fibres végétales

II.4.1. Classification des fibres végétales

❖ Le Bois :

La diversité des essences régionales, une bonne gestion des forêts et la structuration des filières courtes font du bois une ressource locale et renouvelable, à faible impact environnemental, disponible pour la construction.



Epicea



Grumes de bois

La laine de bois est fabriquée à partir d'un procédé de défibrage mécanique de chutes de bois, généralement des résineux, provenant de scierie ou de rémanents de forêt. Les fibres sont ensuite mélangées et liées par un liant organique, souvent issu de l'industrie pétrochimique. Des liants naturels à base de sucre, d'huile et d'amidon sont parfois utilisés. Très couramment utilisés les panneaux d'OSB (Oriented Strand Board) littéralement panneau de grandes particules orientées) étaient à l'origine produits à partir de résidus de placages et de contreplaqués. Ils contiennent 95% de copeaux de bois liés par 5% de résines chimiques. Les panneaux dits OSB3 sont réputés sans émanation de formaldéhyde.

Une fois les grumes de bois sciées les planches sont entreposées pour le séchage. Des cales espacent chaque planche pour que l'air circule et que la planche reste bien droite et ne se déforme pas en séchant.

❖ Le chanvre

Le chanvre cultivé ou textile, *Cannabis sativa* L., fait partie avec le houblon, de la famille des Cannabaceae (Cannabacées ou Cannabinacées)

❖ Le lin

Linum est un genre regroupant les lins, de la famille des Linaceae (Linacées). Il compte près de 200 espèces présentes surtout dans les régions tempérées et subtropicales de l'hémisphère nord. Le lin cultivé est *Linum usitatissimum*.

❖ LE JUTE

Le jute est une plante herbacée de la famille des Malvaceae (Malvacées), cultivée dans les régions tropicales pour ses fibres.

❖ Les Junces

Sous le nom générique de jonc, les tiges de nombreuses espèces de *Scirpus* sp. (Cyperaceae) ou *Juncus* sp. (Juncaceae) sont utilisées comme liens, ou tressées en ouvrages de vannerie (tapis, dessus de chaises, corbeilles ...). Les graminées Poaceae appelée également Gramineae est le nom scientifique d'une importante famille botanique. Le nom d'usage est poacées ou graminées.

❖ LA PAILLE

La paille correspond à la tige des graminées, en particulier des céréales, coupées et dépouillées de leurs grains. Bien souvent il s'agit de la paille de blé, terme générique désignant plusieurs céréales

appartenant au genre *Triticum*.

❖ LE ROSEAU

On appelle « roseau » diverses plantes des sols humides, principalement des graminées appartenant particulièrement aux genres *Arundo* ou *Phragmites*. L'roseau commun, *Phragmites australis*, est appelé aussi Sagne ou petit roseau.

❖ LA CANNE DE PROVENCE

Arundo donax est une espèce de plante herbacée de la famille des Poaceae, sous-famille des Arundinoideae. La sous-espèce *Arundo donax* var. *versicolor* est connue sous le nom de Canne de Provence.

❖ LE BAMBO

Les bambous ou Bambuseae forment une tribu appartenant à la famille des graminées. Une Tribu est un ensemble de plantes, un rang inférieur à la sousfamille et supérieur au genre.

❖ LE COTON

Le cotonnier, du genre *Gossypium*, appartient à la famille de Malvaceae (Malvacées). Le coton est la fibre textile naturelle qui recouvre les graines du cotonnier. Le coir ou fibre de coco Le Cocotier, *Cocos nucifera*, est une espèce de palmiers de la tribu des Cocoeae. Les Palmiers ou Palmacées forment une famille de plantes, aussi nommée Arcaceae (Aréacées).

❖ Le sisal

Le sisal (*Agave sisalana*) est une plante de la famille des Agavaceae, originaire de l'Est du Mexique où on la trouve également sous l'appellation de henequén. Son nom provient de la ville de Sisal, située dans l'état mexicain du Yucatán. C'est à partir du port de Sisal qu'étaient expédiées les fibres dans le monde entier.[37]

II.4.2. Composition chimique des fibres végétales

D'un point de vue structurel, les fibres lignocellulosiques sont composées d'une matrice, constituée principalement d'hémicelluloses et de lignine, renforcée par des fibrilles de cellulose.[38]

- Cellulose

La cellulose est pondéralement et structurellement l'élément constitutif majeur des fibres végétales. La détermination de sa formule exacte date de 1913. Après de nombreuses études portant sur la structure du glucose et du cellobiose [39, 40] et la dégradation chimique partielle de la cellulose et ses dérivés [41], il a été prouvé que la cellulose a une structure polymérique constituée d'enchaînement de monomères cellobioses liés par des liaisons $\sim(1,4)$ (figure II-5) [42]. Cet homopolymère est caractérisé par un grand poids moléculaire avec un degré de polymérisation qui peut dépasser 36000 dans le cas de la cellulose extraite du lin. A titre indicatif, un degré de polymérisation (OP) de 14000 est équivalent à une longueur d'environ 7 lm [43,38]

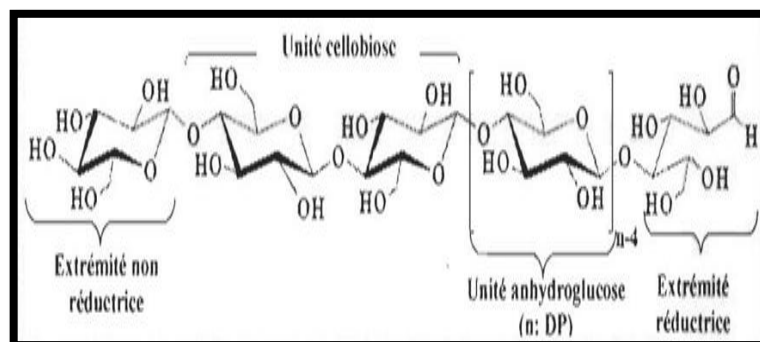


Figure II-5 : Structure chimique de la cellulose.

Les chaînes de cellulose sont liées par des ponts hydrogènes intra- et intermoléculaires (**Figure II-6**) et des liaisons de type Van der Waals. L'association de nombreuses macromolécules de cellulose permet la formation de fibrilles élémentaires ; une fibrille élémentaire est constituée en moyenne de 36 chaînes ; ces fibrilles élémentaires s'assemblent en microfibrilles et favorisent l'établissement d'une structure microcristalline [38,43]. Cette structure fibrillaire condensée est à l'origine des caractéristiques remarquables de la cellulose.

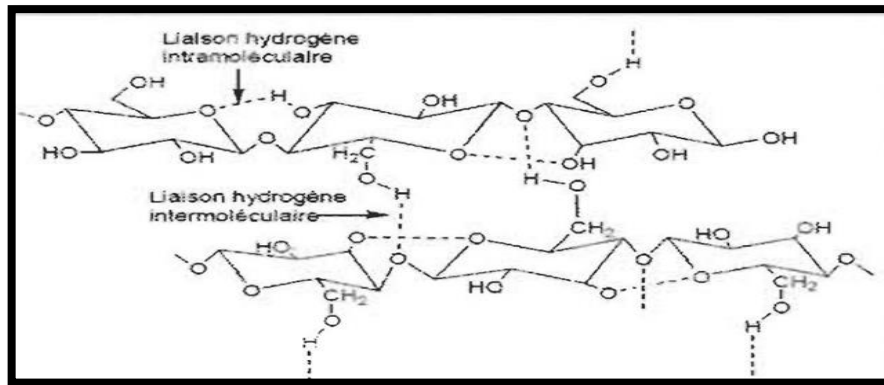


Figure II-6 : Liaisons hydrogènes intra- et intermoléculaires dans la cellulose.

- **Hémicelluloses**

Les hémicelluloses sont des polysaccharides complexes de faible poids moléculaire (degré de polymérisation moyen de 150), très hydrophiles et solubles en milieu alcalin. Leur squelette est composé de résidus P-(1,4) -D-pyranose, où l'0-4 est en position équatoriale (**Figure II-7**). Les pyranoses peuvent être des glucoses, mannoses ou xyloses. Ces unités répétitives présentent de multiples possibilités d'associations et de branchements [41]

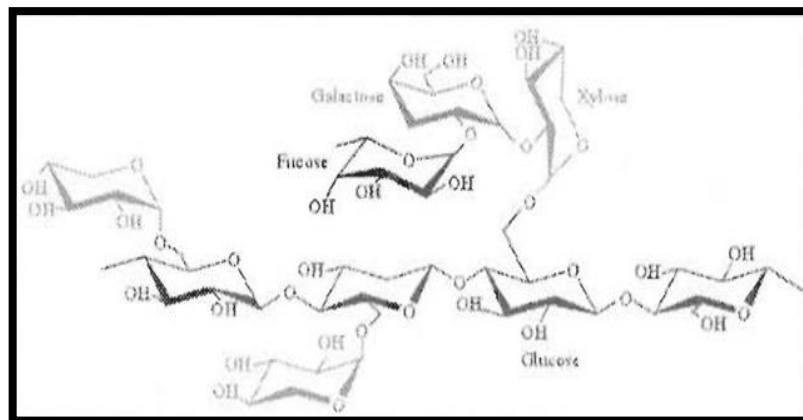


Figure II-7 Structure chimique d'une classe des hémicelluloses [44].

- **Lignine**

La lignine est une macromolécule fortement hétérogène, biosynthétisée à partir de trois alcools phénoliques (syringyle, guaiacyle et p-hydroxyphényle). Ces unités peuvent s'assembler de multiples façons par des liaisons oxygène-carbone ou carbone-carbone formant ainsi une structure tridimensionnelle très ramifiée (**Figure 1.5**) [45,46]. La lignine est de nature thermoplastique (température de ramollissement ~ 90 C et écoulement à ~ 170 C) et présente une faible affinité avec l'eau. [43]

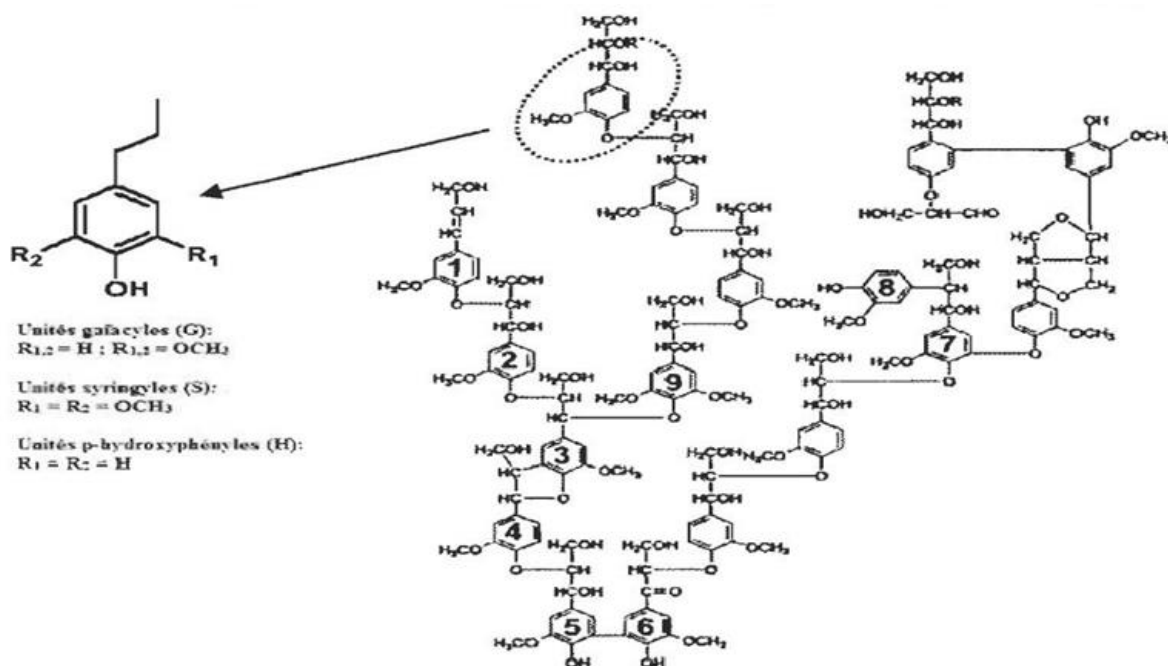


Figure II-8 Structure chimique des lignines.

Les différents types de liaisons retrouvés dans les lignines sont représentés par les couples (1,2) et (9,3) : α -, β -O-4 benzyl-aryl- et alkyl-aryl-éthers; (3,4): β -5 phénylcoumarane; (5,6): 5-5' biphenyle; (7,8): β -1 diarylpropane. Les motifs du type (1,2) et (9,3) sont prédominants (environ 40 à 50% du total des liaisons) [46]

La composition chimique et la morphologie microstructurale des fibres lignocellulosiques sont extrêmement complexes à cause de l'organisation hiérarchique des différents constituants présents à différents pourcentages. La composition chimique dépend de la nature de la fibre, des conditions de croissance, des conditions climatiques, de l'âge de la fibre ... [38]

Le **Tableau II-3** présente la composition chimique de différentes fibres cellulosiques (pourcentage par rapport à la masse sèche de la fibre).

Tableau II-3 Composition chimique des fibres végétales [38,43,47 ,48]

Fibre	Cellulose (%)	Hémicelluloses (%)	Lignine (%)	Pectines (%)	Cires (%)	Cendres (%)
Lin	64,1-85	3,7-16,7	2-6,2	1,8-2,3	1,7	1-1,4
Coton	82,7-90		0,7-1,6	<1	0,6	0,8-1
Chanvre	57-78,3	1-5,7	2,9-13	0,9	0,8	0,53-0,82
Bios des résineux	45-50	4,13-17	24-30	-	-	0,2-0,5
Bios des feuillus	40-50	25-30	18-30	-	-	0,4-0,5
Bambou	42,3-49,3	21-36	23,8-21,6	-	-	1,3-2
Bagasse	40-46	24,1-27,7	12,5-20	-	-	1,5-2,4
Jute	61-71,5	24,5-29	11,8-13	0,2	0,5	2
kenaf	51-59	21,5	15-19	-	-	5

A l'échelle macroscopique, les fibres cellulosiques ont toutes une paroi cellulaire composée de plusieurs couches. Cependant uniquement trois d'entre elles ont été identifiées par microscopie électronique, à savoir, la lamelle moyenne et deux parois concentriques, primaire et secondaire. La paroi secondaire est elle-même constituée de trois couches S 1, S2 et S3 (voir **Figure II .9**). Chaque couche de la paroi cellulaire est constituée d'une variété de polymères de structures différentes. La lamelle moyenne est constituée principalement de la lignine. La paroi primaire est une couche mince d'une épaisseur comprise entre 0,1 et 1 flm, formée par réseau irrégulier de microfibrilles [49]. La couche intermédiaire de la paroi secondaire (S2) constitue la partie principale de la paroi cellulaire et commande ainsi les propriétés mécaniques de la fibre [38,45]. Une étude détaillée de la microstructure des fibres est relatée dans la référence 35.

En plus de la cellulose, les hémicelluloses et la lignine, la composition chimique des fibres inclut également de la matière inorganique, présente en faible proportion par rapport à la masse sèche, l'eau, l'air, des protéines, des pectines, des cires, des graisses, des résines et parfois des gommes. A l'exception des protéines et certains extractibles, ces substances sont localisées dans le lumen ou sur la surface de la fibre sous forme d'inclusions ou de dépôts et ne sont donc pas considérées comme de composants moléculaires intrinsèques [38]. De ce qui précède, on déduit que la fibre elle-même peut être décrite comme un composite laminé.

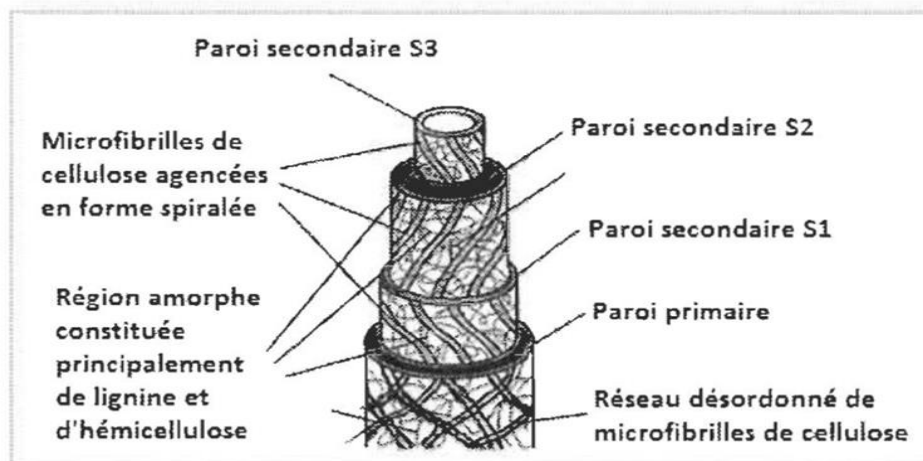


Figure II-9 Structure de la paroi cellulaire de la fibre végétale. [50]

II.4.3. Propriétés des fibres végétales

II.4.3.1. Propriétés hygrométriques

La présence de groupements hydroxyles faisant partie des molécules des fibres, sont responsables de l'absorption d'eau par les fibres hydrophiles de la cellulose. Les hydroxyles présents à la surface des fibres ainsi que les hydroxyles des zones amorphes absorbent facilement les molécules d'eau. Cette eau dite libre s'évapore facilement, quant aux molécules d'eau piégées au niveau des cristallites et de la surface interne des vides, elles sont liées au squelette de la fibre. Un gonflement des fibres en résulte par le fait que les molécules d'eau infiltrées entre les chaînes de cellulose, provoquent leur écartement et favorisent leur glissement les unes par rapport aux autres en désorganisant les microfibrilles.

II.4.3.2. Propriétés physiques et mécaniques

Les fibres végétales se caractérisent par une faible masse volumique présentent des propriétés physiques et mécaniques spécifiques intéressantes.

- Les fibres longues ont des contraintes en traction plus faibles que les fibres courtes, du fait que les premières ont de plus grandes probabilités de contenir des défauts de formation.
- L'index de cristallinité de la cellulose d'une fibre élevée est un indicateur de ses propriétés mécaniques élevées. A titre comparatif la cellulose cristalline possède un module d'élasticité de 90 à 137 GPa, relativement plus élevé par rapport à la fibre de verre qui est d'environ 75GPa.
- L'angle micro fibrillaire explique en partie la déformation élastique de la fibre végétale, ce qui améliore son allongement à la rupture en traction. En effet, la fibre lignocellulosique subit, sous l'action de forces de traction faibles, une déformation réversible. Ceci est dû à l'alignement progressif des microfibrilles cellulosiques avec l'axe de la fibre et une déformation élasto-viscoplastique des polymères amorphes. Suite à un essai de traction sur une fibre végétale, les paramètres influençant la courbe contrainte-déformation sont:
 - La nature de la fibre (composition et structure) ;
 - La largeur de la fibre sollicitée ;
 - Le pourcentage d'eau absorbée dans la fibre. La variation du pourcentage d'eau absorbée entraîne une modification de la section de la fibre (retrait ou gonflement) ; l'eau pénètre dans les zones amorphes et modifie le transfert de charge entre les éléments fibrillaires ;
 - Le diamètre de la fibre : le module d'Young et la contrainte à la rupture évoluent avec les diamètres des fibres.

II.4.4. Application des fibres végétales

Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont actuellement en cours de développement pour remplacer les matériaux traditionnels. Les principaux marchés sont représentés comme suit :

Tableau II-4 Domaines d'application des fibres végétales

Principaux marchés	Domaines d'application des fibres végétales
Automobile	Les entreprises comme Opel Audi, BMW, Renault, Ford, Seat, fabriquent des composites renforcés de fibres végétales : garnitures et panneaux de portes, planches arrière, revêtements intérieurs et passage de roues, voûte interne de pneu, pare-chocs, tableau de bord, etc...
Construction	Les fibres végétales sont utilisées en renfort de matériaux, notamment d'isolation, de produits en ciment, profilés de portes, de fenêtre, panneaux décoratifs, etc...
Infrastructure	Trottoirs, digues, signalisation routières, isolant phoniques, etc...
Autres applications	Les palettes, le mobilier (table de camping ou chaise), équipement de jeux publics, etc...

II.4.5. Avantages et inconvénients des fibres végétales

L'utilisation des fibres végétales en tant que renforts dans les matériaux composites, présente beaucoup d'avantages à condition de remédier à certains inconvénients par différents traitements proposés par la littérature. [51]

Tableau II-5: Les principaux avantages et les inconvénients des fibres végétales

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Faible coût - Biodégradable (pour l'environnement) - Ressource renouvelable - Propriétés mécaniques spécifiques - Importantes (résistance et rigidité) - Demande peu d'énergie pour la production - Non abrasif pour les outillages - Bon isolant thermique et acoustique - Neutre pour l'émission de CO2 - Pas de résidus après incinération - Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres 	<ul style="list-style-type: none"> - Absorption d'eau - Biodégradabilité (pour le matériau) - Fibres anisotropes - Pour des applications industrielles, nécessite de gestion d'un stock - Faible stabilité dimensionnelle - Faible tenue thermique (200 à 300 °C max) - Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, des conditions météorologiques - Renfort discontinu

II.4.6. Présentations des différentes fibres végétales : [52]

❖ **Le chanvre**

Le chanvre est une fibre libérienne, tout comme le lin, le kenaf, le jute et la ramie. Les plantes de cette famille présentent toutes des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses. Par ses possibilités techniques, la fibre de chanvre répond à des besoins textiles traditionnels tout en ouvrant la voie à une foule d'innovations. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe, en France et en Italie.



Figure II-10: Plante de chanvre et les fibres de chanvre.

❖ **Le lin**

Le lin est une plante annuelle qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie qu'en Europe. La fibre de lin vient des tiges de la plante mais aussi de l'huile extraite des graines. L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée, en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. Le lin peut être utilisé comme substitut au coton. De plus, le rendement de cette fibre est très nettement supérieur à la production de coton (jusqu'à 2 t/an/ha).

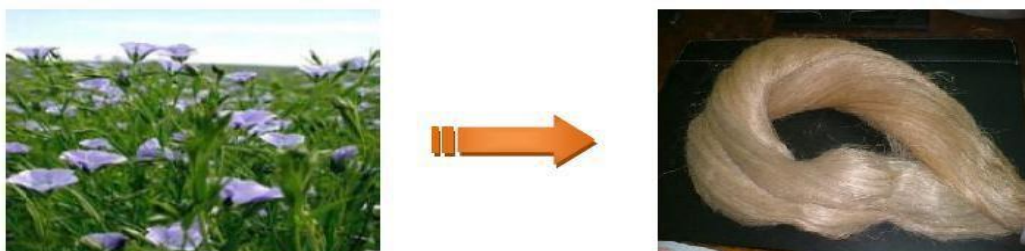


Figure II-11: Plante du lin et les fibres de lin.

❖ Le Coton

Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut. Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie et mêmes d'Europe (Espagne). Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters. Le rendement en linters de coton est de seulement 0,05 t/ha/an. Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. En effet, les linters de coton mesurent 2 à 5 mm et ont une largeur de 18 μm . Elle est utilisée pour des papiers dits de luxe. Elles sont également utilisées pour les papiers fiduciaires et principalement pour les billets de banques, papiers pour lesquels la caractéristique essentielle est la résistance au pliage. Cette fibre est aussi beaucoup utilisée dans le domaine du textile.

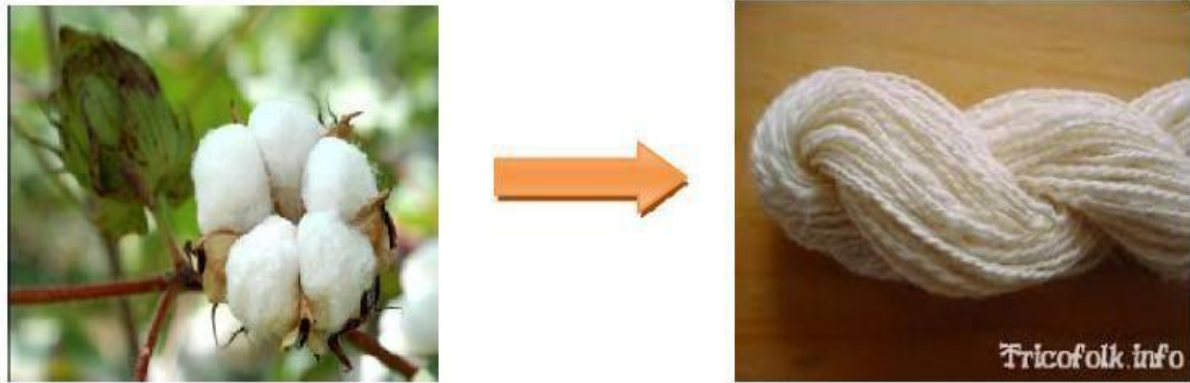


Figure II-12 : Plante et fibres naturelles de coton.

