

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Mécanique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الميكانيكية
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de
Doctorat en sciences : Génie Mécanique

Option : Génie Mécanique

**Elaboration et caractérisation de composites bio-sourcés à
base de fibres de palmier dattier**

Présentée par :

DJOUDI Tarek

Soutenue publiquement le :

14/12/2019

Devant le jury composé de :

Dr. DERFOUF Samcheddine	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. HECINI Mabrouk	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. SCIDA Daniel	Maître de Conférences	Co-rapporteur	Université de Reims, France
Dr. AZOUAOUI Krimo	Professeur	Examineur	USTHB d'Alger
Dr. KRIKER abdelouahed	Professeur	Examineur	Université de Ouargla
Dr. LABED Adnane	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra

إهداء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى جميع أفراد أسرتي و أصدقائي

إلى أبي

أفتقده في هذه الحياة وكم كنت أطمح أن أقاسمه هذه اللحظات

إلى أمي

مزارعة الدرب وسر النجاح ومنبع العنان

إلى إخوتي

عزوتي و سندي في الحياة

إلى زوجتي و ابنتي

أمل الحياة

إلى أصدقائي

رفقاء الدرب

Remerciements

*Le premier merci avant tout à **ALLAH**, pour la bénédiction du succès pour accomplir ce travail.*

*Je tiens à remercier le directeur de thèse, Monsieur **Mabrouk HECINI**, Professeur à l'Université de Biskra, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.*

*Je tiens à remercier également le Co-directeur de la thèse, le Docteur **Daniel SCIDA**, Maître de conférences à l'université de Reims. France, pour la qualité de ses conseils et pour toutes recommandations utiles à mon parcours de recherche.*

*J'adresse mes remerciements à tous les membres du jury d'avoir examiné ce travail. Le Professeur **Samcheddine DERFOUF**, de l'université de Biskra, d'avoir accepté de présider le Jury de la soutenance, les Professeurs **Abdelouahed KRIKER** de l'université d'Ouargla et le Professeurs **Krimo AZOUAOUI** de l'USTHB d'Alger, ainsi que le Docteur **Adnane LABED** de l'université de Biskra.*

*Je tiens à remercier vivement **Dr. Belhi GUERIRA**, directeur du département de Génie Mécanique de l'université de Biskra, **Dr. Youcef DJEBLOUN**, enseignant-chercheur à l'université de Biskra pour leur aide et soutien tout au long de ce travail. Mes remerciements vont aussi à **Mme. Amina LOUCIF**, chef service du laboratoire de plasturgie de l'entreprise des câbles électriques ENICA-Biskra, **Mr. Sadok SEDRATI** ingénieur au Hall technologique de l'université de Biskra et **Mr Stéphane BUET** technicien à l'Institut de Formation Technique Supérieure (IFTS-Charleville-Mézières, France) pour leur collaboration et leur disponibilité durant la réalisation d'importantes parties de ce travail expérimental.*

*Je tiens à remercier Monsieur **Dr. Lamri SEGUENI** enseignant au département de langue de l'université de Biskra, pour sa précieuse contribution dans la rédaction des articles.*

*Un grand remerciement également au **Dr. Mohamed Moustapha TOUBA**, **Dr. Chawki MAHBOUB**, **Mr. Ismaïl GUETALA** et **Dr. Hocine DJEMAI** pour leurs aides et leurs disponibilités. Enfin, je n'oublierai pas d'associer dans mes remerciements à l'ensemble des enseignants de mon département de génie mécanique et mes collègues.*

Djoudi Tarek

ملخص

في مجال الصناعة يعد توفر المواد الخام وسعرها أمرًا ضروريًا لنجاح أي مشروع صناعي، لذلك يعمل العديد من الباحثين على إيجاد مواد بديلة صديقة للبيئة بأسعار منخفضة من خلال استخدام النفايات الطبيعية أو إعادة التدوير. حيث من الملاحظ أن نخيل التمر ينتج كميات هائلة من السعف الجاف كل عام في شكل نفايات متبقية خلال نموه وتطوره الطبيعي. إن إعادة تدوير واستغلال هذه النفايات بدلاً من حرقها من شأنه أن يساعد في تحويل نفايات النباتية إلى ثروة حقيقية يمكن استخدامها بكفاءة وبطريقة صديقة للبيئة.

في هذا السياق، تتضمن هذه الدراسة بحثًا تجريبيًا يركز على التوصيف الفيزيائي و الميكانيكي لهذه النفايات الخام (السهف الجاف)، وصناعة عدة أنواع من المواد المركبة المقواة بخشب أو بالألياف مستخرجة من هذه المواد النباتية ثم يتم بعدها التوصيف الميكانيكي لهذه المواد. كما استخدمت هذه المواد المختلفة في صناعة هياكل الشطائر العازلة و دراسة سلوكها الميكانيكي.

بدأت الدراسة من خلال وصف عنصر رئيسي من نخيل التمر وهو السعف الجاف. تم تقسيم السعف الجاف إلى جزأين أساسيين هما القاعدة و الساق، ثم تم وضع التوصيف الفيزيوميكانيكي على الخشب الليفي والألياف هذين الجزأين. سيتعلق التوصيف المادي بكثافة الألياف والمصفوفة النباتية (اللبنين) وكذلك محتوى الرطوبة في أجزاء مختلفة من السعف. مكنت الاختبارات الميكانيكية من تحديد الخصائص الميكانيكية للخشب الليفي والألياف المستخرجة من جزأين السعف بعد التجفيف. في نهاية هذه الدراسة، أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تأثير موقف العينة المختبرة على الخواص الفيزيائية الميكانيكية. كما جعلت هذه النتائج من الممكن وضع هذا النوع من الخشب الليفي وهذه الألياف ضمن نتائج أخرى للأدب العلمي والنظر في استخدامها في تنفيذ المواد المركبة وفي عناصر العزل.

من جهة أخرى، تم إجراء التوصيف الميكانيكي للمواد المركبة القائمة على هذه الألياف باستخدام نوعين مختلفين من المصفوفة (الإيبوكسيد والبولي بروبيلين). تكشفنا اختبارات الشد التي أجريت للمركبات المركبة بنسب مئوية مختلفة من الألياف (4، 7، 10 و 15%)، أن هناك تحسناً في الخواص الميكانيكية للمصفوفة البكر تتناسب مع المحتوى الشامل للألياف. اختبارات الانضغاط على المواد المركبة القائمة على جزئيات الخشب الليفي والمصفوفة الطبيعية. تظهر نتائج في الخصائص الميكانيكية لهذه المواد المختبرة. من خلال النتائج التي تم الحصول عليها تثمين هذه النفايات للتطبيقات الصناعية المحتملة.

قيمة الصلابة الكلية لشطائر العزل ذات قلب من جسيمات الخشب عالية بالنسبة لذات قلب من الخشب الخام. الصلابة الكلية في السندوتشات الخشبية القائمة على قلب من مواد النخيل أعلى مقارنة بالسندوتشات ذات قلب من الفلين الممثل. تُظهر الملاحظة المعاينة الميكروسكوبية لوجه كسور، الالتصاق الجيد بين الجلد والقلب. هذا يرجع إلى التقنية المستخدمة في إعداد هيكل شطيرة.

Abstract

The availability and price of raw materials is critical to the success of any industrial project, therefore many researchers are working to find alternative materials at low prices through the use of natural waste or recycling. The date palm tree produces enormous quantities of dry palms every year in the form of waste left over during its growth and natural evolution. The recycling and exploitation of this waste instead of burning it would help to convert the vegetable waste into a real wealth that can be used effectively and with respect for the environment.

In this context, this study includes an experimental component that consists of physical-mechanical characterization of the raw material (Palm), elaboration and mechanical characterization of bio-composites and development and study of the behavior (overall stiffness DG) of sandwich structure beams.

The study was started by characterizing a major component of the palm date tree that is the mature palm. The palm being decomposed into essentially two parts, Petiole and Rachis, the characterization was then carried on the fibrous wood and the fibers of these two parts. The physical characterization will concern the density of the fibers and the vegetal matrix (lignin) as well as the moisture content in the different parts of the palm. The mechanical tests made it possible to determine the mechanical characteristics of the fibrous wood and fibers extracted from both parts of the palm after drying. At the end of this study, the results obtained show the influence of the position of the tested sample on the physico-mechanical properties. They also made it possible to situate this type of fibrous wood and these fibers among other results of the scientific literature and to consider using them in the implementation of composite materials and in insulation elements.

The mechanical characterization of the composite materials based on these fibers was carried out by the use of two different types of matrix (epoxyde, polypropylene). Tensile tests carried out for composites at different fiber percentages (4, 7, 10 and 15%), reveal that there is an improvement in the mechanical properties of the virgin matrix proportional to the mass content of fibers. Compression tests on composite materials based on petiole wood particles and natural matrix showing the isotropic and anisotropic characteristics of these tested materials. The results obtained are used to valorize this waste for possible industrial applications.

The value of the overall stiffness of the wood particle core sandwich is high relative to the heart of the raw petiole wood. The overall stiffness in palm-based wood sandwich is higher compared to sandwich with agglomerated cork core. The macroscopic observation of fracture facies shows the good adhesion between the skins and the heart. This is due to the method used in the preparation of sandwich structure.

Résumé

La disponibilité et le prix des matières premières sont déterminants pour la réussite de tout projet industriel, par conséquent, de nombreux chercheurs tentent de trouver des matériaux alternatifs à bas prix grâce à l'utilisation de déchets naturels ou du recyclage. Les palmiers dattiers produisent chaque année d'énormes quantités de palmes sèches sous forme de déchets abandonnés au cours de son croissance et de son évolution naturelle. Le recyclage et l'exploitation de ces déchets au lieu de les brûler contribueraient à convertir les déchets végétales en une richesse réelle pouvant être utilisés efficacement et dans le respect de l'environnement.

Dans ce contexte, ce travail doctoral comporte une étude expérimentale qui consiste en une caractérisation physico-mécanique du matériau brut (Palme), élaboration et caractérisation mécanique des bio-composites et élaboration et étude du comportement mécanique des poutres à structure sandwich.

L'étude a été commencée par la caractérisation d'une composante importante du palmier qui est la palme mûre, la décomposant essentiellement en deux parties, le Pétiole et le Rachis. La caractérisation a été portée alors sur le bois fibreux et les fibres de ces deux parties. La caractérisation physique concernera la masse volumique des fibres et la matrice végétale (lignine), ainsi que le taux d'humidité dans les différentes parties de la palme. Les essais mécaniques ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques du bois fibreux et des fibres extraites des deux parties de la palme après le séchage. À l'issue de cette étude, les résultats obtenus montrent l'influence de la position de l'échantillon testé sur les propriétés physico-mécaniques. Ils ont permis également de situer ce type de bois fibreux et ces fibres parmi d'autres résultats de la littérature scientifique et d'envisager de les utiliser dans la mise en œuvre des matériaux composites et dans des éléments d'isolation.

La caractérisation mécanique des matériaux composites à base de ces fibres a été effectuée pour deux types de matrices différentes (Epoxyde, polypropylène). Les essais de traction effectués pour des composites à différents pourcentages de fibres (4, 7, 10 et 15%), révèlent une amélioration des propriétés mécaniques par rapport à la matrice vierge proportionnellement au taux massique de fibres. Les tests de compression sur les matériaux composites à base de particules de bois de pétiole et matrice naturelle montrent les caractères isotrope et anisotrope de ces matériaux testés en fonction de la taille des particules.

La valeur de la rigidité globale du sandwich avec un cœur à particule de bois est élevée par rapport au cœur du bois de pétiole brut. La rigidité globale dans les sandwiches à base de bois de la palme est plus élevée par rapport aux sandwiches avec un cœur de liège aggloméré. L'observation macroscopique des faciès de rupture montre la bonne adhérence entre les peaux et le cœur. Ceci est dû à la méthode utilisée dans la préparation des poutres sandwiches.

Les résultats obtenus dans ce travail de recherche servent à valoriser les déchets du palmier dattier pour d'éventuelles applications industrielles.

Sommaire

	<i>Page</i>
اهداء	i
Remerciement	ii
ملخص	iii
Abstract	iv
Résumé	v
Sommaire	vi
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x
Introduction	1
Chapitre I : Généralités	
I.1 Définition et classification des composites	6
I.1.1 Classification selon le type de matrice	7
I.1.2 Classification selon la catégorie du renfort	7
I.1.3 Classification selon la forme du renfort	8
I.1.4 Classification selon le marché	9
I.2 Matériaux composites bio-sourcés	9
I.2.1 Renfort à fibres végétales	9
I.2.1.1 Composition chimique des fibres végétales	10
I.2.1.2 Méthodes d'extraction des fibres végétales	14
I.2.1.3 Propriétés et avantages des fibres végétales	16
I.2.2 Matrices	17
I.2.2.1 Matrices polymères	17
I.2.2.2 Matrices naturelles	19
I.3 Procédés de fabrication des composites	19
I.4 Matériaux végétaux du palmier dattier	22
I.4.1 La palme	25
I.4.2 Composition chimique de la palme	25
I.4.3 Déchet du palmier dattier	26
I.4.4 Domaines d'utilisation des déchets de palmier dattier	27
I.5 Synthèse des travaux réalisés	28
I.5.1 Renforts issus de palmier dattier	28
I.5.1.1 Bois	28
I.5.1.2 Fibres	31
I.5.2 Composites à base de renforts de palmier dattier	34
I.5.2.1 Composite à matrice thermodurcissable	34
I.5.2.2 Composite à matrice thermoplastique	36
I.5.2.3 Composite à particules	37
I.6 Composite de structure sandwich	39
I.6.1 Caractéristiques des structures sandwichs	40
I.6.2 Classification des structures sandwichs	40
I.6.3 Domaine d'utilisation	41
I.7 Conclusion	43
Références	45

Chapitre II : Caractérisation physico-mécanique de bois et des fibres de palmier dattier

II.1 Présentation des matériaux	50
II.1.1 Préparation des éprouvettes	51
II.1.1.1 Eprouvettes des bois fibreux	51
II.1.1.2 Eprouvettes de fibres	53
II.1.2 Morphologie de la palme	54
II.1.2.1 Pétiole	55
II.1.2.2 Rachis	55
II.1.2.3 Fibres	56
II.2 Caractérisation physico-mécanique	58
II.2.1 Propriétés physiques	58
II.2.1.1 Pourcentage volumique de fibres et du lignine dans la palme	58
II.2.1.2 Méthode de diffraction des rayons X (DRX)	58
II.2.1.3 Analyse thermique (ATG et DTG)	59
II.2.1.4 Masse volumique du bois et de la fibre	60
II.2.1.5 Taux d'humidité de différentes parties de la palme	61
II.2.2 Propriétés mécaniques	62
II.2.2.1 Essai de traction longitudinale du bois (TL)	62
II.2.2.2 Essai de compression du bois	63
II.2.2.3 Essai de flexion trois points du bois (F3P)	64
II.2.2.4 Essai de traction et torsion des fibres	64
II.3 Résultats et discussion	67
II.3.1 Propriétés physiques	67
II.3.1.1 Pourcentage volumique de fibres et du lignine dans la palme	67
II.3.1.2 Masse volumique du bois et de la fibre	68
II.3.1.3 Méthode de diffraction des rayons X (DRX)	69
II.3.1.4 Analyse thermique (TGA et DTG)	71
II.3.1.5 Taux d'humidité de différentes parties de la palme	71
II.3.2 Propriétés mécaniques	73
II.3.2.1 Essai de traction longitudinale du bois (TL)	73
II.3.2.2 Essai de compression du bois	74
II.3.2.3 Essai de flexion trois points du bois (F3P)	75
II.3.2.4 Essai de traction des fibres	79
II.4 Conclusion	82
Références	83

Chapitre III : Elaboration et caractérisation des matériaux composites

III.1 Présentation et élaborations des matériaux	85
III.1.1 Choix des constituants des matériaux composites	86
III.1.1.1 Fibres	86
III.1.1.2 Bois	87
III.1.1.3 Matrice	88
III.1.2 Elaboration des matériaux composites	89
III.1.2.1 Epoxy/Fibre de rachis	89
III.1.2.2 Polypropylène (PP)/Fibre de rachis	90
III.1.2.3 Matrice naturelle/Particules de bois	92

III.2. Caractérisation mécanique	93
III.2.1 Présentation des essais mécaniques	93
III.2.1.1 Essai de traction	94
III.2.1.2 Essai de compression	95
III.2.2 Résultats et discussion	95
III.2.2.1 Essai de traction	95
III.2.2.2 Essai de compression	100
III.3 Analyse morphologique	102
III.4 Conclusion	104
Références	106

Chapitre IV : Caractérisation mécanique d'une poutre en structure sandwich

IV.1 Présentation des matériaux de type sandwichs	107
IV.1.1 Choix des constituants de la poutre sandwich	107
IV.1.1.1 Peaux	108
IV.1.1.2 Cœurs	108
IV.1.2 Préparation des éprouvettes	109
IV.2 Caractérisation mécanique	110
IV.3 Résultats et discussion	113
IV.4 Observations des faciès de rupture après les tests de flexion trois points	116
IV.5 Conclusion	119
Références	120

Conclusion Générale	121
----------------------------	-----

Article

Annexe

Listes des figures

Introduction	Page
Figure 0.1. Manifestation pour l'arrêt des coupes forets.	1
Figure 0.2. Déchets de palmier dattier : a) collecte des déchets; b) broyage de déchets.	2
Figure 0.3. Bois MDF à base de palmier dattier.	3
Chapitre I : Généralités	
Figure I.1. Les matériaux composites à particules, à fibres et stratifiés.	6
Figure I.2. Classification des composites selon la matrice.	7
Figure I.3. Classification des composites selon la catégorie du renfort.	8
Figure I.4. Classification des composites selon la forme des renforts.	8
Figure I.5. Classification des fibres naturelles selon l'origine .	10
Figure I.6. Classification des fibres végétales selon l'origine.	11
Figure I.7. Structure schématique d'une fibre végétale.	11
Figure I.8. Molécule de la cellulose.	12
Figure I.9. Structure d'un type de xyloglucane.	13
Figure I.10. Structure des précurseurs de la lignine a) p-coumaryl alcohol, b) coniferyl alcohol, c) sinapyl alcohol.	13
Figure I.11. Structure d'une chaîne de pectine (acide polygalacturonique).	14
Figure I.12. Différentes techniques d'extraction des fibres végétales.	15
Figure I.13. Matrice utilisée pour les matériaux composites bio-sourcés.	17
Figure I.14. Structures moléculaires des polymères : a) polymère thermoplastique, b) polymère thermodurcissable.	18
Figure I.15. Mise en œuvre des matériaux composites selon la nature de la matrice.	20
Figure I.16. Quelques procédés de mise en œuvre des composites.	21
Figure I.17. Répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014.	22
Figure I.18. Répartition de palmier dattier en région de Biskra.	22

Figure I.19. Proportion de variétés des palmiers dattiers à Biskra.	23
Figure I.20. Différentes parties d'un palmier dattier et l'évolution naturelle d'une palme.	24
Figure I.21. Les quatre parties de la palme mûre.	25
Figure I.22. Composition chimique des fibres de palmier (% en poids).	26
Figure I.23. Déches des palmiers dattiers : palmes, b) stipes.	27
Figure I.24. Quelques utilisations traditionnelles des déchets de palmier dattier : a) charpentes de maison, b) panier.	27
Figure I.25. Bois MDF à base de palmier dattier.	28
Figure I.26. Schéma représentatif d'une structure sandwich.	40
Figure I.27. Classification des structures sandwichs selon la nature de matériau utilisé.	41
Figure I.28. Quelques utilisation de structure sandwich : a) bâtiment, b) transport, c) sport.	42

Chapitre II : Caractérisation physico-mécanique de bois et des fibres de palmier dattier

Figure II.1. Parties de la palme :a) pétiole ; b) rachis.	51
Figure II.2. Zones de coupe.	51
Figure II.3. Éprouvettes d'essai de traction : a)préparation des plaques (BP), b) découpage des éprouvettes.	52
Figure II.4. Spécimens de bois : a) échantillons des tests physiques, b) éprouvette haltère de l'essai de traction du bois(BP), c) éprouvette de l'essai de compression du bois(BP), d) éprouvette de l'essai de flexion du bois(BR).	52
Figure II.5. Processus d'extraction des fibres des tests physiques : a) ligne d' extraction de fibre, b) fibres.	53
Figure II.6. Processus d'extraction des fibres des tests mécaniques : a)rouissage, b)séchage, c) lavage, d) fibres.	53
Figure II.7. Fibres extraite de la palme (x200) :a) avant lavage, b) après lavage.	54
Figure II.8. Microscope optique digital (DigiBlue QX5 QSG).	54
Figure II.9. Présentation structurale du bois du pétiole avec une coupe transversale (BP) (x10) et (x60).	55
Figure II.10. Présentation structurale du bois du rachis: a) sens longitudinal, b) sections transversales(CT) (x10).	56

Figure II.11. Microscope: a) optique digital (hund type H600 AM), b) électronique (TESCAN VEGA3).	56
Figure II.12. Observations microscopiques des fibres de palme, a) et b) Images MEB d'une fibre de pétiole (variété Deglet-Nour), échelle de 100 μ m, c) surface longitudinale (X200), d) surface transversale (X 400),e) et f) Images MEB d'une fibre de rachis (variété Deglet-Nour), échelle de 200 μ m.	57
Figure II.13. Photo microstructure pour la mesure de la section de fibre: a) coupe transversale (x10), b) coupe longitudinale (x60).	58
Figure II.14. Appareil de rayons X de type D8 ADVANCE.	59
Figure II.15. Appareil de l'analyse thermique (SETARAM LABSYS Evo Instrument).	60
Figure II.16. Appareil de mesure :a) masse volumique de bois, b) masse volumique de fibre.	61
Figure II.17. Appareil de mesure :a) étuve électrique (BINDER), b) balance électronique (Kern V3.1).	62
Figure II.18. Machine universelle de type Instron 5969.	62
Figure II.19. Eprouvette de bois : a) marquage, b) éprouvette marquée.	63
Figure II.20. Essais mécanique sur le bois : a) compression, b) flexion trois points, c) vidéo-traction.	64
Figure II.21. Essai de traction des fibres: a) fixation des fibres, b) dispositif de l'essai.	66
Figure II.22. Pendule de torsion.	66
Figure II.23. Pourcentage volumique de fibres et du lignine dans la palme.	67
Figure II.24. Profil de diffraction des RX de poudre extraite de la palme : a) rachis, b) pétiole, c) foliole.	70
Figure II.25. Courbes TGA et DTG des fibres (FR).	71
Figure II.26. Taux d'humidité de différentes parties de la palme : a) quantité d'eau perdue en fonction du temps, b) taux d'humidité.	72
Figure II.27. Résultats de l'essai de traction (TL): a) courbe type contrainte-déformation, b) éprouvettes (BP) après l'essai.	73
Figure II.28. Résultats de l'essai de vidéo-traction: a) courbe type contrainte-déformation transversale, b) courbe type contrainte-déformation longitudinale.	74

Figure II.29. Résultats de l'essai de compression: courbes types contrainte-déformation, a) (CL) et b) (CT), c) éprouvettes (BP) après l'essai.	75
Figure II.30. Résultats de l'essai de flexion trois points (BP): a) courbe type charge-déplacement, b) éprouvette (BP) après l'essai.	76
Figure II.31. Résultats de l'essai de flexion trois points (BR): a) courbes types charge-déplacement, b) éprouvettes (BR) après l'essai.	77
Figure II.32. Résultats de l'essai de flexion trois points pour les différentes parties du bois de la palme: a) module d'élasticité, b) contrainte maximale.	77
Figure II.33. Courbes types contrainte-déformation de l'essai de traction (FPPr et FRPr).	79
Figure II.34. Courbes types contrainte-déformation de l'essai de traction (FPSc et FRSc).	79

Chapitre III : Elaboration et caractérisation des matériaux composites

Figure III.1. Protocole de la préparation des fibres.	86
Figure III.2. Préparation des particules de bois de pétiole : a) déchets de bois, b) découpage, c) tamisage.	87
Figure III.3. Particules de bois de pétiole selon la taille.	87
Figure III.4. Résine Epoxyde avec leur durcisseur.	88
Figure III.5. Polypropylène.	88
Figure III.6. Protocole de préparation de la colle naturelle : a) poudre de lignine, b) colle vinylique, c) pâte de colle naturelle.	89
Figure III.7. Protocole de préparation des plaques : époxyde/fibre de la palme.	90
Figure III.8. Protocole de préparation des compounds PP/fibre de rachis.	91
Figure III.9. Protocole de préparation des plaques : PP/fibre de rachis.	92
Figure III.10. Protocole de préparation des plaques : matrice naturelle/particule de bois.	93
Figure III.11. Eprouvettes d'essai de traction conformément à la norme NF ISO 527 .	94
Figure III.12. Protocole de préparation des éprouvettes : matrice naturelle/particule de bois.	94
Figure III.13. Tests mécaniques sur le composite: a) essai de traction, b) essai de compression.	95
Figure III.14. Résultats de l'essai de traction sur le matériau composite EFR, exemple de courbe contrainte-déformation.	96

Figure III.15. Résultats de l'essai de traction pour différents taux de fibre (EFR) : a) module d'élasticité, b) contrainte maximale.	97
Figure III.16. Exemple de courbe contrainte-déformation des matériaux (EPR07, EPF07) pour une fraction massique de fibres fixe de 7%.	98
Figure III.17. Résultats de l'essai de traction de (EFR et EFF) à un taux de fibre fixe de 7% : a) module d'élasticité, b) contrainte maximale.	98
Figure III.18. Résultats de l'essai de traction sur le matériau composite PFR.	99
Figure III.19. Résultats de l'essai de traction pour différents taux de fibres (PFR) : a) module d'élasticité, b) contrainte maximale.	100
Figure III.20. Résultats de l'essai de compression sur le matériau composite CBP: a) CL ,b) CT.	100
Figure III.21. Résultats de l'essai de compression pour différents composite (CBP) : a) module d'élasticité (CL), b) module d'élasticité (CT).	101
Figure III.22. Observations microscopique des plaques en matériau composite pour différentes taux de fibre :a)EFR (X 10) , b) PFR (X 10).	102
Figure III.23. Observations micrographies MEB du matériau composite EFR10 après le test de traction: a) rupture de fibres; b) surface de fracture; c) adhérence matrice / fibres.	103
Figure III.24. Observations micrographies MEB du matériau composite PFR15 après le test de traction: a) rupture de fibres; b) surface de fracture; c) adhérence matrice / fibres.	103

Chapitre IV : Caractérisation mécanique d'une poutre structure en sandwich

Figure IV.1. Matériaux utilisés dans les structures sandwichs.	107
Figure IV.2. Composite EFR10 utilisé comme peau des structures sandwichs.	108
Figure IV.3. Matériaux utilisés comme cœur dans les structures sandwichs.	108
Figure IV.4. Protocole de préparation des plaques composites de type sandwich.	109
Figure IV.5. Poutres composites de structure sandwich.	110
Figure IV.6. Dimensionnement d'une poutre sandwich.	110
Figure IV.7. Test de flexion trois points.	111
Figure IV.8. Exemple de courbes charge-déplacement lors de l'essai de flexion trois points sur les poutres en structure sandwich SBP et SBPB.	113

Figure IV.9. Exemple de courbe charge-déplacement des matériaux (SPL3, SBP3) pour une taille de particule de 1 à 3mm.	114
Figure IV.10. Rigidité globale de la structure en sandwich pour différents cœurs.	115
Figure IV.11. Comparaison des courbes expérimentale et analytique pour (SBPB) dans la partie linéaire.	116
Figure IV.12. Observations macroscopique des étapes de rupture d'une éprouvette au cours du test de flexion trois point.	117
Figure IV.13. Observations macroscopique des faciès de rupture des différentes structures sandwichs.	118

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités

Page

Tableau I.1. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales. 16

Chapitre II : Caractérisation physico-mécanique de bois et des fibres de palmier dattier

Tableau II.1. Masse volumique du bois de la palme sèche. 68

Tableau II.2. Masse volumique des composantes du bois de la palme sèche. 68

Tableau II.3. Influence de la température sur le séchage pendant 30 min. 72

Tableau II.4. Résultats de l'essai de traction (BP). 73

Tableau II.5. Résultats des essais de compression (BP). 74

Tableau II.6. Résultats de l'essai de flexion trois points (BP). 75

Tableau II.7. Résultats de l'essai de flexion trois points (BR). 76

Tableau II.8. Comparaison des propriétés mécaniques des bois du palmier dattier. 78

Tableau II.9. Résultats de l'essai de traction des fibres. 80

Tableau II.10. Comparaison des propriétés mécaniques des fibres du palmier dattier. 81

Chapitre III : Elaboration et caractérisation des matériaux composites

Tableau III.1. Conditions du moulage par compression à chaud. 91

Tableau III.2. Résultats de l'essai de traction des éprouvettes composites (EFR). 96

Tableau III.3. Résultats de l'essai de traction des éprouvettes composites (EFR07 et EFF07). 97

Tableau III.4. Résultats de l'essai de traction des éprouvettes composites (PFR). 99

Tableau III.5. Résultats de l'essai de compression des éprouvettes composites (CBP). 101

Chapitre IV : Caractérisation mécanique d'une poutre structure en sandwich

Tableau IV.1. Dimension de poutres testées. 111

Tableau IV.2. Différentes formules module d'élasticité des peaux (E) et le module de cisaillement du cœur (G). 112

Tableau IV.3. Résultats de l'essai de flexion trois points des éprouvettes composites (SBP) et (SBPB). 114

Tableau IV.4. Résultats de l'essai de flexion trois points des éprouvettes composites (SPL3) et (SBP3). 115

Introduction

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 (Medium Density Fiberboard 'MDF', High Density Fiberboard 'HDF', Light Density Fiberboard 'LDF' ...), 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 (*Figure 0.1*). Parfois, il faut plusieurs années pour obtenir la matière première, comme le cas du liège. 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.



Figure.0.1. Manifestation pour l'arrêt des coupes forêts. [1]

Par contre, il existe une source végétale abondante qui n'a pas encore été exploitée et qui peut constituer une alternative au bois traditionnel et aux diverses fibres végétales actuellement utilisées dans la fabrication de matériaux bio-composites. Cette source est liée au palmier dattier, qui au cours de sa croissance et de son évolution naturelle, produit chaque année d'énormes quantités de bois fibreux et de fibres sous forme de déchets actuellement abandonnés, dans les palmerais. Ces déchets concernent les sous-produits du palmier dattier (spadice, grappe, palmes sèches, rebuts de dattes, et lif...) présentés à la [Figure 0.2\(a\)](#), dont la collecte ne nécessite pas la replantation des palmiers, contrairement à d'autres fibres végétales telles que le Lin, le chanvre, le sisal,... Par la création d'une filière dédiée à cette collecte, il suffit de mettre en place un processus cyclique chaque année entre les oasis de palmiers pour broyer ces déchets et les transférer vers une usine d'exploitation ([Figure 0.2\(b\)](#)).



Figure.0.2. Déchets de palmier dattier: a) collecte des déchets, b) broyage de déchets.

L'idée d'exploiter ces déchets dans l'industrie n'est pas récente et déjà été appliquée dans la production des plaques de bois MDF à partir de la palme de palmier dattier en Irak à la fin des années 1980 ([Figure 0.3](#)) [2]. En 2011, une usine égyptienne a réussi à produire le premier bois à partir de "palme", capable de concurrencer le bois importé, tout en maintenant la qualité et l'environnement [3]. La ville industrielle de Khalifa à Abou Dhabi (KIZAD) a inauguré en 2017 la première usine au monde qui a réussi à produire des palettes en bois de haute qualité, à partir de la collecte et du recyclage des déchets de palmiers dattiers [4]. Cette industrie nécessite toujours l'utilisation des technologies conformes à la nature de cette source végétale.



Figure.0.3. Bois MDF à base de palmier dattier. [2]

Dans ce contexte, nous proposons dans ce travail d'étudier la faisabilité de l'utilisation des déchets issus du palmier dattier comme matériaux alternative au bois traditionnel et de diverses fibres végétales actuellement utilisés dans l'élaboration des matériaux bio-composites. Pour répondre à cette question nous avons tracé les objectifs suivants :

- L'étude des propriétés physico-mécaniques des composantes de la partie la plus abondante des sous-produits des palmiers dattiers, à savoir, le bois fibreux et les fibres de la palme.
- La mise en œuvre et la caractérisation mécanique et morphologique des matériaux composites à base du bois et fibres du palmier dattier et différentes matrices.
- La fabrication des plaques sandwiches à partir des composites précédemment élaborés puis leur caractérisation mécanique par des tests appropriés.

Pour présenter cette étude, le manuscrit de thèse est articulé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est un bilan bibliographique présentant la classification des matériaux composites en fonction de plusieurs paramètres, y compris la classification selon la catégorie du renfort utilisé. En outre, cette présentation vise à démontrer les différents constituants entrant dans la mise en forme des matériaux composites bio-sourcés et l'importance de la matière végétale dans la fabrication de ces matériaux. Nous suggérons ensuite certains domaines d'application des matériaux composites renforcés par des fibres végétales, en particulier les fibres de palmier dattier. L'importance des matériaux végétaux est montrée à travers une présentation de leurs répartitions géographiques et estimation de leurs tonnages en Algérie. Enfin, nous présentons une synthèse des travaux réalisés sur les

matériaux composites à base de matériaux extraits de palmiers dattiers selon une classification par la matrice utilisée et la structure de matériaux composites.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des matières premières utilisées dans cette étude. Nous avons choisi la palme du palmier dattier puisqu'il s'agit de la partie la plus disponible et abondante dans les déchets du palmier dattier. Dans cette partie du travail. Nous avons effectué une caractérisation physico-mécanique sur les bois fibreux et les fibres extraites de différentes parties de la palme. Nous avons également présenté la différence entre ces matériaux végétaux selon la zone d'extraction des fibres ou du bois fibreux du palmier dattier.

Dans le troisième chapitre, nous avons élaboré des matériaux composites à base des fibres extraites de la palme avec l'utilisation de deux matrices différentes, thermoplastique (polypropylène) et thermodurcissable (polyester et époxy). De plus, nous avons préparé des plaques en particules de bois fibreux issus du pétiole en utilisant une matrice naturelle. Puis, nous avons étudié l'influence sur les propriétés mécaniques des composites élaborés des différents paramètres comme le procédé de mise en œuvre, le taux de fraction massique du renfort et la taille des renforts. Enfin une étude microscopique a été effectuée pour interpréter les résultats obtenus.

Le quatrième chapitre présente une application des différentes bio-composites préparées dans le chapitre précédent. Des structures sandwiches constituées ont été fabriquées à partir de peaux à base de résine époxy et fibres de palme et avec des cœurs différents (matrice naturelle/particule, bois de pétiole et liège aggloméré). Le comportement mécanique de ces plaques sandwiches a été étudié par des essais de flexion trois points.

Finalement, la conclusion générale reprendra les principaux résultats de l'étude qui permettent de formuler plusieurs interprétations scientifiques, pour l'évaluation des matériaux composites à base des fibres de palmier dattier. Cette conclusion se terminera par la présentation des perspectives envisagées pour la poursuite de cette recherche.

I.1 Définition et classification des composites	6
I.1.1 Classification selon le type de matrice	7
I.1.2 Classification selon la catégorie du renfort	7
I.1.3 Classification selon la forme du renfort	8
I.1.4 Classification selon le marché	9
I.2 Matériaux composites bio-sourcés	9
I.2.1 Renfort à Fibres végétales	9
I.2.1.1 Composition chimique des fibres végétales	10
I.2.1.2 Méthodes d'extraction des fibres végétales	14
I.2.1.3 Propriétés et avantages des fibres végétales	16
I.2.2 Matrices	17
I.2.2.1 Matrices polymères	17
I.2.2.2 Matrices naturelles	19
I.3 Procédés de fabrication des composites	19
I.4 Matériaux végétaux du palmier dattier	22
I.4.1 La palme	25
I.4.2 Composition chimique de la palme	25
I.4.3 Déchet du palmier dattier	26
I.4.4 Domaines d'utilisation des déchets de palmier dattier	27
I.5 Synthèse des travaux réalisés	28
I.5.1 Renforts issus de palmier dattier	28
I.5.1.1 Bois	28
I.5.1.2 Fibres	31
I.5.2 Composites à base de renforts de palmier dattier	34
I.5.2.1 Composite à matrice thermodurcissable	34
I.5.2.2 Composite à matrice thermoplastique	36
I.5.2.3 Composite à particules	37
I.6 Composite de la structure sandwich	40
I.6.1 Caractéristiques des structures sandwichs	40
I.6.2 Classification de la structure sandwich	40
I.6.3 Domaine d'utilisation	41
I.7 Conclusion	43
Références	45

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.

I.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 1.1*). Ces composants sont généralement la matrice et les renforts, liés les uns aux autres en conservant leurs identités et propriétés. Ces constituants doivent assurer une 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[1, 2].

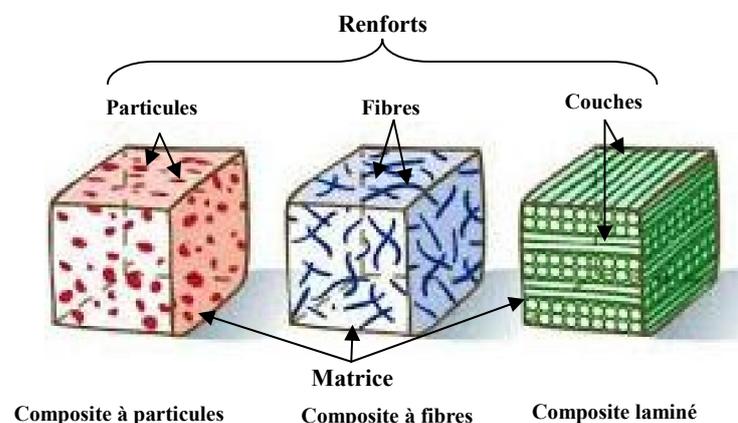


Figure 1.1. Matériaux composites à particules, à fibres et stratifiés.

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

I.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 [3]. Mais pour l'impérieuse nécessité de protection de la santé environnementale, des matrices naturelles ont été utilisées [4]. La Figure I.2 représente une classification des composites selon la nature de la matrice.

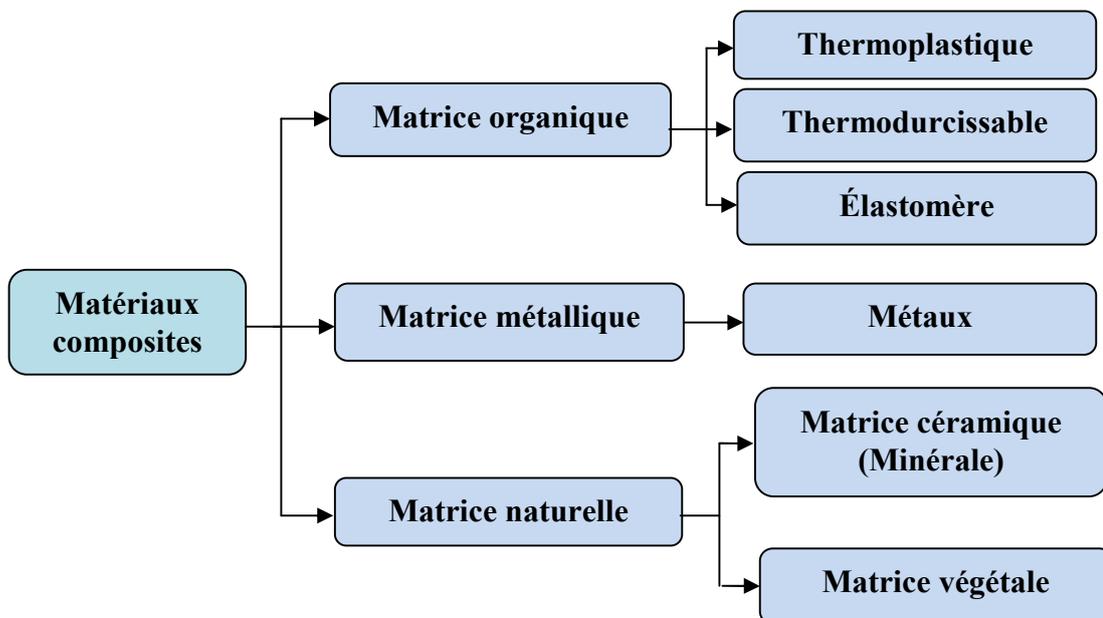


Figure I.2. Classification des composites selon la matrice.

I.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 [5]. La Figure I.3 représente une classification des composites selon la catégorie de renfort.

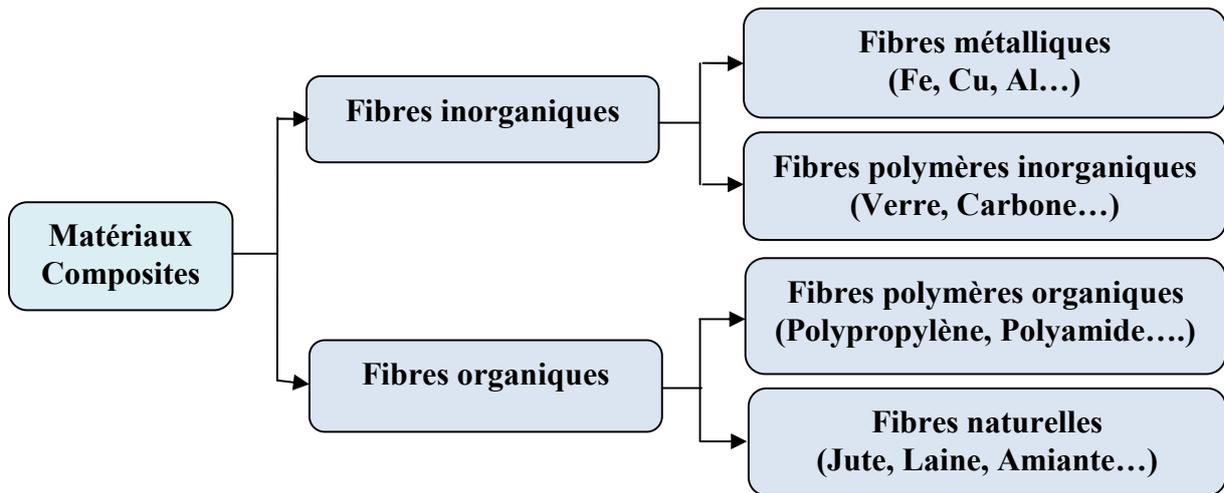


Figure I.3. Classification des composites selon la catégorie du renfort.

I.1.3 Classification selon la forme du renfort

La [Figure I.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 continues (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 [6]. 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 [7].

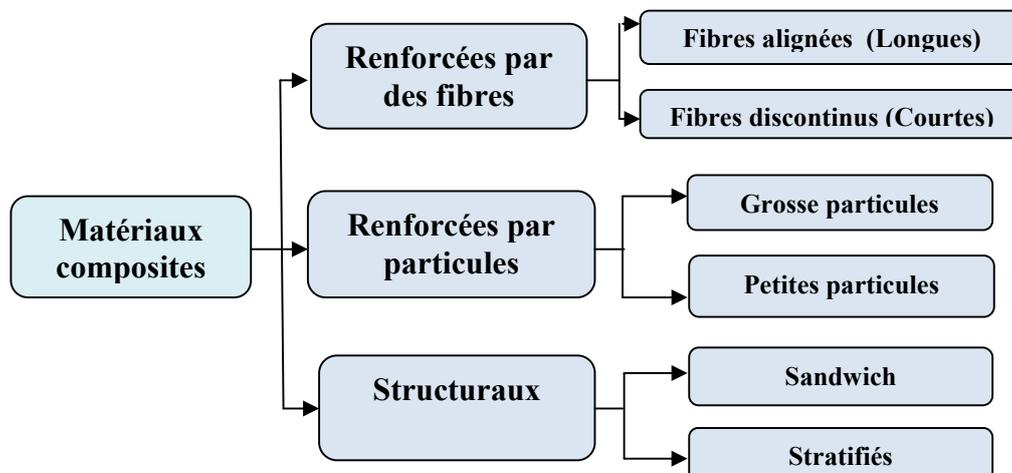


Figure I.4. Classification des composites selon la forme des renforts.

I.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) [1].

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 "éco-composites", "composite bio-sourcé" et "agro-composites" qui s'inscrivent également pleinement dans les concepts émergents de la chimie verte et de chimie la 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 bio-composites sont ainsi composés dans le principe de renforts généralement en fibres naturelles et d'une matrice issue préférentiellement de la biomasse [8].

I.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.

I.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 I.5*) [9, 10].

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

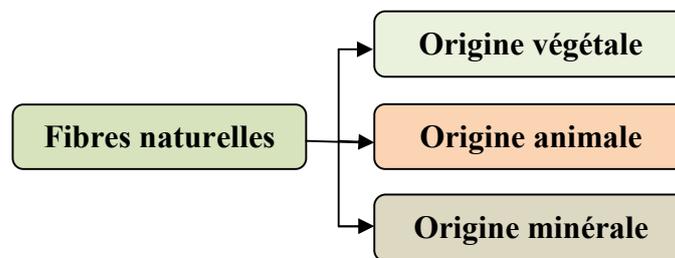


Figure I.5. Classification des fibres naturelles selon l'origine [10].

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 [11]. 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.

I.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 [12].

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

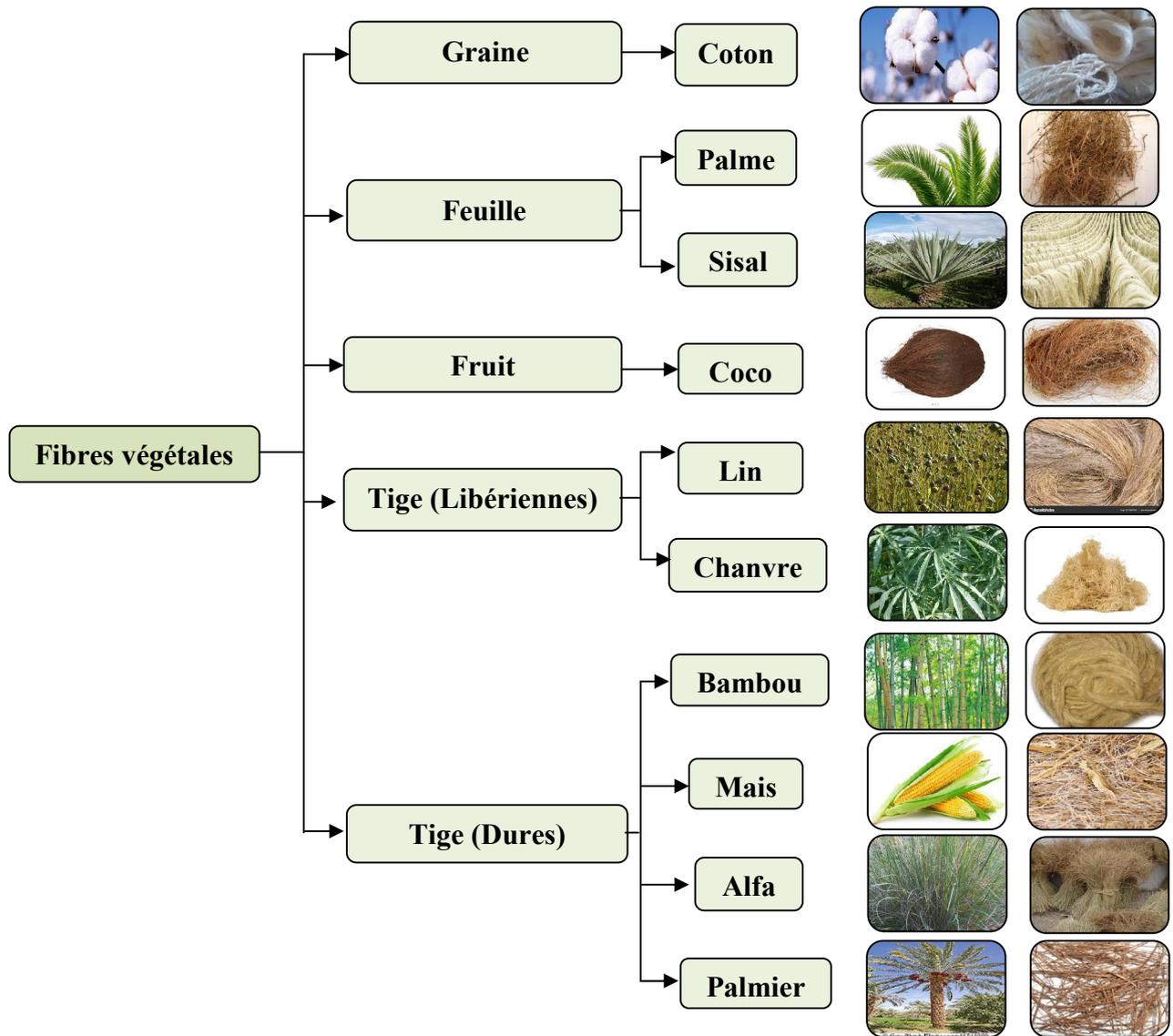


Figure I.6. Classification des fibres végétales selon l'origine.

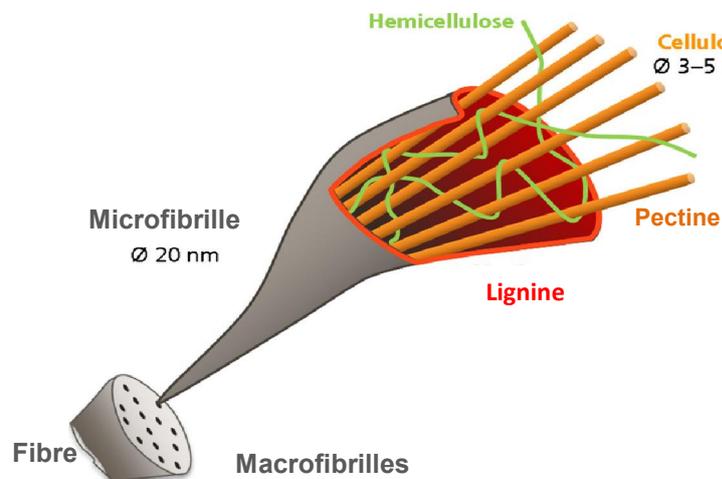


Figure I.7. Structure schématique d'une fibre végétale [13].