❖ L'Abaca

L'Abaca ou chanvre de Manille est un bananier textile (Musacées) qui pousse aux Philippines : les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudo tronc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, pour des rabanes, des nappes, des stores ou des vêtements. La fibre d'Abaca a une longueur de 6 mm pour un diamètre de 22 μm . Elle est utilisée principalement dans la composition des papiers filtres, des sachets de thé. Ce sont des papiers poreux demandant une bonne résistance, en particulier au déchirement.



Figure II-13: Plante de l'abaca et fibres de l'abaca.

❖ Le Kénaf

Le Kénaf est une plante herbacée dont la tige peut atteindre 3 m de haut. Il se trouve principalement dans les régions tropicales et en Amérique du Sud. La production de kénaf en Europe est rare. Elle est destinée uniquement pour le domaine papetier. Le rendement en fibre atteint près de

10 t/an/ha. La longueur moyenne des fibres (1,5 mm) est comprise entre celle des fibres de feuillus et celle des fibres de résineux.

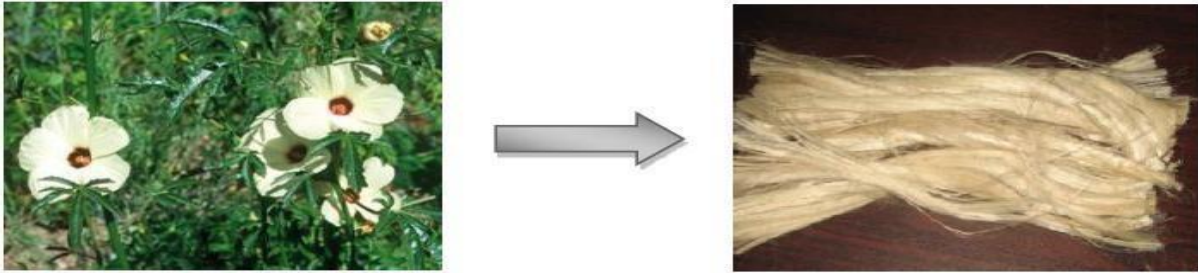


Figure II-14: Plante de Kénaf avec ces fibres.

❖ Le Jute

Le jute est une plante buissonnante originaire du sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh. Le rendement en fibres est de 2 t/ha/an. Les fibres utilisées en papeterie sont les déchets de culture et de filature. La longueur moyenne des fibres est de 2 mm, avec une largeur de 20 μm . Les caractéristiques de ces fibres sont généralement assimilées à celles du kenaf.



Figure II-15: Jute :(a) plante, (b) tisse, (d) fibre.

❖ La ramie

La ramie est une plante arbustive. Originaire d'Asie de l'Est, la ramie a pour principaux producteurs la Chine, le Japon et l'Amérique. Le rendement en fibres est d'environ 2 t/ha/an. La longueur moyenne des fibres est comprise entre 40 et 250 mm, pour un diamètre moyen de 45 μm . Ces fibres ressemblent aux fibres de lin mais sont encore plus longues, plus solides et plus rigides.



Figure II-16: Plante de Ramie et les fibres naturelles de la Ramie.

❖ Le coco

Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien.

On utilise plutôt dans des pièces spacieuses et lorsqu'on veut mettre en avant son côté rustique.



Figure II-17: Fibre naturelles de la plante du coco.

❖ **Le Sisal**

Le sisal est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2 m de long. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ces fibres est de 3 mm.

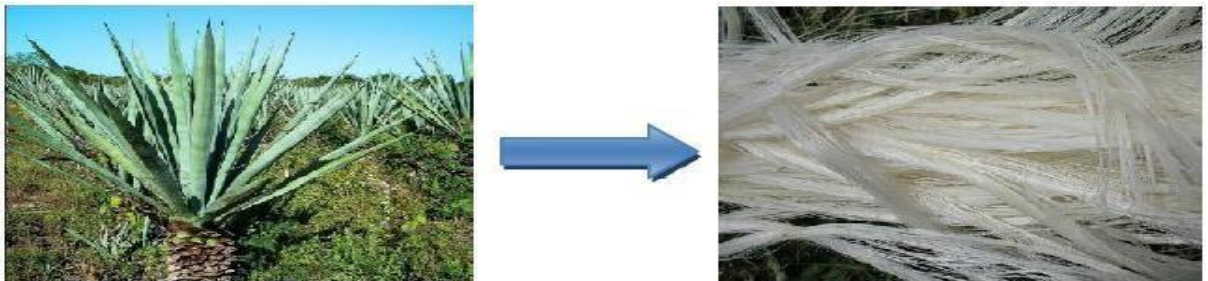


Figure II-18 fibres naturelles du sisal.

❖ **Palmier dattier**

Le palmier dattier il a un stipe solitaire de couleur marron ou gris qui atteint jusqu'à 20 mètres de hauteur et 60 cm de diamètre à l'âge adulte (**Figure. II-19**). Leur couronne se compose de plus d'une centaine de feuilles pennées qui mesurent plus de 5 mètres de longueur. Le pétiole peut mesurer jusqu'a un mètre, et est recouvert d'épines sur ses bords.

Les folioles sont de couleur verte. Elles sont étroites, rigides et disposées de manière irrégulière sur le rachis. Les types les plus connus sont : Nour, Dokar, Elghers (appellation locale).



Figure II-19: Palmier et les fibres de palmier dattier.

❖ **Alfa**

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m a 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes (**Figure. II-20**). Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête, le désert commence.

Elle est employée dans la fabrication de sparterie, des cordages, des espadrilles, des tissus grossiers, des papiers d'imprimerie...etc.

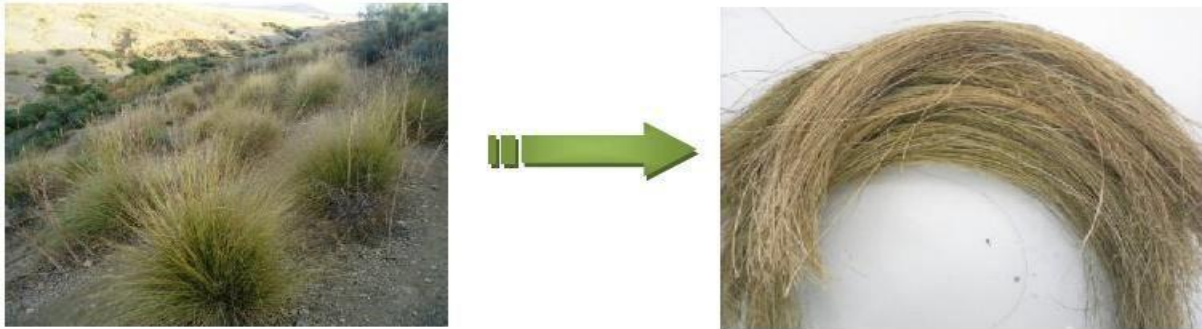


Figure II-20 : La plante et les fibres l'Alfa.

II.5. Biocomposites

Les matériaux Bio-composites ou les matériaux biosourcés sont des matériaux composés de fibres naturelles ou des résines naturelles au lieu de fibres synthétisées (verre, carbone, etc.) ou de résines (résines époxy, polyalcool vinylique, etc.). Les fibres biosourcés telles que le sisal, le jute, le chanvre, le lin, le bambou, la laine, les cheveux, la soie etc., sont obtenues à partir de plantes ou d'animaux. De plus, les matériaux de matrice naturels tels que le caoutchouc naturel, le polyester, etc., sont produits à partir de plantes.[53]

Chapitre III : **Travaux de recherche**

III. Travaux de recherche

Dans ce chapitre, différentes manières de classification des matériaux composites sont d'abord présentées, selon le type de matrices, la taille et les catégories du renfort. Le développement et l'utilisation des composites bio-sourcés nécessitent en amont des connaissances sur la structure et la composition chimique de chacun des constituants pour mieux appréhender l'étude des interactions entre renforts et matrices. Ainsi, en deuxième lieu, nous nous proposons de présenter une description des différents constituants entrant dans la mise en œuvre des matériaux composites bio-sourcés. Les différentes techniques de fabrication des matériaux composites en général sont ensuite dénombrées avec des descriptions synthétiques. Ensuite, nous nous proposons de présenter quelques domaines d'application des matériaux composites renforcés par des fibres végétales, en particulier ceux à fibres de palmier dattier. En dernier lieu, une synthèse bibliographique donne l'état de l'art sur les travaux réalisés sur les matériaux composites à base de matériaux extraits de palmiers dattiers.

III.1. Définition et classification des composites

Le consensus sur la définition de matériau composite s'articule autour du fait que le composite est un matériau multi-phase formé à partir d'une combinaison de matériaux qui diffèrent par leur composition et leur forme\$ (**Figure III.1**). Ces composants sont généralement la matrice et les renforts, liés les uns aux autres en conservant leurs identités et propriétés. Ces constituants doivent assurer un forte capacité d'adhésion afin de constituer un matériau aux propriétés nouvelles qui ne peuvent être obtenues par aucun des composants d'origine agissant seuls. L'intérêt croissant des composites est dû principalement aux possibilités de gain de poids et de réalisation de pièces complexes [54, 55].

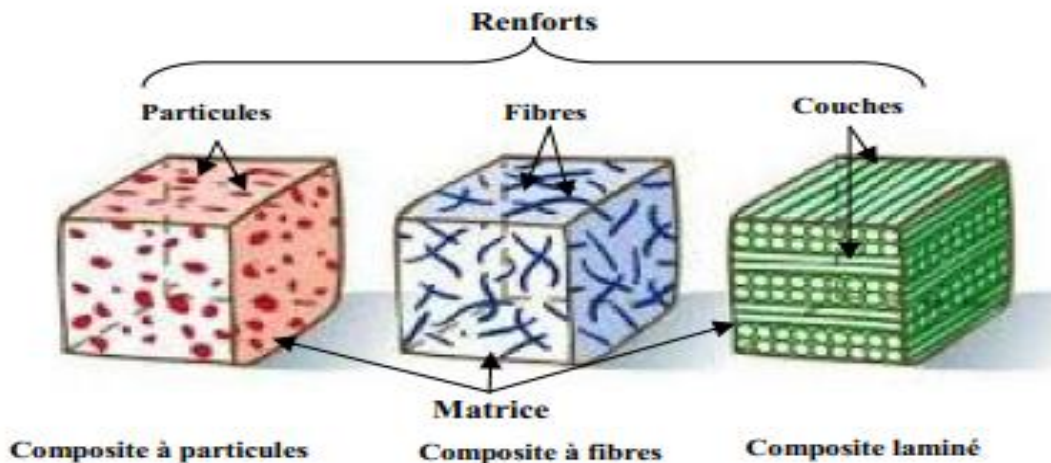


Figure III-1: Matériaux composites à particules, à fibres et stratifiés.

Les composites peuvent être classés selon de nombreuses caractéristiques dues au renforcement ou à la matrice. Nous proposons quatre catégories parmi les plus courantes.

III.1.1. Classification selon le type de matrice

La classification habituellement utilisée dans ce cas est décrite selon les trois principales matrices utilisées, les composites à matrice organique CMO, les composites à matrice céramique CMC et les composites à matrice métallique CMM [56]. Mais pour l'impérieuse nécessité de protection de la santé environnementale, des matrices naturelles ont été utilisées [57]. La **Figure III .2** représente une classification des composites selon la nature de la matrice.

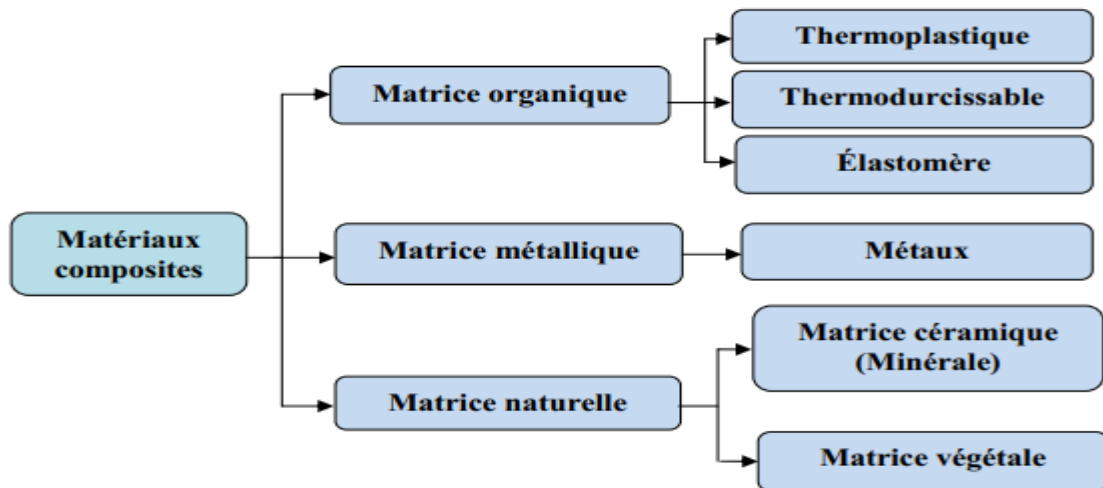


Figure III-2 Classification des composites selon la nature de matrice.

III.1.2. Classification selon la catégorie du renfort

La matrice est renforcée avec différentes fibres en termes d'origine ou de forme. Les composites fibreux peuvent être classés en deux catégories selon les catégories des fibres : fibres inorganiques et fibres organiques. Ces fibres peuvent se présenter sous différentes formes : forme linéique, forme surfacique et en forme multidirectionnelle [58]. La Figure III.3 représente une classification des composites selon la catégorie de renfort.

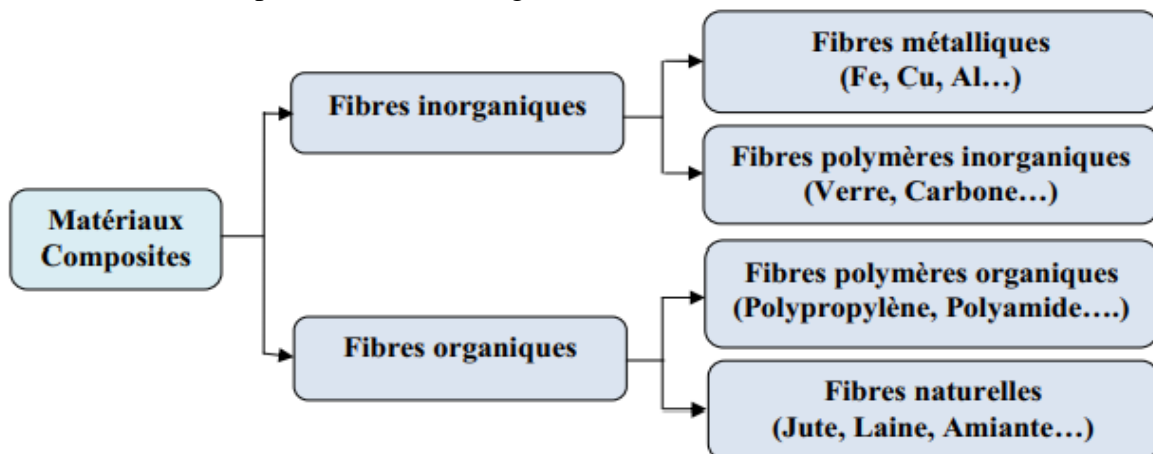


Figure III-3. Classification des composites selon la catégorie du renfort.

III.1.3. Classification selon la forme du renfort

La Figure III.4 présente la classification du composite selon la forme des renforts, que nous pouvons classer en trois familles. Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres, soit continués (fibres longues), soit discontinues (coupées, courtes). Il est considéré à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules, sachant qu'une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée [59]. Nous pouvons souligner que la troisième famille "structuraux" de cette classification est le résultat de l'intégration des deux premières familles "renforcés par des particules", "renforcées par des fibres". Ces deux premières familles se différencient à partir de la valeur du facteur de forme L/d du renfort où L et d sont respectivement la longueur et le diamètre du renfort [60].

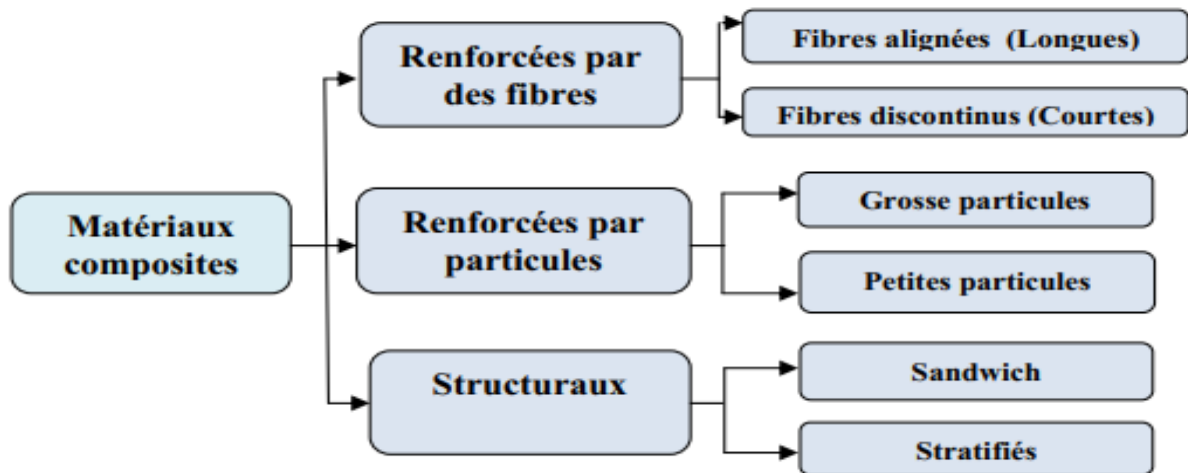


Figure III-4. Classification des composites selon la forme des renforts.

III.1.4. Classification selon le marché

On retrouve souvent la distinction suivante par laquelle les matériaux sont classés en fonction du marché.

- Les composites de grande diffusion (GD) : ce sont des composites peu coûteux (<10 à 40 €/kg) qui occupent une large part du marché. On les trouve dans l'industrie du bâtiment, le transport nautique, les piscines, les équipements électriques.

- Les composites à hautes performances (HP) : ce sont des composites assez onéreux, dont le marché est encore réduit pour les applications aérospatiales, transports, sports de compétition (coût > 40€/kg) [54].

Récemment, l'industrie a été amenée à exploiter des matériaux naturels et à les utiliser pour produire des matériaux composites respectueux de l'environnement. Par conséquent, nous pouvons trouver une nouvelle classification des matériaux composites que l'on nomme "bio-composites". Il existe d'autres appellations proches comme "écomposites", "composite bio-sourcé" et "agro-composites" qui s'inscrivent également pleinement dans les concepts émergents de la chimie verte et de chimie durable. Il n'existe pas de définition encore officielle des bio-composites, mais il est maintenant admis que ces matériaux doivent être fabriqués impérativement à partir de ressources naturelles plus ou moins transformées mécaniquement et/ou chimiquement. Les biocomposites sont ainsi composés dans le principe de renforts généralement en fibres naturelles et d'une matrice issue préférentiellement de la biomasse [61].

III.2. Matériaux composites bio-sourcés

La classification des matériaux composites bio-sourcés est généralement dépendante de la nature du renfort, de la nature de la matrice ou de la nature des composants réunis. De nombreux travaux sont toujours en cours pour produire des matériaux bio-composites avec un mélange de fibres naturelles et différentes matrices. Cependant, à ce jour, l'idéalisation des composants généraux et des caractéristiques de ces matériaux est encore largement insuffisante pour produire des pièces techniques.

III.2.1. Renforts à fibres végétales

Du point de vue du renfort, les fibres végétales, qui appartiennent à la famille des fibres naturelles constituent une alternative écologique aux autres renforts. Ces fibres naturelles,

intéressantes du point de vue disponibilité et possibilité du recyclage, peuvent apporter, de par leur nature, des caractéristiques supplémentaires aux composites, notamment en termes de propriétés mécaniques et physiques. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges (*Figure III.5*) [62, 63].

Les fibres naturelles sont subdivisées en trois grands groupes selon leur origine, animale, végétale et minérale.

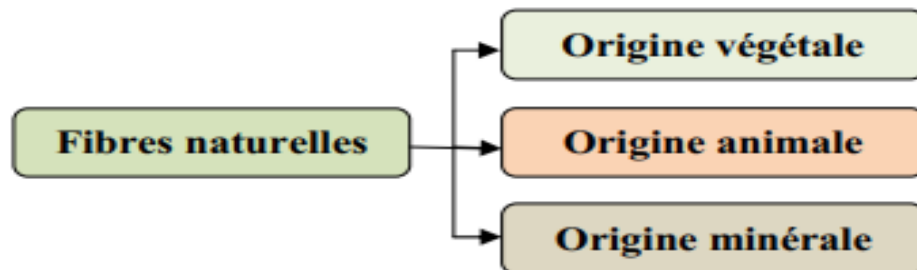


Figure III-5. Classification des fibres naturelles selon l'origine. [63]

Si l'on s'intéresse plus particulièrement aux fibres végétales, celles-ci sont issues de la biomasse et peuvent être extraites du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante. Elles sont principalement composées de cellulose, d'hémicelluloses, de lignines et de pectines. Ces fibres sont surtout utilisées pour leurs avantages inégalés : leur faible densité, leur pouvoir d'isolant thermique, leurs propriétés mécaniques, et notamment pour leur biodégradabilité et atouts écologiques [64]. Nous pouvons subdiviser les fibres végétales en cinq groupes selon la source d'extraction (*Figure I.6*), à savoir la graine, la feuille, le fruit, la tige libérienne ou dure.

III.2.1.1. Composition chimique des fibres végétales

La structure microscopique des fibres végétales est complexe. Elles sont constituées par des fibrilles, elles-mêmes formées par des chaînes de cellulose. Les chaînes de cellulose s'associent entre elles de façon parallèle par des liaisons hydrogènes pour former des microfibrilles dont la section (de l'ordre de quelques nm) est variable selon les espèces végétales. Enfin, les fibres se présentent sous la forme d'un composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant un élément structurant très rigide qui est la cellulose [65].

Les constituants majoritaires des fibres lignocellulosiques déshydratées sont la cellulose, les hémicelluloses, les lignines et les pectines (*Figure III .7*)

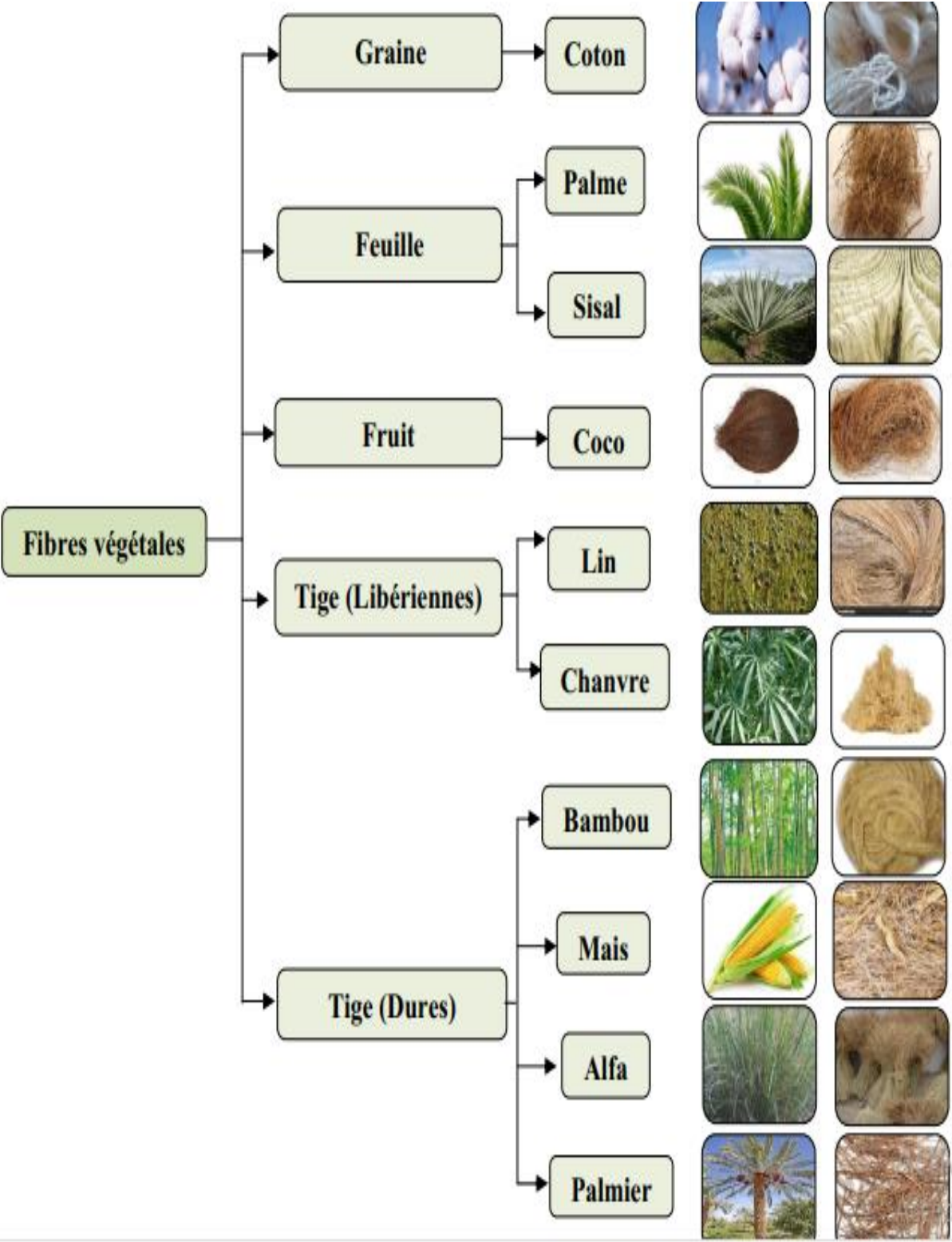


Figure III-6. Classification des fibres végétales selon l'origine.