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 [14]. 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 I.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 [15].

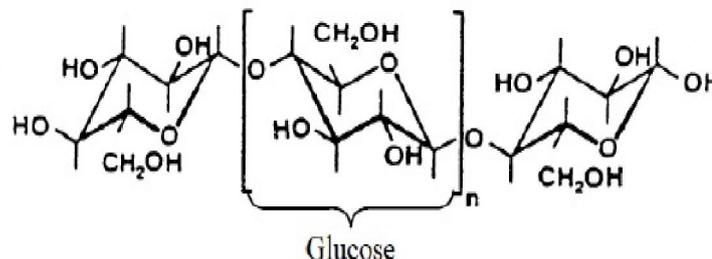


Figure I.8. Molécule de la cellulose [9].

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 [16].

L'hémicellulose est très hydrophile, soluble en milieu alcalin, et facilement hydrolysable dans les acides [15, 17].

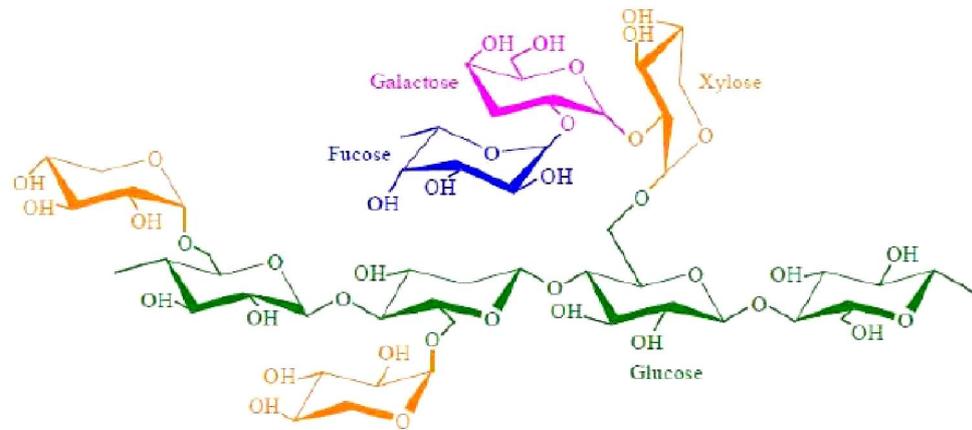


Figure I.9. Structure d'un type de xyloglucane [12].

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 [18].

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 I.10: l'alcool coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylrique. 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 [17].

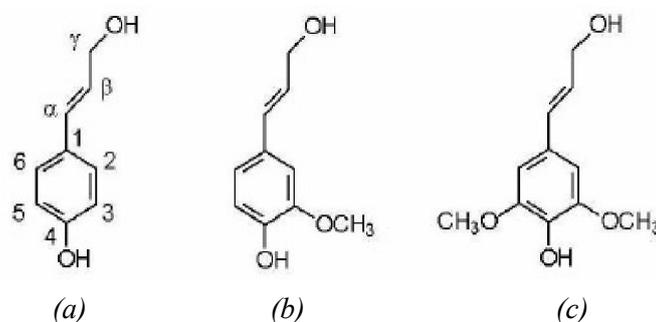


Figure I.10. Structure des précurseurs de la lignine

a) *p*-coumaryl alcohol, b) coniferyl alcohol, c) sinapyl alcohol [17].

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 I.11](#) présente un exemple de structure de pectine [18].

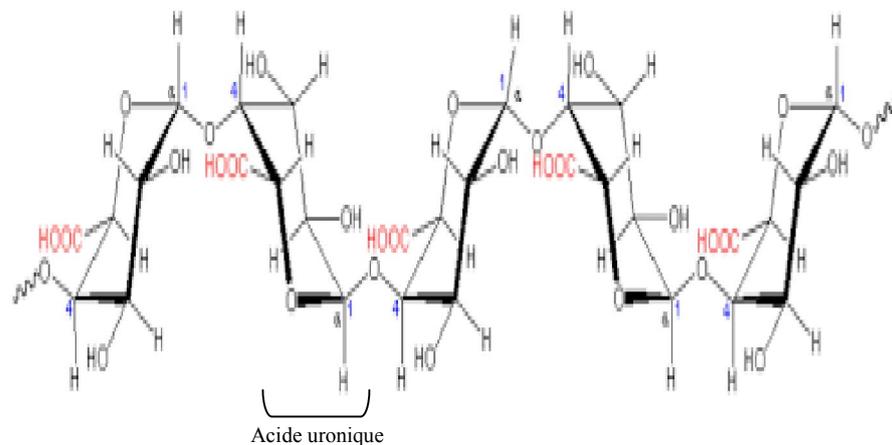


Figure I.11. Structure d'une chaîne de pectine (acide polygalacturonique) [18].

I.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 [10]. La [Figure I.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.

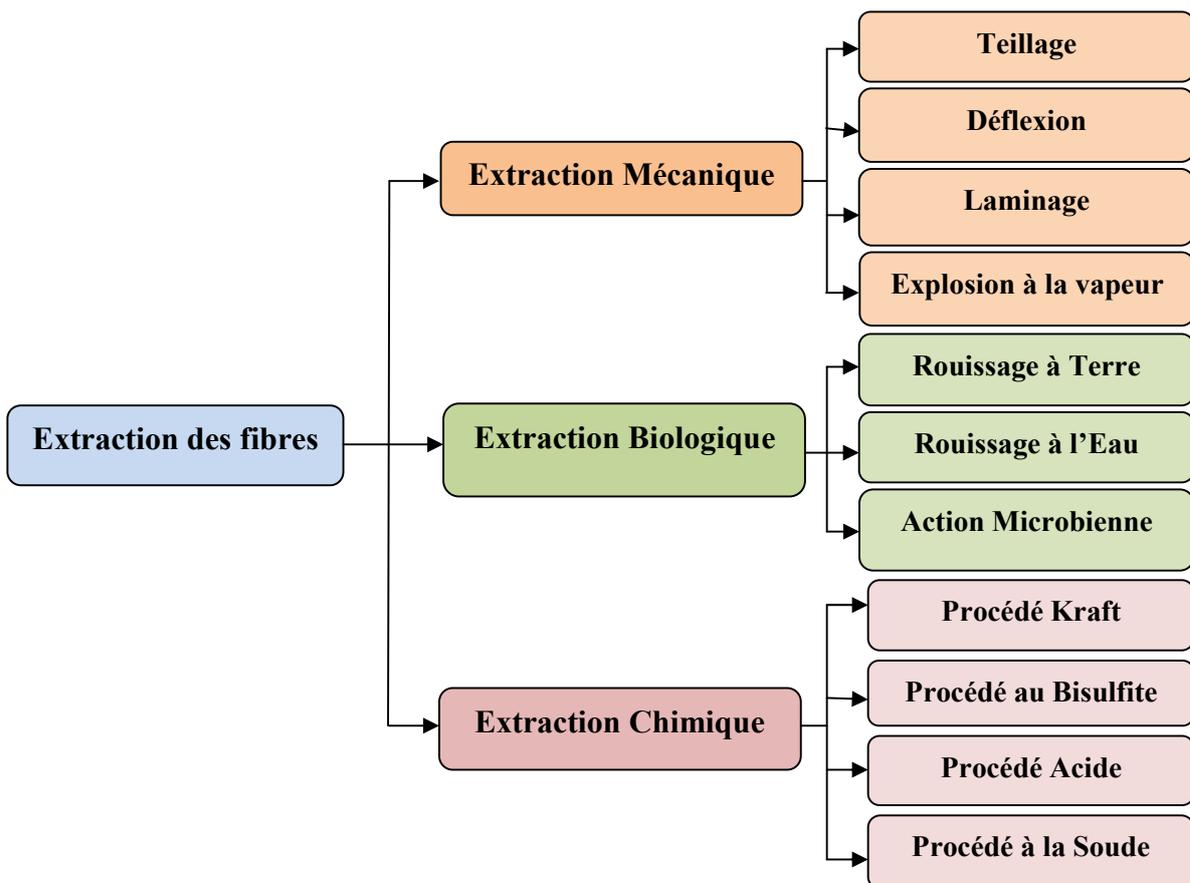


Figure I.12. Différentes techniques d'extraction des fibres végétales.

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 [19-21].

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 I.1](#) présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales comme renfort dans les composites.

Tableau I.1. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales [22-24].

Avantages	Inconvénients
Faible coût	Absorption d'eau
Biodégradable (pour l'environnement)	Biodégradabilité (pour le matériau)
Ressource 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	

I.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*) [24-26].

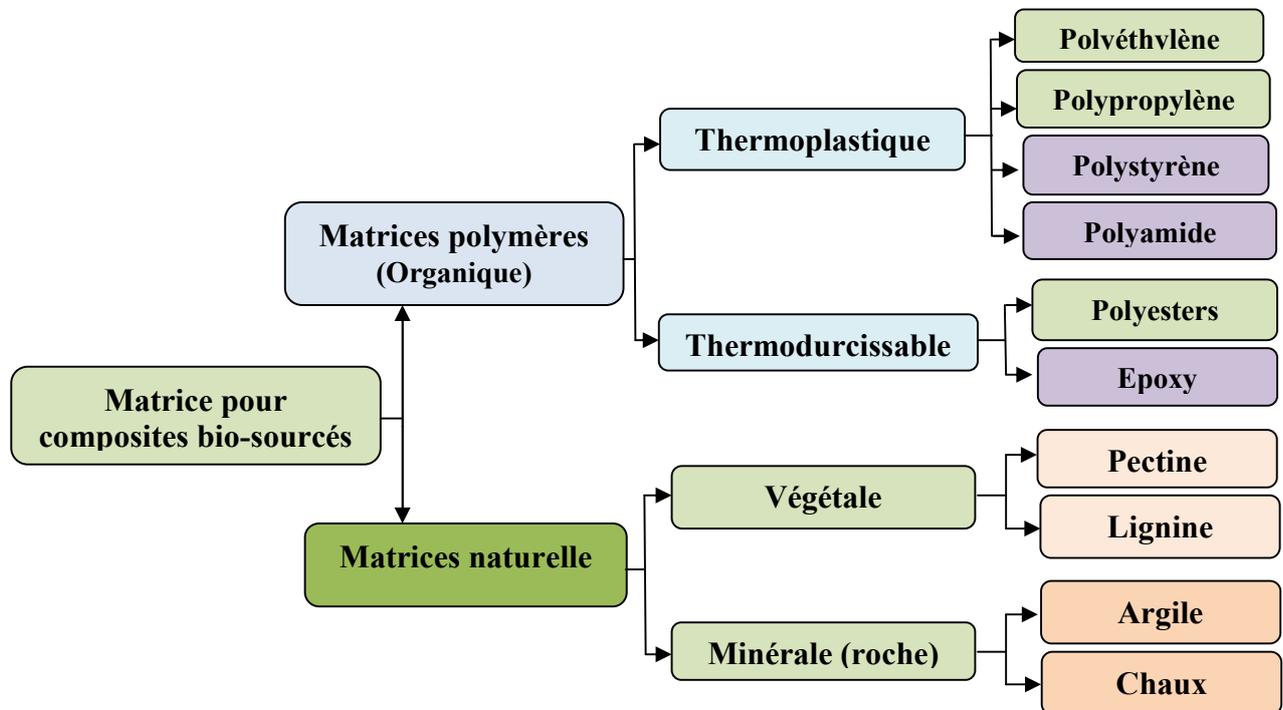


Figure I.13. Matrice utilisée pour les matériaux composites bio-sourcés.

I.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 I.14(b)*) établies de manière irréversible lors de la polymérisation.

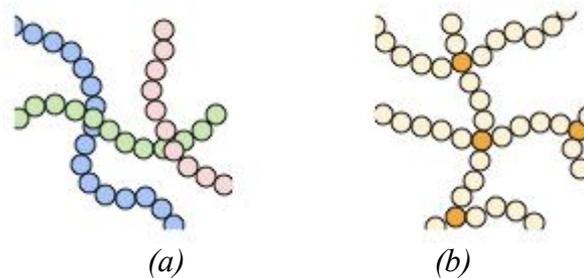


Figure I.14. Structures moléculaires des polymères :

a) polymère thermoplastique, b) polymère thermodurcissable [3].

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 » [3].

I.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.

I.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 I.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) [27]. Ils sont des procédés manuels ou semi-automatisés.

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 [27].

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 [28]. En général, les méthodes de mise en œuvre des bio-composites sont manuelles ou semi-automatisées.

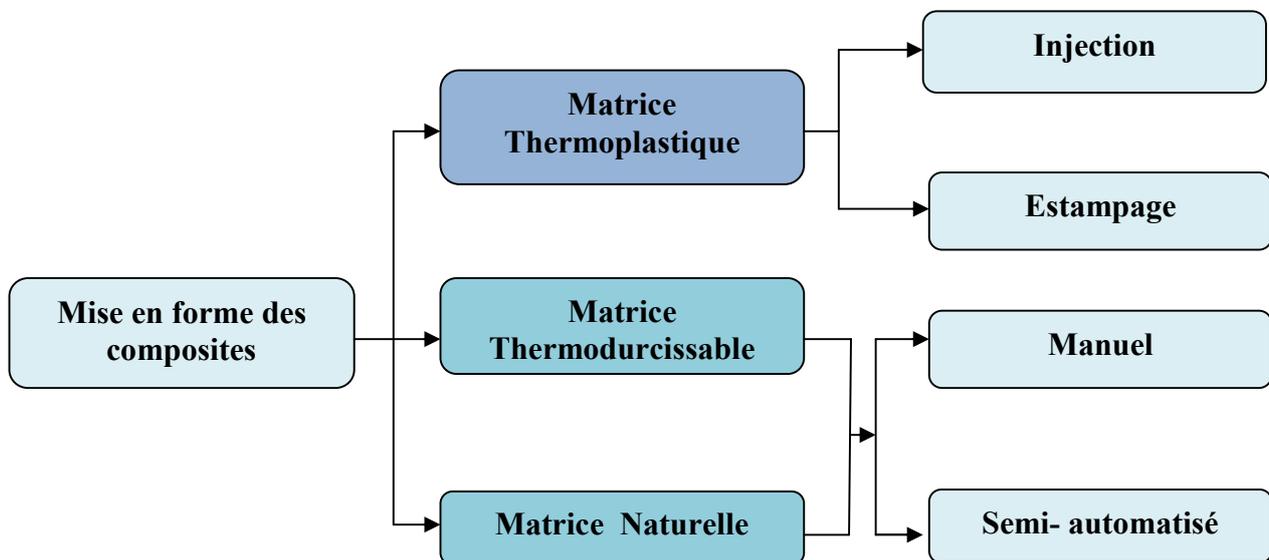


Figure I.15. Mise en œuvre des matériaux composites selon la nature de la matrice.

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 [28].
- **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 semi-produits 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 I.16](#) présente les procédés de mise en œuvre des composites précités.



Figure I.16. Quelques procédés de mise en œuvre des composites.

I.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 [29-32].

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 [33].

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 I.17 montre la répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014.

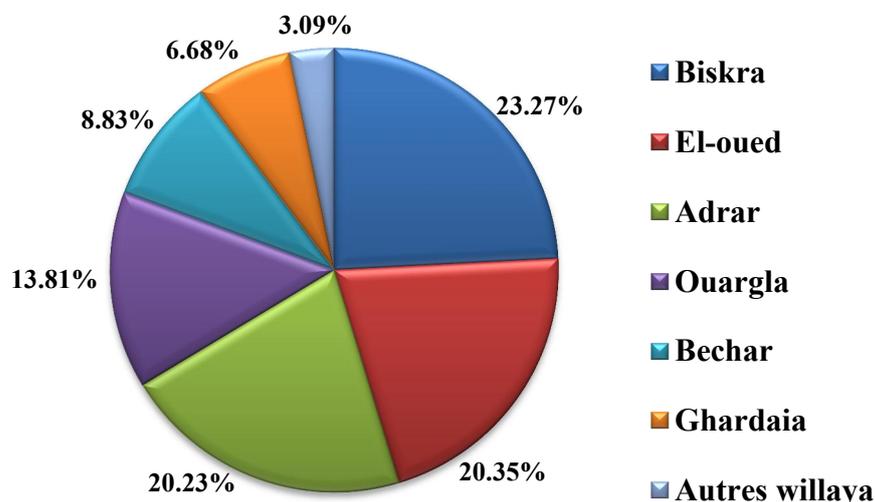


Figure I.17. Répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014.

Source : Données utilisées à partir du tableau 01 de l'annexe 01[33].

Les oasis de palmiers de Biskra sont particulièrement concentrés dans les sept régions de Ziban, comme le montre la Figure I.18 [34].

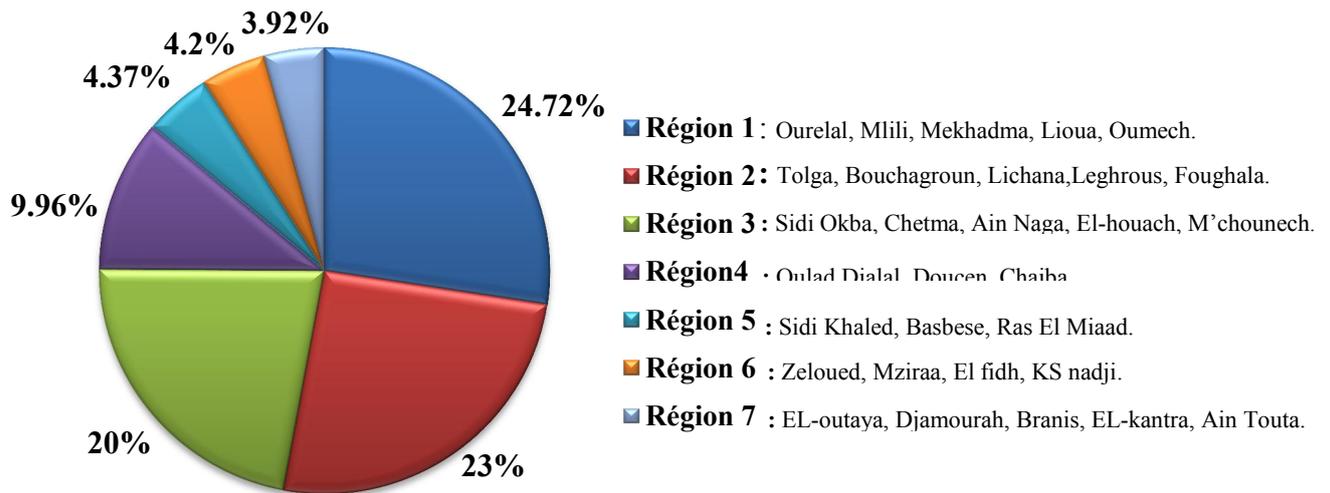


Figure 1.18. Répartition de palmier dattier en région de Biskra.

Source : Données utilisées à partir du tableau 02 de l'annexe 01[33].

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 1.19](#).

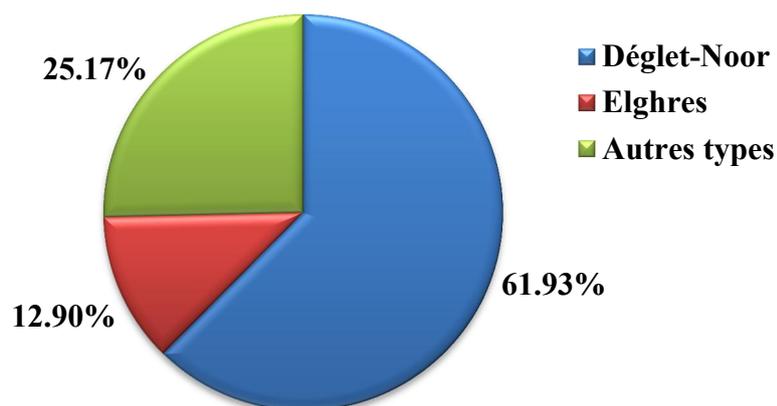


Figure 1.19. Proportion de variétés des palmiers dattiers à Biskra.

Source : Données utilisées à partir du tableau 03 de l'annexe 01[33].

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 I.20](#) présente les constituants principaux du palmier dattier et l'évolution naturelle d'une palme [35-37].

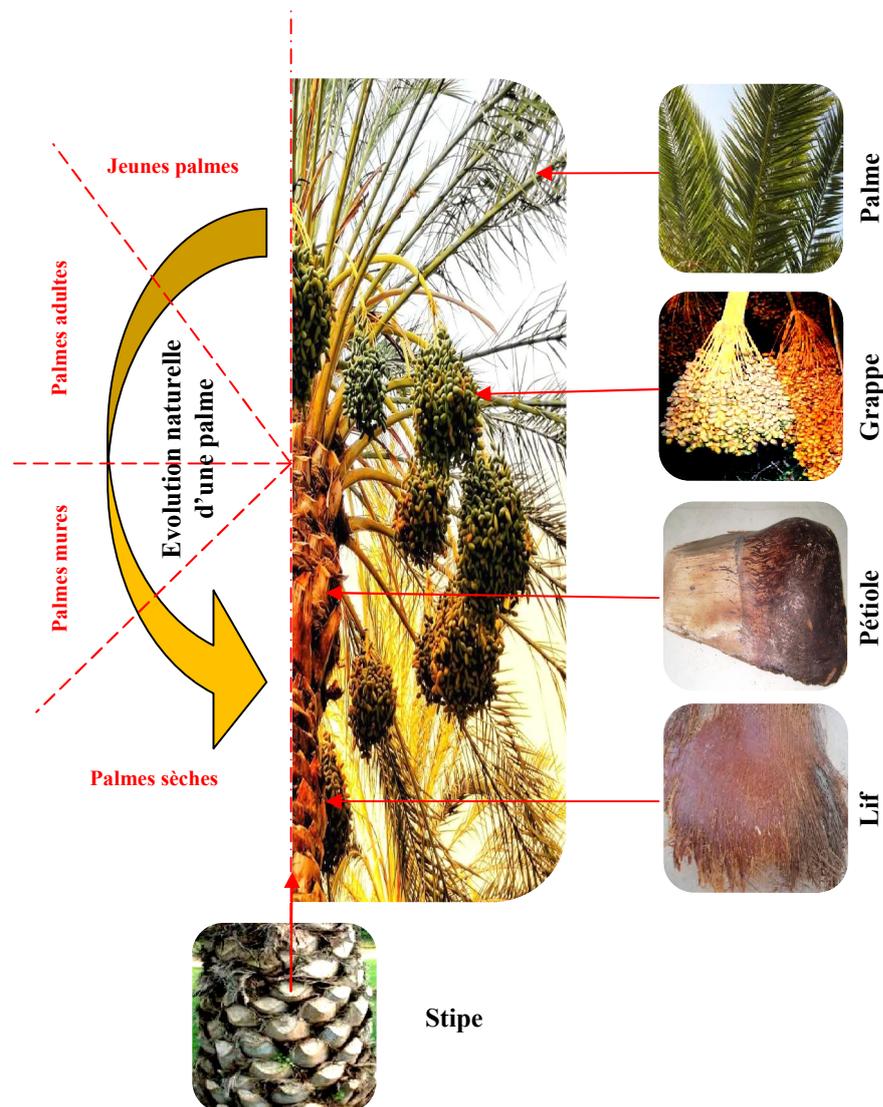


Figure I.20. Différentes parties d'un palmier dattier et l'évolution naturelle d'une palme.

I.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 [29]. 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 I.21](#) présente les différentes parties d'une palme mûre.[38]

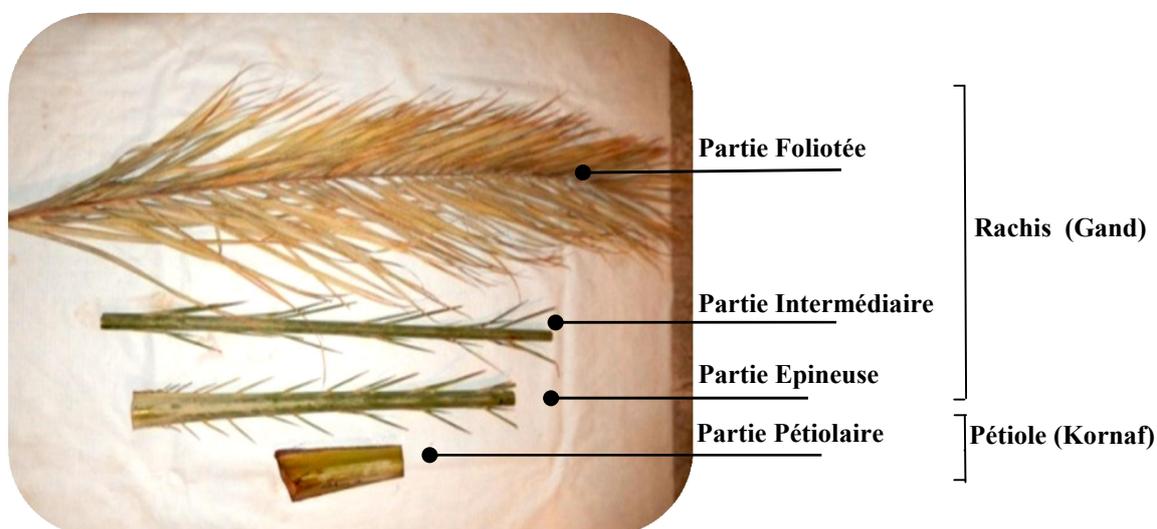


Figure I. 21. Les quatre parties de la palme mûre [38].

I.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 \[36\]](#) sont résumés dans le graphe de la [Figure I.22](#). Ces résultats représentent des moyennes d'au moins trois essais pour chaque élément.

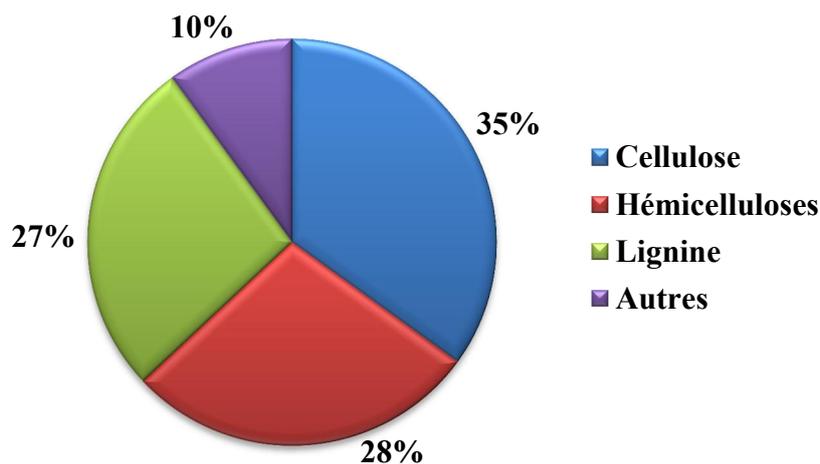


Figure I. 22. Composition chimique des fibres de palmier (% en poids) [36].

I.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 [39] (*Figure I.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, Rebut de dattes, et Lif, ...). Cette quantité de déchets peut atteindre 80 milles tonnes par an dans la seule région de Biskra (Algérie) [40]. Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir de bourgeons et perd un nombre similaire de palmes par dessèchement [29, 39, 40]. Une palme pèse en moyenne 1.4Kg. Le palmier dattier donne en moyenne 15 palmes par an [41]; on dénombre environ 18.4 millions de palmier dattier en Algérie dont 4.3 millions dans la région de Biskra [40]. On peut estimer le total de palmes séchées à environ 382200 tonnes/an en Algérie [38].



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

I.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 I.24 montre certaines applications de ces déchets.

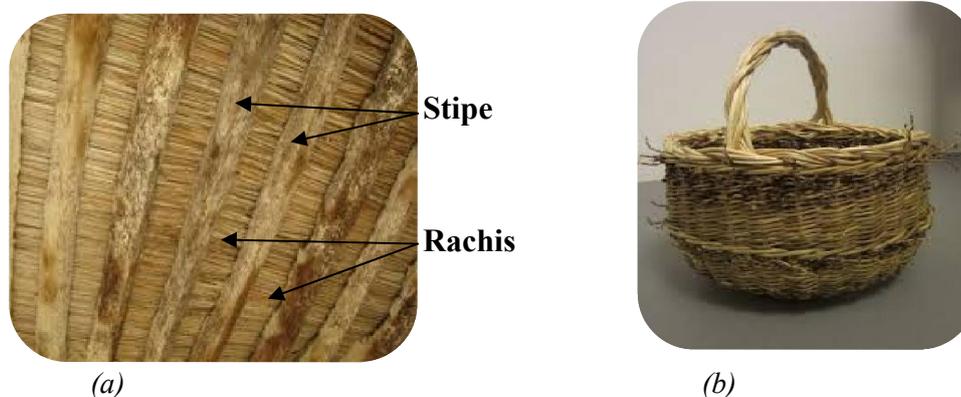


Figure I. 24. Quelques utilisations traditionnelles des déchets de palmier dattier :
a) charpentes de maison, b) panier.

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 I.25). Cette technique est utilisée par de nombreux fabricants industriels dans le monde [42-44]. 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 [45-47]. En général, les utilisateurs ont considéré que le bois et les fibres extraites du palmier ont les mêmes propriétés.



Figure I. 25. Bois MDF à base de palmier dattier.

I.5 Synthèse des travaux réalisés

En ce qui concerne les travaux de recherche réalisés dans le domaine des bio-composite 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.

I.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.

I.5.1.1 Bois

H. Abdel-Rahman et al [48] 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 [49]** 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 [50]** 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 [51] 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 le type de bois, de l'humidité, de la direction des sollicitations, de la densité du bois,....

L'étude de **S. Amirou** [4] 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/cm^3 et 1542 Kg/cm^3 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 [21] 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 / m^3 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 $200 \text{ }^\circ\text{C}$. 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 composite légers et à bonne isolation thermique.

Une étude expérimentale a été menée par **M. Tlijani** [52] sur les propriétés thermo-physiques 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 [53]** 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.

I.5.1.2 Fibres

L'étude de **Y. Djebbloun et al [35]** 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 [54] 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 [55] 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 [56]** 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 [57] 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 élimine 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 [58] 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/cm^3) 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 [59]** 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 / m^3 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** [60] 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.

I.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.

I.5.2.1 Composite à matrice thermodurcissable

Dans l'étude de **A. S. Hammood** [56], 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** [36], 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. Djeboun [24] 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 [61] 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 composites 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.

I.5.2.2 Composite à matrice thermoplastique

Y. Djeboun [24] a étudié les propriétés mécaniques de composites à base de matrice thermoplastique (polypropylènes) 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 [62] 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 [63] 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 [64]** 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 [65] 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.

1.5.2.3 Composite à particules

T. Masri et al [66] 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 0.78GPa et 2.84MPa, 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 [4]** 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 monocouche 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 obtenue 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 obtenues par **G. Nemli et al [67]**.

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 [68] 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 résultants 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 [69-71], 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.

1.6. 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 [72] (*Figure 1.26*). 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 [28].

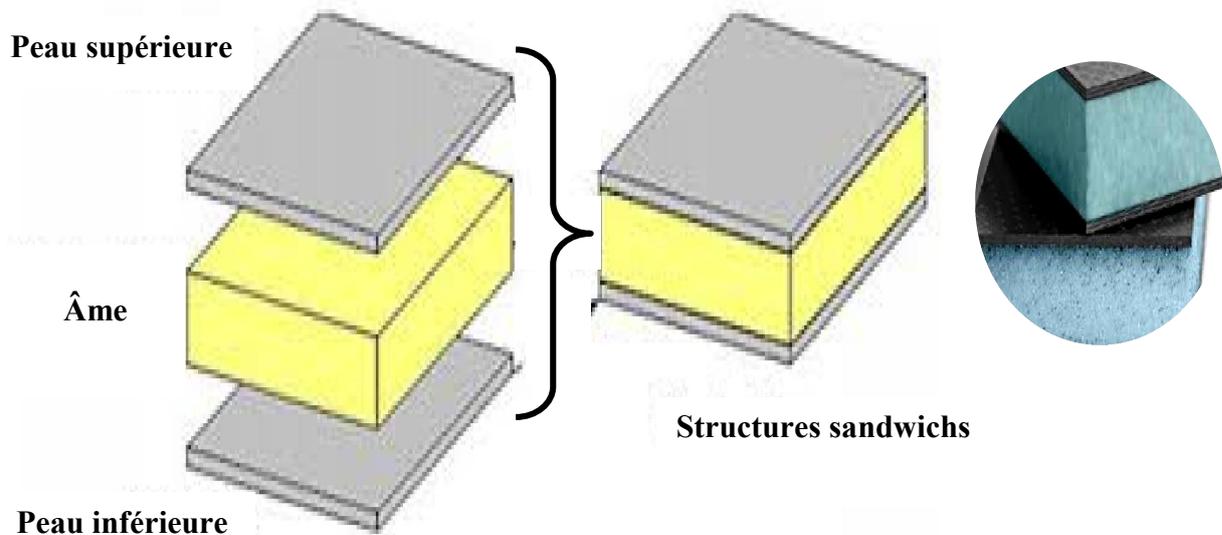


Figure I. 26. Schéma représentatif d'une structure sandwich.

I.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 [73, 74].

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).

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

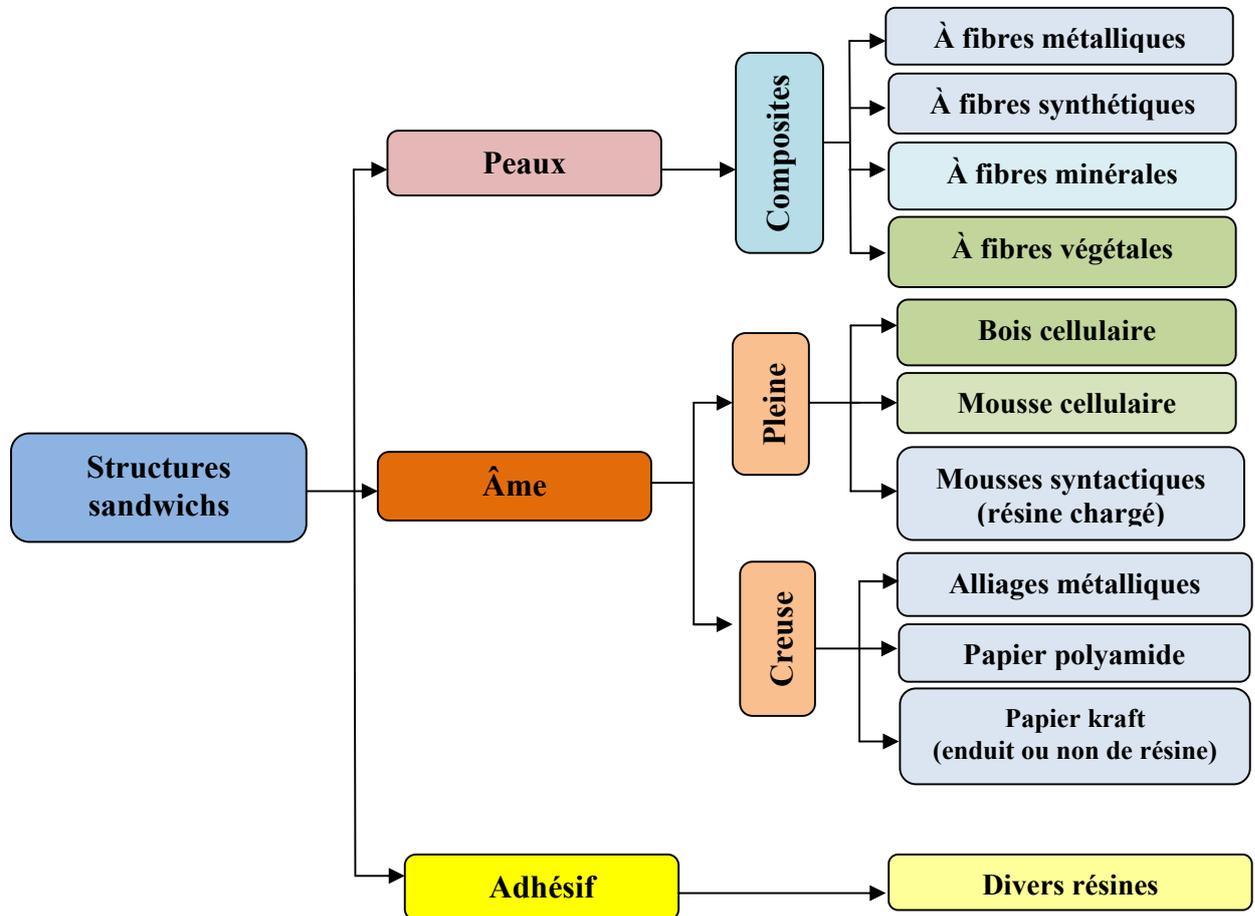


Figure I.27. Classification des structures sandwichs selon la nature de matériau utilisé.

I.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 [75]. 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 intérieures des cabines et les coques des cabines de trains à grande vitesse (TGV) [76, 77]. Les structures sandwichs sont également utilisées dans le domaine du sport [78].

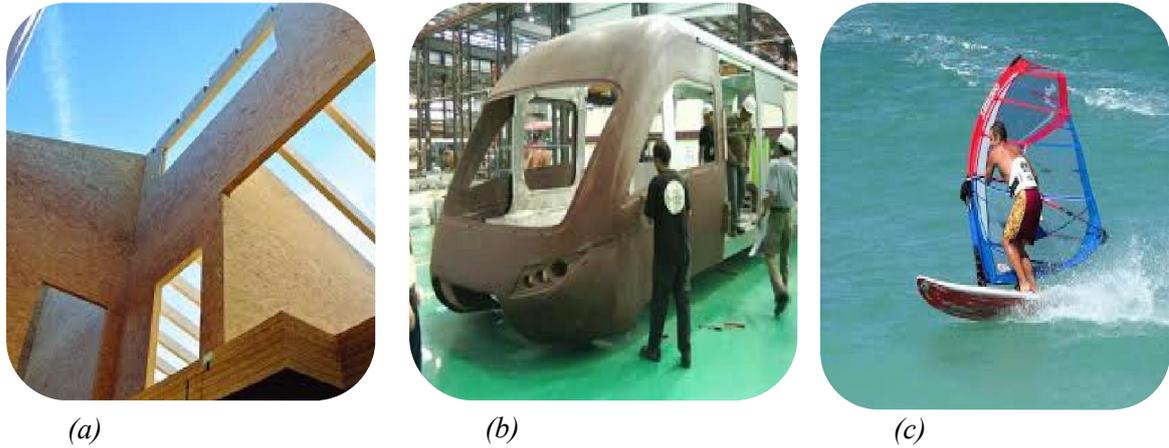


Figure I.28. Quelques utilisations de structure sandwich :
a) bâtiment, b) transport, c) sport.

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 ont été déjà utilisés dans l'industrie des composites à base de bois. On peut citer certains des travaux réalisés, tels que l'utilisation du Lin par [N. El Hajj et al \[79\]](#) pour l'élaboration d'agro-composites 100% végétaux, selon des différentes procédures de préparation. Pour l'élaboration de quatre types de panneaux sandwichs [N. Lakreb \[80\]](#) a utilisé le bois de pin dans les peaux et du liège aggloméré dans le cœur 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 \[74\]](#). 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 \[52\]](#) et les composites de polystyrène expansé (EPS) étudiés par [T. Masri \[81\]](#).

I.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 composite 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

l'amélioration des propriétés mécaniques, physiques et thermiques des panneaux de particules.

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.

Cette thèse de doctorat porte sur l'étude de matériaux composés bio-sourcés à base de fibres végétales extraites de feuilles (palme) qui feront l'objet d'une étude détail avant leurs utilisations comme renfort. Les techniques choisies pour l'extraction des fibres dans cette étude sont les techniques mécanique et biologique. Concernant les matrices sélectionnées pour la préparation des bio-composites, trois types seront utilisées: l'une thermoplastique (polypropylène (C₃H₆)_n), la deuxième thermodurcissable (époxy) et la troisième naturelle à base de lignine. Nous utiliserons deux procédé pour la préparation des bio-composites à base de différentes matrices, à savoir le moulage à contact manuel et le moulage par compression SMC.

Références

- [1] 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.
- [2] S. M. Lee, *Dictionary of composite materials technology*: CRC Press, 1995.
- [3] L. Gendre, "Les grandes familles de matériaux composites," *ENS CACHAN, Université de PARIS-SACLAY, France, 2011*.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] J. M. Berthelot, *Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures*, 5^e édition Tec & Doc, Paris, France. ed, 2012.
- [7] 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.
- [8] A. Błędzki, A. Jaskiewicz, 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.
- [9] V. V. D. Thi., "Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non," thèse de doctorat, Université de Grenoble. France, 2011.
- [10] C. Baley, *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*: Ed. Techniques Ingénieur, 2005.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] C. Álvarez, F. M. Reyes-Sosa, and B. Díez, "Enzymatic hydrolysis of biomass from wood," *Microbial biotechnology*, vol. 9, pp. 149-156, 2016.
- [14] J. Biagiotti, D. Puglia, and J. M. Kenny, "A review on natural fibre-based composites-part I: structure, processing and properties of vegetable fibres," *Journal of Natural Fibers*, vol. 1, pp. 37-68, 2004.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] H. Ville, "Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non," thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Alès, France, 2011.
- [18] S. Bouzouita, "Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel," thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon. Français. , 2011.
- [19] 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.

- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] A. Mokhtari, "Modélisation du comportement et de la rupture des composites à matrices thermoplastiques," thèse de doctorat, Université de Tizi Ouzou, Algérie, 2016.
- [23] A. Bledzki and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres," *Progress in polymer science*, vol. 24, pp. 221-274, 1999.
- [24] Y. Djebbloun, "Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales," thèse de doctorat en Sciences, Université de Biskra, Algérie, 2018.
- [25] F. M. L. Rekbi, "Contribution à l'analyse de l'endommagement des matériaux composites," thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2016.
- [26] R. Boubeker, "Etude Expérimentale et Numérique du Comportement des Plaques Trouées en Matériaux Composites," Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2016.
- [27] 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.
- [28] ANFA, "Les matériaux composites," *Dossier pédagogique, Dossier créé avec la collaboration de Marc Marzano - Action Composite, Pascal Celle - GNFA, 2014.*
- [29] P. Munier, "Le palmier-dattier," *Techniques agricoles et productions tropicales*, vol. 24, pp. 221, 1973.
- [30] 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.
- [31] P. Munier, "Le problème de l'origine du palmier-dattier et l'Atlantide," *Fruits*, vol. 29, pp. 235-240, 1974.
- [32] D. Fernandez, "Sciences de la vie ED 167 Biologie des systèmes intégrés, Agronomie, Environnement (BSIAE)," thèse de doctorat, Université Toulouse, France, 2006.
- [33] 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.
- [34] Direction Régionale Agriculture Biskra "Bilan de campagne dattiere", Algérie, 2016/2017.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] A. Nourani, A. Kadri, Z. Benguiga M. Mehenni, A. Salem, and K. Ferhat, "Réalisation d'un pollinisateur du palmier dattier," *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, vol. 5, 2017.
- [38] 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.
- [39] G. Peyron, *Cultiver le palmier-dattier*, 2000.

- [40] Itdas, "Rapport sur la situation du secteur agricole," *Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne*, Biskra, Algérie, 2012.
- [41] 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.
- [42] N. Alp and N. Iskanderany, "Manufacture of Chipboard Panels from Indigenous Date Palm Bioma," *second annual meeting for scientific research, Arabie saouditethe* 2003.
- [43] T.Masri, A.Benchabane, and H.Ounis, "Matériaux à base des déchets de palmier dattier(Phoenix Dactylifera) et de polyrène," *DZ patent, App.160159,10-04-2016, Algeria*.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] T. Guettaf Temam, "Caractérisation Structurale et mécanique du Bois de la Grappe du Palmier Dattier " thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2017.
- [51] 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.
- [52] M. Tlijani, "Contribution à la caractérisation thermophysique de matériaux bio-isolants: valorisation des déchets de bois de palmier," thèse de doctorat, Université Paris-Est, France, 2016.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.

- [57] E. A. Elbadry, "Agro-Residues: Surface Treatment and Characterization of Date Palm Tree Fiber as Composite Reinforcement," *Journal of Composites*, vol. 2014, 2014.
- [58] 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.
- [59] 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 hot-dry climate," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, pp. 554-564, 2005.
- [60] 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.
- [61] T. Alsaeed, 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.
- [62] K. M. Zadeh, D. Ponnammam, 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.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] P. Widsten and A. Kandelbauer, "Adhesion improvement of lignocellulosic products by enzymatic pre-treatment," *Biotechnology Advances*, vol. 26, pp. 379-386, 2008.
- [72] C. Binetruy, "Structures sandwiches," *Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites, AM5141 VI*, 2008.

- [73] 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.
- [74] H. Djemai, "Contribution à l'étude de l'endommagement dans les matériaux composites sandwichs," thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2017.
- [75] C. Abdenacer, "Etude de la performance des matériaux composites sandwichs-Application en Fatigue," Thèse de doctorat, Université BM Annaba, Algérie, 2012.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] 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.

II *Caractérisation physico-mécanique de bois et des fibres de palmier dattier*

II.1 Présentation des matériaux	50
II.1.1 Préparation des éprouvettes	51
II.1.1.1 Eprouvettes des bois fibreux	51
II.1.1.2 Eprouvettes de fibres	53
II.1.2 Morphologie de la palme	54
II.1.2.1 Pétiole	55
II.1.2.1 Rachis	55
II.1.2.3 Fibres	56
II.2 Caractérisation physico-mécanique	58
II.2.2 Propriétés physiques	58
II.2.2.1 Pourcentage volumique de fibres et du lignine dans la palme	58
II.2.2.2 Méthode de diffraction des rayons X (DRX)	58
II.2.2.3 Analyse thermique (ATG et DTG)	59
II.2.2.4 Masse volumique du bois et de la fibre	60
II.2.2.5 Taux d'humidité de différentes parties de la palme	61
II.2.3 Propriétés mécaniques	62
II.2.3.1 Essai de traction longitudinale du bois (TL)	62
II.2.3.2 Essai de compression du bois	63
II.2.3.3 Essai de flexion trois points du bois (F3P)	64
II.2.3.4 Essai de traction et torsion des fibres	64
II.3 Résultats et discussion	67
II.3.1 Propriétés physiques	67
II.3.1.1 Pourcentage volumique de fibres et du lignine dans la palme	67
II.3.1.2 Masse volumique du bois et de la fibre	68
II.3.1.3 Méthode de diffraction des rayons X (DRX)	69
II.3.1.4 Analyse thermique (TGA et DTG)	71
II.3.1.5 Taux d'humidité de différentes parties de la palme	71
II.3.2 Propriétés mécaniques	73
II.3.2.1 Essai de traction longitudinale du bois (TL)	73
II.3.2.2 Essai de compression du bois	74
II.3.2.3 Essai de flexion trois points du bois (F3P)	75
II.3.2.4 Essai de traction des fibres	79
II.4 Conclusion	82
Références	83

La disponibilité en quantité importante des déchets renouvelables des palmiers dattiers, décrite au chapitre I, ont suscité l'intérêt des chercheurs en suggérant de les utiliser comme renfort dans les matériaux composites et les structures d'isolation. Ceci nécessite la caractérisation physico-mécanique du bois et des fibres extraites des différents constituants du palmier dattier (*Figure I.20*).

L'objectif de cette partie de l'étude est la caractérisation physico-mécanique de bois fibreux et des fibres d'une composante importante du palmier dattier qui est la palme mûre.

La caractérisation physique a concernée la masse volumique des fibres et de la matrice végétale (Lignine) par deux méthodes : la technique de la photo-microscopie (Light microscopie) et la méthode de diffraction de rayon X (DRX). D'autre part, le taux de ces deux composantes dans le bois ainsi que le taux d'humidité dans les différentes parties de la palme. Les résultats obtenus de ses propriétés physiques et les l'analyse thermique (ATG et DTG) de la fibre de palmier dattier ont permis de les comparer avec d'autres fibres et bois de palmier dattier présentés dans plusieurs références bibliographiques.

Les essais mécaniques sont réalisés pour déterminer les caractéristiques mécaniques du bois fibreux et des fibres extraites des deux parties de la palme après son séchage. Ces propriétés mécaniques ont permis également de situer ces nouveaux types de bois fibreux parmi d'autres résultats de la littérature scientifique et d'envisager de les utiliser dans la mise en œuvre des matériaux composites et dans des éléments d'isolation.

Avant la caractérisation de bois et les fibres de la palme, il semble nécessaire de présenté la morphologie des différentes parties de la palme, telles que, le pétiole et le rachis.

II.1 Présentation des matériaux

Le matériau de cette étude est extrait des palmes mûres d'un palmier dattier type Deglet-Nour de la région de Biskra (Algérie). L'âge du palmier est d'environ 50 ans. Les palmes utilisées sont séchées pendant six mois sous des conditions naturelles avant d'effectuer les tests de caractérisation.

La palme est décomposée essentiellement en deux parties, le *Pétiole* et le *Rachis*. L'étude de la morphologie et la caractérisation physico-mécanique de la palme se sont focalisées alors sur le bois fibreux et les fibres de ces deux parties (*Figure II.1*).