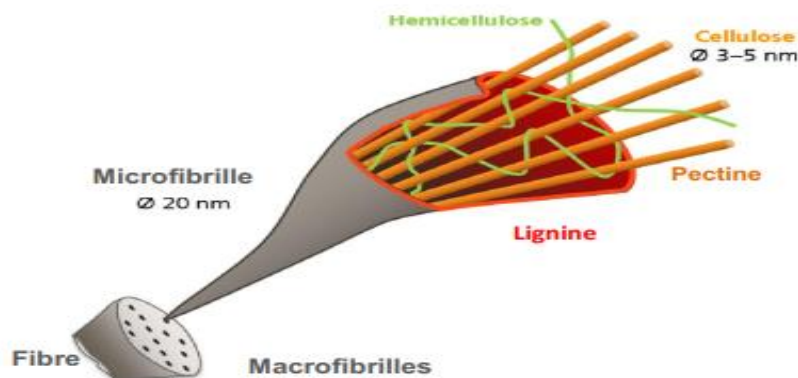


Figure III-7. Structure schématique d'une fibre végétale. [66]

a) La cellulose

L'existence de la cellulose comme matériau commun dans les parois cellulaires végétales était d'abord découverte par **Anselm Payen** en 1838 [67]. La cellulose représente la molécule biologique la plus abondante sur terre. D'un point de vue chimique, la cellulose est une macromolécule constituée par une très longue chaîne stéréo-régulière composée de maillons de glucose $C_6H_{12}O_6$ (Figure III.8). La cellulose possède une structure fibrillaire et partiellement cristalline. Les microfibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines ordonnées et de zones amorphes totalement désordonnées.

Dans la zone cristalline, les chaînes cellulosiques sont disposées parallèlement les unes aux autres, liées par des liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogènes qui se développent entre les chaînes. Les interactions moléculaires sont fortes et assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs. Grâce à sa grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. La cellulose est de nature très hydrophile [68].

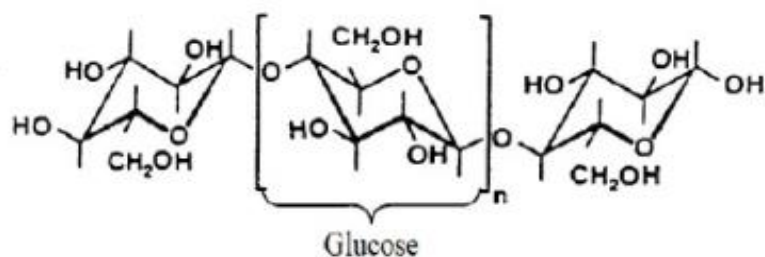


Figure III-8. Molécule de la cellulose. [62]

b) Les hémicelluloses

Dans la plupart des fibres naturelles, la cellulose est mélangée à des hémicelluloses qui sont également des polysaccharides composés d'une combinaison de cycles à 5 et 6 carbones (Figure I.9). Les hémicelluloses sont des polysaccharides pariétaux non cellulosiques extraits des végétaux. Elles constituent le principal liant dans la structure pariétale des végétaux en s'associant par liaisons hydrogènes aux microfibrilles de cellulose et à la cellulose de la paroi cellulaire. La variabilité des motifs monomères constitutifs de la chaîne principale (xylose, arabinose, glucose, mannose, galactose, etc.) permet de distinguer différents types d'hémicellulose. Les hémicelluloses sont des polymères à chaînes courtes, amorphes, et fortement hydrophiles souvent utilisées comme agent

épaississant, stabilisant ou émulsifiant [69]. L'hémicellulose est très hydrophile, soluble en milieu alcalin, et facilement hydrolysable dans les acides [68, 70].

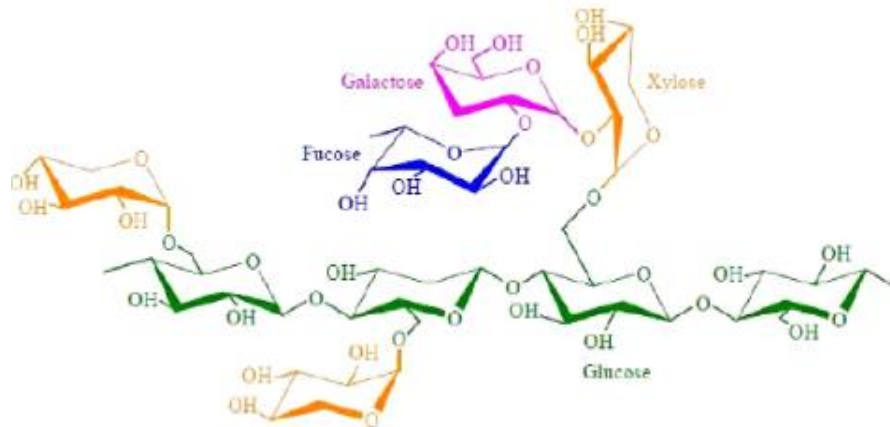


Figure III-9. Structure d'un type de xyloglucane.

c) Les lignines

La lignine est la seconde substance organique renouvelable la plus présente sur la terre après la cellulose. Elle participe à la rigidité structurale des parois cellulaires et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes [71].

La lignine ou « les lignines » sont des polymères tridimensionnels provenant de la polymérisation radicalaire de trois alcools phénylpropénoïques dont la structure, dépendant de l'espèce végétal; est indiquée sur la **Figure III.10**: l'alcool coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique. La lignine est totalement amorphe et hydrophobe. Elle n'est pas hydrolysée par les acides, mais soluble à chaud dans la soude, facilement oxydée et facilement condensable avec du phénol [70].

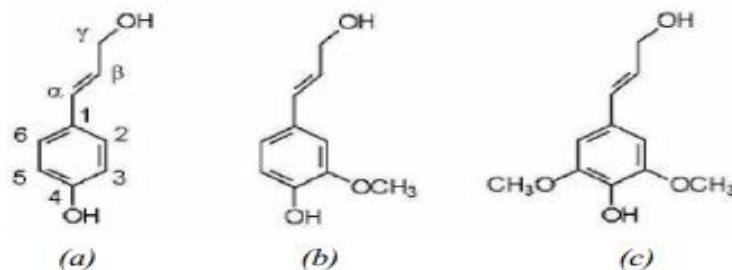


Figure III-10. Structure des précurseurs de la lignine a) p-coumaryl alcool, b) coniferyl alcool, c) sinapyl alcool [70].

d) Les pectines

Les pectines regroupent les hétéro-polysaccharides qui se trouvent généralement dans les parois cellulaires primaires des fibres végétales sauf le bois. La structure des pectines dépend de l'espèce végétale et les proportions des différents types varient en fonction de leur position dans les parois cellulaires.

Les pectines sont les composés les plus hydrophiles dans les fibres végétales en raison de la présence de groupes acide carboxylique. La **Figure III.11** présente un exemple de structure de pectine [71].

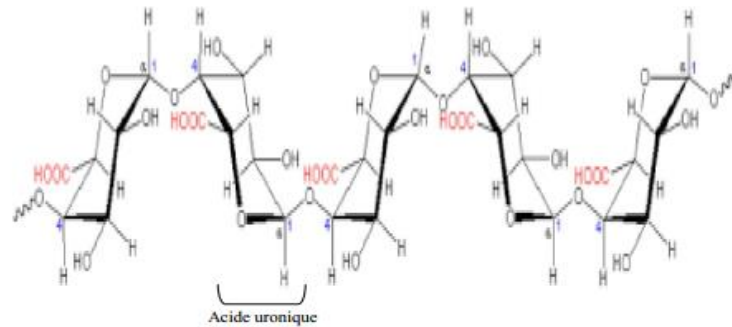


Figure III-11. Structure d'une chaîne de pectine (acide polygalacturonique) [71]

III.2.1.2. Méthodes d'extraction des fibres végétales

Habituellement, pour un usage de renfort de matériau composite, les fibres végétales sont prélevées dans la chaîne de transformation de l'industrie textile. Cette filière a développé, depuis de très nombreuses années, des techniques pour séparer les fibres du reste de la plante. Les techniques utilisées pour séparer et présenter les fibres sont l'extraction mécanique, chimique et biologique [63]. La Figure III.12 montre les trois techniques d'extraction des fibres de différentes méthodes.

a) L'extraction mécanique

Cette technique est basée sur la séparation des fibres par des procédures mécaniques à l'aide d'une machine ou manuellement. L'extraction mécanique a généralement deux problèmes majeurs. Le premier est le risque élevé d'obtenir de faibles propriétés mécaniques en raison de contraintes mécaniques qui peuvent être agressives et modifier les caractéristiques intrinsèques des fibres, quelle que soit la méthode de séparation utilisée.

b) L'extraction biologique

C'est une technique naturelle pour l'extraction des fibres, par l'utilisation d'agents microbiens ou en développant des micro-organismes capables de séparer les éléments non cellulosiques de la partie fibreuse de la plante en éliminant les liaisons qui les unissent. Cette méthode est très efficace. Cependant, ils ne peuvent pas éliminer la polymérisation de la pectine et sont généralement basés sur des conditions naturelles et des conditions agressives.

c) L'extraction chimique

Dans littérature scientifique plusieurs méthodes qui dépendent de la séparation chimique de la cellulose des autres composants non cellulosiques sont proposées. Les méthodes d'extraction chimique des fibres végétales permettent d'éviter les inconvénients d'extraction mécanique, et surtout d'économiser beaucoup de temps et d'énergie.

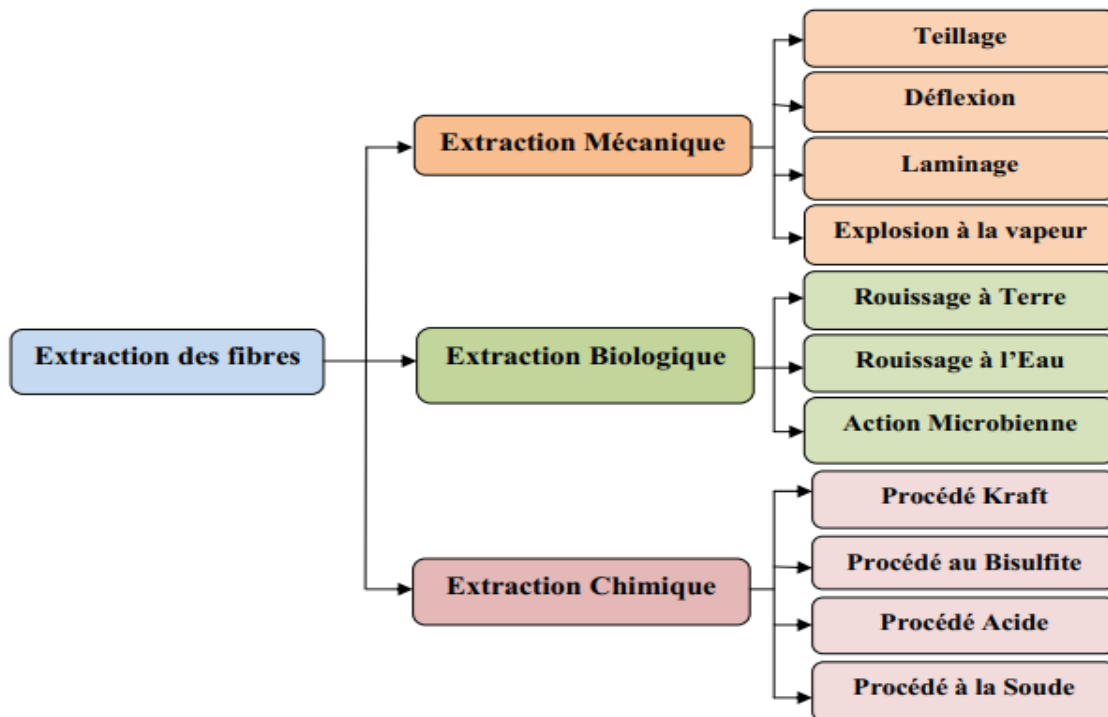


Figure III-12. Différentes techniques d'extraction des fibres végétales.

I.2.1.3 Propriétés et avantages des fibres végétales

Bien que les propriétés physico-mécaniques des fibres végétales soient affectées par certaines conditions de croissance, de climat, d'âge et d'origine végétale, les fibres végétales ont un effet bénéfique sur les propriétés physico-mécaniques du composite. D'une manière générale elles sont de bons renforts pour les matrices à cause de leur résistance relativement grande et leur faible densité [72-74].

Les fibres lignocellulosiques renouvelables ont un avantage par rapport les fibres synthétiques car elles forment des boucles au lieu de se rompre au cours de leur transformation et de leur fabrication. De plus, la cellulose contient une section ovale plate qui augmente le transfert de charge en présentant un rapport d'aspect effectivement plus élevé. Cependant, malgré ces nombreux avantages, la fibre végétale a certaines limites à être utilisée et qui sont des inconvénients.

Le **Tableau III.1** présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales comme renfort dans les composites.

Tableau III-1. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales [75-77]

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

III.2.2. Matrices

En général, la matrice qui constitue l'une des composantes des matériaux composites bio-sourcés est une matrice organique ou une matrice naturelle biodégradable. La matrice joue un rôle clé dans la cohésion entre les fibres végétales, assurant leur protection chimique et la forme du produit final. La bonne adhérence interfaciale fibres/ matrice garantit les bonnes propriétés mécaniques. La matrice détermine en général la limite de l'environnement de service du matériau et la température d'utilisation. On énumère un plusieurs types de matrice pour servir de matrice aux matériaux composites

bio-sourcés selon la classification mentionnée ci-dessus (*Figure I.13*) [77-79].

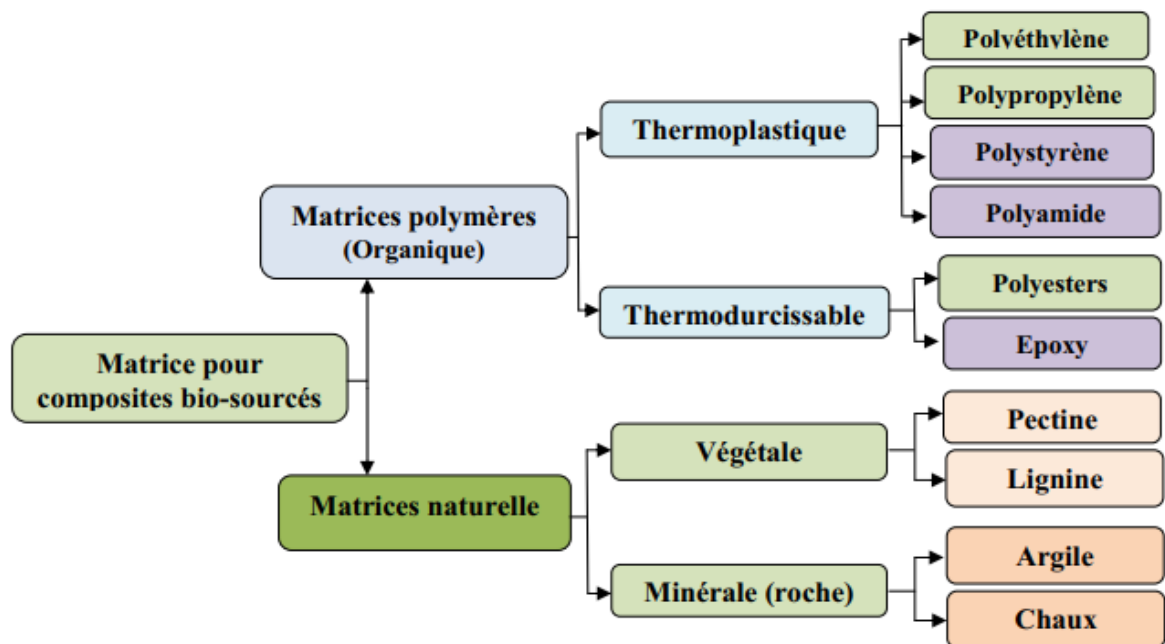


Figure III-13. Matrice utilisée pour les matériaux composites bio-sourcés.

III.2.2.1. Matrices polymères

Il existe deux types de matrices polymères qui possèdent des propriétés foncièrement différentes et sont employées dans des filières distinctes :

- Les thermoplastiques, qui se présentent sous forme solide (granulés, plaques...) et que l'on met en forme en les ramollissant par chauffage, puis en les solidifiant par refroidissement.
- Les thermodurcissables, qui se présentent sous forme liquide visqueuse et que l'on met en forme en déclenchant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur, ce qui entraîne une solidification.

La différence essentielle entre ces deux types de polymères est la nature des phénomènes physiques assurant leur cohésion. Les thermoplastiques sont constitués de longues molécules linéaires, maintenues entre elles par des liaisons physiques de faible énergie (liaisons hydrogène ou de Van der Waals, **Figure I.14(a)**) ; ces liaisons se cassent lorsque l'on chauffe le polymère et se rétablissent lorsqu'on le refroidit, de façon réversible. A l'inverse, les thermodurcissables sont des molécules en forme de réseaux tridimensionnels, maintenus par des liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes, **Figure III.14(b)**) établies de manière irréversible lors de la polymérisation.

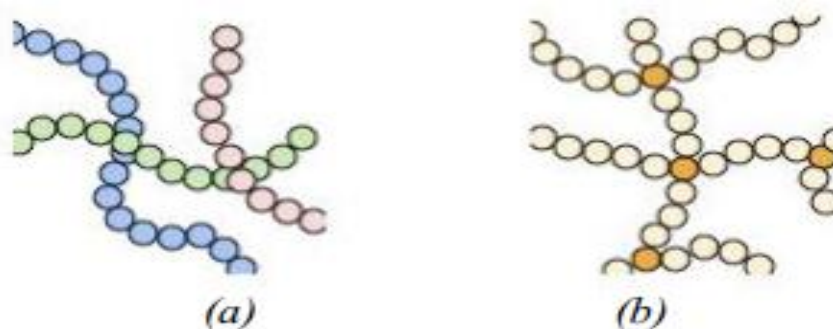


Figure III-14. Structures moléculaires des polymères : a) polymère thermoplastique, b) polymère thermodurcissable [56].

Cette différence fondamentale est à l'origine de propriétés bien distinctes. Par exemple :

- Les thermoplastiques sont moins rigides et moins résistants que les thermodurcissables (mais cela importe peu sur les composites à fibres longues, car la rigidité et la résistance proviennent essentiellement des fibres) ;
- Les thermoplastiques sont plus ductiles que les thermodurcissables, donc résistent mieux à la fissuration ;
- Les déchets thermoplastiques sont recyclables, ce qui n'est pas le cas pour les déchets thermodurcissables ;
- Les granulés thermoplastiques peuvent être stockés indéfiniment et à température ambiante, tandis que les thermodurcissables doivent être stockés au froid et pendant une durée limitée si la résine et le durcisseur sont déjà mélangés ;
- Les thermoplastiques doivent toujours être portés à haute température pour être mis en forme, les thermodurcissables pas forcément...

D'une manière générale, les matrices thermodurcissables sont plus fréquemment employées que les thermoplastiques, en raison de leur plus grande facilité de mise en forme (il est plus facile d'imprégner des fibres avec un liquide qu'avec des granulés ramollis, et les températures à utiliser sont souvent plus raisonnables). Parmi les plus courantes, on peut citer les résines polyester, peu coûteuses et souvent utilisées dans les applications « grande diffusion », et les résines époxy (ou époxydes), très employées dans les applications « hautes performances » [56].

III.2.2.2. Matrices naturelles

La matrice naturelle est composée de polymères d'origine naturelle issus de la transformation chimique de deux ou plusieurs constituants différents, solides et liquides. Les sources d'extraction de la matière solide sont minérales (chaux, argile, enduit), végétales (chimie des sucres ou lipo chimie) ou animales (graisse, os). Les liquides peuvent être des huiles végétales, de l'alcool végétal ou tout simplement de l'eau.

Les matrices végétales sont obtenues soit à partir de l'extraction d'un solide végétal (lignine, pectine) mélangé ensuite une solution, soit à partir de l'exsudat naturel des substances naturelles sécrétées par certains végétaux, les conifères essentiellement. Elles ont l'aspect d'un liquide poisseux qui sèche plus ou moins rapidement au contact de l'air. Les industriels se montrent de plus en plus intéressés par l'utilisation de ces matrices naturelles dans la mise en œuvre des éco-composites (bio-sourcés) qui représentent une solution d'avenir et durable pour de nombreux secteurs comme l'aéronautique, l'automobile, l'ameublement, et l'industrie du sport.

III.3. Procédés de fabrication des composites

L'industrie utilise une vaste gamme de méthodes de mise en œuvre des matériaux composites. Ces procédés peuvent être classés en fonction de la nature de la matrice utilisée, comme le présente la **Figure III.15**.

Les méthodes de mise en œuvre des matériaux composites à matrice thermodurcissables se classent généralement en fonction des séries à réaliser et les dimensions des pièces. Néanmoins, deux catégories de procédés se réfèrent aux formes des pièces à réaliser ; ce sont les procédés pour la réalisation de corps creux (tubes et citernes) et les procédés en continu qui permettent la réalisation de pièces à section constante

(Profilés) [80]. Ils sont des procédés manuels ou semi-automatisé.

Les méthodes mécaniques de mise en œuvre des matières thermoplastiques renforcées se classent, en deux catégories : l'injection qui est le procédé le plus utilisé, et l'emboutissage ou l'estampage de

plaques qui sont des procédés plus récents. Dans ces cas, les mèches imprégnées sont également utilisables directement [80].

La préparation de matériaux composites à matrice naturelle est plus récente, notamment l'utilisation de matrices de PLA (bio-polymère avec acide lactique d'origine fossile) à base de cellulose en cours de développement [81]. En général, les méthodes de mise en œuvre des bio-composites sont manuelles ou semi-automatisées.

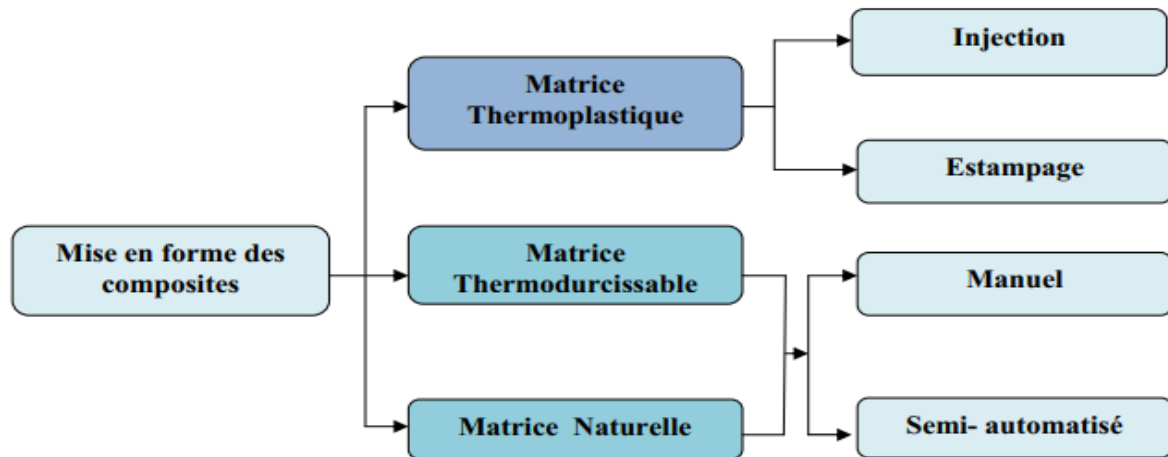


Figure III-15. Mise en œuvre des matériaux composites selon la nature de la matrice.

Parmi les procédés de mise en œuvre des matériaux composites, on distingue :

- **Le moulage au contact** : Le moulage au contact consiste à imprégner manuellement des renforts disposés dans un moule préalablement enduit d'un agent démoulant et recouvert d'une couche de surface appelé gelcoat [81].

- **La projection simultanée (PS)** : La projection simultanée est un procédé semi-mécanisé qui permet la réalisation de pièces de grandes dimensions aux formes simples ou complexes. Rapide et facile à mettre en œuvre, il nécessite l'utilisation d'une machine de projection assurant la découpe du fil, l'imprégnation et sa projection sur le moule.