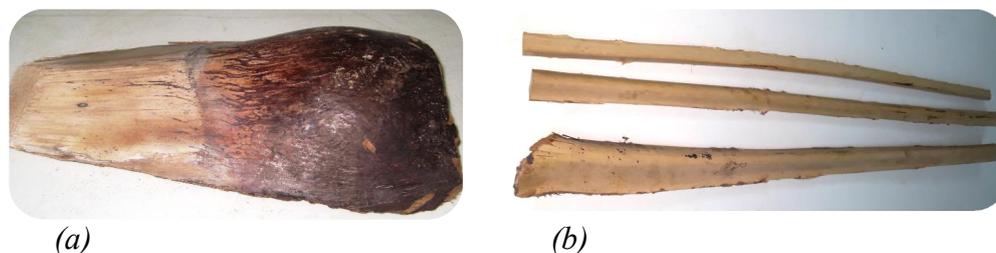


Figure II.1. Parties de la palme :

a) pétiole ; b) rachis.

II.1.1 Préparation des éprouvettes

Pour la préparation des échantillons, des palmes du même palmier dattier ont été découpées en quatre parties, notées de I à IV (Figure II.2). Quatre échantillons sont découpés de chaque partie de la palme. Les essais mécaniques et les tests physiques ont été réalisés sur des éprouvettes issues du bois fibreux et les fibres du pétiole et d'autres issues du bois et les fibres du rachis de la même palme.

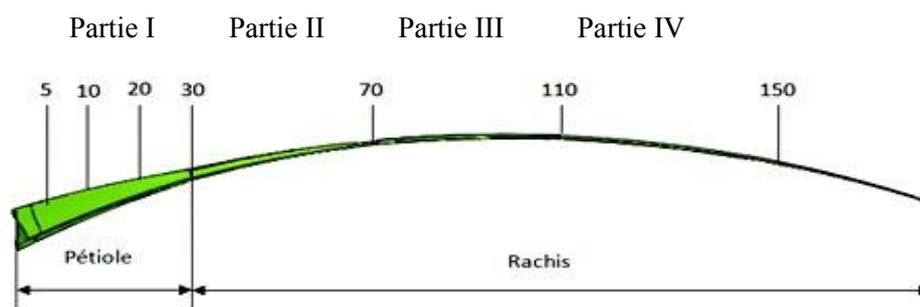


Figure II.2. Zones de coupe.

Les éprouvettes des tests physiques et mécaniques du bois fibreux et des fibres de la palme sont mesurées sur plusieurs échantillons pris le long de la longueur.

II.1.1.1 Eprouvettes des bois fibreux

Les éprouvettes du bois de pétiole (BP) utilisés pour les essais de traction sont de forme haltère selon la norme **NF ISO 527**. Elles ont été usinées à l'aide d'une fraiseuse à commande numérique. La position des fibres est longitudinale. La largeur des plaques de bois du pétiole ne permettait pas de découper des éprouvettes dans le sens transversal. (Figure II.3).

Les éprouvettes (BP) des essais de compression de dimensions $(30 \times 30 \times 30) \text{ mm}^3$ dans les deux directions longitudinale (CL) et transversale (CT) ont été préparées au moyen

de plaques de bois de pétiole, les éprouvettes (BP) de test de flexion statique sont de dimensions (260x30x20) mm³.

Lors de la préparation des éprouvettes du bois de rachis (BR) pour les tests de flexion trois points, la partie du rachis (partie II à IV) est découpée en trois zones (BR1, BR2, BR3) avec trois éprouvettes pour chaque zone. Les éprouvettes sont de dimensions (140x15x7) mm³.

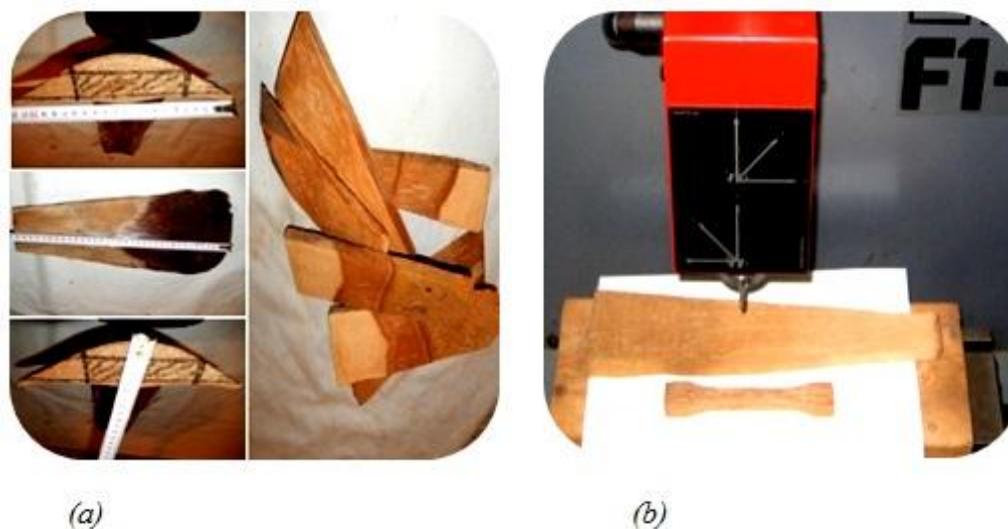


Figure II.3. *Éprouvettes d'essai de traction :*

a) préparation des plaques (BP), b) découpage des éprouvettes.

La **Figure II.4** présente les différentes éprouvettes de bois fibreux utilisés pour la mesure des propriétés physiques et la caractérisation mécanique.

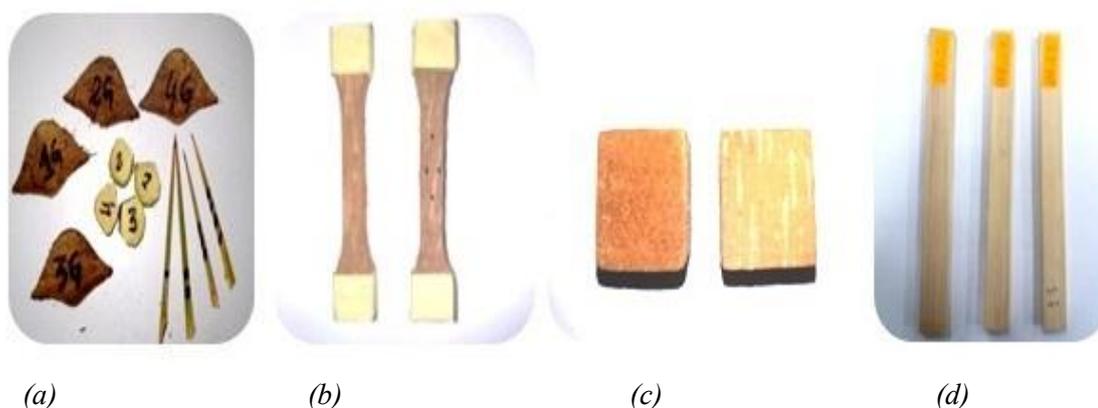


Figure II.4. *Spécimens de bois : a) échantillons des tests physiques, b) éprouvette haltère de l'essai de traction du bois(BP), c) éprouvette de l'essai de compression du bois(BP), d) éprouvette de l'essai de flexion du bois(BR).*

II.1.1.2 Echantillons de fibres

Pour déterminer ses propriétés physiques, les fibres sont prises de la même ligne suivant la longueur de la palme [Figure II.5](#). La longueur de chaque fibre est de 40 à 50 cm.

La préparation des échantillons des fibres pour les essais mécaniques nécessite un traitement plus complexe. L'extraction mécanique des fibres à l'aide d'un outil métallique a été précédée par l'utilisation de la technique de rouissage à l'eau inspirée des travaux de [C. Baley \[2\]](#). Cette technique consiste à tremper des morceaux de bois fibreux de pétiole et de rachis dans un bain d'eau pendant une semaine à dix jours. Les morceaux de 30 à 40 cm de bois fibreux de rachis ont été ensuite maintenus dans un sac en plastique noir pendant 30 à 45 jours jusqu'à ce que les champignons et les bactéries soient stimulés sur tous les morceaux de bois. Cette technique biologique permet de faciliter le processus mécanique d'extraction [\[3\]](#). Ensuite, on soumet plusieurs fois les fibres obtenues de différent diamètre à un lavage à l'eau distillée et au séchage dans une étuve (BINDER) à une température de $110\pm 1^\circ\text{C}$ pendant une durée de 180 minutes. ([Figure II.6](#)).

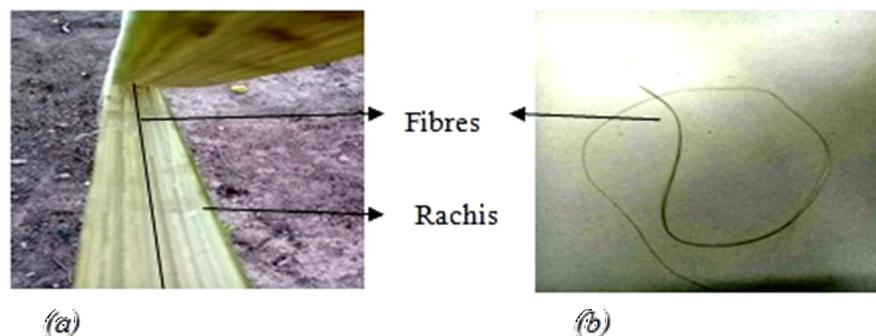


Figure II.5. Processus d'extraction des fibres des tests physiques :
a) ligne d'extraction de fibre, b) fibres.



Figure II.6. Processus d'extraction des fibres des tests mécaniques :
a) rouissage, b) séchage, c) lavage, d) fibres.

L'élimination de la matrice végétale (Lignine) de la surface latérale de la fibre a été vérifiée par observation microscopique. La **Figure II.7** présente l'observation microscopique de la surface de fibres avant et après lavage obtenue par le microscope optique (hund type H600 AM) (**Figure II.11(a)**).

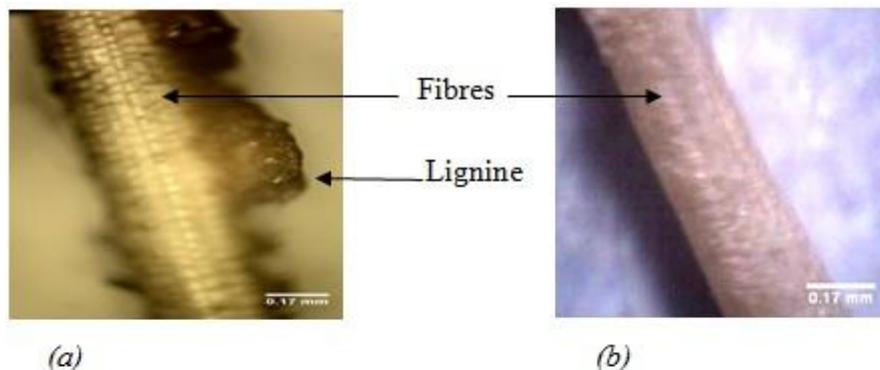


Figure II.7. *Fibres extraite de la palme (x200) :*
a) avant lavage, b) après lavage.

Les fibres ont été classées suivant deux catégories suivant leur position le long de la palme, la fibre de la partie pétiolaire (*FP*) et celle de la partie du rachis (*FR*).

II.1.2 Morphologie de la palme

Pour l'étude morphologique du bois de la palme, les observations ont été effectuées par l'utilisation d'un microscope optique numérique de type (DigiBlue_QX5_QSG). Le microscope permet d'agrandir les images 10 fois, 60 fois et 200 fois. L'appareil est connecté à un ordinateur pour enregistrer des images (**Figure II.8**).



Figure II.8. *Microscope optique digital (DigiBlue QX5 QSG).*

II.1.2.1 Pétiole

La Figure II.9 présente la structure morphologique du bois du pétiole (BP) suivant trois coupes selon la direction de l'axe de la palme, Transversale (CT), longitudinale (CL) et longitudinale tangentielle (CLT). On observe que la taille de la section de la palme varie tout au long de la palme et que la direction des fibres suit la variation de la section avec une diminution de leur section Figure II.10. L'observation microscopique de la section transversale de la palme montre la faible concentration des fibres par rapport à celle de la matrice végétale (Lignine).

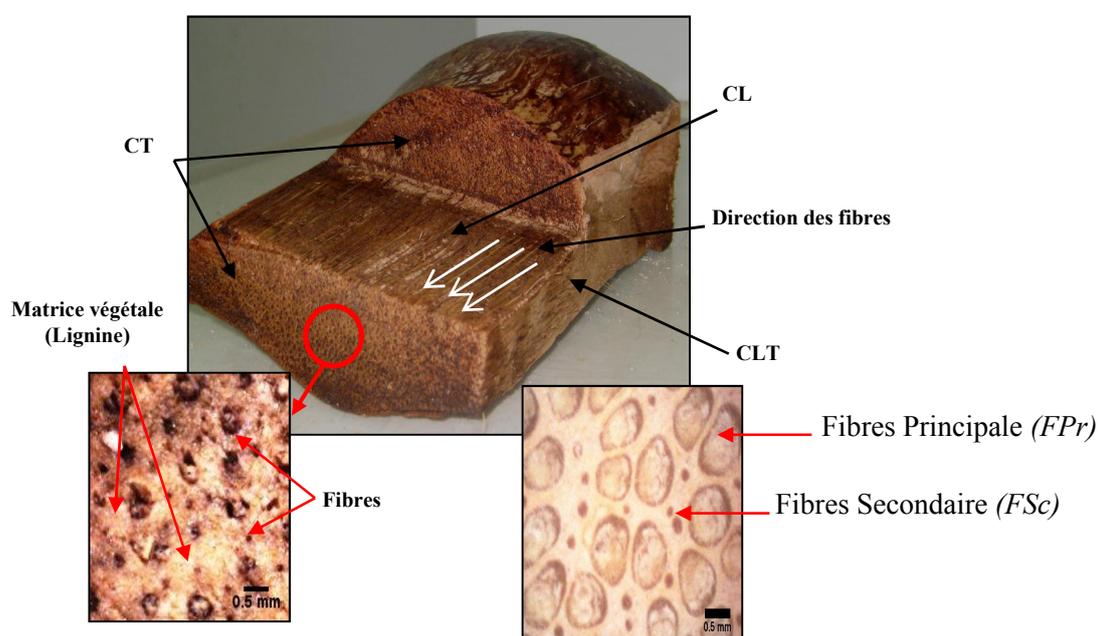


Figure II.9. Présentation structurale du bois du pétiole (BP) avec une coupe transversale (x10) et (x60)

II.1.2.2 Rachis

La Figure II.10 présente une coupe longitudinale d'une partie du bois du rachis de 60 cm de longueur et d'une largeur variante entre 10 à 4.5 cm. L'observation microscopique des coupes transversales (CT) des différentes zones du rachis obtenues de la même ligne le long de la palme, montre que la section des fibres et le pourcentage de la matrice végétale (Lignine) diminuent avec une augmentation de la concentration des fibres.

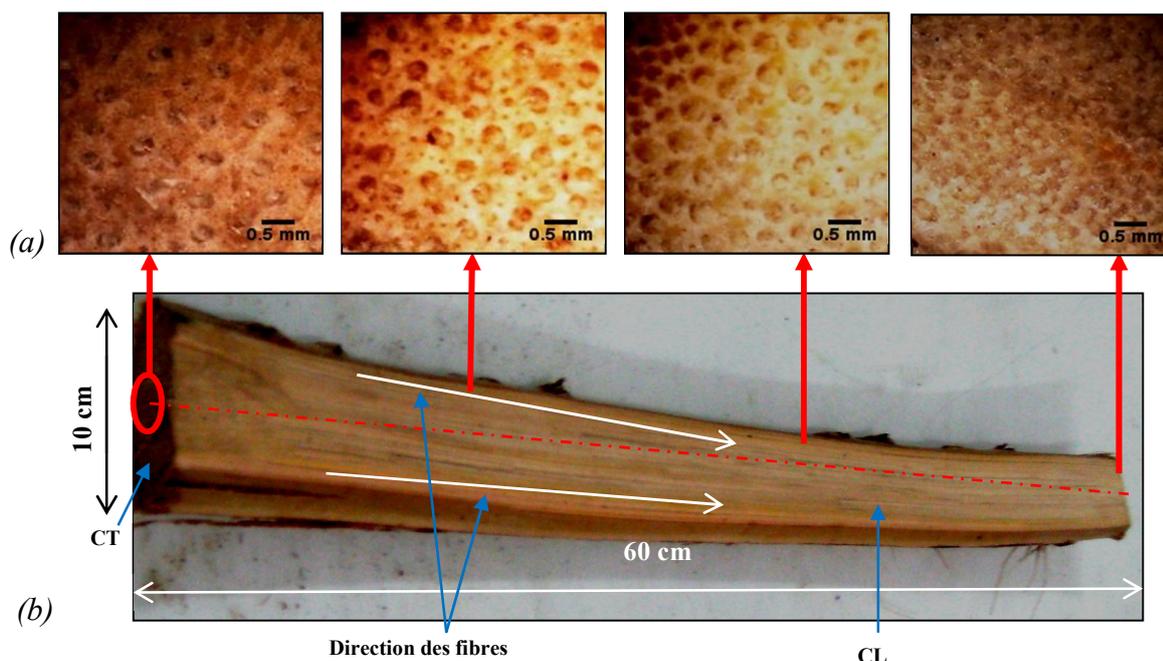


Figure II.10. Présentation structurale du bois du rachis:

a) sections transversales (CT) (x10), b) sens longitudinal (CL).

Selon la coupe transversale du bois de la palme, on peut observer deux catégories de fibres, les fibres principales de diamètre plus grand que celui des fibres secondaires. Les fibres sont classées en deux catégories par rapport à leur diamètre moyen, les fibres principales (*FPr*) et les fibres secondaires (*FSc*).

I.1.2.3 Fibres

Des observations microscopiques ont été effectuées pour étudier la morphologie et la surface des fibres de la palme à l'aide d'un Microscope optique (hund type H600 AM) et d'un microscope électronique (TESCAN VEGA3). Les microscopes sont connectés à un ordinateur pour enregistrer des images avec des différents grossissements (*Figure II.11*).

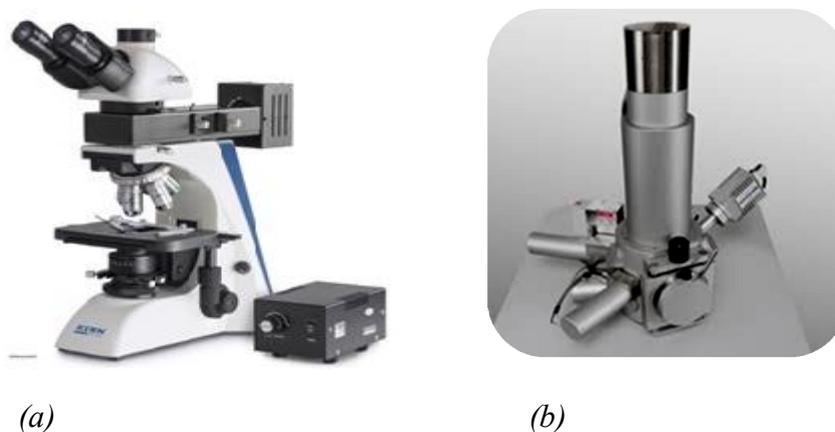


Figure II.11. Microscope: a) optique digital (hund type H600 AM), b) électronique (TESCAN VEGA3).

Les fibres de palmier dattier sont constituées de différentes couches sous une forme proche de canal cylindrique avec un diamètre extérieur de 0.25 à 0.80 mm. La surface rugueuse est essentiellement constituée de lignine, surface typique pour la plupart des fibres naturelles (Figure II.12(a), II.12(c) et II.12(e)). Ces mêmes observations ont été signalées par B. Agoudjil et al [4]. L'observation microscopique montre la forme hétérogène de la fibre issue de la palme. La Figure II.12(b), II.12(d) et II.12(f) montre que les fibres sont intercalées avec un groupe de trous asymétriques qui s'étend sur toute la longueur des fibres, sous forme de canaux minces (lumière). Cette propriété peut être attribuée à la faible densité des fibres de la palme et à la porosité élevée.

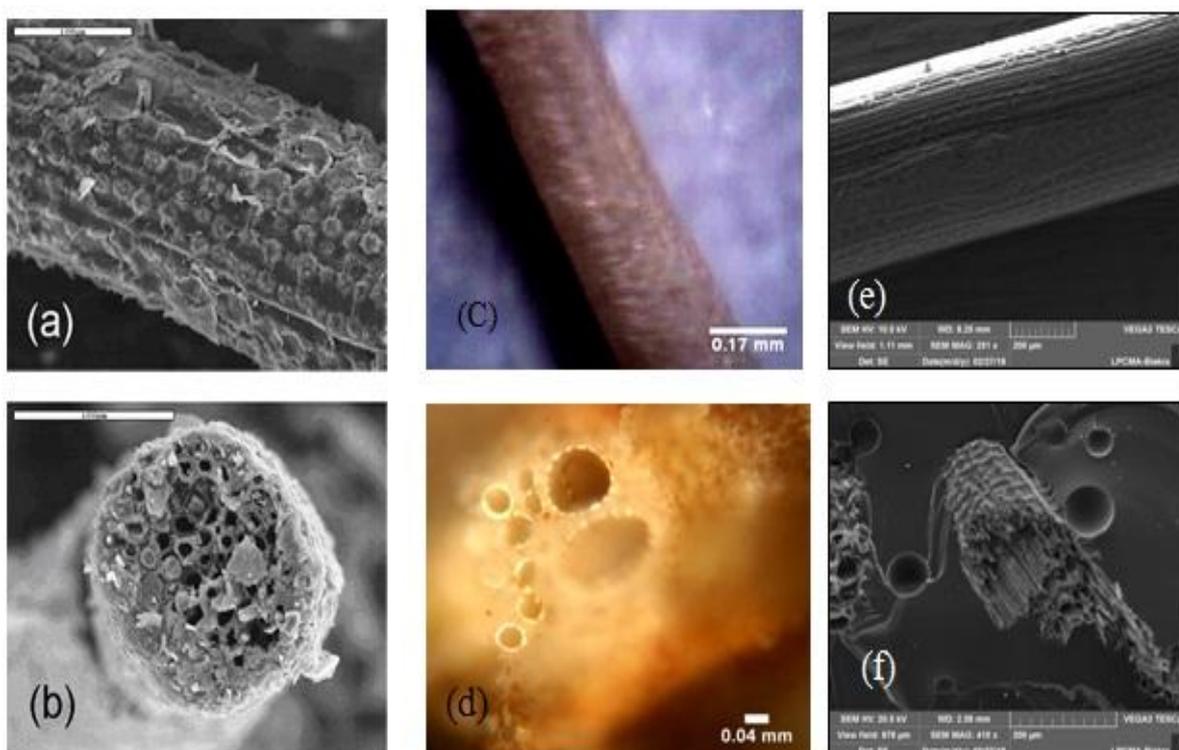


Figure II.12. Observations microscopiques des fibres de palme, a) et b) Images MEB d'une fibre de pétiole (variété Deglet-Nour), échelle de 100µm[1], c) surface longitudinale (X200), d) surface transversale (X 400), e) et f) Images MEB d'une fibre de rachis (variété Deglet-Nour), échelle de 200µm

Le diamètre de la fibre varie d'une fibre à l'autre, compatible avec sa longueur et sa partie d'extraction. Cette propriété peut être l'une des raisons qui affectent l'évolution des propriétés physiques de ces fibres telles que la masse volumique et donc les propriétés mécaniques.

II.2 Caractérisation physico-mécanique

II.2.1 Propriétés physiques

II.2.1.1 Pourcentage volumique de fibres et du lignine dans la palme

Pour déterminer le rapport de la fibre/matrice végétale (Lignine), la technique choisie consiste à calculer le volume total des fibres présentes dans un volume donné d'échantillon de $(10 \times 5 \times 5) \text{ mm}^3$. La technique de la photo-microscopie (Light microscopie) a été utilisée pour mesurer la section des fibres. On a utilisé un microscope optique numérique de type (DigiBlue_QX5_QSG) (Figure II.8). Les mesures de la section des fibres ont été effectuées dans la direction transversale et longitudinale de l'échantillon (Figure II.13).

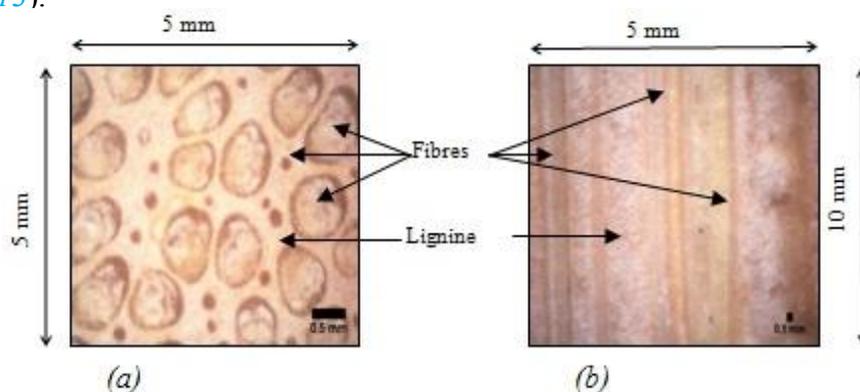


Figure II.13. Photo microstructure pour la mesure de la section de fibre:

a) coupe transversale (x10), b) coupe longitudinale (x60).