- **Le procédé RTM (Resin transfer molding)** : le moulage par injection à basse pression de résine est une technique de fabrication de pièces en matériaux composites. C'est un procédé industriel d'injection à basse pression de résine liquide dans un moule rigide et fermé.

- **Le moulage sous-vide et l'infusion** : Le moulage sous-vide et l'infusion : Les procédés faisant appel au vide sont nombreux. Celui-ci ayant pour principal avantage de permettre d'appliquer sur une pièce une pression uniforme importante à moindre coût. Mais il présente aussi certains inconvénients, tels que le choix limité du taux et de la forme de renfort utilisée pour chaque processus. De plus, le moulage sous-vide est difficile à mettre en œuvre avec des moules à plan de joint.

- **Le moulage par compression à chaud (BP)** : Le moulage par compression est un procédé de mise en forme par moulage de pièces en matériaux plastiques ou composites.

Ces matériaux peuvent être à base des thermoplastiques et surtout des thermodurcissables.

- **Le SMC (Sheet Moulding Compound)** : c'est un moulage à haute pression des semiproduits composé de matrice et de renfort. Il permet de fabriquer des pièces dans de très nombreux secteurs d'activités.

- **Le BMC (Bulk Molding Compound)** : c'est un mélange généralement moulé par compression de matrice, charges et renforts sous forme de fibres coupées à l'aide d'une presse à injection, sous des

pressions de 150 à 180 bars, à grande vitesse dans un moule fermé et régulé en température entre 150 et 160 °C et destinés aux procédés de moulage pour grandes séries.

La Figure III.16 présente les procédés de mise en œuvre des composites précités



Figure III-16. Quelques procédés de mise en œuvre des composites.

III.4. Matériaux végétaux du palmier dattier

Le palmier dattier a été dénommé *Phoenix dactylifera* LIN, c'est une plante fruitière pérenne, le plus ancien dans le monde. Ayant une croissance lente, ses caractéristiques dépendent du milieu, de l'âge et des conditions culturales. L'origine des palmiers dattiers reste indéterminée malgré les grandes recherches dans ce domaine. Actuellement la culture du palmier dattier s'étend dans l'hémisphère nord préférentiellement dans les régions arides et semi-arides chaudes. Il est largement cultivé pour ses fruits alimentaires qui sont commercialisés dans le monde entier. Les estimations actuelles indiquent que le monde arabe est le plus grand producteur de palmier dattier au monde [82-85].

Selon les données du ministère de l'Agriculture et du développement rural de l'Algérie ; il y a environ 18.4 millions de palmier dattier répartis sur une superficie de plus de 160 milles hectares. Bien que ce patrimoine soit reparti dans 17 wilayas (départements), il se concentre principalement dans les wilayas Sud- Est et Sud-Centre d'Algérie [86].

La wilaya de Biskra est la première région d'Algérie en termes de nombre de palmiers dattiers avec 4,3 millions de palmiers, représentant 23.27% du patrimoine national. Viennent ensuite les wilayas d'El Oued et d'Adrar qui représentent environ 20% La Figure III.17 montre la répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014.

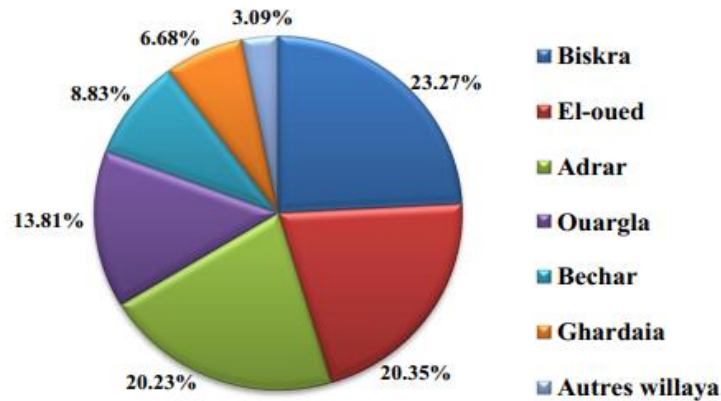


Figure III-17: Répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014 **Source :** Données utilisées à partir du tableau 01 de l'annexe 01[86]. Les oasis de palmiers de Biskra sont particulièrement concentrées dans les sept régions de Ziban, comme le montre la **FigureIII.18** [87].

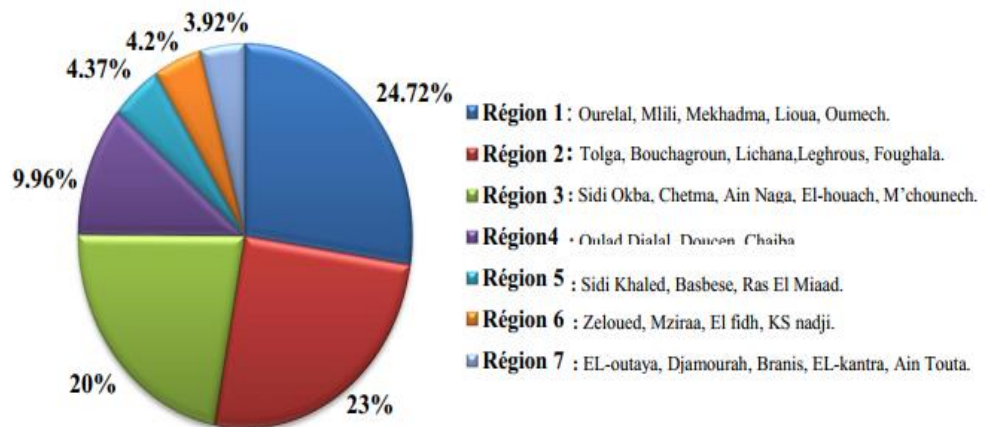


Figure III-18. Répartition de palmier dattier en région de Biskra. **Source :** Données utilisées à partir du tableau 02 de l'annexe 01[86].

Ces régions sont connues par une grande diversité de palmiers dattiers. Cette différence entre les palmiers peut être distinguée à l'œil nu à travers la couleur, la taille, le fruit et la forme de la palme. Les palmiers de Deglet-Noor sont les plus répandus à Biskra avec 61,93%, puis les palmiers d'Elghres avec 12,90% comme le montre la **Figure I.19**.

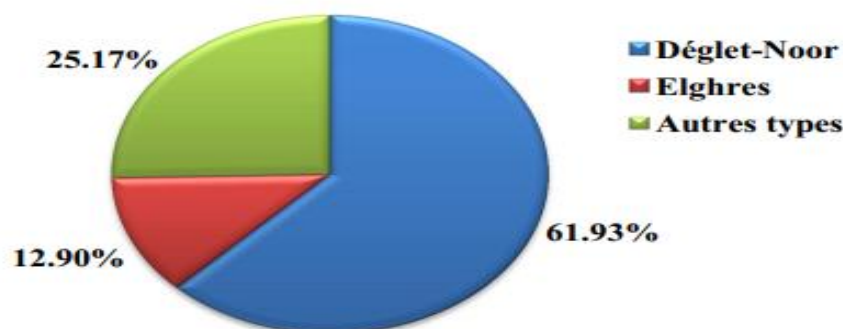


Figure III-19. Proportion de variétés des palmiers dattiers à Biskra. **Source :** Données utilisées à partir du tableau 03 de l'annexe 01[86].

On pourrait croire que le palmier dattier est une plante qui ne possède pas de tronc alors que c'est un monocotylédone qui possède un tronc qui contient du bois fibreux et du tissu entourant le tronc à l'encastrement de la palme, appelé localement Lif. De plus, c'est une plante dioïque comportant des pieds mâles (Dokkar) et des pieds femelles (Nakhla).

Le palmier dattier a un tronc très élancé (Stipe), haut jusqu'à 30 m, clairement recouvert par les gaines (Pétiole) des feuilles (Palme) tombées et de tissu (Lif) entourant le tronc à l'encastrement des pétioles. Les palmes sont réunies en forme d'une couronne en un nombre de 20 à 30 au maximum. Un ensemble de régimes (Grappe) aux fruits sont suspendus sous la couronne de palmes dispersée. La **Figure III.20** présente les constituants principaux du palmier dattier et l'évolution naturelle d'une palme [88-90].

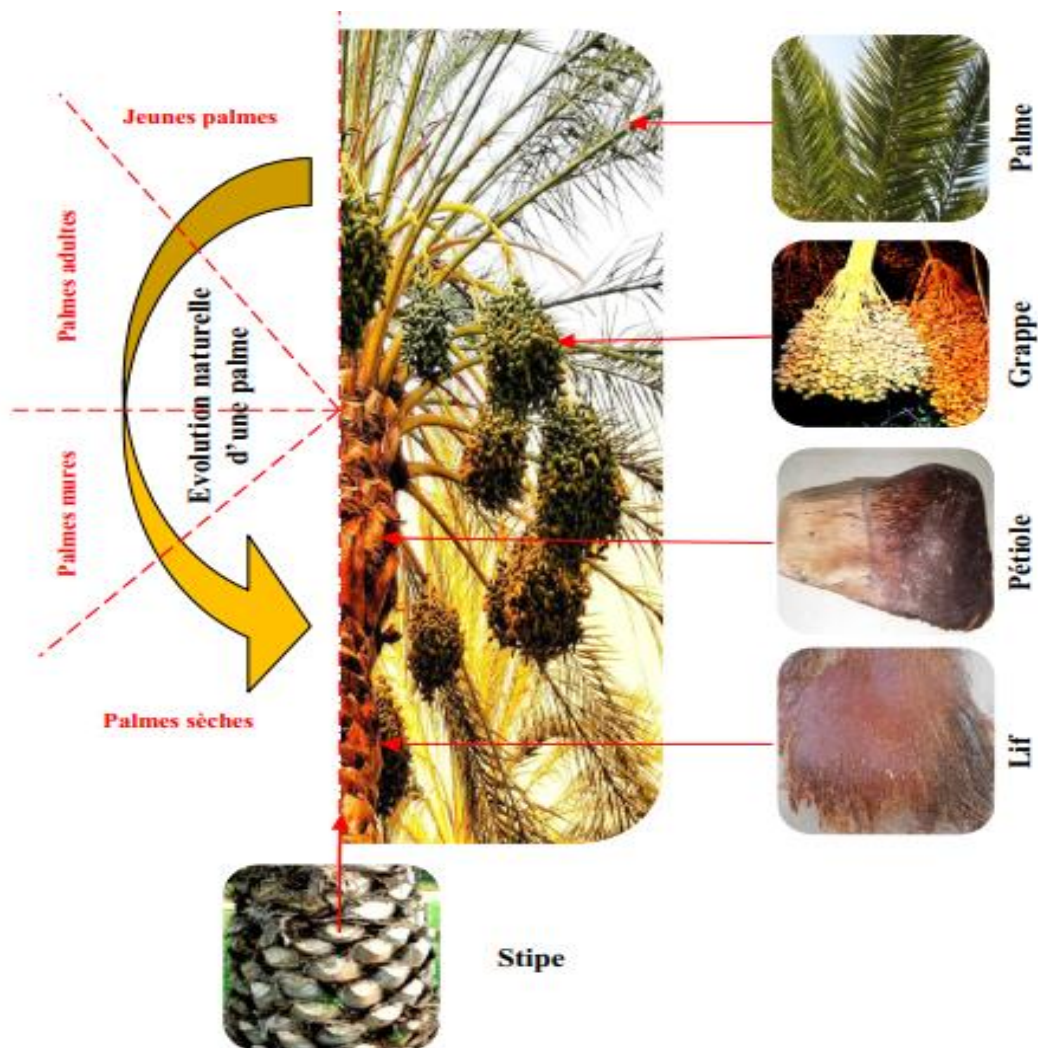


Figure III-20. Différentes parties d'un palmier dattier et l'évolution naturelle d'une palme.

III.4.1. La palme

La palme est une feuille pennée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis (Gand) qui s'étend jusqu'au pétiole (Kornaf). Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues. La base pétiolaire des palmes (dit localement Kornaf) est dure et relativement rigide [82]. La longueur d'une palme peut varier de quelques dizaines de centimètre à plusieurs mètres. Suivant cette longueur, la palme peut

être divisée en quatre parties : partie pétiolaire, partie épineuse, partie intermédiaire et partie foliotée. La **Figure III.21** présente les différentes parties d'une palme mûre.[91]

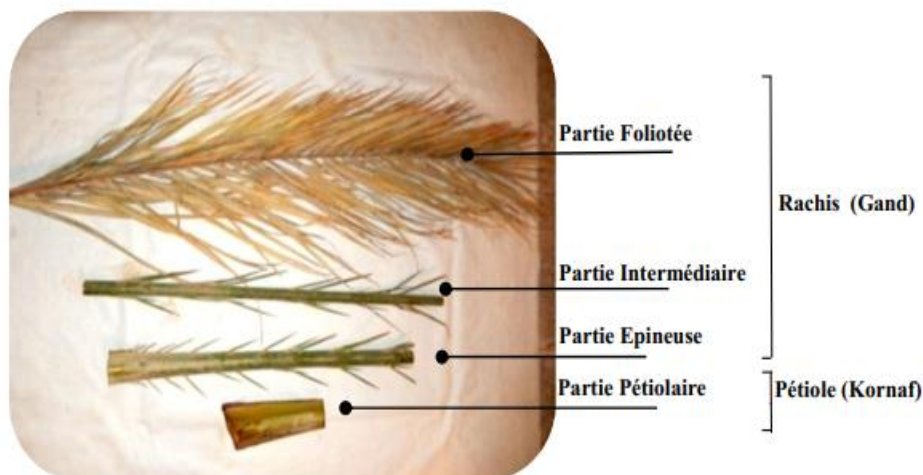


Figure III-21. Les quatre parties de la palme mûre. [91]

III.4.2. Composition chimique de la palme

Les résultats de la composition chimique des fibres lignocellulosiques issues du palmier dattier d'après l'étude de **A. Sbiai [89]** sont résumés dans le graphe de la **Figure III.22** Ces résultats représentent des moyennes d'au moins trois essais pour chaque élément.

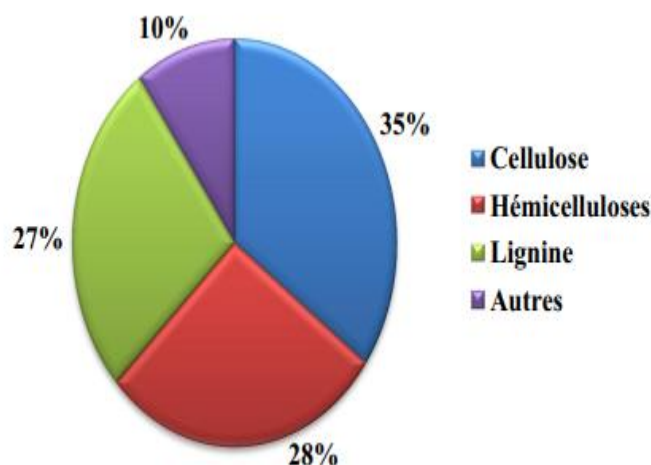


Figure III-22. Composition chimique des fibres de palmier (% en poids) [89].

III.4.3. Déchet du palmier dattier

La croissance et l'évolution naturelle d'une palme passent par quatre étapes successives qui sont définies par les termes palmes jeunes, palmes adultes, palmes mûres et palmes sèches [92] (**Figure III.20**). Un palmier dattier produit chaque année une quantité très importante de bois fibreux et de fibres (Lif) sous forme de déchets abandonnés, dans les oasis du désert du Sahara. Ces déchets concernent les sous-produits du palmier dattier (Spadice, Grappe, Palmes sèches, Rebutts de dattes, et Lif, ...). Cette quantité de déchets peut atteindre 80 milles tonnes par an dans la seule région de Biskra (Algérie) [93]. Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir de bourgeons et perd un nombre similaire de palmes par dessèchement [82, 92, 40]. Une palme pèse en

moyenne 1.4Kg. Le palmier dattier donne en moyenne 15 palmes par an [94] ; on dénombre environ 18.4 millions de palmier dattier en Algérie dont 4.3 millions dans la région de Biskra [93]. On peut estimer le total de palmes séchées à environ 382200 tonnes/an en Algérie [91].



Figure III-23: Déchets des palmiers dattiers : a) palmes sèches, b) stipes.

III.4.4. Domaines d'utilisation des déchets de palmier dattier

Les déchets de la palme constitués de fibres ne sont exploités que d'une manière artisanale pour des applications traditionnelles. On les retrouve par exemple dans l'artisanat (avec la fabrication de chapeaux, paniers et tapis...etc.) mais également dans la construction (charpentes de maison). La Figure III.24 montre certaines applications de ces déchets.

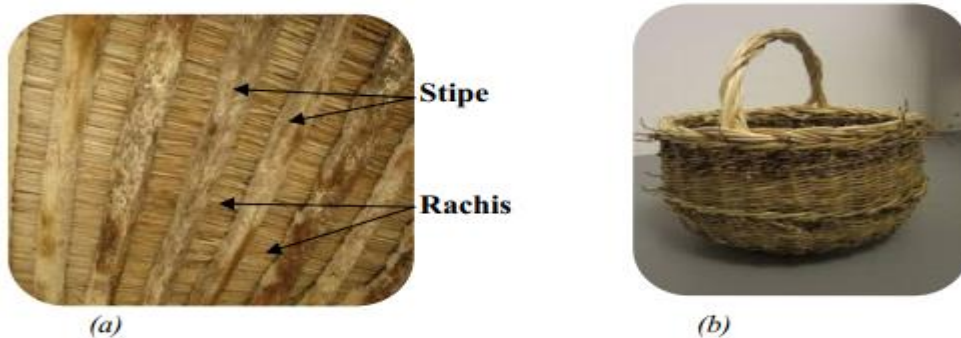


Figure III-24. Quelques utilisations traditionnelles des déchets de palmier dattier : a) charpentes de maison, b) panier.

Actuellement, le bois fibreux de la palme est utilisé comme une alternative aux déchets de bois classique dans la fabrication des différentes plaques de bois industriel (MDF, HDF, LDF, ...) (Figure III.25). Cette technique est utilisée par de nombreux fabricants industriels dans le monde [95-97]. D'autre part, les fibres extraites du bois fibreux de palme attirent l'intérêt des chercheurs pour être utilisées comme renfort dans les matériaux composites [98-100]. En général, les utilisateurs ont considéré que le bois et les fibres extraites du palmier ont les mêmes propriétés.



Figure III-25. Bois MDF à base de palmier dattier.

III.5. Synthèse des travaux réalisés

En ce qui concernent les travaux de recherche réalisés dans le domaine des biocomposites à base du palmier dattier, ils sont présentés à travers deux sections principales. La première concerne certains travaux sur des matières premières utilisées comme agents de renforcement, tels que le bois et les fibres de palmier dattier, et la seconde sur des matériaux composites à base de renforts issus du palmier dattier.

III.5.1. Renforts issus de palmier dattier

Dans cette section, nous présentons quelques travaux scientifiques menés sur divers renforts extraits des palmiers dattiers, tel que, le bois et les fibres. Ces renforts sont utilisés dans la préparation de composites bio-sourcés.

III.5.1.1. Bois

H. Abdel-Rahman et al [101] présentent une étude expérimentale sur les propriétés physiques et mécaniques des rachis de palme de palmier dattier. L'étude des propriétés physiques inclue la structure anatomique du rachis et l'effet de l'absorption d'eau sur son volume. Des essais de traction ont été utilisés pour déterminer les propriétés mécaniques de rachis. Les résultats des tests montrent qu'il y a une différence entre la résistance à la traction entre la paroi de bois de rachis et le cœur. La contrainte maximale des parois de rachis varie entre 116 et 208 MPa, tandis que celle du cœur correspond approximativement à la moitié de ces valeurs. En plus, le module d'élasticité de rachis se situe entre 10 et 30 GPa.

Les travaux de **M. K. Jahromi et al [102]** avaient pour but de cette recherche était d'identifier certaines caractéristiques techniques et mécaniques sur le bois du palmier dattier. Les résultats obtenus sont utilisés dans l'étude de la conception d'une machine afin de réaliser des travaux de maintenance de palmier tout au long de l'année. La machine est directement attachée au tronc du palmier dattier. Les propriétés physico-mécaniques du bois de tronc de palmier dattier obtenues sont la teneur en humidité de 228,98% et la densité moyenne du tronc de 1,16 g / cm³. En plus, les résultats des essais de flexion trois points ont montré que sa résistance moyenne à la flexion est de 7.166 MPa et son module de flexion est de 273.4 MPa. Les essais de compression longitudinale et perpendiculaire ont montré que le module d'élasticité et la limite élastique étaient respectivement de 281,3 et 4,458 MPa dans la direction longitudinale, tandis que la contrainte à la limite proportionnelle était dans la direction perpendiculaire de 1.124MPa. La résistance à la compression est ainsi inférieure dans le sens perpendiculaire par rapport au sens longitudinal. La charge maximale dans le test de dureté était de 0,7319kN et la ténacité en test de choc étaient de 1,61 kg.m.

L'étude expérimentale de **T. Guettaf Temam [103]** a été menée pour différentes caractéristiques de différents types de palmier. L'analyse de la microstructure des bois du palmier dattier a montré que celle-ci était complexe. En effet, le bois de grappe de palmier est constitué de deux couches contenant un nombre différent de fibres de différents diamètres. La mesure du taux d'absorption et de la teneur en humidité dans différents échantillons testés, a montré qu'il y a une différence pour chaque partie de bois et chaque type de palmier dattier. Des essais de traction ont été effectués sur du bois de régime et les résultats obtenus indiquent que le coefficient d'élasticité varie entre 7036 et 16161 MPa.

E. S. Ellouze A et Medhioub S [104] ont mené une étude sur la caractérisation du bois de palme du sud de la Tunisie, pour l'éventuelle utilisation industrielle de ces déchets. Dans le but de déterminer les caractéristiques mécaniques du bois du tronc de palmier, des essais de compression

perpendiculaire aux fibres et de flexion trois points ont été effectués sur plusieurs échantillons d'orientations privilégiées par rapport au repère naturel selon la norme NF51-002 dans le domaine élastique. Les résultats obtenus montrent la variation des valeurs du module d'élasticité entre le test de flexion et le test de compression. Le coefficient d'élasticité pour l'essai de flexion trois points est de 6000 MPa, par contre pour l'essai de compression perpendiculaire aux fibres est de 2875 MPa. Le coefficient d'élasticité peut varier pour une charge appliquée longitudinalement aux fibres, avec une autre appliquée transversalement. Cette différence dans deux directions perpendiculaires montre le caractère anisotrope du bois du tronc. Les paramètres influençant la résistance du bois de palmier dattier à la traction, à la compression et à la flexion trois points, sont fonction du type de bois, de l'humidité, de la direction des sollicitations, de la densité du bois,

L'étude de **S. Amirou [57]** présente les résultats d'analyses effectuées sur le bois du tronc et de rachis de palmiers dattiers, telles que les propriétés physiques, mécaniques, chimiques, thermiques et anatomiques. Les résultats des propriétés physiques obtenus montrent qu'il existe une différence entre les valeurs enregistrées selon de la position de l'échantillon testé. La masse volumique varie entre 1508 Kg/cm³ et 1542 Kg/cm³ selon la hauteur et le diamètre, ainsi que les valeurs d'humidité varient entre 178.48 et 174.24%. D'autre part, les propriétés mécaniques ont montré que ces matériaux ont un potentiel d'utilisation favorable et les valeurs obtenues dépendaient des propriétés physiques et de la structure morphologique du matériau analysées par les observations microscopiques du bois du palmier dattier.

K. Almi [74] a étudié les propriétés chimiques, physiques, thermiques et mécaniques du bois issu de différentes parties renouvelables du palmier dattier. Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les composants du bois des huit espèces étudiées. La quantité de cellulose dans le bois variait entre 33,29% et 43,94%, avec une teneur en hémicellulose d'environ 20% dans tous les types de bois. Ils se caractérisent par une faible masse volumique généralement inférieure à 600 kg / m³ et un faible taux d'absorption d'eau qui est inférieur à 100%, sauf pour le bois de pétiole, spathe et fibrillium. Le bois de pétiole représente la valeur la plus basse pour la densité, avec un taux d'absorption élevé de 146%. La dégradation thermique pour le bois de pétiole, la spathe, les grappes et le rachis est à 200 °C. Le bois de palmier dattier est un matériau ayant de faibles propriétés mécaniques avec une résistance à la traction variant de 86 à 213 MPa, le module d'élasticité variait de 3 à 8,5 GPa et un allongement à la rupture proche de 3%. Cependant, il se caractérise par des propriétés spécifiques élevées qui constituent l'un des principaux avantages de son utilisation pour développer des matériaux composites légers et à bonne isolation thermique.