Selon le volume de chaque échantillon, l'image grossie de la coupe longitudinale (Figure II.13(c)) permet de déterminer le diamètre moyen de chaque fibre. La coupe transversale donne le nombre de fibres dans chaque échantillon (Figure II.13(b)).

II.2.1.2 Méthode de diffraction des rayons X (DRX)

La méthode de diffraction des rayons X (DRX) est la méthode privilégiée par plusieurs chercheurs pour la détermination du taux de cristallisation des fibres végétales [5-8]. Pour analyser le bois de palme, nous avons utilisé l'appareil D8 ADVANCE a été disponible dans le laboratoire de rayons X de la Faculté des sciences et technologies de l'Université de Biskra (Figure II.14).

L'analyse par DRX a été réalisée sous vide à l'aide d'un système de diffractométrie X'Pert Pro. La diffraction des rayons X a été appliquée sur la poudre de bois issus de différentes parties de la palme, telles que le pétiole, le rachis et la foliole. La longueur d'onde de l'intensité monochromatique du rayonnement $\text{CuK}\alpha$ est de 0,154 nm enregistrée entre $2\theta=10^\circ$ à 80° . La longueur de l'échantillon utilisé était de 35 mm exposé à la

température ambiante. Le matériau de l'anode utilisé est le Cu et les réglages du générateur sont 40 mA et 40 Kv.

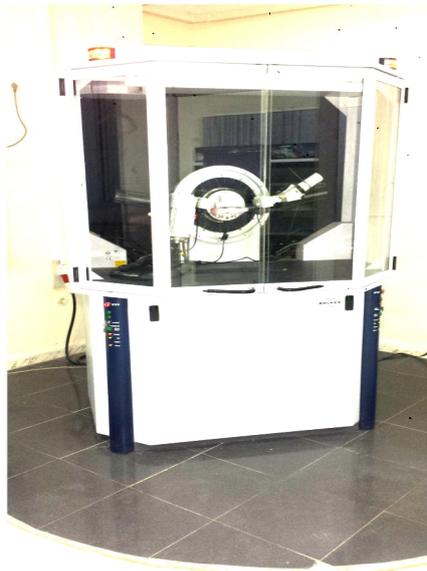


Figure II.14. Appareil de rayons X de type D8 ADVANCE.

II.2.1.3 Analyse thermique (ATG et DTG)

L'analyse thermique est une série de techniques qui mesure l'évolution de certain paramètre physique d'un matériau en fonction de la température, du temps. Tel que la mesure de la quantité et la vitesse de variation de la masse en fonction de la température par l'utilisé l'analyse thermogravimétrique ATG, ou par l'analyse thermique différentielle ATD qui est suivre l'évolution de la différence de température entre l'échantillon étudié et un corps témoin inerte, c'est-à-dire dépourvu d'effets thermiques dans le domaine de température étudié. Le comportement thermique des échantillons en fibres de rachis (*FR*) de masse 35 mg a été réalisé par analyse thermique TGA et DTG à l'aide d'un (SETARAM LABSYS Evo Instrument) (*Figure II.15*). Les tests ont été effectués à une vitesse de chauffage de 10 ° C / min, de 22 ° C à 700 °C.



Figure II.15. Appareil de l'analyse thermique (SETARAM LABSYS Evo Instrument).

II.2.1.4 Masse volumique du bois et de la fibre

Pour déterminer la masse volumique du bois fibreux et des fibres de la palme, il est nécessaire de mesurer la masse et le volume d'un échantillon.

L'échantillon est pesé par une balance électronique (Kern V3.1) d'une précision de 0,0001g. Le volume de l'échantillon est déterminé par la technique de déplacement de l'eau qui consiste à plonger l'échantillon dans un récipient rempli d'eau distillée et un autre rempli du propanol, selon la norme **ISO 10119: 2002**.

La masse volumique de la matrice végétale (Lignine) est alors calculée à partir de la loi de mélange suivante :

$$\rho_c = \rho_l V_l + \rho_f (1 - V_l) \quad (\text{II.1})$$

$$V_l + V_f = 1 \quad (\text{II.2})$$

ρ_c : masse volumique de bois. ρ_f : masse volumique de fibre.

ρ_l : masse volumique de lignine. V_l : fraction volumique de lignine.

V_f : fraction volumique des fibres.

La Figure II.16. Présente les appareils de mesure physiques

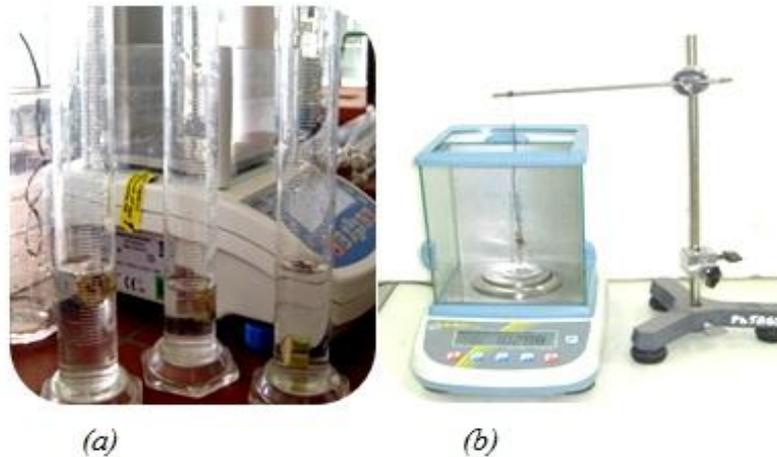


Figure II.16. Appareil de mesure :

a) masse volumique de bois, b) masse volumique de fibre.

II.2.1.5 Taux d'humidité de différentes parties de la palme

La teneur en eau dans la palme est déterminée par la méthode gravimétrique. Les échantillons prélevés de la palme de masse initiale M_h sont placés dans une étuve (BINDER) à une température de $110 \pm 1^\circ\text{C}$. Les échantillons sont pesés chaque heure jusqu'à la stabilisation de la masse de l'échantillon M_s (Figure II.17).

Le taux d'humidité H est déterminé à partir de la formule suivante :

$$H\% = \frac{(M_h - M_s)}{M_h} \times 100 \quad (\text{II.3})$$

$H\%$: pourcentage d'eau dans le bois de la palme (taux d'humidité).

M_h : masse d'échantillon avant séchage.

M_s : masse d'échantillon après séchage.

La température de séchage est choisie suite à une étude de l'influence de ce paramètre sur le taux d'humidité. On utilise différentes températures 60°C , 110°C et 150°C pour le séchage des échantillons sous forme d'un cube de la même taille et de la même zone de coupe.

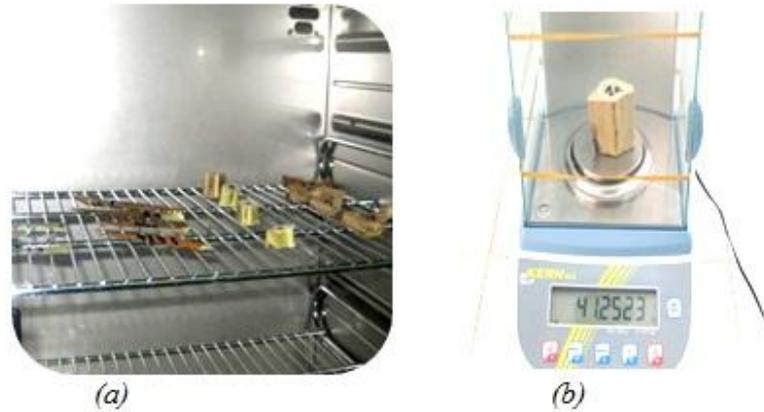


Figure II.17. Appareil de mesure :

a) étuve électrique (BINDER), b) balance électronique (Kern V3.1)

II.2.2 Propriétés mécaniques

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques du bois fibreux et des fibres, des essais de traction, de compression et de flexion à trois points ont été réalisés à l'aide d'une machine universelle de type Instron 5969 pilotée par un ordinateur avec le logiciel Bluehill3 (Figure II.18). Les cellules utilisées ont une capacité maximale de 50KN pour les essais sur le bois (BP et BR), et de 5KN pour les essais sur les fibres (FP et FR).

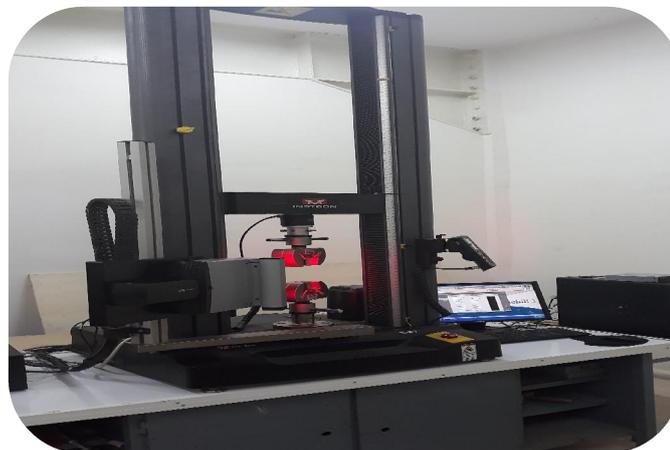


Figure II.18. Machine universelle de type Instron 5969.

II.2.2.1 Essai de traction longitudinale du bois (TL)

Les éprouvettes de traction longitudinale du bois (BP) sont fixées aux têtes d'amarrage après avoir couvert la zone de fixation par un ruban adhésif en papier pour éviter le glissement et l'écrasement de l'éprouvette (Figure II.19(b)). La vitesse de l'essai est de 2mm/min.

Pour déterminer le coefficient de poisson dans le sens longitudinal des fibres, un dispositif de capteur vidéo extensomètre avancé a été utilisé pour les mesures des déformations transversales et longitudinales. Les sept échantillons de test sont marqués de quatre points au milieu de chaque éprouvette à l'aide d'un guide de marquage spécifique (*Figure II.19(a)*).

Le coefficient de Poisson ν est calculé selon la formule suivante.

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (\text{II.4})$$

Avec

ε_T : déformation transversale.

ε_L : déformation longitudinale.



*Figure II.19. Éprouvette de bois :
a) marquage, b) éprouvette marquée.*

II.2.2.2 Essai de compression du bois

L'essai de compression a été effectué avec des éprouvettes (*BP*) dans les deux directions longitudinale (*CL*) et transversale (*CT*) selon la norme **NF B51-007-ISO3132-1975**. La vitesse de l'essai est constante de 5mm/min (*Figure II.20(a)*). La contrainte et la déformation maximale dans le cas des éprouvettes (*CT*) sont déterminées au point de changement de la linéarité de la courbe charge-déplacement, tandis que, dans le cas des éprouvettes (*CL*), elles ont déterminées au point de la chute franche de la charge due à la rupture de l'éprouvette.

II.2.2.3 Essai de flexion trois points du bois (F3P)

Le test de flexion statique s'effectue suivant la norme **NF en ISO 178**. La vitesse de l'essai est de 2 mm/min (*Figure II.20(b)*). En exploitant les courbes charge-déplacement obtenues par l'essai de la flexion trois points, on peut déterminer le module d'élasticité en flexion E_f selon la formule (II.5), suivant la norme **NFT 51 001**. La déformation en flexion ε et la contrainte de flexion σ sont déterminées respectivement selon les formules (II.6) et (II.7).

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{F}{S} \quad (\text{II.5})$$

$$\varepsilon = \frac{6h}{L^2} S \quad (\text{II.6})$$

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (\text{II.7})$$

L : distance entre les appuis (mm). S : flèche (mm).

b : épaisseur de l'éprouvette (mm). h : hauteur de l'éprouvette (mm).

F : charge pour un point choisi sur la tangente à l'origine (N).

La *Figure II.20*. Présente les différents essais mécaniques sur le bois de palmier

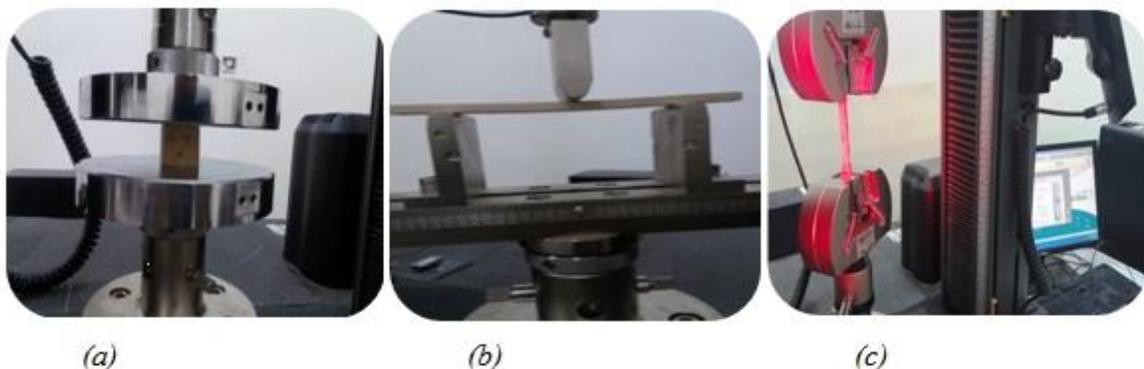


Figure II.20. Essais mécaniques sur le bois :
a) compression, b) flexion trois points, c) vidéo-traction.

II.2.2.4 Essai de traction et de torsion des fibres

Les éprouvettes pour les essais de traction des fibres (FPr et FSc) pour les différentes parties de la palme sont préparées selon la norme **ASTMD 3379-75**. Les essais de traction ont été effectués conformément à la norme **ASTMD 882**. Les fibres sont fixées entre deux feuilles de forme rectangulaire munies à leur milieu d'une ouverture de 60 mm

de longueur. Les deux feuilles sont collées pour maintenir de manière permanente la fibre. La vitesse de déplacement des mors a été adaptée à 0.1 mm/min (*Figure II.21(b)*).

La détermination du coefficient de Poisson de la fibre de la palme a été effectué selon la formule de constante mécanique de Lamé μ ou λ suivantes [6]:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{II.8})$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (\text{II.9})$$

Le coefficient de Poisson est déterminé par l'expression (II.8):

$$\nu = \frac{E}{2\mu} - 1 \quad (\text{II.10})$$

Le module d'élasticité E est déterminé expérimentalement par l'essai de traction, et le module de cisaillement μ se détermine par l'élasticité de torsion F. Beaulard [9], selon la formule suivante

$$\mu = \frac{32\tau L}{\pi D^4} \quad (\text{II.11})$$

Où D : le diamètre de la fibre ; L : la longueur de la fibre ; τ : couple de torsion.

Le couple de torsion τ est déterminé à l'aide d'un pendule de torsion (*Figure II.22*) suivant la formule (II.12).

$$\tau = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 I_G \quad (\text{II.12})$$

Où T : la période de l'oscillation du pendule de torsion ; I_G : le moment d'inertie de la masse utilisée.

Le pendule de torsion est constitué d'une masse cylindrique fixée à un support horizontal par l'intermédiaire d'une fibre de la palme. Cette fibre exerce un couple de rappel $M_{t/0}$ proportionnel à l'angle de torsion θ ($\theta \ll 1$) qu'on lui impose tel que [6]:

$$M_{t/0} = -\tau\theta \quad (\text{II.13})$$

Dans ce cas, nous supposons que l'angle est un angle unitaire égal à 1 rd, alors que la fibre reste dans le domaine élastique.

Une série de mesures a été faite sur des fibres extraites de la palme de longueur 240 mm et de diamètre variant entre 0.25 et 0.81 mm.

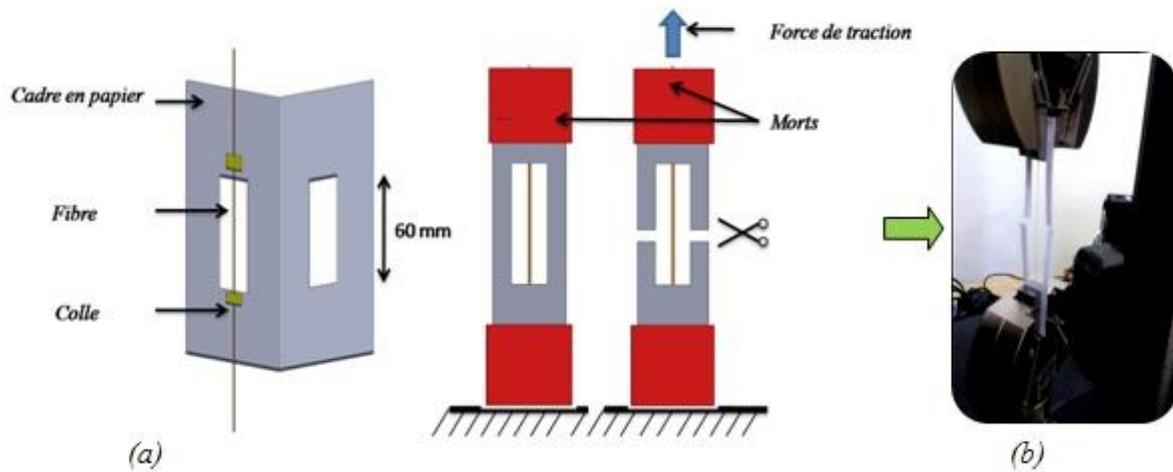


Figure II.21. Essai de traction des fibres:
a) fixation des fibres, b) dispositif de l'essai.

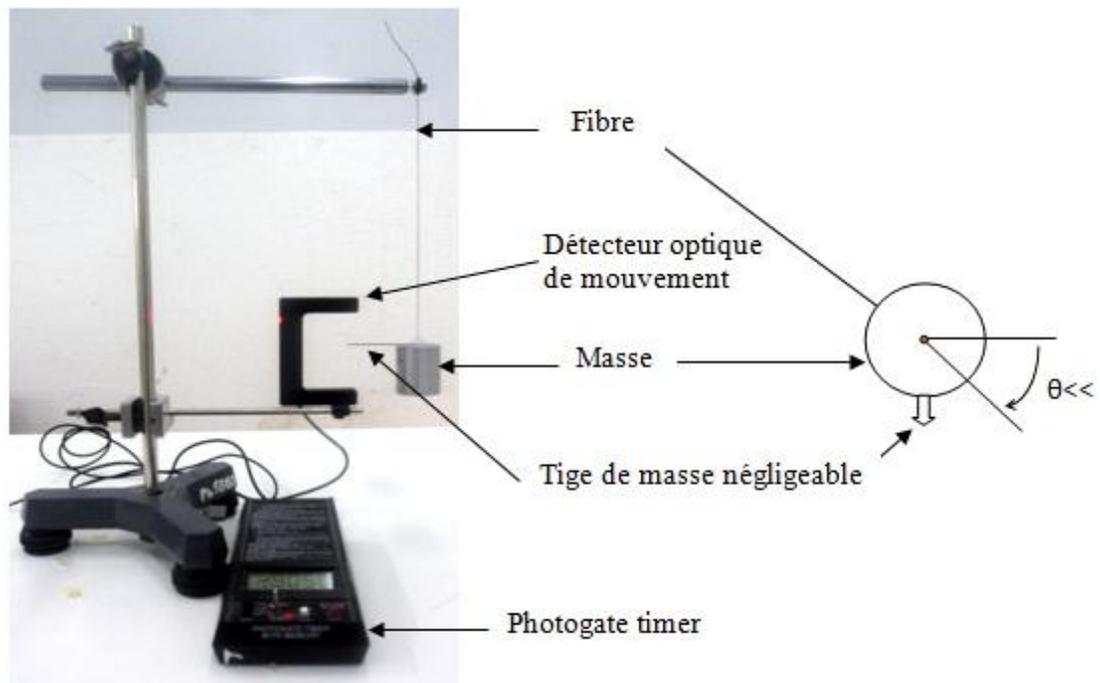


Figure II.22. Pendule de torsion [6].

II.3 Résultats et discussion

II.3.1 Propriétés physiques

La forme et la structure de la palme sont complexes, à cause de la répartition des fibres et du taux de la matrice végétale (Lignine) qui diffère le long de la palme. Le bois fibreux étant constitué par des groupes organiques de la palme, il est considéré comme un matériau hydrophile. Il est donc nécessaire de quantifier les paramètres relatifs à cette propriété par le pourcentage volumique de ses constituants (fibres et matrice végétale (Lignine)) et le taux d'humidité. Ces caractéristiques sont déterminées dans différentes parties de la palme.

II.3.1.1 Pourcentage volumique de fibres et de lignine dans la palme

La Figure II.23 présente le pourcentage volumique des fibres et celui de la matrice végétale (Lignine) suivant la longueur de la palme selon la technique de la photomicroscopie.

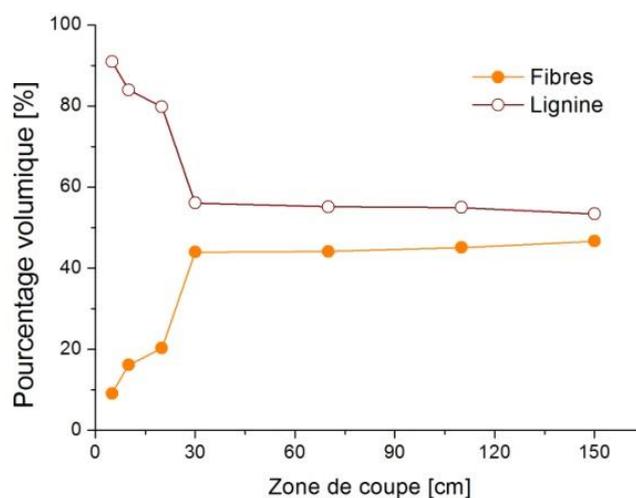


Figure II.23. Pourcentage volumique de fibres et du lignine dans la palme.

La forme des courbes obtenues montre que le pourcentage volumique des fibres dans la partie pétiolaire (BP) comprise entre 5 à 30 cm de la longueur, est faible, entre 10 et 20% environ, et que le taux de la matrice végétale (Lignine) dans cette partie est par conséquent très élevé et atteint 90%. Pour les parties les plus éloignées, le taux de la matrice végétale (Lignine) diminue rapidement jusqu'à 56% devenant quasiment constant suivant la longueur de la palme. Dans cette partie du rachis (BR), le pourcentage de fibres peut atteindre 44% avec une augmentation de 57%. Ces mêmes observations ont été

signalées par les travaux doctoraux de [T. Guettaf Temam \[10\]](#) où il montre qu’il a une augmentation de pourcentage des fibres dans le bois de grappe et de la palme de type Deglet-Nour, tant transversalement que longitudinalement. Le taux de fibre augmente jusqu’à 44% le long du rachis et 12% en sens transversale, avec une diminution de diamètre de fibre.

Cette variation importante du taux de fibres et celui de la matrice végétale (Lignine) le long de la palme est un paramètre qu’il faut prendre en compte dans l’interprétation de la variation éventuelle des caractéristiques mécaniques.

II.3.1.2 Masse volumique du bois et de la fibre

Dans la même optique, le diamètre de la fibre et sa masse volumique, ainsi que la masse volumique du bois fibreux de la palme sèche, ont été mesurées le long de la palme. La masse volumique de la matrice végétale (Lignine) est déduite à partir de la loi de mélange. Les [Tableaux II.1](#) et [II.2](#) donnent les valeurs de la masse volumique selon la position pour les échantillons (BP) et (BR).

Tableau II. 1. Masse volumique du bois de la palme sèche.

Matière	(BP)				(BR)		
Position d’échantillon [cm]	[0-5]	[5-10]	[10-20]	[20-30]	[30-70]	[70-110]	[110-150]
Masse volumique [g/cm ³]	0.15	0.16	0.17	0.27	0.54	0.69	0.75
Masse volumique moyenne [g/cm ³]	0.19±0.05				0.66±0.11		

Tableau II.2. Masse volumique des composantes du bois de la palme sèche (fibres et matrice végétale).

Matière		(BP)	(BR)
Position	[cm]	[0-30]	[30-150]
Diamètre de la fibre	[mm]	0.57±0.24	0.49±0.24
Masse volumique de fibres	[g/cm ³]	0.61±0.18	0.81±0.58
Fraction volumique des fibres V_f	[%]	20	44
Fraction volumique de la matrice végétale (Lignine) V_l	[%]	80	56
Masse volumique de la matrice végétale (Lignine)	[g/cm ³]	0.09±0.03	0.54±0.37

Le [Tableau II.1](#) montre que la masse volumique du bois fibreux augmente le long de la palme à partir de la partie pétiolaire (*BP*) jusqu'à la partie rachis (*BR*). En moyenne, elle est trois fois supérieure dans la partie (*BR*) que de la partie (*BP*). La faible densité de bois de pétiole par rapport au bois de rachis a été rapportée aussi dans les travaux [S. Amirou \[11\]](#). La section des fibres varie tout au long de sa longueur. Les fibres dont le diamètre est supérieur à 0.5mm sont désignées par les fibres principales (FPr) et celle de diamètre inférieure à 0.5mm par les fibres secondaires (FSc). La masse volumique des fibres de la partie pétiolaire (*FP*) est légèrement inférieure à celle dans la partie rachis (*FR*) ([Tableau II.2](#)). Une conclusion similaire a été rapportée par [K. Almi \[12\]](#) et [T. Guettaf Temam \[13\]](#) dans leurs travaux doctoraux.