Une étude expérimentale a été menée par **M. Tlijani [105]** sur les propriétés thermophysiques de trois essences de bois du palmier dattier. L'analyse des résultats en fonction de la position des éprouvettes et de l'orientation des fibres dans le bois sur la conductivité thermique a montré que les principaux facteurs influant la conductivité thermique sont la diversité du palmier dattier, la position et l'orientation des fibres dans le bois (tronc ou palme). Les propriétés thermo-physiques de ce type de matériau sont anisotropes et son utilisation est préférable dans la direction radiale (flux thermique perpendiculaire au plan des fibres). Les propriétés thermiques fortes observées en matière de conductivité thermique et de masse volumique prouvent que le bois de pétiole de palme est un bon isolant thermique par comparaison à d'autres matériaux isolants. Cette conclusion est similaire dans l'étude de **B. Agoudjil et al [106]** où ils ont découvert que les parties renouvelables du palmier dattier (pétiole et grappe) constituent un bon isolant thermique présentant une faible masse volumique.

Ces travaux scientifiques, le bois des palmiers dattiers a généralement de bonnes propriétés mécaniques avec un comportement mécanique anisotrope. Les résultats des tests physiques et thermiques reflètent la différence de comportement du bois de palmier dattier en fonction de la partie de son extraction. En effet, Le bois de la partie pétiolaire présente une faible densité et une bonne isolation thermique par rapport aux bois des autres parties de palmier dattier.

III.5.1.2. Fibres

L'étude de **Y. Djeboun et al [88]** a pour but de valoriser les fibres végétales locales et en évaluer leur efficacité en tant que renfort dans de nouveaux biomatériaux renouvelables. Le but de l'étude était de déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques, à savoir le module d'élasticité, le coefficient de Poisson et la masse volumique de cette fibre, appelée localement «Lif». Cette fibre est extraite de différentes variétés de palmiers dattiers de la région de Biskra au sud-est de l'Algérie. Les fibres ont été extraites par une méthode mécanique. Cette étude compare les caractéristiques mécaniques de la fibre Lif du palmier dattier avec d'autres fibres synthétiques et végétales étudiées précédemment. Les résultats obtenus pour les caractéristiques mécaniques et physiques des différents types de fibres Lif testés, indiquent que le module élastique déterminé en effectuant l'essai de traction varie entre 3.30 et 9.86 GPa et le coefficient de Poisson est déterminé par l'essai de torsion varie entre 0.100 et 0.176. Les propriétés spécifiques de cette fibre qui sont présentées par les valeurs de la densité qui varient entre 0.45–0.57 g/cm³. Les résultats de cette étude indiquent que la fibre Lif peut être utilisée comme les autres fibres végétales. La faible densité et les caractéristiques mécaniques intéressantes de la fibre Lif montrent la possibilité de l'utiliser comme renfort dans les matériaux composites pour diverses utilisations industrielles.

K. Almi et al [107] sont intéressés aux des propriétés mécaniques, physiques et thermiques de fibres issues de différentes parties renouvelables du palmier dattier. Les résultats ont montré que les caractéristiques de huit types de fibres de palmier dattier étaient quelque peu différentes. Les valeurs obtenues pour le rachis sont les plus élevées pour une résistance à la traction et le module d'élasticité de 213 MPa et 8,50 GPa, respectivement. Cela peut être dû à ses propriétés chimiques telles que la teneur relativement élevée en cellulose de 41,42% et à ses propriétés physiques faibles telles que la porosité évaluée à 15,44%. Selon l'analyse thermique des fibres de palme, il a été rapporté que les fibres de palme conviennent à la mise en œuvre de composites à des fins d'isolation thermique.

A. Bezazi et al [108] ont apporté une contribution technique à l'extraction des fibres de grappe de palmiers dattiers de manière mécanique et à l'utilisation d'eau pour le traitement alcalin de se fibre de différentes concentrations d'hydroxyde de sodium NaOH à 1% et 2% pendant des durées d'immersions de 48 et 72 heures. Ainsi, la caractérisation mécanique des fibres brutes non traitées et des fibres traitées montre que le traitement chimique améliore les propriétés mécaniques telles que la contrainte maximale et le module d'élasticité. Le traitement des fibres avec 2% d'hydroxyde de sodium NaOH pendant 48 heures donne les meilleures propriétés mécaniques des fibres testées avec une augmentation des valeurs de contrainte à la rupture de l'ordre de 131% par rapport à la contrainte de la fibre non traitée. En augmentant les valeurs de module d'élasticité jusqu'à 98 %, il est à signaler que l'extraction des fibres des bras de grappe est un travail difficile dans le but d'obtenir des fibres longues et non endommagées.

Dans l'étude de **A. S. Hammood [109]** les mailles des fibres entourant le tronc du palmier dattier (type Berhi) ont été collectées dans une ferme de palmiers dattiers en Irak. Les fibres ont été séparées des mailles à la main, puis lavées avec de l'eau distillée pour éliminer les saletés adhérentes,

les poussières et les contaminants. Ces fibres du palmier dattier extraites des mailles ont été séchées naturellement à une température de 25°C pendant 24 heures, puis immergées dans de l'eau salée d'une concentration de 3,5% de NaCl pendant 48 heures, puis exposé à une température de 50 ° C dans une étuve jusqu'à ce qu'il soit complètement sec. Les fibres sont ensuite coupées aux dimensions requises pour obtenir des échantillons destinés à la caractérisation physique et mécanique. Les propriétés physiques et mécaniques obtenues par les tests sur les fibres sont comprises entre 1,00 et 1,98 g / cm³ pour la masse volumique, entre 95 et 190 MPa pour la résistance à la traction, et entre 2,7 et 5,8 GPa pour le module d'élasticité.

E. A. Elbadry [110] a étudié l'effet de différentes méthodes de traitement de surface des fibres de palmier dattier sur leurs différentes propriétés. Le traitement a été effectué selon trois techniques. Le premier, est un nettoyage manuel de la surface, ce qui peut être effectué en nettoyant les fibres avec un chiffon doux pour sable. Le deuxième est le même que le premier mais effectué après traitement thermique des fibres dans une étuve à 100 ° C pendant 1,5 heures. Le troisième est un traitement chimique par 1% de NaOH à 100 ° C pendant 1 heure. Les résultats obtenus après les différents traitements sur la morphologie de la surface, la densité et la stabilité thermique, comparés aux fibres de palme brutes, montrent l'amélioration des performances mécaniques des fibres. La résistance à la traction et le module d'élasticité des fibres brutes sont respectivement autour de 176MPa et 5.5GPa qui sont proches des valeurs des propriétés mécaniques des fibres de coco et comparables aux autres fibres naturelles. Le traitement à la soude a un effet évident sur l'augmentation des propriétés mécaniques. La résistance à la traction peut atteindre 400 MPa et le module d'élasticité, jusqu'à 15 GPa. Cela est dû à l'état de surface de la fibre après le traitement qui est éliminé la cire et les corps gras. De plus, le traitement thermique des fibres issues de palmier dattier avant le nettoyage de la surface améliore le séchage de la surface des fibres, ce qui contribue à éliminer tous les contaminants et les fibrilles de fibres qui ont un effet négatif sur la résistance à la traction.

F. M. Al-Oqla et S. Sapuan [111] dresse un ensemble de critères permettant un classement des matériaux composites renforcés par des fibres naturelles. Ces normes peuvent être utilisées comme un outil majeur dédié aux concepteurs et décideurs pour choisir des matériaux composites à partir de fibres naturelles adaptées à une application donnée. D'après ces critères, les fibres de palmier dattier ont des propriétés très compétitives pour l'industrie automobile. La fibre de palmier dattier est la fibre la moins chère parmi les autres types de fibres naturelles. Le rapport L/D des fibres de palmier dattier est plus modéré que celui des autres types de fibres naturelles. La fibre du palmier dattier ayant la plus faible valeur de densité (environ 1 g/cm³) son module spécifique domine tous les autres types de fibres naturelles. Il est d'environ deux fois la valeur du chanvre, et plus de trois fois celui du sisal. Cela signifie que les fibres de palmier dattier sont très compétitives par rapport aux types de fibres naturelles.

L'étude de **A. Kriker et al [112]** examine des fibres superficielles (Lif) de quatre types de palmier dattier et détermine leurs propriétés mécaniques et physiques. Les fibres sont séparées individuellement par l'utilisation d'eau. Les résultats mécaniques montrent que, les fibres humides étaient légèrement plus résistantes que les fibres sèches. La fibre de Lif issus de palmier mâle avait donné la plus haute résistance à la traction comprise entre 170 et 300 MPa, avec un module d'élasticité qui varie entre 3.25 et 5.25 GPa. De plus, concernant les propriétés physiques des fibres, leur densité est comprise entre 1300 et 1450 kg / m³ selon la variation de diamètre de 0,1 à 0,8 mm. Ces résultats

obtenus pour les propriétés des fibres de palmier dattier mâle conviennent à l'utilisation de ces fibres dans le renforcement du béton.

L'objectif du travail de **A. Al-Khanbashi et al [113]** est d'étudier la possibilité d'utiliser des fibres de palmier dattier dans le renforcement des matériaux composite à matrice polymères. Les fibres de palmier dattier ont été étudiées en évaluant leurs propriétés chimiques, physiques et mécaniques, par rapport aux autres fibres naturelles couramment utilisées. Cette étude a abordé l'effet des différents traitements de surface sur les caractéristiques des fibres de palmier dattier, telles que la résistance à la traction, la densité, la morphologie de la surface et la stabilité thermique. Les résultats obtenus par des essais de traction sur des échantillons de fibres montrent des résistances à la traction de 170-275 MPa, un module d'élasticité compris entre 5 et 12 GPa et un allongement à la rupture de 5-10%. Les différentes méthodes de traitement utilisées ont un impact sur les différentes propriétés de la fibre. La fibre traitée par la soude présente la plus grande augmentation de la résistance à la traction et la plus grande amélioration de la résistance à la dégradation thermique par rapport aux autres traitements étudiés.

En général, les fibres extraites des palmiers dattiers possèdent de bonnes propriétés mécaniques et physiques. L'extraction de la fibre de palmier dattier reste une tâche difficile pour obtenir des fibres longues et non endommagées. Les différentes méthodes de traitement de ces fibres ont un impact sur leurs propriétés et mécaniques. La différence entre les valeurs des propriétés mécaniques et physiques des fibres des palmiers dattiers obtenues par divers tests et signalée dans les travaux scientifiques peut être due au morphologique complexe de ces fibres, en plus, de la diversité des zones d'extraction de la fibre et de l'essence du palmier dattier.

III.5.2. Composites à base de renforts de palmier dattier

Dans cette section, nous présentons les matériaux composites à base de renforts issus de palmier dattier selon la nature de la matrice et la forme du renfort.

III.5.2.1. Composite à matrice thermdurcissable

Dans l'étude de **A. S. Hammood [109]**, le matériau composite étudié est composé d'une matrice de résine polyester renforcée de fibres naturelles issues du palmier dattier. Les fibres sont traitées avec une solution d'acide maléique à une concentration de 5% pendant 20 heures. La fraction volumique des fibres de palmier dattier était fixée à 40% dans tous les matériaux composites préparés. Pour préparer des échantillons composites, l'auteur utilise une méthode simple consistant à déposer les fibres à la main. Les résultats obtenus des différents tests montrent que la fibre de palmier dattier a une bonne adhésion inter-faciale à la matrice de résine polyester ; par ailleurs ce matériau souffre de la dégradation rapide de la matrice et des fibres du palmier dattier lorsqu'elles sont exposées à l'érosion, ceci est clairement illustré par l'observation optique de la micro-fissuration de la matrice et de la rupture des fibres.

Le but de l'étude de **A. Sbiai [89]**, est d'étudier le comportement mécanique aux petites et grandes déformations des composites à base de fibres de palmier dattier. Les fibres traitées ou non traitées sont introduites avec la résine époxyde et le durcisseur amine pour former ensuite le matériau composite. L'analyse morphologique des faciès de rupture des composites à base d'époxyde et de fibres non modifiées et modifiées par oxydation qui sont étudiés après des tests de flexion trois points montrent une bonne adhésion interfaciale entre les fibres traitées et la matrice. Les résultats de traction sur les composites avec différentes fractions massiques de fibres (5, 10 et 15%) ont montré que le module d'élasticité augmentait de 2,6 à 3,2 GPa.

Y. Djebbloun [77] a étudié les propriétés mécaniques des composites à base de matrice polyester et d'époxy renforcés par des fibres courtes de Lif de palmiers dattiers. Les éprouvettes ont été préparées pour les essais mécaniques en utilisant une machine de découpe laser CO₂ à partir des plaques de composites présentant différentes fractions massiques de fibres. Les résultats des tests de traction montrent des améliorations du module d'élasticité des résines polyester et époxy renforcées par la fibre de palmier dattier (Lif). Le module d'élasticité s'améliore de $0,737 \pm 0.139$ à $1,177 \pm 0.361$ GPa pour la matrice polyester et de 0.365 ± 0.044 à 0.537 ± 0.018 GPa pour la matrice époxy avec une baisse de la déformation à la rupture. L'auteur attribue ceci au rôle rigidifiant de la fibre du Lif.

T. Alsaeed et al [114] ont étudié l'effet du traitement des fibres de palmier dattier avec des différentes concentrations de NaOH sur l'adhérence interfacial entre la matrice époxy et les fibres, ainsi que l'effet des dimensions des fibres tel que la longueur et le diamètre sur les propriétés du composite renforcées par la fibre seul. Les résultats obtenus et l'observation de la morphologie de surface ont montré que la longueur de 10 mm de fibre traité par la concentration de 6% de NaOH était la condition optimale d'adhérence des fibres avec la matrice, tandis que la concentration supérieure à 9% a engendré un endommagement des fibres, les résultats mécaniques obtenus étaient alors les plus faibles.

III.5.2.2. Composite à matrice thermoplastique

Y. Djebbloun [77] a étudié les propriétés mécaniques de composites à base de matrice thermoplastique (polypropylène) renforcé par des fibres de palmier dattier (Lif). Le mélange (matrice PP / fibres Lif) a été produit par une machine d'extrusion mono-vis pour les différentes fractions massique de fibres (3, 4 et 5%). Les compounds obtenus à partir du découpage des fils de composites ont été utilisés pour la préparation des plaques rectangulaires dans une machine à thermo-compression. Selon les résultats d'essais de traction effectués sur les matériaux composites, une amélioration de la contrainte à la rupture et de module d'élasticité a été observée avec l'augmentation du taux de fibres. En outre, plus le taux de fibres est élevé plus le composite devient rigide et difficile à déformer. Le module d'élasticité s'améliore de 0.622 à 0.686 GPa et la contrainte à la rupture de 10.62 à 19.19 MPa.

K. M. Zadeh et al [115] ont analysé l'effet de l'hydroxyde de magnésium ignifuge sur les mélanges recyclés de PP (polypropylène), HDPE (High-density polyethylene) et LDPE (Low-density polyethylene) renforcés par des fibres de palmier dattier (10% en masse). Ceci est dans le but de l'utilisation de polymères recyclés et renforcés par les fibres de palmier dattier dans la conception de produits utiles. L'ensemble des composites fabriqués étaient peu coûteux, moins énergivores et respectueux de l'environnement. Bien que le retardateur de flamme ait réduit les propriétés mécaniques, les fibres de palme ont renforcé l'ensemble du composite ce qui permet d'obtenir simultanément le caractère ignifuge et des propriétés mécaniques intéressantes. Le module d'élasticité de ces composites varie entre 510.2 ± 1.2 et 569.5 ± 3.1 MPa.

A. Bendahou et al [116] ont vérifié la compatibilité entre les composants des matériaux composites. Les composites ont été préparés par le mélange des fibres issues d'une palme de palmier dattier et des matrices thermoplastiques PP (polypropylène) et PEBD (polyéthylène basse densité) avec des agents de couplage à différents pourcentages. Les analyses morphologiques et thermo-mécaniques effectuées sur les composites montrent que ces agents améliorent l'adhésion entre la matrice polymère et les fibres de palmier. Ces résultats sont confirmés par **A. Bendahou et al [117]** concernant l'adhésion interfaciale significativement améliorée lors de l'utilisation d'agents. Ceci

améliore les performances mécaniques pour les deux types de composites jusqu'à une quantité critique de compatibilisant au-delà de laquelle le taux de cristallinité du polymère diminue. Le module d'élasticité augmente considérablement jusqu'à 1.329 ± 0.155 GPa pour une fraction massique des fibres entre 5 à 10%.

B. Abu-Sharkh et al [118] ont étudié la dégradation des matériaux composites à base d'une matrice thermoplastique polypropylène chargée par des fibres de palmier dattier à partir d'un vieillissement naturel et artificiel. Le composite a été préparé par l'injection de polymère avec deux stabilisants et des fibres de la palme qui étaient nettoyées par l'éthanol et du toluène. Les tests de vieillissement montrent que le composite chargé par les fibres de palmier dattier est plus stable que le polypropylène vierge dans des conditions climatiques naturelles sévères. De plus, une bonne adhésion interstitielle (PP / fibres de palme) peut être due à l'efficacité des stabilisants utilisés, source de la rétention de la résistance mécanique. Les échantillons composites présentent une stabilité supérieure à celle du PP et la perte de résistance mécanique ne dépasse pas 20% avec le vieillissement.

La plupart des chercheurs s'accordent la bonne adhérence (inter-faciale) entre les fibres du palmier dattier et la matrice époxy. Ainsi pour assurer cette adhérence entre les matrices thermoplastiques et les fibres des palmiers dattiers, différentes techniques de traitement des fibres sont nécessaires. Néanmoins, ces traitements affectent les composantes et les différentes propriétés de la fibre. La fraction massique des fibres et leurs dimensions, tel que la longueur et le diamètre ont une influence considérable sur les propriétés du composites renforcées par les fibres de palmier dattier. Les méthodes de mise en œuvre des matériaux composites à base de matrices thermodurcissables sont plus simples que l'utilisation des matrices thermoplastiques.

III.5.2.3. Composite à particules

T. Masri et al [119] présente une étude expérimentale sur la caractérisation de composites bois-plastique innovants à base des déchets (palmiers dattiers, polystyrène expansé). Les déchets de feuillet de palmier dattier sont utilisés comme particules de renforts et les déchets de polystyrène expansé dissolu dans l'essence sont utilisés comme matrice. Les résultats obtenus après des tests mécaniques, thermiques et morphologiques sur des matériaux composites préparés en différentes tailles et fraction massique de particules, montrent le bon état d'adhérence de l'interface bois/matrice. Les propriétés mécaniques sont acceptables avec un module de flexion et une contrainte maximale pouvant atteindre 0.78 GPa et 2.84 MPa, respectivement, et avec une densité allant de 542 à 824 kg/m³, comparable à celle des matériaux habituels tels que le bois dur et mou, le MDF. La conductivité thermique moyenne est comprise entre 0.11 et 0.16 W/m.K. Il a été conclu que l'utilisation de déchets de palmiers dattiers comme renforcement dans les composites pouvait être considérée comme un bon renfort naturel.

Le but de ces travaux de **S. Amirou [57]** est d'évaluer la possibilité d'élaborer des panneaux de composites écologiques à base de bois de palmier dattier ayant de bonnes propriétés. En outre, de nouveaux liants ont été développés à faible rejet de formaldéhyde ou sans émission de formaldéhyde à travers la mise en œuvre de ressources naturelles. Ainsi, des panneaux à particules en bois de palmier ont été préparés en tant que panneaux alternatifs aux panneaux de bois traditionnel. Les panneaux sont constitués de particules monocouches de palmier dattier (stipe et rachis) avec colle (Mélamine urée formaldéhyde et Phénol-formaldéhyde). Les résultats de caractérisation mécanique des panneaux obtenus ont montré la faisabilité technique de l'utilisation du stipe et du rachis de palmier dattier dans l'élaboration des panneaux de particules avec les résines synthétiques

satisfaisantes. Ainsi, les caractéristiques requises pour les panneaux à application dans le domaine de la finition intérieure et l'ameublement sont obtenues en utilisant les particules du stipe et la résine PF (phénol-formaldéhyde). Les contraintes de rupture et modules d'élasticité, sont respectivement de 18,01 et 2974,23 MPa. En parallèle les valeurs les plus basses de la contrainte à la rupture (1876,7 MPa) et du module d'élasticité (11,6 MPa) sont obtenues avec les panneaux fabriqués à base du rachis et de la résine MUF. Ces résultats peuvent être expliqués par la richesse en lignine et extractibles dans le rachis et le faible pourcentage de cellulose et d'holocellulose dans le rachis par rapport au le stipe. Par ailleurs, une teneur élevée en lignine augmente la fragilité de la matière lignocellulosique, contrairement à la cellulose qui diminue la fragilité. Ceci est compatible avec les résultats obtenus par **G. Nemli et al [120]**.

K. Almi [21] a développé et étudié des matériaux composites à base de différentes particules de bois de palmier dattier avec l'utilisation de deux types de matrice (résine polyester insaturé, colle polyacétate de vinyle). Toutes les plaques de particules de bois de palmier dattier ont été élaborées à une pression de pressage constante de 0.1MPa dans une plage de températures de 28°C à 200°C pendant 10 min. Les résultats obtenus des différents tests physico-thermiques et mécaniques montrent l'influence du taux de liant (matrice), la granulométrie et les conditions de moulage (température, durée de pressage) sur les propriétés physiques et mécaniques des plaques réalisées. Les propriétés mécaniques, le module d'élasticité et la contrainte de rupture des composites de particule de bois de palmier dattier sont plus élevés si les particules de taille ($d \leq 0.5\text{mm}$ et $l \leq 1\text{mm}$) sont utilisées avec de la colle PVA par moulage à 80 ° C. Le module d'élasticité et la contrainte de rupture en flexion prennent les valeurs de 1.73GPa et 22.25MPa respectivement.

N. Saadaoui et al [121] ont caractérisé les matériaux composites auto-liés à base des particules de bois et des fibres de palmier dattier. Les quatre sous-produits du palmier dattier, Pétiole, Rachis, Folioles et Lif ont été évaluées par une étude chimique, morphologique et mécanique. Les panneaux composites de particules de bois de palmier dattier sont préparés par pressage à chaud sans traitement préalable ni ajout de liants synthétiques. Les résultats des tests mécaniques de flexion, de la mesure de la liaison interne, du gonflement en épaisseur, de l'absorption d'eau et de l'analyse mécanique dynamique montrent que les composites à base de particules de Lif, Folioles et Rachis ont des propriétés suffisantes par rapport à la norme industrielle japonaise A 5908 et la norme française NF EN 312. Particleboards – requirements; 2010. Pour améliorer les propriétés mécaniques des panneaux de particules, divers types de méthodes et de paramètres ont été proposés dans la littérature [122-124], tels que le contrôle de : le traitement chimique des particules, la pression d'injection par vapeur, le traitement pré-enzymatique et les procédés thermiques tels que l'extrusion.

A travers cette revue de littérature, on peut conclure qu'il est possible d'utiliser les différentes particules de palmiers dattiers dans la fabrication de panneaux de particules avec la colle naturelle ou des liants synthétiques. Les panneaux à base des particules de bois de palmier dattier ont de bonnes caractéristiques. La taille et le dosage du liant jouent un rôle clé dans l'amélioration des propriétés mécaniques, physiques et thermiques du panneau de particules.

III.6. Composite de structure sandwich

Les structures dites « sandwichs » occupent une place importante dans le domaine de la construction des pièces composites. Elles sont présentes dans pratiquement tous les domaines d'application. Ces structures résultent de l'assemblage par collage ou soudure de deux peaux (ou semelles) minces sur une âme (ou cœur) plus léger et de plus faibles caractéristiques mécaniques qui

maintient leur écartement et transmet par cisaillement les actions mécaniques d'une peau à l'autre [125] (*Figure III.26*). Les structures sandwichs ont la particularité de pouvoir à la fois rigidifier et alléger une structure tout en lui apportant de nouvelles propriétés comme par exemple une isolation phonique ou thermique selon le matériau d'âme choisi [81].

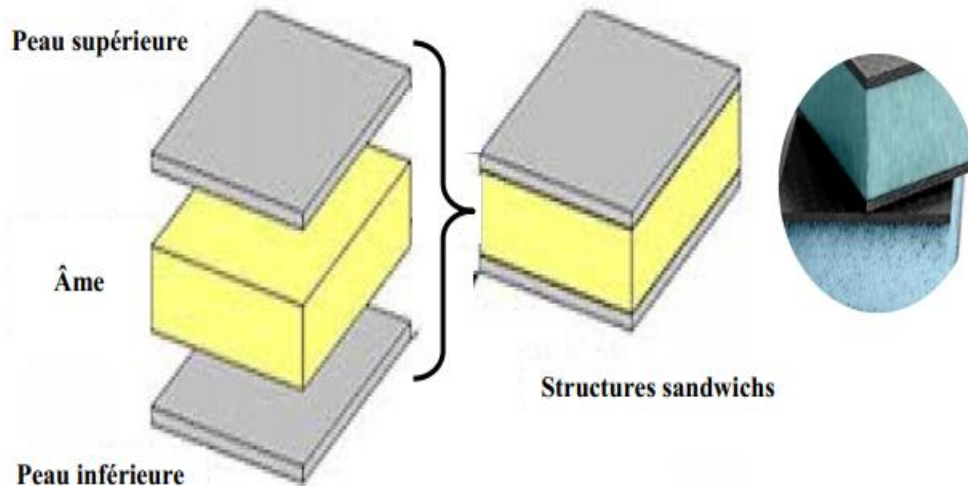


Figure III-26. Schéma représentatif d'une structure sandwich.