Nous pouvons conclure que la proportion des fibres augmente la valeur de la masse volumique, et le pourcentage de la matrice végétale (Lignine) la réduit dans le bois fibreux. D'autre part, la masse volumique des fibres varie en fonction de leur emplacement dans la palme. Ceci affecte naturellement les propriétés hygroscopiques et mécaniques du bois fibreux de la palme.

II.3.1.3 Methode de la diffraction des rayons X (DRX)

Les résultats de la diffraction des rayons X sur la poudre de bois issus de différentes parties de la palme, le pétiole, le rachis et la foliole, sont présentés par les graphes de la [Figure II.24](#).

Les diagrammes présentent deux pics de diffraction forts à la valeur de 2θ qui sont remarquablement détectés dans la plupart des matériaux et des fibres végétales d'après [\[14\]](#) et [\[15\]](#). Le pic à $2\theta = 15,66^\circ$ dans le diagramme (a) indique l'existence de constituants amorphes dans la poudre de rachis. Le pic à $2\theta = 22,07^\circ$ désigne la nature cristalline de la poudre de rachis. L'analyse de ce diagramme par logiciel [X'Pert HighScore](#) montrent que l'indice de cristallinité a été estimé à 70%. Ce résultat est presque identique à celui obtenu par [K. B. Hamou \[15\]](#) et [Y. Djebloun et al. \[6\]](#).

En ce qui concerne l'analyse des diagrammes de pétiole et de la foliole, les taux de cristallinité sont défectés à 36% et 81% respectivement. La moyenne de ces résultats est similaire à ceux obtenus avec d'autres fibres végétales, tels que Plant de Heteropogon Contortus (54,1%) [\[14\]](#), Acacia leucophloea (51%), Acacia Arabica (51,72%) et Acacia planifrons (65,38%) [\[5, 8\]](#). La différence entre les résultats de différentes parties de la palme peut être due à la morphologie de la palme. Cette différence est similaire à celle

indiquée dans la méthode de microscopie optique (Light microscopy), tel que le taux des fibres est 44%.

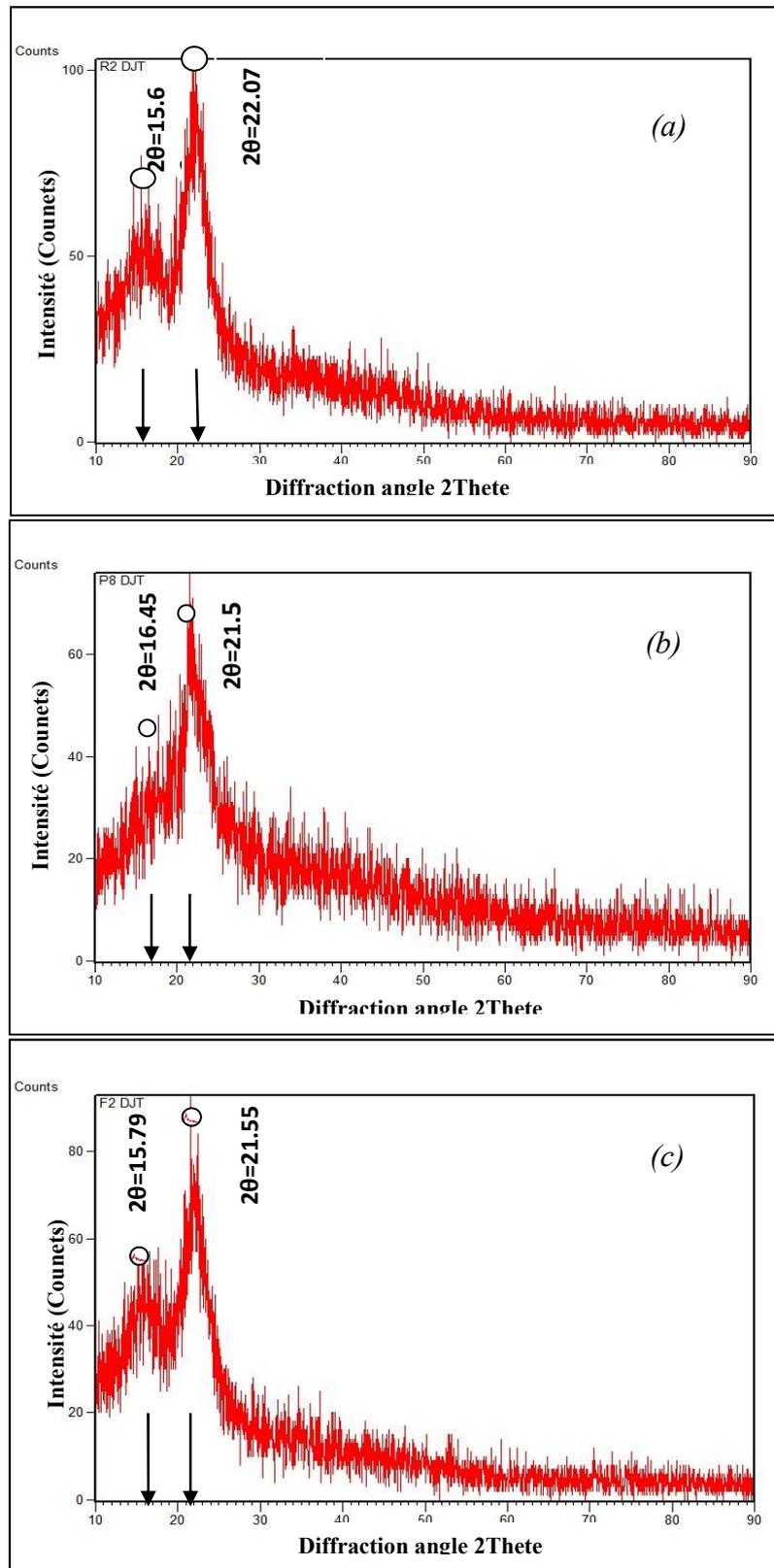


Figure II.24. Profil de diffraction des RX de poudre extraite de la palme :
a) rachis, b) pétiole, c) foliole.

II.3.1.4 Analyse thermique (TGA et DTG)

Le comportement de la stabilité thermique des fibres de la partie rachis (*FR*) est analysé à l'aide des courbes TGA et DTG telles que représentées dans la [Figure II.25](#).

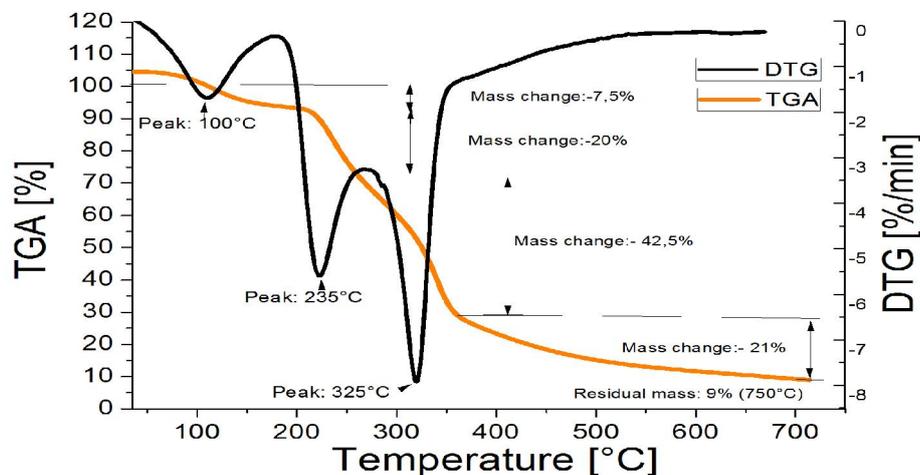


Figure II.25. Courbes TGA et DTG des fibres (*FR*).

On peut observer que le même comportement vis-à-vis de la dégradation thermique pour tous les testés lorsque la température a atteint 100 ° C, ce qui correspond à une diminution lente du poids, due à la teneur en humidité. La principale dégradation de la fibre s'est développée de 210 ° C à 420 ° C, Il présente les deux principales étapes de la dégradation thermique dans les FPR. La première phase de dégradation thermique a le pic proche de 235 ° C associé à la dégradation thermique des hémicelluloses avec une perte de masse de 20%. La deuxième phase de dégradation thermique a le pic de 345 ° C montre une perte de poids de 42,5%, due à la dégradation de la cellulose ([Figure II.25](#))[16]. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus lors d'études sur d'autres types de fibres naturelles [12, 14, 17, 18].

II.3.1.5 Taux d'humidité de différentes parties de la palme

La mesure du taux d'humidité à différentes températures de séchage a montré que ce paramètre n'a pas d'influence sur le taux initial d'humidité dans différentes parties de la palme. Ce paramètre affecte seulement la vitesse de séchage. En effet, le [Tableau II.3](#) montre l'évolution du taux d'eau perdue d'échantillons de même taille et de même zone d'emplacement dans la palme (*BR*) pendant une durée de 30 minutes à différentes températures. La température accélère et augmente la quantité d'eau perdue. Le pourcentage de la perte d'eau à une température de 60°C est très inférieure que celle perdue

à une température de 110 et 150°C. La température de séchage sera donc choisie entre 110 et 150°C.

Tableau II.3. Influence de la température sur le séchage du bois (BR) pendant 30 min.

Température [°C]	Eau perdue [%]
60	7
110	59
150	68

La Figure II.26 (a) présente la variation de la quantité d'eau perdue en fonction du temps dans différentes parties de la palme. Le taux d'humidité est déterminé après la stabilisation de la quantité d'eau perdue à la température de 110°C (Figure II.26(b)).

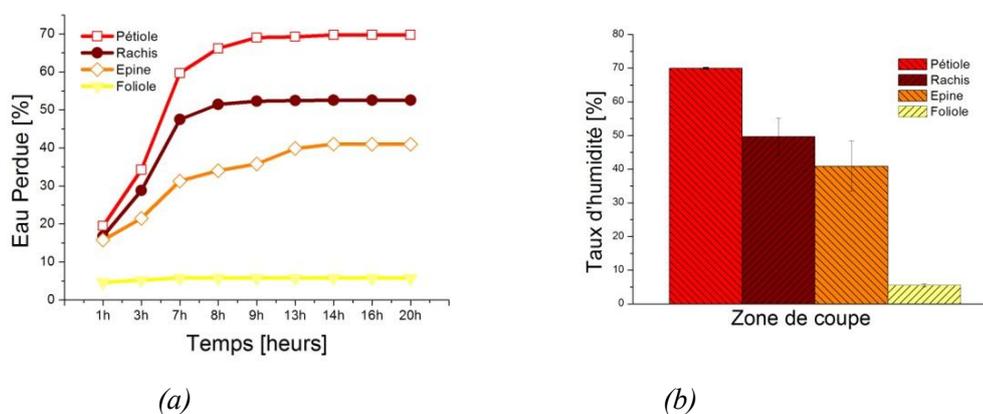


Figure II.26. Taux d'humidité de différentes parties de la palme : a) quantité d'eau perdue en fonction du temps, b) taux d'humidité.

Nous remarquons que les courbes de la variation de la quantité d'eau perdue au cours de temps dans les différentes parties de la palme ont la même allure, mais présentent différents niveaux d'importance selon les différents constituants de la palme. Le pourcentage d'eau restitué maximal au niveau de (BP) est de 70% suivi de celui de (BR) avec 50%. Le pourcentage le plus bas est enregistré dans les folioles de 5.5% juste après les épines à 41%. Nous constatons ainsi que la teneur en eau diminue le long de la palme. Ceci est en concordance avec l'augmentation de la masse volumique du bois fibreux dans le même sens pour les palmes sèches. Ainsi, la valeur de la masse volumique du bois fibreux dans les différentes parties de la palme est grandement affectée par le taux d'humidité. Le pourcentage d'humidité peut affecter les propriétés mécaniques des constituants de la palme après le séchage. Les résultats des propriétés physiques du bois de palmier dattier tel que la masse volumique, les composantes de bois et le taux d'humidité

effectuée naturellement sur les résultats des propriétés mécaniques de ce bois. Ces résultats sont similaires avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs tels que H. Abdel-Rahman et al [19], M. K. Jahromi et al [20], S. Amirou [11], et L. Fathi [21].

II.3.2 Propriétés mécaniques

II.3.2.1 Essai de traction longitudinale du bois (TL)

Les résultats obtenus de l'essai de traction sur les éprouvettes longitudinales (BP) sont présentés par les courbes de contrainte-déformation (Figure II.27(a)). Elles présentent une partie linéaire relativement importante et un domaine réduit où apparaît la non-linéarité. La Figure II.27(b) montre la rupture au milieu des éprouvettes de forme haltère après l'essai de traction, confirmant la validité du test.

La Figure II.28 présente une courbe type contrainte-déformation transversale /longitudinale de l'essai de traction par l'utilisation de la technique de vidéo-traction. Le Tableau II.4 donne les caractéristiques mécaniques du bois (BP) obtenues à partir de plusieurs essais.

Tableau II.4. Résultats de l'essai de traction (BP).

Nombre des éprouvettes	σ_{\max} [MPa]	ε_{\max} [mm/mm]	E [GPa]	ϑ_{LT} [°]
15	6.43±1.48	0.011±0.003	1.08±0.54	0.27±0.06

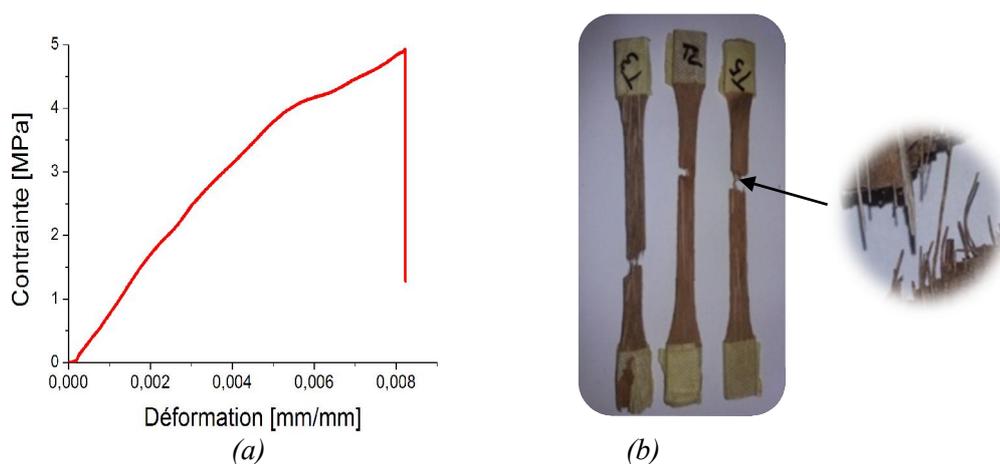


Figure II.27. Résultats de l'essai de traction (TL):

a) courbe type contrainte-déformation, b) éprouvettes (BP) après l'essai.

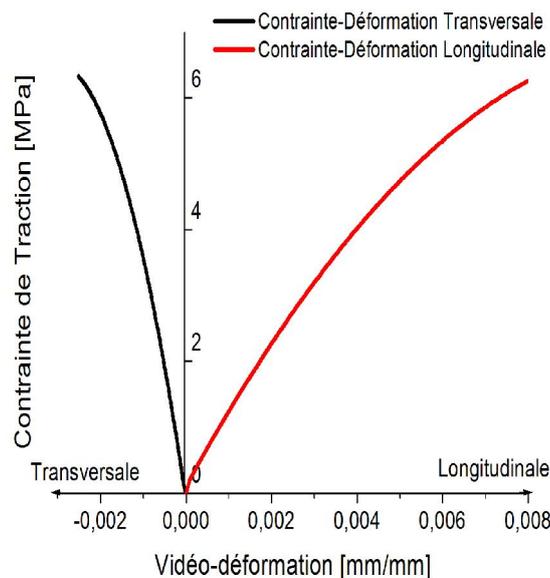


Figure II.28. Résultats de l'essai de vidéo-traction:

- a) courbe type contrainte-déformation transversale, b) courbe type contrainte-déformation longitudinale.

II.3.2.2 Essai de compression du bois

Les courbes contrainte-déformation de la Figure II.29 issues des essais de compression dans le sens longitudinal (CL) et le sens transversal (CT) des éprouvettes (BP) montrent le caractère anisotrope du matériau (BP) testé. Dans le domaine élastique, les éprouvettes conservent leur forme cubique pour les deux essais. Dans le cas de l'essai (CT) et après le changement de la linéarité de la courbe contrainte-déformation, la contrainte tangentielle importante provoque un glissement dans le sens perpendiculaire de la charge (Figure II.29(c)). En effet, les propriétés mécaniques dans les deux sens présentées dans le Tableau II.5 obtenues à partir de ces courbes sont très différentes.

Tableau II.5. Résultats des essais de compression (BP).

	Sens longitudinal (CL)			Sens transversal (CT)		
Nombres des éprouvettes	4			4		
	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E_L [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E_T [GPa]
	3.70±0.42	0.025±0.015	0.22±0.07	3.85±0.04	0.634±0.069	0.08±0.01

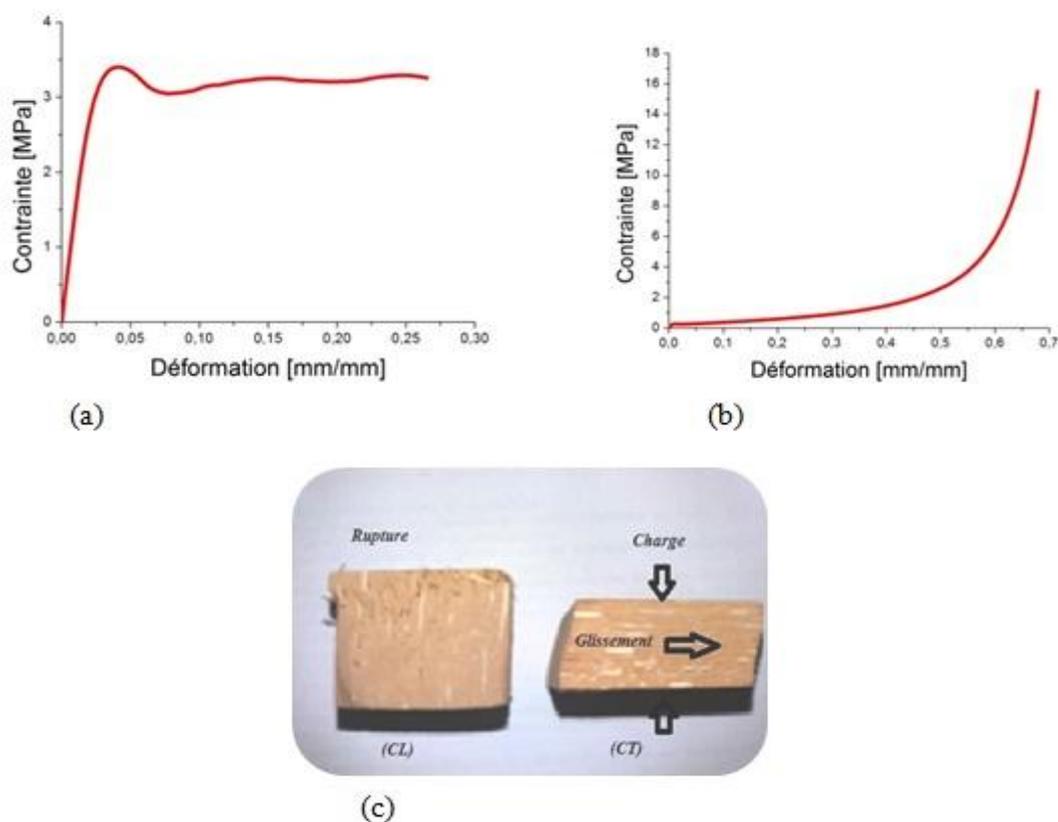


Figure II.29. Résultats de l'essai de compression: courbes types contrainte-déformation, a) (CL) et b) (CT), c) éprouvettes (BP) après l'essai.

II.3.2.3 Essai de flexion trois points du bois (F3P)

Les résultats obtenus à partir des essais de flexion trois points sur les éprouvettes issues du pétiole (BP) sont représentés sur le graphe charge-déplacement de la Figure II.30 (a). Le Tableau II.6 présente les caractéristiques mécaniques déduites de cet essai.

Tableau II.6. Résultats de l'essai de flexion trois points des éprouvettes (BP).

Nombres des éprouvettes	F_{\max} [N]	E_f [GPa]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]
3	96.29±12.41	0.59±0.01	10.33±2.36	0.017±0.003

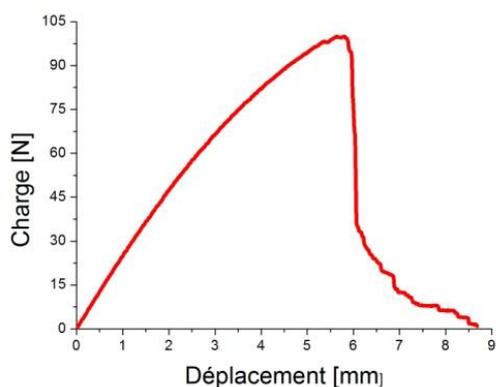
Les résultats obtenus à partir des essais (F3P) sur les éprouvettes issues des différentes parties du rachis sont représentés sur le graphe charge-déplacement de la Figure II.30(a). Les caractéristiques mécaniques relatives aux trois parties du rachis sont illustrées dans le Tableau II.7.

Tableau II.7. Résultats de l'essai de flexion trois points des éprouvettes (BR).

Nombres des éprouvettes	Parties éprouvettes	F_{max} [N]	E_f [GPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [mm/mm]
3	BR1	342,11±80,43	7.25±2.55	88.88±29.78	0.016±0.004
3	BR2	388,94±92,11	10.25±0.53	115.89±23.22	0.015 ±0.003
3	BR3	190,81±18,55	8.32±1.27	68.64±7.64	0.008 ±0.006
	Moyenne (BR)	307,56±103,56	8,60±1,52	91,13±19,36	0,013±0,004

La Figure II.30(b) et la Figure II.31(b) présentent les éprouvettes rompues après l'essai de flexion trois points.

La Figure II.32 présente la variation du module d'élasticité et la contrainte maximale de flexion du bois fibreux le long de la palme. A partir des résultats obtenus, on remarque que le module d'élasticité et la contrainte sont différents dans les différentes parties de la palme. Le module d'élasticité augmente jusqu'à 10 GPa pour la partie de rachis (BR) de la palme. Ceci est dû à la nature micro-fibrillaire de la fibre dans cette zone et à la bonne adhérence des fibres dans l'autre partie (BP).



(a)



(b)

Figure II.30. Résultats de l'essai de flexion trois points (BP):

a) courbe type charge-déplacement, b) éprouvette (BP) après l'essai.

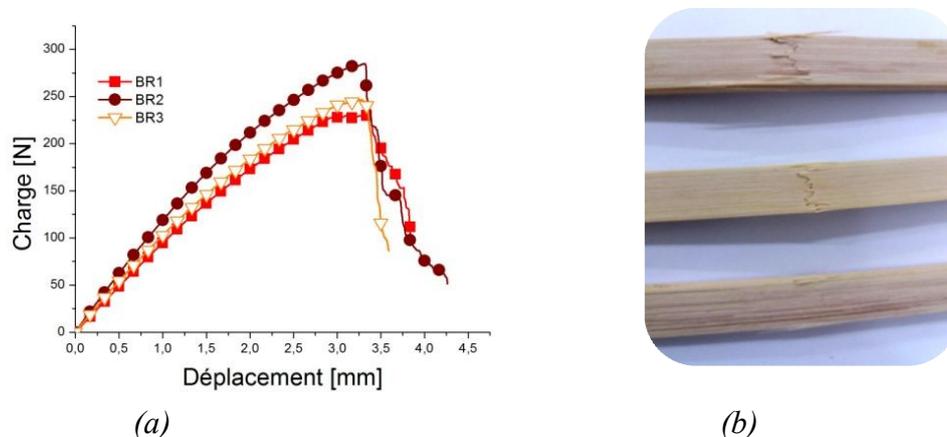


Figure II.31. Résultats de l'essai de flexion trois points (BR):

a) courbes charge-déplacement, b) éprouvettes (BR) après l'essai.