III.6.1. Caractéristiques des structures sandwichs

L'adhérence des peaux et le cœur est un critère important pour le transfert des charges et pour le fonctionnement de la structure sandwich dans son ensemble. La notion fondamentale d'une structure sandwich est que les peaux supportent les charges de flexion alors que le cœur supporte les charges de cisaillement [126, 127].

L'assemblage des peaux et du cœur est réalisé par collage avec des adhésifs de synthèse de type époxy ou polyester. La qualité du collage est fondamentale pour les performances et la durée de vie de la pièce. Ainsi l'adhésif doit avoir une épaisseur comprise entre 25 et 200 microns. Les principaux avantages de ces structures sont :

- la légèreté (économie de poids à résistance égale),
- très grande rigidité,
- grande résistance en flexion,
- isolation thermique et phonique (suivant l'application).

III.6.2. Classification des structures sandwichs

Les composants d'une structure sandwich (les peaux, l'âme et les adhésifs) peuvent être classés en fonction de la nature des matériaux utilisés pour chaque élément. Les peaux de la structure sandwich sont généralement des matériaux composites constitués de fibres enrobées d'une matrice à base de résine. L'âme est un matériau de faible densité tenant compte des conditions d'utilisation (conditions thermiques, corrosion, prix, etc.).

La **Figure III.27** présente une classification des composants de la structure sandwich en fonction du type de matériau utilisé.

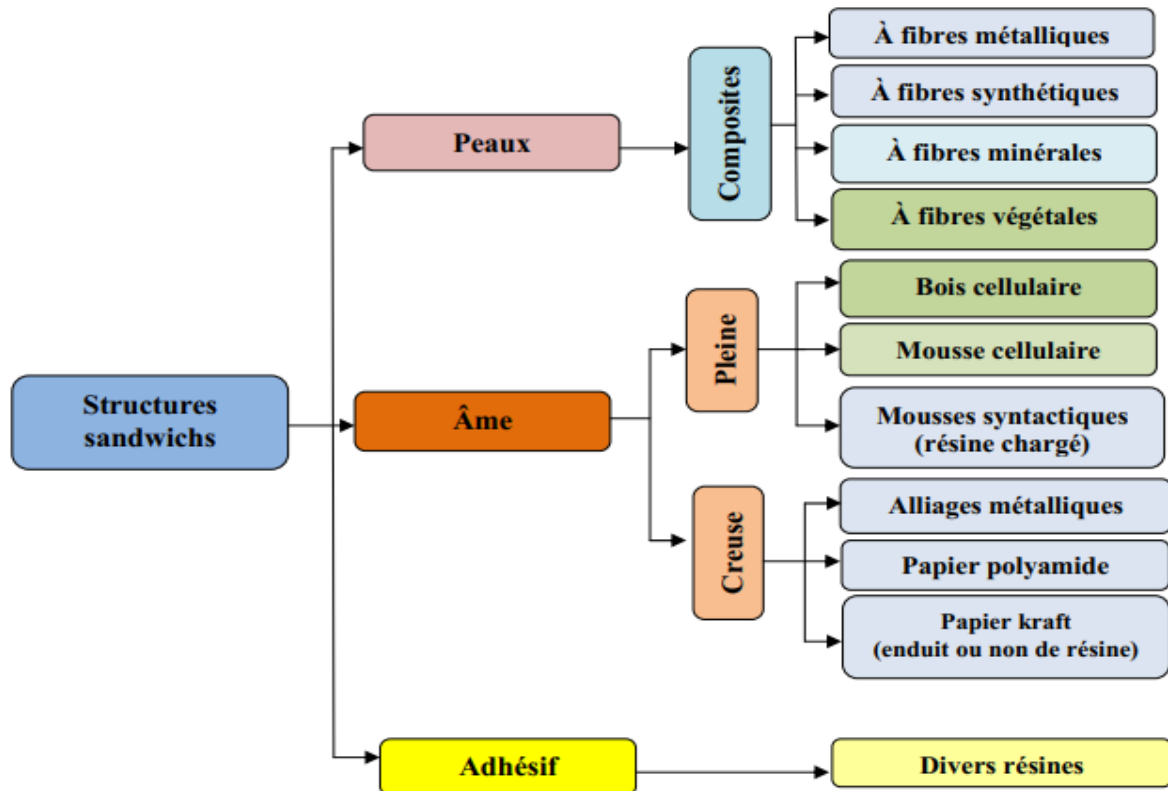


Figure III-27. Classification des structures sandwichs selon la nature de matériau utilisé.

III.6.3. Domaine d'utilisation

Les structures sandwichs sont utilisées dans divers domaines tels que l'industrie du bâtiment, pour leurs excellentes caractéristiques d'isolation thermique qui sont prises en compte. Il existe aussi d'autres raisons de son utilisation telles que le coût, la stabilité, la résistance au choc, la durée de vie, la résistance à la fatigue, une maintenance réduite, une facilité de réparation et la capacité d'atténuation des vibrations [128]. Pour leurs caractéristiques intéressantes et leurs bonnes résistances au feu, les structures en sandwich sont utilisées dans le domaine aéronautique et ferroviaire, comme la fabrication des intérieurs des cabines et les coques des cabines de trains à grande vitesse (TGV) [129, 130]. Les structures sandwichs sont également utilisées dans le domaine du sport [131].



L'utilisation des matériaux végétaux dans la fabrication des composites y compris les composants de la structure sandwich (cœurs) n'est pas récente. L'application de différentes

techniques telles que le procédé LIN-K et le procédé de thermo-compression qui été déjà utilisé dans l'industrie du composite à base de bois. On peut citer certains des travaux réalisés, tels que l'utilisation du Lin par **N. El Hajj et al [132]** pour l'élaboration d'agro-composites 100% végétaux, selon des différents procédés de préparation. Pour l'élaboration de quatre types de panneaux sandwichs **N. Lakreb [133]** a utilisé le bois de pin dans les peaux et du liège aggloméré dans les cœurs différenciés par des séparations de bois de pin dans le cœur. Il a ensuite étudié le comportement mécanique de ces panneaux. Le liège a également été utilisé dans le cœur du sandwich préparé par **H. Djemai [127]**. L'utilisation de bois de palmier dattier dans les structures en sandwich est encore quasi inexistante malgré ses propriétés telles que l'isolation thermique. Cette propriété a influencé les caractéristiques de nombreux composites, notamment les composites à base de matrice ciment étudiés par **M. Tlijani [105]** et les composites de polystyrène expansé (EPS) étudiés par **T. Masri**.

III.7. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les matériaux composites, puis une classification de ces matériaux, y compris une classification selon la catégorie du renfort utilisée. Nous nous sommes focalisés sur les matériaux composites à base de renforts naturels, dits composites bio-sourcés, en particulier le renfort végétal extraites de palmier dattier tels que la fibre et le bois. Diverses statistiques sur les palmiers dattiers et leurs déchets ont également été fournies. De plus, nous avons présentés les divers procédés d'extraction de fibres végétales et de fabrication de matériaux composites.

Nous avons conclu à travers cette revue de littérature effectuée sur les composites à base de renforts de palmier dattier, que le bois et les fibres extraites des palmiers dattiers ont généralement de bonnes propriétés mécaniques et physiques. Il apparaît que le comportement mécanique de ce bois est anisotrope. Ainsi que, les propriétés physiques et thermiques du bois de palmier dattier sont en fonction de la partie d'extraction. Le bois de la partie pétiolaire a une faible densité et une bonne isolation thermique par rapport aux bois des autres parties de palmier dattier. Par ailleurs, les différentes méthodes de traitement des fibres de palmier dattier ont un impact sur les différentes propriétés physiques et mécaniques de ces fibres. La différence entre les valeurs des propriétés mécaniques et physiques des fibres des palmiers dattiers peut être due à la morphologie complexe de ces fibres et la diversité des zones d'extraction de la fibre et de l'essence du palmier dattier. Il convient de noter que l'extraction de la fibre de palmier dattier reste une tâche difficile pour obtenir des fibres longues et non endommagées.

Nous pouvons constater également qu'il existe une bonne adhérence (inter-faciale) entre les fibres du palmier dattier et la matrice époxy. Pour assurer cette adhérence entre les matrices thermoplastiques et les fibres des palmiers dattiers, différentes techniques de traitement des fibres sont nécessaires. Ces traitements de la fibre affectent les composantes et les différentes propriétés de cette fibre. La fraction massique de fibres et les dimensions des fibres tel que la longueur et le diamètre ont une influence considérable sur les propriétés du composites renforcées par la fibre de palmier dattier. De plus, les méthodes de mise en œuvre de matériaux composites à base de matrices thermodurcissables sont plus simples que l'utilisation de matrice thermoplastique.

Nous avons pu constater à travers ce qui a été présenté comme travaux réalisés sur les panneaux de particules végétaux qu'il est possible d'utiliser les différentes particules du bois de palmiers dattiers dans la fabrication de panneaux de particules avec de la colle naturelle ou des liants synthétiques. Les panneaux à base des particules du bois de palmier dattier ont de bonnes

caractéristiques. La taille et le dosage du liant jouent un rôle clé dans Cette section nous a permis de mettre en lumière les méthodes et les moyens nécessaires pour mener à bien notre étude, tels que le choix des matériaux à utiliser dans la préparation de bio-composite et les manières de leur exploitation. D'où les fibres de la palme ont été sélectionnées pour renforcer les différentes matrices et le bois de pétiole pour la fabrication des structures sandwichs pour cette étude expérimentales.

Chapitre IV :
Matériaux et techniques
expérimentales

IV. Matériaux et techniques expérimentales

IV.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les matériaux qui ont été utilisés pour la réalisation des composites à base d'une matrice thermodurcissable, la résine vinyle ester, renforcée par la fibre de palmier dattier (PD) à des taux variables et une taille de 125 μ m. On a décrit, également dans ce chapitre, les techniques d'élaboration des composites et les principales techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation des propriétés des matériaux préparés.

IV.2. Présentation des matériaux utilisés

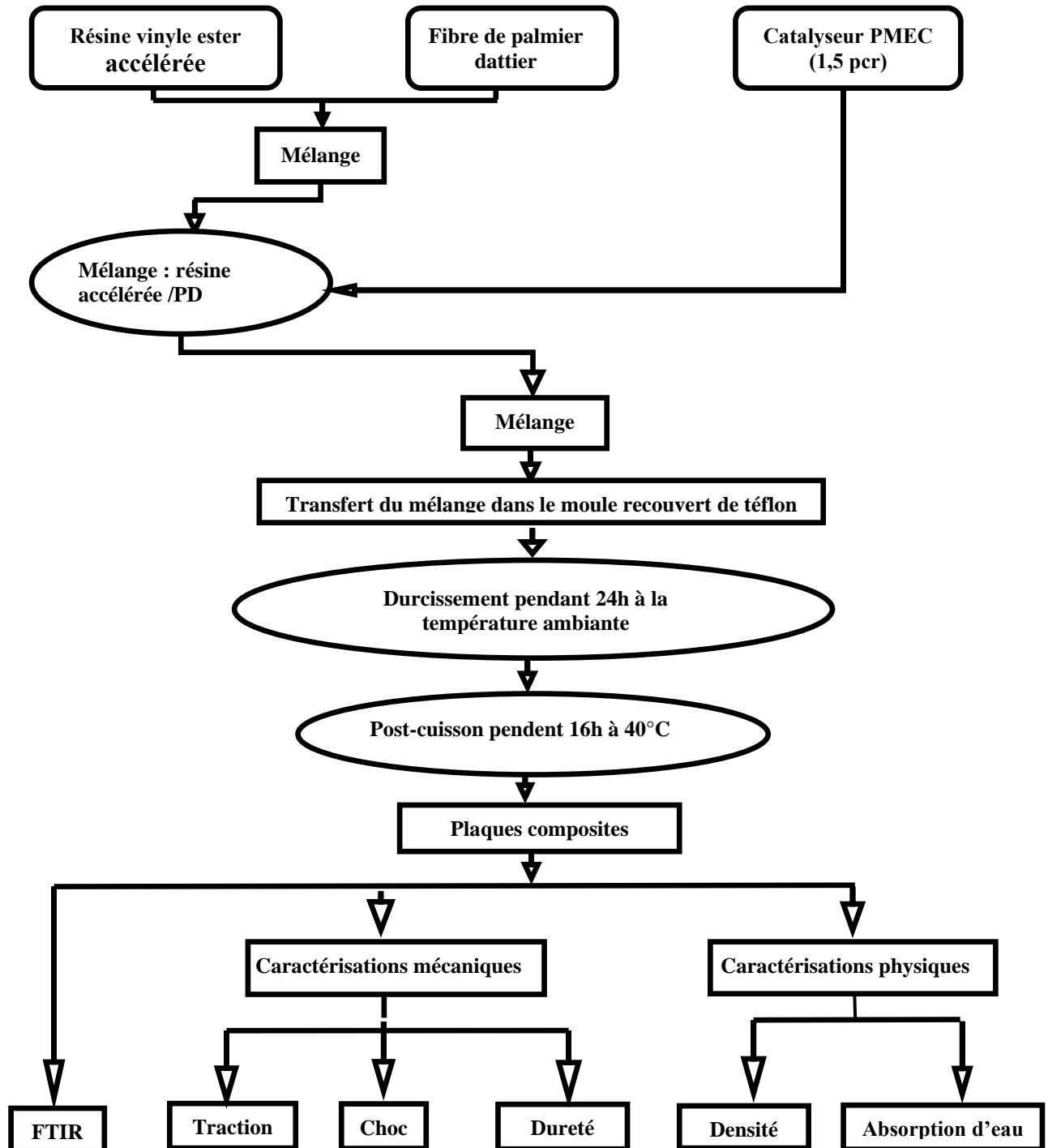


Figure IV-1: Préparation des composites à matrice vinyle ester renforcée par La fibre de palmier dattier (PD) orientation aléatoire.

IV.2.1. Résine vinyle ester

Le nom commercial de cette résine est Atlac 580 ACT est une résine uréthane bisphénol. La résine vinyle ester thixotrope pré-accélérée de haute qualité. Il combine une résistance chimique exceptionnelle et une combinaison exceptionnelle de résistance à la chaleur et de flexibilité. De plus, il a de très bonnes propriétés de manipulation et de durcissement et résiste à de nombreux sels acides aqueux et solutions alcalines. Surtout contre les milieux alcalins. Le **tableau IV-1** regroupe l'ensemble des propriétés de la résine vinyle ester.

Tableau IV-1: Caractéristiques générales de cette résine vinyle ester

Propriétés	Unité	Valeur
La densité	g/ml	0.908
Viscosité à 23 °C Brookfield (SP2/20)	mPa.S	500-600
Indice d'acide	mgk/g	4-8
Temps de gel de 25 à 35°	minutes	25.5-31.5
Temps de durcissement de 25°C au pic	minutes	42.5 - 52.5

IV.2.2. Système catalytique Catalyseur/accélérateur

Un initiateur de réaction de copolymérisation est utilisé pour toutes les formulations. Il s'agit du peroxyde de méthyléthylcétone (PMEC). La quantité d'initiateur introduite dépend de la température de travail et varie, conformément aux indications des fiches techniques des fournisseurs, de 1 à 1,5 %. La concentration de PMEC qui a été incorporée pour le durcissement de nos plaques est de 1,5 pcr. L'accélérateur utilisé pour promouvoir la réaction de durcissement de la résine est l'octoate de cobalt qui a été préalablement incorporé avec une concentration de 0,25% Vol.

IV.2.3. Charge utilisée et son prétraitement

La fibre de palmier dattier (PD) est la fibre utilisée dans la préparation de composite, elle a été récupérée par le broyage de palmier dattier.

Le palmier dattier (PD) a subi plusieurs prétraitements avant d'être utilisé et afin d'obtenir une poudre fine avec une granulométrie homogène ayant un diamètre moyen de 125µm.

a) Le séchage

La fibre de palmier dattier (PD) a été séché à l'air libre pendant 6 mois

b) Le broyage

Le broyage a été effectué à l'aide d'un moulin à café (**figure IV.2**)

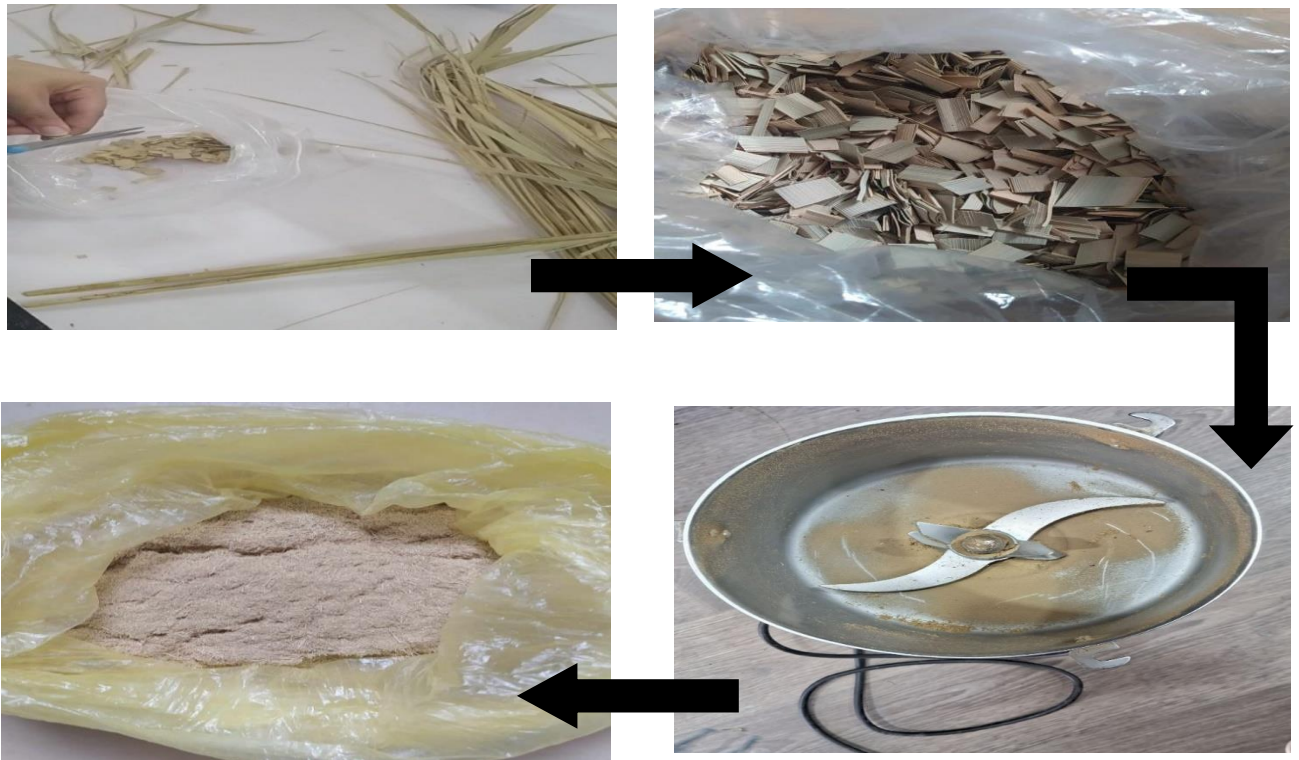


Figure IV-2: La fibre de palmier dattier (PD)

c) Le tamisage

Le palmier dattier séché et broyée ainsi obtenue est passée à travers des tamis pour obtenir une farine de 125 μm de taille des graines.



Figure IV-3 : opération de tamisage avec une tamiseuse d'analyse (AS200 basic).

IV.3. Elaboration des composites

La quantité de résine vinyle ester accélérée est soigneusement pesée de façon à préparer des plaques de composites ayant une épaisseur moyenne de 5 mm, et ce en utilisant des moules en bois.

La résine vinyle ester accélérée est mélangée aléatoirement et doucement, dans un récipient métallique. La charge est, ensuite, ajoutée avec les taux suivants 1, 2, 3,4 et 5 pcr. Une concentration de 1,5 pcr de P MEC est ajoutée, en dernier, pour assurer la réticulation de matrice du composite. La

formulation, ainsi préparée, est versée sur une feuille de téflon sur laquelle est déposé le moule. Des plaques de composites ont été faites en utilisant un moule en bois de (250 x 250) mm². La bonne répartition de la formulation liquide sur toute la surface du moule est assurée par l'emploi d'un ébulleur qui permet à la fois de dégager les inclusions de bulles d'air pouvant être induites par suite à l'opération de mélangeage, et d'améliorer l'état de surface de la plaque, comme c'est montré dans la figure IV.4. La plaque, ainsi élaborée, est laissée durcir pendant 24 h à la température ambiante, suivi d'un séjour de 16 heures à 40°C dans l'étuve pour une post-cuisson.

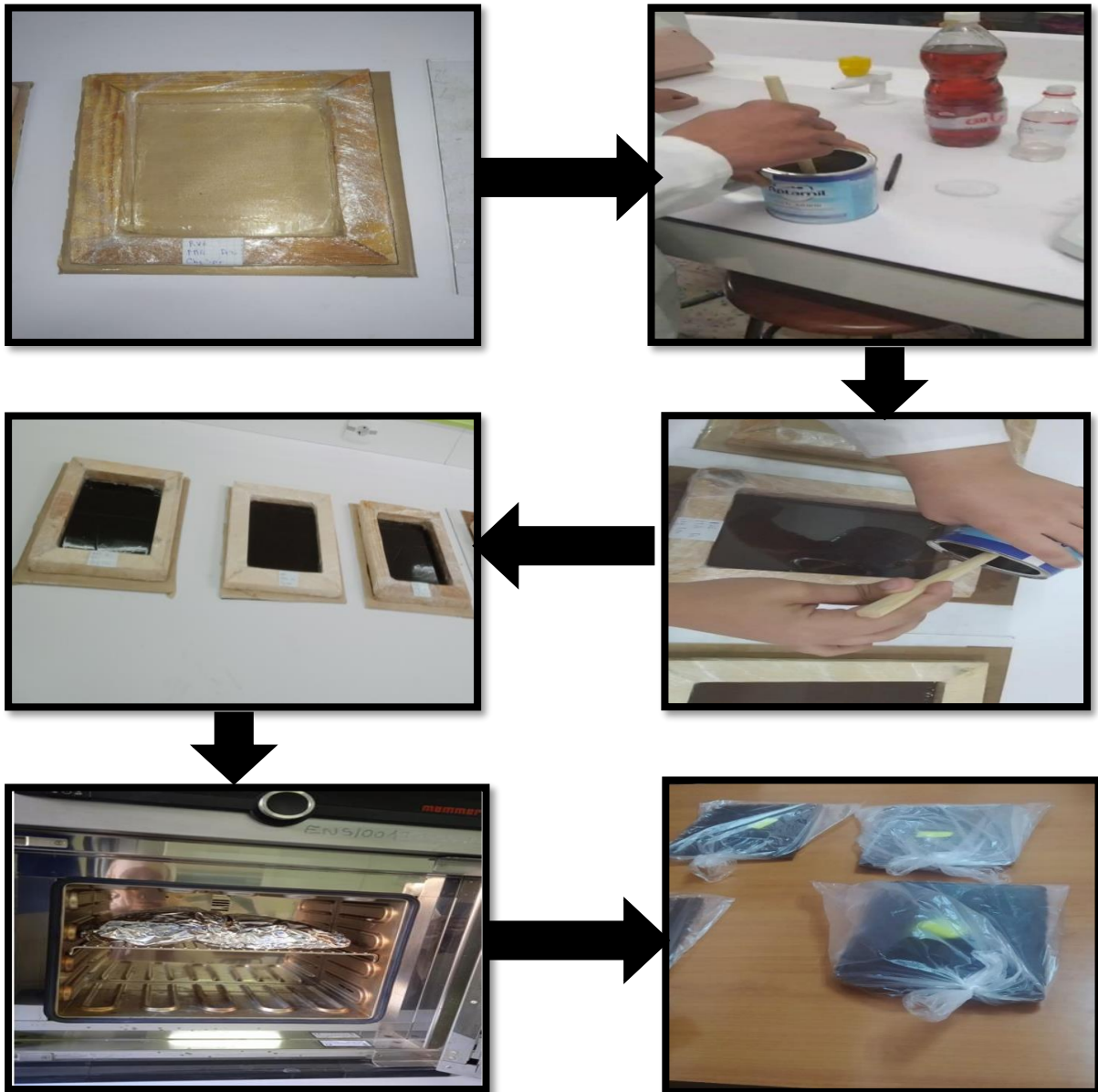


Figure IV-4: Préparation de composite en résine vinyle ester par le procédé de moulage au contact.

IV.4. Préparation des échantillons

Les plaques de résine et de composites obtenues sont homogènes et présentent un bon état de surface. A partir de ces plaques, les éprouvettes destinées aux essais mécaniques sont usinées en forme rectangulaires aux cotes désirées à l'aide d'une coupeuse diamantée. Afin de limiter les échauffements liés à l'usinage, des vitesses d'avance et des profondeurs de passe modérées sont

adoptées. Ce protocole permet d'obtenir des éprouvettes présentant un très bon aspect de surface, paramètre déterminant pour réaliser des essais mécaniques corrects.

IV.5. Essais expérimentaux effectués

IV.5.1. Analyse structurale par la spectroscopie IRTF

L'étude structurale par spectrophotométrie infrarouge a pour but de mettre en évidence l'existence d'interactions entre la matrice et les fibres incorporées. L'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) pour les échantillons fibres de palmier dattier non traité a été réalisée sous forme de pastilles préparées selon les compositions suivantes : 4% de fibres de palmier dattier et 96% de bromure de potassium (KBr) (nombre de scan : 10), Les spectres infrarouges ont été enregistrés à l'aide d'un spectrophotomètre du type Perkin Elmer sur un domaine de nombre d'ondes s'étalant de 4000 à 500 cm^{-1} , en utilisant une résolution égale à 4 cm^{-1} .

IV.5.2. Essais mécaniques

IV.5.2.1. Essai de traction

Les essais de traction ont été effectués sur des éprouvettes rectangulaires ayant les dimensions (125X25X4) mm^3 sur une machine du type **Dynamomètre WD-T-20KN**. Les éprouvettes ont été testées à une vitesse de déplacement de 2 mm/min pour évaluer les caractéristiques en traction, notamment, la contrainte à la rupture σ_r et la déformation à la rupture ε_r .

La contrainte à la rupture exprime la charge de traction supportée par l'éprouvette à l'instant de sa rupture par unité de surface, elle est donnée par l'expression suivante :

$$\sigma_r = F/S \quad (\text{N/m}^2) \quad \text{IV-1}$$

F: Charge de traction supportée par l'éprouvette (N),

S : Section initiale (m^2).

La déformation à la rupture est indiquée en pourcentage sous la forme suivante :

$$\varepsilon_r = \Delta l/l_0 \quad (\%) \quad \text{IV-2}$$

ε_r : Déformation à la rupture,

$\Delta L = L - L_0$: Allongement,

L_0 : Longueur initiale de l'éprouvette,

L : Longueur finale de l'éprouvette.

IV.5.2.2. Essai de dureté :

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration d'un corps dur. Une technique très simple et efficace. À l'aide d'un duromètre SHORE l'essai de dureté a été effectué. De plus, la valeur de dureté SHORE a été convertie en échelle de dureté Rockwell conformément à la norme ASTM D2240-15e1. La valeur moyenne de trois lectures a été enregistrée à l'aide d'un duromètre SHORE, le test a été effectué pour chaque pourcentage de fibres.

IV.5.2.3. Essai de choc Izod

L'essai de résistance au choc résulte de l'application d'une sollicitation mécanique à grande vitesse de percussion avec une énergie élevée, engendrant la rupture d'une éprouvette en une fraction de seconde. Il permet de déduire dans des conditions expérimentales données, la fragilité ou la ductilité du matériau.

Les essais ont été réalisés sur un appareil du type **Resil Impactor**, consistant en un pendule portant à son extrémité libre un marteau, un support pour éprouvette et un dispositif de lecture de l'énergie de rupture, sur des éprouvettes non entaillées, ayant les dimensions (65/15/4) mm³, selon la norme ISO180. Le choc est donné au centre de l'éprouvette au moyen d'un marteau de 7,5 Kg. L'énergie de fracture ou résilience a_n est calculée, pour les barreaux lisses selon l'équation suivante :

$$a_n = \frac{A_n}{el} \quad \text{IV-3}$$

A_n est l'énergie cinétique en joule absorbée par l'éprouvette au moment de l'impact alors que l , e sont, respectivement, la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette.

IV.5.3. Essais physiques

IV.5.3.1. Mesure de la densité des composites

Les mesures de densité ont été effectuées sur un appareil balance du type **Ohaus** selon la norme ISO 1183, méthode A, conçue pour les matériaux possédant une densité supérieure à 1. Le protocole expérimental suivi pour la réalisation de l'essai consiste aux étapes suivantes :

- 1- Préparer le pycnomètre
- 2- Tarer la balance
- 3- Prendre un échantillon dont le poids varie de 1 à 5g
- 4- Mettre l'échantillon sur la corbeille, et enregistrer la masse W_a
- 5- Tarer la balance à nouveau puis immerger l'échantillon dans le liquide d'immersion
- 6- Enregistrer la masse volumique selon la formule suivante :

$$d = \frac{W_a \times \rho(fl)}{W_a - Wfl} + 0.0012 \text{g/cm}^3 \quad \text{IV-4}$$

d : masse volumique de l'échantillon exprimée en g/cm³

$\rho(fl)$: masse volumique du liquide d'immersion exprimée en g/cm³

W_a : poids de l'échantillon dans l'air, exprimé en g

Wfl : valeur absolue de la poussée hydrostatique, exprimé en g

0,0012 g/cm³ = masse volumique de l'air dans les conditions normales

IV.5.3.2. Test d'absorption d'eau :

Des tests d'absorption d'eau ont été réalisés conformément à la norme ASTM D 5229 [1]. Avant le test, le poids de chaque échantillon a été mesuré. Trois échantillons de chaque composite formulé ont été immergés dans de l'eau distillée à température ambiante. Les spécimens ont été retirés de l'eau chaque 24h et sont essuyés avec un papier absorbant avant de mesurer leur poids. Après les mesures du poids, les spécimens ont été nouveau immergés dans l'eau. Le test d'absorption d'eau a été poursuivi pendant plusieurs jours jusqu'à ce qu'un poids constant des échantillons soit atteint. Le pourcentage d'absorption d'eau [WA (%)] est calculé en utilisant le calcul formule suivante :

$$\frac{\text{poids du composite absorbé par l'eau} - \text{poids du composite sec}}{\text{poids du composite sec}} \times 100 = W\%$$

Chapitre V:
Résultats et discussion

V. Résultats et discussion

V.1. Caractérisation de la fibre de palmier dattier (PD) et de la résine vinyle ester par IRTF

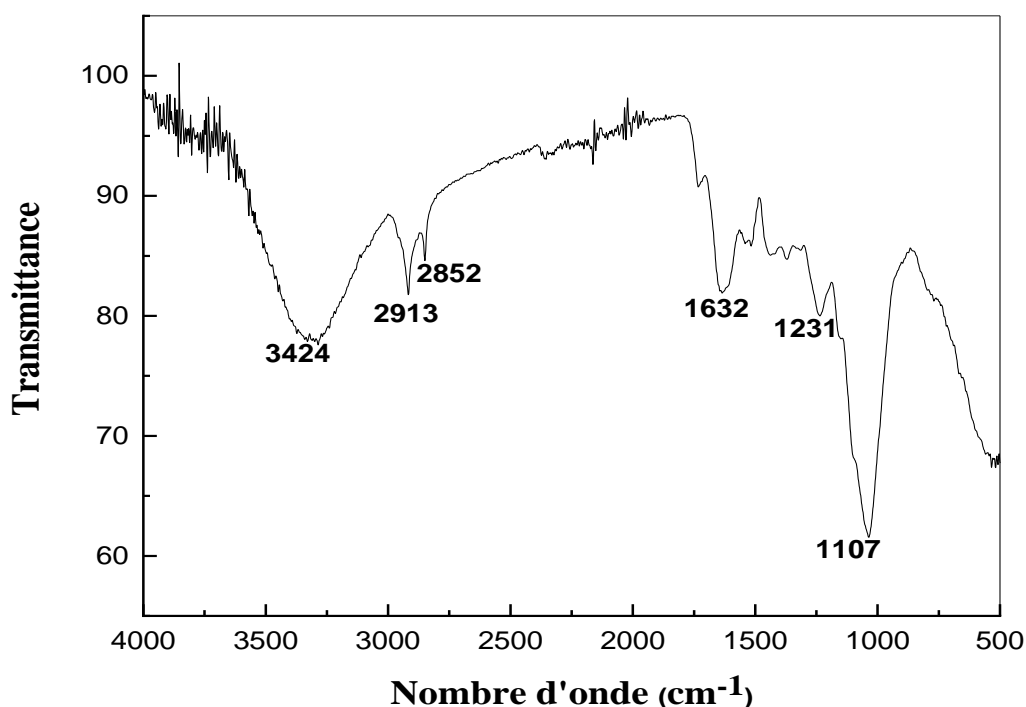


Figure V-1: Spectres IRTF de palmier dattier (PD)

Tableau V-1: Attribution des bandes infrarouges de palmier dattier (PD)

liaison	O-H associée	C-H alcane	C-O	C-O-C
Fréquence cm ⁻¹	3424	2913 et 2852	1107	1055

Les spectres IRTF donnés par la **figure V-1** caractérisent les fibres de palmier dattier (PD) non traitée. L'examen de ces spectres révèle la présence de quelques pics spécifiques. Les pics situés entre 1055 cm⁻¹ et 1070 cm⁻¹ caractérisent la vibration de la liaison C-O-C, L'étirement symétrique à 1055 cm⁻¹ de la liaison C-O-C et la vibration d'étirement du squelette cellulosique à environ 1 051 à 1065 cm⁻¹ provenaient des composants polysaccharidiques. Le pic à 2913 cm⁻¹ est attribué une bande d'absorption du CH alcane. Des pics à 3424 cm⁻¹ caractérisent les groupements alcooliques de la cellulose. La région située entre 3 424 cm⁻¹ est liée aux groupes OH et CH₂, et le pic situé à 1 550 cm⁻¹ est attribué à la vibration de déformation des groupes hydroxyles libres.

V.2. Propriétés mécaniques des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD)

Les propriétés mécaniques (traction et choc) des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) ont été déterminées en fonction du taux de fibre.

V.2.1. Propriétés en traction

Les variations des propriétés en traction, notamment la contrainte et la déformation à la rupture des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre sont représentées par les **figures 2 et 3**.

D'après **la figure V-2**, donnant les variations de la contrainte à la rupture en fonction du taux de palmier dattier (PD), nous avons noté une augmentation par rapport à la matrice pure jusqu'à des taux de 3 pcr, suivie d'une diminution pour les bio-composites (RVE)/ palmier dattier (PD) ayant une dimension de 125 μ m.

L'augmentation de la contrainte à la rupture est attribuée à la rigidification du matériau après l'incorporation de palmier dattier. Par ailleurs, quand le taux de fibre s'accroît, la possibilité de formation d'agrégats augmente, nuisant ainsi à la continuité au sein du composite et formant des sites favorables à sa rupture fragile. Ces résultats sont en accord avec ceux de **Seki et al.[134]** ; **Chirayil et al.[135]**, **Amrani et al.[136]** et **lin et al.[137]** en étudiant les composites UPR/huntite, UPR/nanocellulose, UPR/perlite et UPR/nanoargile respectivement.

De même, les valeurs de la déformation à la rupture ont été également affectées par le taux de palmier dattier. En effet, les variations illustrées par **la figure V-3** montrent une amélioration de la déformation à la rupture d'une valeur de 3 % pour la résine vinyle ester non chargée à des valeurs de 5.2 ,7.2 et 9 % pour les bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) pour un taux de palmier dattier de 4pcr, respectivement. Au-delà de 4pcr, la déformation à la rupture décroît pour l'ensemble des bio-composites. Ces résultats sont expliqués par le fait que la surface de contact fibre/matrice est t'améliorer car la surface spécifique augmente. L'amélioration des propriétés peut aussi être attribuée à la distribution plus uniforme de la charge dans la matrice. Dans ce contexte, **Madugu et al [138]**. Ont proposé que la répartition uniforme des charges dans la microstructure des composites est un facteur clé pour la promotion des propriétés mécaniques. Cependant, la diminution de la résistance mécanique en traction et de la déformation à la rupture indique soit une mauvaise dispersion de la charge, soit la présence d'agglomérats ou encore l'existence de défauts tels que les micro-vides [139].

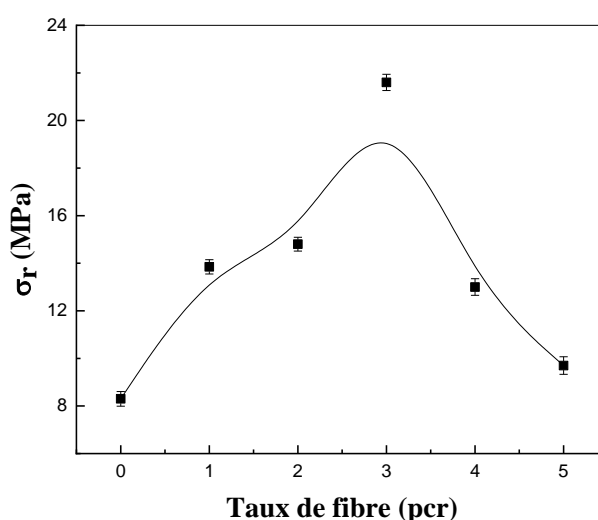


Figure V-2. Variations de la contrainte à la rupture des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre.

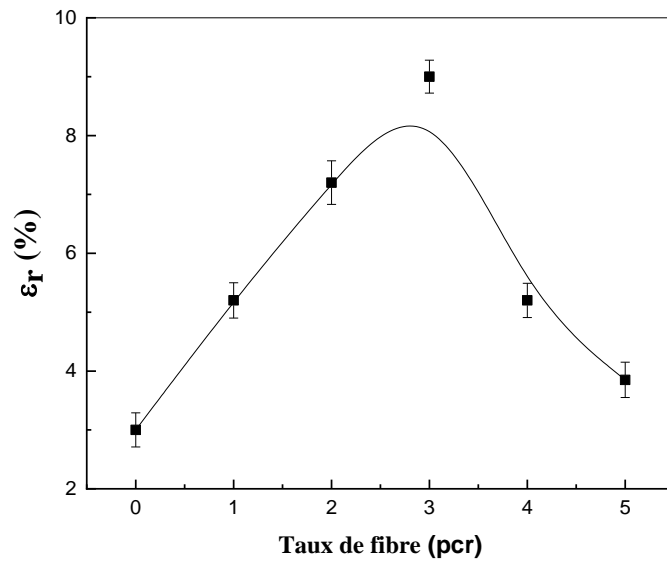


Figure V-3. Variations de la déformation à la rupture des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre.

V.2.2. Résultats de l'essai de choc

Les variations de la résistance au choc Izod sans entaille, des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre présentant une dimension de $125\mu\text{m}$ sont représentées par la **figure V-4**.

La **figure V-4** donnant les variations de la résistance au choc des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre montre que la résilience varie peu avec l'ajout des fibres (PD) et met en évidence une grande augmentation pour le taux de 2 pcr suivie d'une diminution lorsque la teneur en fibres augmente. Ceci semble suggérer que les bio-composites présentent différentes dispersions dépendamment des taux de fibres incorporés et que lorsque celui-ci atteint 2 pcr, la distribution du renfort au sein de la matrice devient optimale.

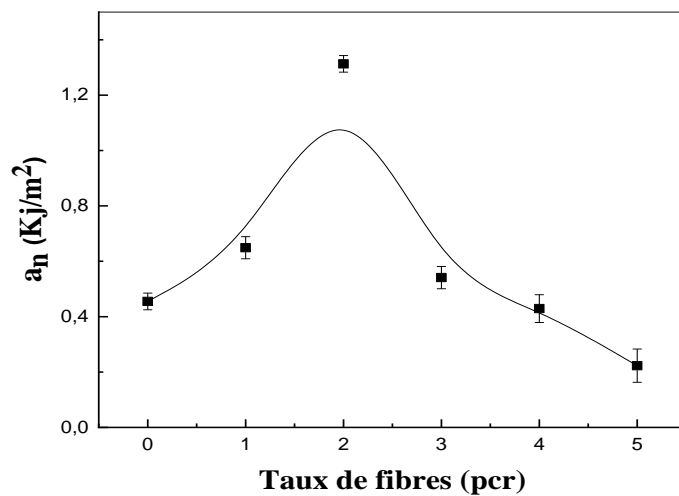


Figure V-4: Variations de la résilience des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre.

V.2.3. Etude de la dureté SHORE :

Les variations des propriétés de la dureté shore des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre sont représentées dans la **Figure IV-5**.

D'après la **figure IV-5**, donnant les variations de la dureté Shore en fonction du taux de palmier dattier (PD), nous avons noté une augmentation par rapport à la matrice pure jusqu'à des taux de 3 pcr, suivie d'une diminution pour les bio-composites (RVE)/ palmier dattier (PD) ayant une dimension de 125 μ m

L'augmentation de la dureté Shore est attribuée à la rigidité du matériau après l'incorporation de palmier dattier. Par ailleurs, quand le taux de fibre s'accroît, la possibilité de formation d'agrégats augmente, ce qui conduit à sa rupture fragile.

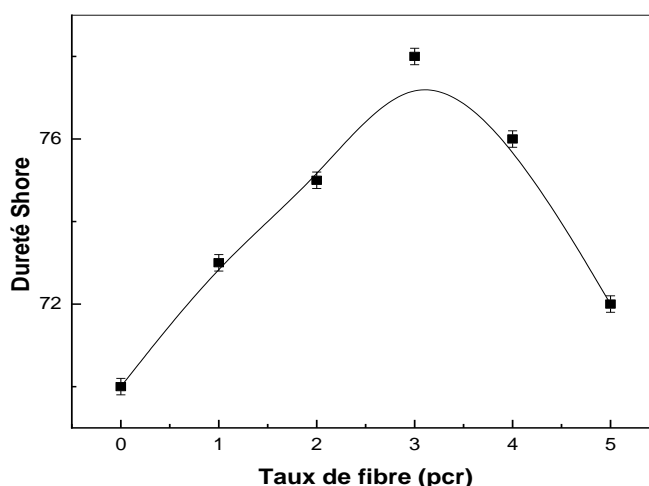


Figure V-5 : Variations de la dureté Shore des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre.

V.3. Propriétés physiques des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD)

V.3.1. Densités des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD)

La **figures V-6** représente les variations de la densité des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre. L'incorporation de palmier dattier (PD), dont la densité est relativement très faible, n'affecte pas celle des bio-composites, ce qui permet d'obtenir des matériaux dont la densité est comparable à celle de la matrice. Ceci est dû à la contribution de la densité de la fibre végétale dans celle du bio-composite. Ainsi, l'ajout du palmier dattier permet l'élaboration de bio-composites dotés de bonnes performances mécaniques sans porter préjudice à la densité, ce qui est considéré comme un atout en faveur des constituants de ce bio-composite.

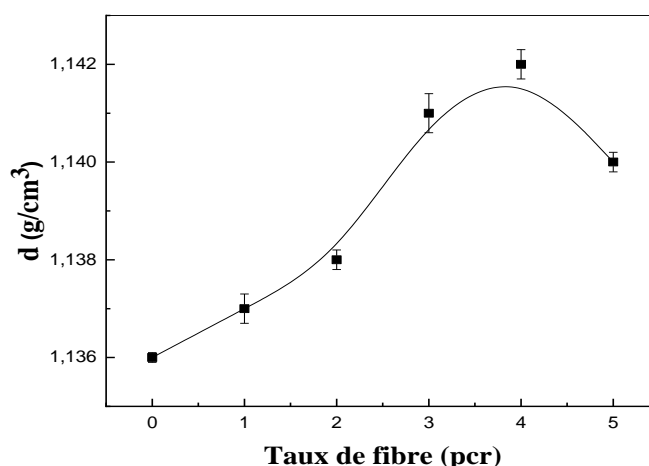


Figure V-6 : Variations de la densité des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre.

V.4. Influence du taux de fibre sur l'absorption d'eau des bio-composites vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) :

Les résultats de l'absorption d'eau sont présentés sur la figure V-7. On observe que le comportement d'absorption d'eau est similaire pour tous les bio-composites. Les éprouvettes ont absorbé l'eau très rapidement au cours des premières étapes (0 à 50 h), se rapprochant d'un point de saturation le composite continuait à absorber l'eau lentement. Les composites à base de fibres de palmier dattier présentent des taux d'absorption d'eau plus élevés en raison de la nature hydrophile de la cellulose. La forte absorption d'eau entraîne des changements dans les propriétés dimensionnelles des échantillons.

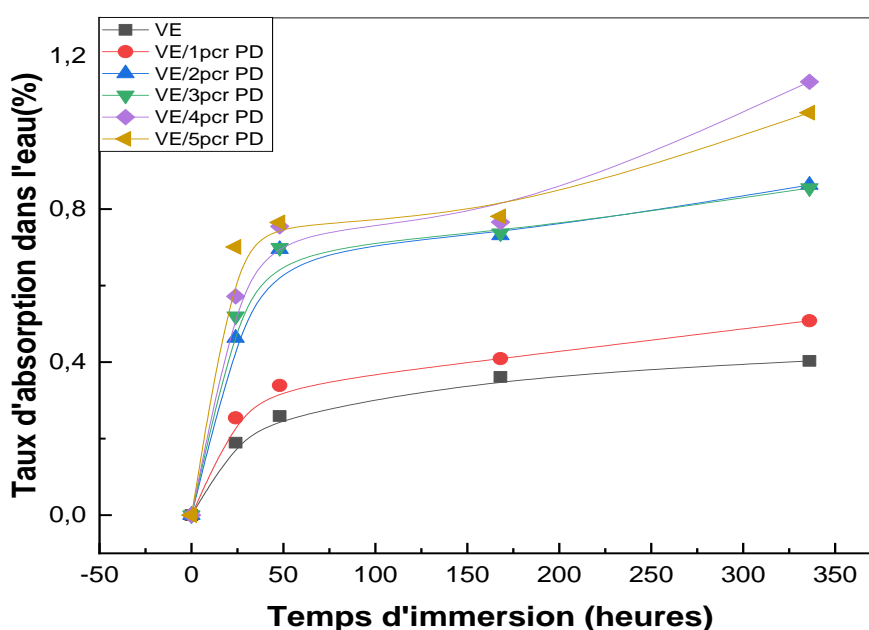


Figure V-7 : Influence du taux de fibre sur l'absorption des bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD).

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'ensemble des travaux que nous avons présentés dans le cadre de cette mémoire concerne la préparation et la caractérisation de nouveaux matériaux composites à base de charge végétale locale : les fibres de palmier dattier.

Nous nous sommes principalement intéressés, aux composites à base d'une matrice thermodurcissable, la résine vinyle ester, renforcée par les fibres de palmier dattier à des taux variables et une taille de 125 μ m.

La caractérisation des composites bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD) en fonction du taux de fibre a permis de dégager certaines conclusions.

Par ailleurs, la caractérisation mécanique (traction, choc et dureté) des bio-composites a permis de constater :

- ✓ L'augmentation de la contrainte et la déformation à la rupture avec l'augmentation du taux de fibre.
- ✓ L'augmentation de la résistance à l'impact jusqu'à un taux de fibre de 2pcr, pour les bio-composites résine vinyle ester (RVE)/ fibre de palmier dattier (PD)
- ✓ L'augmentation de la dureté Shore par rapport à la matrice pure jusqu'à des taux de 3 pcr

La densité de la fibre palmier a induit de faibles variations sur la densité de la résine (1,136) et a permis d'élaborer des bio-composites ayant des densités très voisines de celle de la matrice.

Les composites à base de fibres de palmier dattier présentent des taux d'absorption d'eau plus élevés en raison de la nature hydrophile de la cellulose.

Perspective

Perspective

A partir des conclusions et des résultats dégagés de ce travail, nous avons formulé les perspectives suivantes :

- Faire une analyse par microscopie électronique à balayage pour mettre en évidence l'adhésion de la fibre de palmier dattier à la résine vinyle ester
- Préparer des matériaux composites avec des dimensions de particules inférieures à 125 μ m.
- Traiter chimiquement la fibre de palmier dattier afin d'augmenter l'adhésion et la surface spécifique.

Références

- [1] ZAPATA MASSOT. “Synthèse de matériaux composites par co-broyage en voie sèche. Caractérisation des propriétés physico-chimiques et d’usages des matériaux”, these de doctorat, L’INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2004.
- [2] J. P. BERRO RAMÍREZ, “Caractérisation et modélisation de l’endommagement des composites bobinés. Application à la prédiction de l’éclatement des réservoirs bobinés hyperbares Diss. Chasseneuil-du-Poitou”, Ecole nationale supérieure de mécanique et d’aérotechnique 2013.
- [3] S. Hayat, “Analyse de l’influence du cisaillement transverse et des déformations normales sur le comportement thermomécanique des plaques FGM”, Thèse de Doctorat de l’université de DJILLALI LIABES de SIDI BEL ABBES. 2015.
- [4] Bessadok A, M. S, L. C, and M. M, “Influence of chemical modifications on watersorption and mechanical properties of Agave fibres Composites”, Part A: Applied Science and Manufacturing, 39: 29-45. 2008.
- [5] FELLAH Menouar, “MODELISATION ET EVALUATION DE LA REDUCTION DU COEFFICIENT DE DILATATION LONGITUDINAL THERMIQUE DANS LES PLAQUES STRATIFIEES EN PRESENCE DE FISSURES TRANSVERSES”, Thèse de Doctorat de UNIVERSITE DJILALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES.
- [6] J. Charles, “Les charges de la participation”, doi: 10.4000/sociologies.4151.
- [7] GHEBRID Nassima, “Etude des problèmes de conduction thermique dans un matériau composite à matrice polymère pigmenté de dioxyde de Titane”, UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF 1, 2018.
- [8] M. M. Younes, “Cours Matériaux Composites”, 2017.
- [9] L. Gornet, “Laurent Gornet Généralités sur les Matériaux Composites”, 2011.
- [10] Laarej Merad, “ETUDE PAR SPECTROSCOPIE RAMAN ET MODELISATION D’UNE RESINE COMPOSITE RTM”, l’Université Abou Bakr BELKAID de Tlemcen, 2010.
- [11] A. Y. Nenonene, “Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d’os, de tannin ou de mucilage”, thèse de doctorat de l’université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences de. 2009.
- [12] A. AL-Maghribi, “Comportement des matériaux composites à fibres courtes : applications à l’impact basse vitesse”, thèse de doctorat, l’université Paul Sabatier, 2008.
- [13] ROUAM Kamilia, “Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d’un stratifié renforcé par des fibres naturelles”, Mémoire de Magister de UNIVERSITE M’HAMED BOUGARA – BOUMERDES, 2014.
- [14] J. P. Bailon and J. M. Dorlot, “Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot”, Des Matériaux ,3émeEdition, Ecole de Montréal, 2000.
- [15] D. Gay, “matériaux composites hermès,” 2009.
- [16] CARMA, “Glossaire des matériaux composites” ,2006.
- [17] HA MI Brahim, “Elaboration et caractérisation physico-mécanique d’une structure sandwich multicouches” ,Thèse Dr. Univ. M’HAMED BOUGARA-BOUMERDES.
- [18] B. Saber, “Caractérisation du comportement micromécanique d’un matériau composite par différentes approches mathématiques”, mémoire magister, Université MENTOURI Constantine, 2010.
- [19] J.-M. Berth, “Mécanique des matériaux et structures composites”, *Inst. Supérieur des Matériaux Mécaniques Avancés, Le Mans, F.*, 2010.

Références

- [20] B. A. et K. S. SIEGMANN. A, "Residual stresses in polymers I: The effect of thermal history. Polymer Engineering and Science".
- [21] S. A, S. KENIG, and B. A, "Residual stresses in polymers I: The effect of thermal history. Polymer Engineering and Science" , 22.40-47, 1982.
- [22] H. T. B. C. et S. K. PHAM, "Residual stresses in injection molded polycarbonate rectangular bars". Polymère Engineering and Science, 33 1634- 1643.
- [23] J.-M. Berthelot, "Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures", p. 637, 2012.
- [24] F. M.J, "Short fiber reinforced thermoplastics" , Research Studies Press, 1982.
- [25] B. C, B. TB, and A. L, "Microlevel manufacturing process simulation of carbon fiber/epoxy composites to analyze the effect of chemical and thermal induced residual stresses", *J. Compos. Mater.* 46 (17)2123-2143, 2012.
- [26] E. Chabert, "Matériaux composites à matrices vitrimer et polymère supramoléculaire" ,*Thèse Dr. l'Université Pierre Marie Curie*, 2015.
- [27] L. Berreur, B. d Maillard, and S. Nösperger, "L'industrie française des matériaux composites" ,*Ministère l'économie des Financ. l'industrie*, pp. 1–47, 2002.
- [28] Berthelot, J.M., "Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des Structures." Masson ed. 1996.
- [29] Gay, D., "Matériaux composites". Hermes ed. 1997
- [30] Mohanty, A.K., Misra, M., and Hinrichsen, G., "Biofibers, biodegradable polymers and
- [31] Baley, C., Grohens, Y., and Pillin, I., "State of the art regarding biodegradable Composites". *Revue des Composites et des Matériaux Avances*, 2004. 14(2): p. 135-166.
- [32] J.M. Berthelot. « Composite Matériels. Mechanical Behavior and Structural Analysis », New York ,1999
- [33] Maurice REYNE Technologie des composites, édition HERMES, 1990
- [34] M. Bendifallah, Travail de recherche sur les matériaux à mémoire viscoélastiques parfaitement élastiques pour une nouvelle Prothèse Totale de Hanche, Mémoire de magistère, UNIVERSITÉ DE BATNA, 2011/2012
- [36] Doan Thi Thu Loan, "Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices," these de doctorat, l'université de Dresden, 2006.
- [37] Aurélie Vissac. Matière en fibres. Sciences de l'Homme et Société. 2014. Ffdumas 03035822ff
- [38] Sun, R.C., Sun, X.F., Wen, J.L. (2001). Fractional and structural characterization of lignins isolated by alkali and alkaline peroxide from barley straw.
- [39] Bledzki, A.K., Mamun, A.A., Lucka-Gabor, M., Gutowski, V.S. (2008). The effects of acetylation on properties of flax fibre and its polypropylene composites. *Express Polymer Letters*, 2(6), 413-422.
- [40] Arifuzzaman Khan, G.M., Alam Shams, M.S., Kabir, M.R., Gafur, M.A., Terano, M., Alam, M.S. (2013). Influence of chemical treatment on the properties of banana stem fiber and banana stem fiber/coir hybrid fiber reinforced maleic anhydride grafted polypropylene/low density polyethylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(2), 1020-1029
- [41] Frisoni, G., Baiardo, M., Scandola, M., Lednická, D., Cnockaert, M.C., Mergaert, J., Swings, J. (2001). Natural cellulose fibers: heterogeneous acetylation kinetics and biodegradation behavior. *Biomacromolecules*, 2(2), 476-482.

Références

- [42] Joseph, K., Thomas, S., Pavithran, C. (1995). Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites. *Pol ymer*, 3 7(23), 5139-5149.
- [43] Bodirlau, R., Teaca, c.A. (2009). Fourier transform infrared spectroscopy and thermal analysis of lignocellulose fillers treated with organic anhydrides. *Romanian Reports of Physics*, 54(1-2), 93-104.
- [44] Hill, C.A.S., Jones, D., Strickland, G., Cetin, N. S. (1998). Kinetic and mechanistic aspects of the acetylation of wood with acetic anhydride. *Holzforschung*, 52(6), 623- 629.
- [45] Zhai, Q., Zhao, S., Zhou, C., Li, W., Peng, C. (2014). Determination of the Si-H content of hydrogen silicone oil by a combination of the fourier transform near infrared, attenuated total reflectance-fourier transform infrared, and partial least squares regression models. *Journal of Applied Po/ymer Science*, 131(17),8624-8629.
- [46] Gutierrez, A., Del Riao, J.c. (2003). Lipids from flax fibers and their Fate in alkaline pulping. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(17),4965-4971
- [47] Freire, C.S.R., Silvestre, A.J.D., Pascoal Neto, C., Belgacem, M.N., Gandini, A. (2005). Controlled heterogeneous modification of cellulose fibers with fatty acids: effect of reaction conditions on the extent of esterification and fiber properties. *Journal of Applied Pol ymer Science*, 100(2), 1093-110
- [48] Van Soest, P.J" Robertson, J.B., Lewis, B.A
- [49] Godina, B., Agneessens, R., Gerinc
- [50] Hill, c.A.S., Jones, D., Strickland, G., Cetin, N. S. (1998). Kinetic and mechanistic aspects of the acetylation of wood with acetic anhydride. *Holzforschung*, 52(6), 623- 629.
- [51] BELKHIR Zohra, « Amélioration des propriétés mécaniques des composites à différentes matrices à base de fibres naturelles locales », these de doctorat, Université Larbi Tébessi – Tébessa – , 2022.
- [52] CARMA, « Glossaire des matériaux composites », centre d’animation régional en matériaux avances, Décembre, 2006.
- [53] Y. Şafak, Ç. Ahmet, Ö. Mustafa, and S. Hasan, “Bio-composite materials: a short review of recent trends, mechanical and chemical properties, and applications,” *Eur. Mech. Sci.*, vol. 2(3), pp. 83–91, 2018.
- [54] R. Kueny, "Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles," thèse de doctorat, Université de Lorraine, France,2013.
- [55] S. M. Lee, *Dictionary of composite materials technology*: CRC Press, 1995.
- [56] L. Gendre, "Les grandes familles de matériaux composites," ENS CACHAN, Université de PARIS-SACLAY.France,2011.
- [57] S. Amirou, "Etude et mise au point de composite à base de la matière fibreuse du palmier dattier Phoenix dactylifera L," thèse de doctorat, Université de Boumerdes, Algérie, 2015.
- [58] S. Swier, G. Van Assche, and B. Van Mele, "Reaction kinetics modeling and thermal properties of epoxy–amines as measured by modulated-temperature DSC. I. Linear step-growth polymerization of DGEBA+ aniline," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 91, pp. 2798-2813, 2004.
- [59] J. M. Berthelot, *Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures.*, 5e edition Tec & Doc, Paris, France. ed, 2012.
- [60] C. Baley, Y. Grohens, and I. Pillin, "State-of-the-art of biodegradable composite materials," *Revue des Composites et des Matériaux Avances*, vol. 14, pp. 135-166, 2004.

Références

- [61] A. Błędzki, A. Jaszkiwicz, M. Urbaniak, and D. Stankowska-Walczak, "Biocomposites in the past and in the Future," *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, vol. 6B (96):15-22, 2012.
- [62] V. V. D. Thi., "Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non," thèse de doctorat, Université de Grenoble. France, 2011.
- [63] C. Baley, *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites* : Ed. Techniques Ingénieur, 2005.
- [64] M. Dallel, "Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima L.*) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil," thèse de doctorat, Université de Haute Alsace-Mulhouse, France, 2012.
- [65] D. Sedan, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment : influence sur les propriétés mécaniques du composite," thèse de doctorat, Université de Limoges, France, 2007.
- [66] C. Álvarez, F. M. Reyes-Sosa, and B. Díez, "Enzymatic hydrolysis of biomass from wood," *Microbial biotechnology*, vol. 9, pp. 149-156, 2016.
- [67] J. Biagiotti, D. Puglia, and J. M. Kenny, "A review on natural fibre-based composites-part I: structure, processing and properties of vegetable fibres," *Journal of Natural Fibers*, vol. 1, pp. 37-68, 2004.
- [68] M. Ragoubi, "Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne," thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, France, 2010.
- [69] A. Nenonene, "Élaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage," thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.
- [70] H. Ville, "Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non," thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Alès, France, 2011.
- [71] S. Bouzouita, "Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel," thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon. Français., 2011.
- [72] R. Ntenga, "Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites," thèse de doctorat, Université de Yaoundé I (UYI), Cameroun, 2007. Chapitre I Généralités
- Elaboration et caractérisation de composites bio-sourcés à base de fibres de palmier dattier Page 46
- [73] L. Mohammed, M. N. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, and M. S. Islam, "A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, Article ID 243947, 15 pages, 2015.
- [74] K. Almi, "Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie," thèse de doctorat en Sciences ; Université de Biskra, Algérie, 2018.
- [75] A. Mokhtari, "Modélisation du comportement et de la rupture des composites a matrices thermoplastiques," thèse de doctorat, Université de Tizi Ouzou, Algérie, 2016.
- [76] A. Bledzki and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres," *Progress in polymer science*, vol. 24, pp. 221-274, 1999.
- [77] Y. Djebloun, "Contribution a la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales," thèse de doctorat en Sciences, Université de Biskra, Algérie. 2018.

Références

- [78] F. M. L. Rekbi, "Contribution à l'analyse de l'endommagement des matériaux composites," thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2016.
- [79] R. Boubeker, "Etude Expérimentale et Numérique du Comportement des Plaques Trouées en Matériaux Composites," Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2016.
- [80] F. Berbain, A. Chevalier, and C. Choudin, "Mise en oeuvre des composites : Méthodes et matériels," Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites, pp. A3720. 1-A3720. 34, 1997.
- [81] ANFA, "Les matériaux composites," Dossier pédagogique, Dossier créé avec la collaboration de Marc Marzano - Action Composite, Pascal Celle - GNFA, 2014.
- [82] P. Munier, "Le palmier-dattier," Techniques agricoles et productions tropicales, vol. 24, pp. 221, 1973.
- [83] J. M. Harris and B. Meylan, "The influence of microfibril angle on longitudinal and tangential shrinkage in *Pinus radiata*," *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, vol. 19, pp. 144-153, 1965.
- [84] P. Munier, "Le problème de l'origine du palmier-dattier et l'Atlantide," *Fruits*, vol. 29, pp. 235-240, 1974.
- [85] D. Fernandez, "Sciences de la vie ED 167 Biologie des systèmes intégrés, Agronomie, Environnement (BSIAE)," thèse de doctorat, Université Toulouse, France, 2006.
- [86] S. Fadlaoui, "Application de la technique de modélisation de l'architecture du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) pour la caractérisation des cultivars," Mémoire de Magister, Université de Biskra, Algérie, 2017.
- [87] Direction Régionale Agriculture Biskra "Bilan de campagne dattiere", Algérie, 2016/2017.
- [88] Y. Djebbloun, M. Hecini, T. Djoudi, and B. Guerira, "Experimental determination of elastic modulus of elasticity and Poisson's coefficient of date palm tree fiber," *Journal of Natural Fibers*, vol. 16, pp. 357-6-367, 2018.
- [89] A. Sbiai, "Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres," Thèse de doctorat, INSA-Lyon, France, 2011.
- [90] A. Nourani, A. Kadri, Z. Benguiga M. MehenniI, A. Salem, and K. Ferhat, "Réalisation d'un pollinisateur du palmier dattier," *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, vol. 5, 2017.
- [91] T. Djoudi, M. Hecini, D. Scida, Y. Djebbloun, and B. Guerira, "Caractérisation physique et mécanique du bois et des fibres issus d'une palme mûre de palmier dattier," *Matériaux & Techniques*, vol. 106, pp. 403, 2018.
- [92] G. Peyron, *Cultiver le palmier-dattier*, 2000.
- [93] Itdas, "Rapport sur la situation du secteur agricole," Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne, Biskra, Algérie, 2012.
- [94] A. Chehma, H. Longo, and A. Siboukeur, "Estimation du tonnage et valeur alimentaire des sous-produits du palmier dattier chez les ovins," *Rech Agron*, vol. 7, pp. 7-15, 2000.
- [95] N. Alp and N. Iskanderany, "Manufacture of Chipboard Panels from Indigenous Date Palm Bioma," second annual meeting for scientific research, Arabie saouditethe 2003.
- [96] T. Masri, A. Benchabane, and H. Ounis, "Matériaux à base des déchets de palmier dattier (*Phoenix Dactylifera*) et de polysyrène," *DZ patent*, App.160159, 10-04-2016, Algeria.

Références

- [97] S. S. Hegazy and K. Ahmed, "Effect of date palm cultivar, particle size, panel density and hot water extraction on particleboards manufactured from date palm fronds," *Agriculture*, vol. 5, pp. 267-285, 2015.
- [98] F. M. AL-Oqla, O. Y. Alothman, M. Jawaid, S. Sapuan, and M. Es-Saheb, "Processing and properties of date palm fibers and its composites," in *Biomass and bioenergy*: Springer, 2014, pp. 1-25.
- [99] A. Dehghani, S. M. Ardekani, M. A. Al-Maadeed, A. Hassan, and M. U. Wahit, "Mechanical and thermal properties of date palm leaf fiber reinforced recycled poly (ethylene terephthalate) composites," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 52, pp.841-848, 2013.
- [100] K. M. M. Rao and K. M. Rao, "Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo," *Composite structures*, vol. 77, pp. 288-295, 2007.
- [101] H. Abdel-Rahman, R. Al-Juruf, F. Ahmad, and I. Alam, "Physical, mechanical and durability characteristics of date palm frond stalks as reinforcement in structural concrete," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 10, pp. 175-181, 1988.
- [102] M. K. Jahromi, A. Jafari, S. Mohtasebi, and S. Rafiee, "Engineering properties of date palm trunk applicable in designing a climber machine," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2008.
- [103] T. Guettaf Temam, "Caracterisation Structurale et mécanique du Bois de la Grappe du Palmier Dattier " thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2017.
- [104] E. S. Ellouze A, Medhioub S, , "Détermination des caractéristiques mécaniques du bois tronc palmier," *Séminaire International, INVACO2, Rabat-Maroc*, vol. N° :30-123, Novembre 2011.
- [105] M. Tlijani, "Contribution à la caractérisation thermophysique de matériaux bioisolants: valorisation des déchets de bois de palmier," thèse de doctorat, Université Paris-Est, France, 2016.
- [106] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and M. Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood," *Energy and buildings*, vol. 43, pp. 491-497, 2011.
- [107] K. Almi, A. Benchabane, S. Lakel, and A. Kriker, "Potential utilization of date palm wood as composite reinforcement," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 34, pp. 1231-1240, 2015.
- [108] A. Bezazi, S. Amroune, and F. Scarpa, "Analyse statistique et effet des traitements chimique sur le comportement physico-mécanique des fibres des bras de grappe des palmiers dattier," *Synthèse : Revue des Sciences et de la Technologie*, vol. 31, pp.108-120, 2015.
- [109] A. S. Hammood, "Effect of Erosion on Water Absorption and Morphology for Treated Date Palm Fiber-Reinforced Polyester Composites," *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS* vol. Vol:15, December 2015.C
- [110] E. A. Elbadry, "Agro-Residues: Surface Treatment and Characterization of Date Palm Tree Fiber as Composite Reinforcement," *Journal of Composites*, vol. 2014,2014.
- [111] F. M. Al-Oqla and S. Sapuan, "Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 347-354, 2014.
- [112] A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M. Khenfer, and M. Chabannet, "Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hotdry climate," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, pp. 554-564, 2005.

Références

- [113] A. Al-Khanbashi, K. Al-Kaabi, and A. Hammami, "Date palm fibers as polymeric Matrix reinforcement: fiber characterization," *Polymer Composites*, vol. 26, pp.486-497, 2005.
- [114] T. Alsaed, B. Yousif, and H. Ku, "The potential of using date palm fibres as reinforcement for polymeric composites," *Materials & Design*, vol. 43, pp. 177-184, 2013.
- [115] K. M. Zadeh, D. Ponnamma, and M. A. A. Al-Maadeed, "Date palm fibre filled recycled ternary polymer blend composites with enhanced flame retardancy," *Polymer Testing*, vol. 61, pp. 341-348, 2017.
- [116] A. Bendahou, A. Dufresne, Y. Habibi, and H. Kaddami, "Matériaux composites à base de fibres lignocellulosiques et de matrices thermoplastiques (PP et PEBD)," presented at 8ème Colloque Franco-Roumain sur les Polymères, 2007.
- [117] A. Bendahou, H. Kaddami, H. Sautereau, M. Raihane, F. Erchiqui, and A. Dufresne, "Short palm tree fibers polyolefin composites: effect of filler content and coupling agent on physical properties," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 293, pp. 140-148, 2008.
- [118] B. Abu-Sharkh and H. Hamid, "Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 85, pp. 967-973, 2004.
- [119] T. Masri, H. Ounis, L. Sedira, A. Kaci, and A. Benchabane, "Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes," *Construction and Building Materials*, vol. 164, pp. 410-418, 2018.
- [120] G. Nemli, S. Demirel, E. Gümüşkaya, M. Aslan, and C. Acar, "Feasibility of incorporating waste grass clippings (*Lolium perenne* L.) in particleboard composites," *Waste Management*, vol. 29, pp. 1129-1131, 2009.
- [121] N. Saadaoui, A. Rouilly, K. Fares, and L. Rigal, "Characterization of date palm lignocellulosic by-products and self-bonded composite materials obtained thereof," *Materials & Design*, vol. 50, pp. 302-308, 2013.
- [122] C. Álvarez, B. Rojano, O. Almaza, O. J. Rojas, and P. Gañán, "Self-bonding boards from plantain fiber bundles after enzymatic treatment: adhesion improvement of lignocellulosic products by enzymatic pre-treatment," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 19, pp. 182-188, 2011.
- [123] P. Evon, V. Vandebossche, and L. Rigal, "Manufacturing of renewable and biodegradable fiberboards from cake generated during biorefinery of sunflower whole plant in twin-screw extruder: influence of thermo-pressing conditions," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 97, pp. 1940-1947, 2012.
- [124] P. Widsten and A. Kandelbauer, "Adhesion improvement of lignocellulosic products by enzymatic pre-treatment," *Biotechnology Advances*, vol. 26, pp. 379- 386, 2008.
- [125] C. Binetruy, "Structures sandwiches," *Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites*, AM5141 V1,2008.
- [126] S. Rocca and A. Nanni, "Mechanical characterization of sandwich structure comprised of glass fiber reinforced core: Part 1," *Composites in Construction*, pp.11-13, 2005.
- [127] H. Djemai, "Contribution à l'étude de l'endommagement dans les matériaux composites sandwiches," thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2017.
- [128] C. Abdenacer, "Etude de la performance des matériaux composites sandwichs Application en Fatigue," Thèse de doctorat, Université BM Annaba, Algérie, 2012.

Références

- [129] G. Belingardi, M. Cavatorta, and R. Duella, "Material characterization of a composite–foam sandwich for the front structure of a high speed train," *Composite structures*, vol. 61, pp. 13-25, 2003.
- [130] A. Marouene, "Comportement sous choc des composites sandwichs et influence des paramètres des matériaux et du test," *Mémoire de Maîtrise ès sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal. Canada*, 2010.
- [131] N. El Hajj, R.-M. Dheilily, Z. Aboura, M. Benzeggagh, and M. Queneudec, "Manufacturing process of 100% vegetable composites: Effect of the flax tow grading and the addition of biological matrix," presented at JNC 16, 2009.
- [132] N. Lakreb, "Elaboration, caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich multicouches à base de liège et bois de déroulage," *Thèse de doctorat, Université de Boumerdes, Algérie*, 2015.
- [133] T. Masri, "Contribution au développement de matériaux de construction à base des sous-produits du palmier dattier," *thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie*, 2018.
- [134] Y.Seki, K. Sever, M.Sarikanat, A.Sakarya and E. Elik. Effect of huntite mineral on mechanical, thermal and morphological properties of polyester matrix. *Composites: Part B, Vol. 45,1534,(2013)*.
- [135] C. Chirayil, L.Mathewa, P. Hassanb, M. Mozeticc and S. Thomas.Rheological behaviour of nanocellulose reinforced unsaturated polyester nanocomposites .*International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 69,274,(2014)*.
- [136] M.lin Chana, K-tak Lau, T-tat Wong, M-po Ho and D. Hui. Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite. *Composites: Part B., Vol.42,1708,(2011)*.
- [137] IA. Madugu , M. Abdulwahab and VS.Aigbodion . Effect of iron fillings on the properties and microstructure of cast fiber–polyester/iron filings particulate composite. *Journal of Alloys and Compounds, Vol.47,807,(2009)*.
- [138] M.Tait , A.Pegoretti , A.Dorigato A and Kalaitzidou K. The effect of filler type and content and the manufacturing process on the performance of multifunctional carbon/poly-lactide composites. *Carbon, Vol.49,4280,(2011)*.
- [139] S.Jin Park and J.Seong Jin. Effect of silane coupling agent on interphase and performance of glass fibers/unsaturated polyester composites. *Journal of Colloid and Interface Science, Vol.242,174,(2001)*.

ANNEXES

ANNEXES

Tableau 1 : Variations des caractéristiques en traction des composites RVE/Palmier en fonction du taux de fibre.

Taux de fibre (pcr)	0	1	2	3	4	5
σ_r (MPa)	8.3	13.85	14.8	21.6	13	9.7
ε_r (%)	3	5.2	7.2	9	5.2	3.85

Tableau 2 : Variations de la résilience choc Izod des échantillons non entaillés des composites en fonction du taux de fibre.

Taux de fibre (pcr)	0	1	2	3	4	5
a_n (KJ/m ²)	0.455	0.649	1.313	0.541	0.429	0.223

Tableau 3 : Variations de la dureté Shore en fonction du taux de la fibre.

Taux de fibre (pcr)	0	1	2	3	4	5
Dureté Shore	70	73	75	78	76	72

Tableau 4 : Variations de la densité en fonction du taux de la fibre.

Taux de fibre (pcr)	0	1	2	3	4	5
d (g/cm ³)	1.136	1.137	1.138	1.141	1.142	1.140

ANNEXES

Tableau 5 : Variations de taux d'absorption d'eau des composites (PD) en fonction du Temps d'immersion

Temps d'immersion (heures) Taux D'absorption (%)	24	48	168	336
Taux RVE	0,189	0,259	0,361	0,403
Taux VE /1 pcr	0,259	0,339	0,409	0,508
Taux VE /2 pcr	0,463	0,695	0,737	0,863
Taux VE /3 pcr	0,520	0,699	0,737	0,855
Taux VE /4 pcr	0,572	0,775	0,766	1,133
Taux VE /5 pcr	0,701	0,765	0,781	1,052