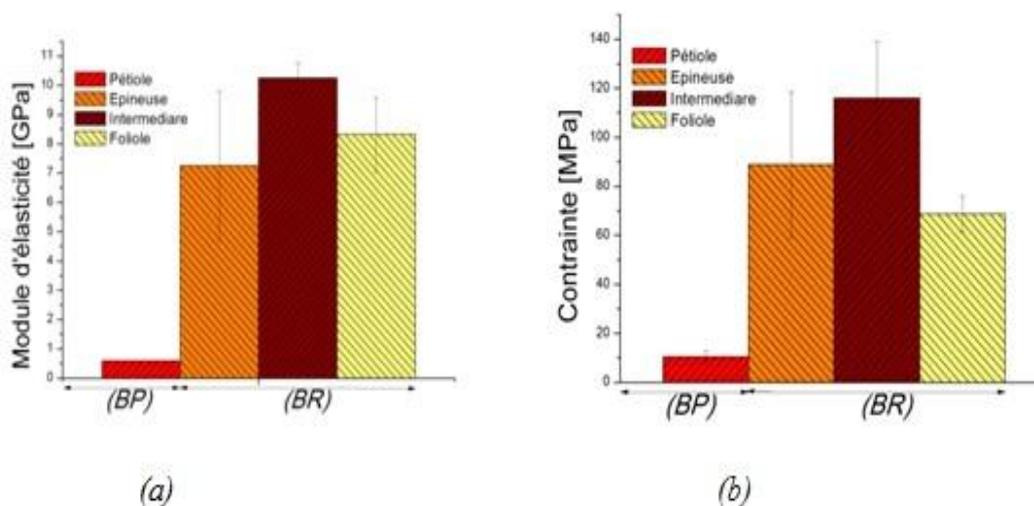


Figure II.32. Résultats de l'essai de flexion trois points pour les différentes parties du bois de la palme: a) module d'élasticité, b) contrainte maximale.

Le Tableau II.8 présente une comparaison des caractéristiques mécaniques du bois fibreux de différentes parties du palmier dattier obtenue dans la présente étude avec ceux tirées de quelques références de la littérature.

Tableau II.8. Comparaison des propriétés mécaniques des bois du palmier dattier.

Matériau	E [GPa]	σ_{max} [MPa]	Références	Palmier dattier			
				Type	Région		
(BP) (Kornaf)	0.54-1.62 ^(TL) 0.07 ^(CT) -0.29 ^(CL) 0.58-0.60 ^(F3P)	4.95-7.91 ^(TL) 3.28 ^(CL) -4.12 ^(CL) 7.97-12.69 ^(F3P)	Présente étude	Pétiole	Tolga Biskra-Algérie		
	7.0 ^(TL)	90 ^(TL)		Palmier dattier		Borj-rose Biskra-Algérie	
	0.23 ^(CL)	3.79 Algérie				Biskra-Algérie	
(BR) (Gand)	7.08-10.12 ^(F3P)	71.77-110.49 ^(F3P)	Présente étude		Tolga Biskra-Algérie		
	8.5 ^(TL)	213 ^(TL)				Borj-rose Biskra-Algérie	
	3.87 ^(TL)	95.35 ^(TL)				Borj-rose Biskra-Algérie	
Tronc du palmier	9.8 ^(TL) 0.1 ^(CT) -2.2 ^(CL) 8.5 ^(F3P)	35 ^(TL) 5 ^(CT) -35 ^(CL) 65 ^(F3P)	[23]	Palmier dattier	Biskra-Algérie		
	2.88 ^(CL) 6 ^(F3P)	22 ^(CL) 30 ^(F3P)		[22]		Palmier dattier	Sud de Tunisie
	5.105-8.189 ^(F4P)	27.38-42.7 ^(F4P) 1.97-2.71 ^(CL)		[11]		Palmier dattier	Algérie

Notation des Types d'essai mécanique : (TL) Traction Longitudinale, (CL) Compression Longitudinale, (CT) Compression Transversale, (F3P) Flexion trois points.

II.3.2.4 Essai de traction des fibres

Les Figures II.33 et II.34 présentent les courbes contrainte-déformation de l'essai de traction pour les deux catégories de fibres suivant la longueur de la palme :

(FPPr) : fibre de pétiole principale,

(FPSc) : fibre de pétiole secondaire,

(FRPr) : fibre de rachis principale,

(FRSc) : fibre de rachis secondaire.

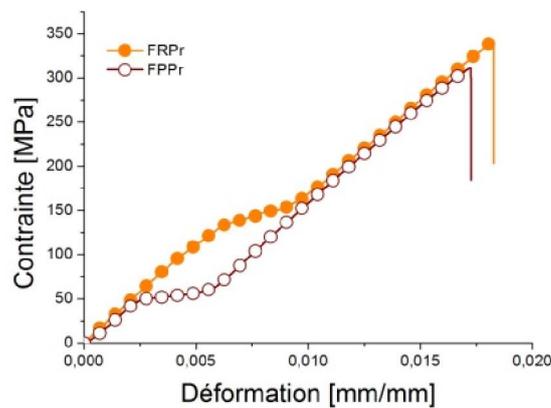


Figure II.33. Courbes types contrainte-déformation de l'essai de traction sur les fibres (FPPr et FRPr).

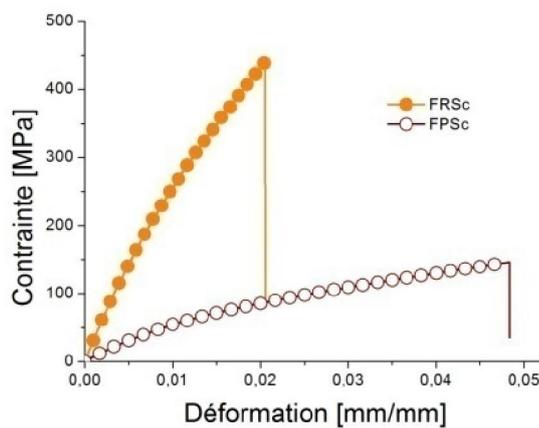


Figure II.34. Courbes types contrainte-déformation de l'essai de traction sur les fibres (FPSc et FRSc).

Nous remarquons que les deux types de courbes de traction reflètent la différence du comportement mécanique des fibres testées. Cette différence provient de l'influence de différents paramètres tels que la position de la fibre dans la palme et leur structure interne. Ceci est en corrélation avec les résultats de l'étude morphologiques (*Figure II.6*) et des propriétés physiques (*Tableau II.1* et *Tableau II.2*) de la palme. La *Figure II.33* montre deux changements brusques de l'allure de la courbe pendant sa montée. Ce phénomène est intrinsèque aux courbes de traction des fibres principales (*FRPr* et *FPPr*) et qui peut être attribué à la rupture interne des micro-fibrilles ou du glissement. Ce phénomène n'est pas observé dans les fibres secondaires (*Figure II.34*). Les fibres rachis (*FR*) ont un module d'élasticité E plus élevé que celui des (*FP*), contrairement à la résistance mécanique. Les résultats sont présentés dans le *Tableau II.9*.

Tableau II.9. Résultats de l'essai de traction des fibres.

Nombres des éprouvettes	Zone d'extraction	Catégories des fibres	E [GPa]	σ_{max} [MPa]	ϑ [°]
10	Fibre de Pétiole (<i>FP</i>)	FPPr	11.86±1.21	270.24±29.63	
10		FPSc	6.72± 1.44	120.19±38.54	
Intervalle (<i>FP</i>)			5.28-13.07	81.65-299.87	0.16±0.03
20	Fibre de Rachis (<i>FR</i>)	FRPr	14.16±6.57	210.18±131.16	
20		FRSc	17.93±5.92	198.24±157.58	
Intervalle (<i>FR</i>)			7.59-23.85	40.66-341.34	0.12±0.02

Nous remarquons d'après les résultats obtenus que le module d'élasticité et la contrainte maximale varient selon la position de la fibre sur la palme. Les valeurs importantes des écarts-types sont dues à la diversité des fibres dans le sens transversal (fibres de la peau et fibres du cœur). De plus, les caractéristiques qui reflètent la rigidité mécanique des fibres de la palme sont plus importantes dans la partie rachis que dans la partie pétiolaire. Cette différence de comportement mécanique des différentes catégories de fibres de la palme en fonction de leur diamètre et de leur emplacement dans la palme permet de les classer par rapport aux champs d'application en tant que charge dans l'élaboration des matériaux composites à base de fibres végétales.

Le *Tableau II.10* présente une comparaison des résultats de cette étude avec d'autres résultats tirés de différentes références bibliographiques.

Tableau II.10. Comparaison des propriétés mécaniques des fibres du palmier dattier.

E [GPa]	σ_{\max} [MPa]	Références	Palmier dattier	
			Type	Région
5.28-23.85	40.66-341.34	Présente étude	Palme Deglate- Nour	Tolga Biskra-Algérie
7-8.5	90-213	[24]	Différentes parties Deglate- Nour	Borj-rose Biskra-Algérie
6-11	180-320	[18]	Lif Palmier dattier	El-faiyum Egypte
2.7-5.8	95-190	[25]	Tige Berhi	Irak
2.5-12	97-275	[26]	Palmier dattier	-
2-7.5	58-203	[27]	Palmier dattier	-
8.86×10^{-3}	125.97	[28]	Bras de grappe Palmier dattier	Hodna M'sila-Algérie
3.30-9.86	38.02-318.55	[6]	Différents Types de Lif	Biskra-Algérie
1.55-8.25	130-320	[29]	Lif Palmier dattier	-

La différence entre les résultats des différents auteurs dans le cas du bois fibreux et des fibres extraites du palmier dattier (Tableau II.8 et Tableau II.10) peut être attribuée à plusieurs facteurs tels que la nature du bois fibreux du palmier (le type du palmier dattier) et la région de sa croissance. La partie d'extraction peut être aussi un facteur d'influence car la structure du bois fibreux et de la fibre diffère d'une zone à une autre dans le même palmier dattier. Les propriétés mécaniques des fibres de la palme donnent des résultats intéressants par rapport à celles des autres fibres de palmier dattier. Les valeurs obtenues pour le coefficient de Poisson de bois de pétiole sont presque identiques au bois classique et au liège et du même ordre de grandeur que les valeurs obtenues par Y. Djebbloun et al. [6] pour la fibre de Lif de palmier dattier et C. Baly [2] pour la fibre de chanvre.

II.4 Conclusion

Les résultats obtenus à travers ce chapitre ont permis d'identifier les propriétés physiques du bois fibreux et des fibres extraites de la palme mûre du palmier dattier, telles que la masse volumique de la matrice végétale (Lignine) et de la fibre ainsi que la masse volumique du bois fibreux dans différentes parties de la palme mûre. A partir des tests de séchage, le taux d'humidité pour chaque partie de la palme a été évalué. Ensuite, les caractéristiques mécaniques du bois fibreux de la palme mûre après le séchage ont été déterminées le long de la palme à partir de la partie pétiolaire (*BP*) jusqu'à la partie rachis (*BR*). Les caractéristiques mécaniques des fibres ont été obtenues à partir d'une sollicitation en traction des fibres extraites de la palme. L'étude a porté sur les deux parties de la palme mûre, la partie pétiolaire (*BP et FP*) et le rachis (*BR et FR*). La partie pétiole (*BP*) présente la masse volumique et les propriétés mécaniques les plus faibles. Ceci peut être dû au pourcentage très élevée de la matrice végétale (Lignine) et du taux d'humidité dans cette partie. D'autre part, la partie rachis (*BR*) présente des comportements mécaniques remarquables par rapport à ceux des autres parties de la palme. Ceci est due à ses propriétés physiques car le pourcentage des fibres est plus élevé et cohérent. En plus, la rigidité et la résistante à la traction des fibres (*FR*) dans cette partie sont meilleures.

Les résultats obtenus et ceux de la littérature montrent une importante dispersion des valeurs des caractéristiques physiques et mécaniques du bois fibreux et des fibres extraites du palmier dattier. Ceci est dû à plusieurs facteurs tels que la grande diversité des types de palmier dattier et la présence de plusieurs types de fibres dans le même palmier. Ainsi, les résultats ne peuvent être présentés que sous forme de borne inférieure et borne supérieure.

Ainsi, le bois de palmier dattier conviendra au développement de matériaux isolants efficaces et sûrs pour le développement futur de matériaux, selon les résultats obtenus et la déclaration des chercheurs dans littératures.

Références

- [1] 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.
- [2] C. Baley, *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*: Ed. Techniques Ingénieur, 2005.
- [3] M. Dallel, "Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima* L.): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil," thèse de doctorat, Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2012.
- [4] 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.
- [5] N. R. J. Hyness, N. Vignesh, P. Senthamaraiannan, S. Saravanakumar, and M. Sanjay, "Characterization of new natural cellulosic fiber from *Heteropogon contortus* plant," *Journal of Natural Fibers*, vol. 15, pp. 146-153, 2018.
- [6] 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.
- [7] P. Manimaran, S. Saravanakumar, N. Mithun, and P. Senthamaraiannan, "Physicochemical properties of new cellulosic fibers from the bark of *Acacia arabica*," *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 21, pp. 548-553, 2016.
- [8] P. Senthamaraiannan, S. Saravanakumar, V. Arthanarieswaran, and P. Sugumaran, "Physico-chemical properties of new cellulosic fibers from the bark of *Acacia planifrons*," *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 21, pp. 207-213, 2016.
- [9] F. Beaulard, "Sur les propriétés élastiques des fils de soie et le coefficient de Poisson," *Journal of Physical and Theoretical Applications*, vol. 2, pp. 785-795, 1903.
- [10] T. Guettaf Temam, "Caractérisation Structurale et mécanique du Bois de la Grappe du Palmier Dattier " *thèse de doctorat, université de biskra, Algérie*, 2017.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] T. Guettaf Temem, "Caractérisation structurale et mécanique du bois de la grappe du dattier," thèse de doctorat, pp. 115-120, Université de biskra, Algérie, 2017.
- [14] P. Baskaran, M. Kathiresan, P. Senthamaraiannan, and S. Saravanakumar, "Characterization of new natural cellulosic fiber from the bark of *dichrostachys cinerea*," *Journal of Natural Fibers*, vol. 15, pp. 62-68, 2018.
- [15] K. B. Hamou, "Extraction de nanofibrilles de cellulose à structure et propriétés contrôlées: caractérisation, propriétés rhéologiques et application nanocomposites," thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2015, France.
- [16] T. Djoudi, M. Hecini, D. Scida, Y. Djebbloun, and H. Djemai, "Physico-Mechanical Characterization of Composite Materials Based on Date Palm Tree Fibers," *Journal of Natural Fibers*, pp. 1-14, 2019.
- [17] M. Tajvidi and A. Takemura, "Effect of fiber content and type, compatibilizer, and heating rate on thermogravimetric properties of natural fiber high density polyethylene composites," *Polymer Composites*, vol. 30, pp. 1226-1233, 2009.

- [18] E. A. Elbadry, "Agro-Residues: Surface Treatment and Characterization of Date Palm Tree Fiber as Composite Reinforcement," *Journal of Composites*, vol. 2014, 2014.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] L. Fathi, "Structural and mechanical properties of the wood from coconut palms, oil palms and date palms," *reviewed and is correct;1305 SW 9th Street, Dundee, OR 97115, USA, Informatik und Naturwissenschaften an der Universität Hamburg*, 2014.
- [22] 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.
- [23] M. Baali, "Contribution à la caractérisation et à l'exploration de la microstructure et des propriétés des constituants du palmier," Mémoire de magistère, Université de Biskra, Algérie, 2012.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] A. Alawar, A. M. Hamed, and K. Al-Kaabi, "Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement," *Composites Part B: Engineering*, vol. 40, pp. 601-606, 2009.
- [28] 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.
- [29] A. Kriker, A. Bali, G. Debicki, M. Bouziane, and M. Chabannet, "Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates," *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, pp. 639-648, 2008.

III.1 Présentation et élaborations des matériaux	85
III.1.1 Choix des constituants des matériaux composites	86
III.1.1.1 Fibres	86
III.1.1.2 Bois	87
III.1.1.3 Matrice	88
III.1.2 Elaboration des matériaux composites	89
III.1.2.1 Epoxy/Fibre de rachis	89
III.1.2.2 Polypropylène (PP)/Fibre de rachis	90
III.1.2.3 Matrice naturelle/Particules de bois	92
III.2. Caractérisation mécanique	93
III.2.1 Présentation des essais mécaniques	93
III.2.1.1 Essai de traction	94
III.2.1.2 Essai de compression	95
III.2.2 Résultats et discussion	95
III.2.1 Essai de traction	95
III.2.2 Essai de compression	100
III.3 Analyse morphologique	102
III.4 Conclusion	104
Références	106

Ce chapitre dédié à l'élaboration et à la caractérisation des matériaux composites s'appuie sur la précédente étude sur les fibres et le bois fibreux de palme présentée au [Chapitre II](#). Ce dernier fournit les informations nécessaires pour adapter à la meilleure utilisation de ces constituants pour le renforcement de divers matériaux composites et leur éventuelle valorisation industrielle. Sur la base des résultats intéressants obtenus lors des tests physiques et mécaniques sur la fibre et le bois de la palme, en particulier les résultats de la partie de rachis, tels que la faible densité et la bonne résistance mécanique des fibres extraites de cette partie, on peut conclure que tous les types des fibres de la partie rachis peuvent être utilisées comme renfort pour développer de nouveaux matériaux composites à base de matrices différentes. De plus, le bois de la partie pétiolaire possède la valeur la plus basse en termes de masse volumique et la bonne conductivité thermique qui été signalées dans de précédents travaux [1-3], ce qui permet d'envisager naturellement l'utilisation de ces bois dans la mise en œuvre des matériaux composites à particules pour une future utilisation dans les éléments d'isolation.

L'objectif de ce chapitre est l'élaboration et la caractérisation mécanique des matériaux composites constitués de renforts issues d'une palme mûre d'un palmier dattier à différentes fractions massiques. Deux types de matrices différentes, matrice époxyde et matrice polypropylène sont utilisés lors de l'élaboration. A partir des résultats obtenus par cette étude, on peut déduire le taux de fibres optimale en fonction des priorités des usages requis, ainsi que choisir la matrice appropriée. L'observation microscopique des échantillons des composites permet ainsi ce choix en fonction de la bonne adhérence interfaciale entre la fibre et la matrice.

L'élaboration et la caractérisation mécanique de matériaux composites à base de particules de bois et matrice naturelle permet de les comparer avec certains matériaux végétaux classiques utilisés comme éléments de structures isolantes telles que le bois et le liège.

III.1 Présentation et élaborations des matériaux

Dans cette étude, différents constituants ont été utilisés pour préparer des matériaux composites à différentes composition. Ainsi que l'utilisation de diverses techniques pour la mise en œuvre de matériaux composites.

III.1.1 Choix des constituants des matériaux composites

Les matériaux utilisés pour l'élaboration des matériaux composites dans cette partie de l'étude sont des renforts végétaux en fibres et en bois extraits de la palme de palmier dattier. En outre, trois types de matrices différentes ont été utilisés: une matrice thermodurcissable, une matrice thermoplastique et une matrice naturelle.

III.1.1.1 Fibres

Cette partie d'étude s'intéresse à l'utilisation des fibres extraites d'une palme mûre de même palmier dattier présenté au [Chapitre II](#). Nous considérons la partie rachis (la partie épineuse II et la partie intermédiaire III) et la partie foliotée de la palme ([Figure I.21](#)). Les fibres de la partie rachis (FPR) et la partie foliotée (FPF) sont obtenues par la technique d'extraction présentée dans le [Chapitre II](#) (la section [II.2.1.2](#)). Elles sont coupées dans un broyeur électrique à lames à une vitesse de 300 tr/min pendant 90 secondes. Les fibres broyées obtenues sont soumises à un tamisage intensif dans une succession de tamis métalliques pendant 30 minutes. Enfin, les fibres choisies de taille (0.25-0.35 mm) sont lavées et séchées une seconde fois pour assurer leur propreté. La [Figure III.1](#) présente le protocole sur la préparation des fibres courtes, fibres utilisées lors de la mise en œuvre des matériaux composites.

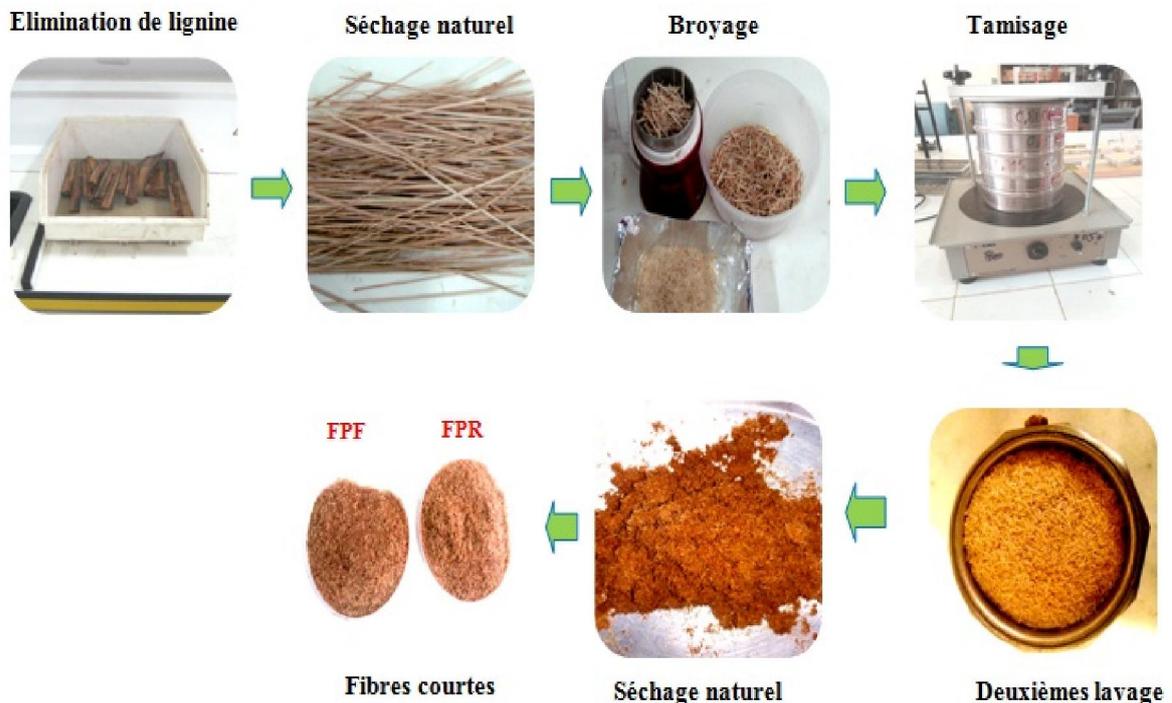


Figure III.1. Protocole de la préparation des fibres.

III.1.1.2 Bois

Dans le cadre de ce travail, les particules de bois de pétiole proviennent de la même source que la partie pétiolaire, ce qui a été étudié dans le chapitre précédent (*Figure II.8*). Les particules de bois ont été préparées à partir des déchets de bois de ces pétioles par un découpage manuel pour les tailles entre 1 et 5 mm comme le présente la *Figure III.2*. La taille inférieure à 1 mm est obtenue par un tamisage des copeaux de bois broyé à l'aide d'un broyeur à lame disponibles à Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne (ITDAS) Biskra.



*Figure III.2. Préparation des particules de bois de pétiole :
a) déchets de bois, b) découpage, c) tamisage.*

La *Figure III.3* présente les différentes tailles des particules de bois de pétiole obtenues.



Figure III.3. Particules de bois de pétiole selon la taille.

III.1.1.3 Matrice

Les différentes matrices utilisées pour la préparation des matériaux composites sont de trois types: époxyde, polypropylène et colle naturelle.

a) Epoxyde : La matrice thermodurcissable (Époxy Résine Scapa Polymeric 41) est une résine époxyde bi-composant, polymérisable à température ambiante, semi-rigide non chargée. La couleur du mélange est ambre. Sa densité est de 1.03 g/cm^3 . La préparation de la résine s'effectue à une température ambiante d'environ 30°C pendant 5 minutes. Certains avantages de cette matrice sont un mélange facile grâce aux rapports résine/durcisseur (1/1) et le temps de polymérisation s'adapte au climat tempéré. [Figure III.4](#). (Fiche technique en [Annexe](#)).



Figure III.4. Résine Epoxyde avec leur durcisseur.

b) Polypropylène : Le polypropylène utilisé pour cette étude est de la gamme des homopolymères de (REPSOL) ([Figure III.5](#)), enregistré sous la référence PP080 G2M. Il couvre une large plage d'indices de fluidité, avec des valeurs démarrant à $1\text{g}/10\text{min}$, incluant des spécialités jusqu'à $150\text{g}/10\text{min}$ dans les applications d'injection et allant $800\text{-}1100\text{g}/10\text{min}$ dans les applications d'extrusion pour fibres ultra-fines. Ce type de thermoplastique est utilisé dans le domaine de la fabrication des articles ménagers, les bouchons et les diverses pièces à paroi mince (Fiche technique en [Annexe](#)).



Figure III.5. Polypropylène.

c) **Colle naturelle** : On a utilisé une colle naturelle à base de lignine par le mélange colle à bois (colle vinylique) et poudre de lignine. La colle vinylique est une colle blanche constituée de poly acétate de vinyle en solution aqueuse, destinée à coller divers matériaux hydrophiles. La lignine est obtenue à partir du tamisage des fibres de palme après la procédure de broyage (*Figure III.1*). la pate molle de fixation (colle naturelle) a été obtenu avec un rapport de 1/5 entre la lignine et la colle, resultat de plusieurs test de mélange. Ainsi on a ajouté lentement 40 g de lignine à 200 g de solution de colle vinylique, puis l'ensemble est mélangé constamment jusqu'à l'homogénéisation des deux composants. La teneur en matières solides de la lignine dans la pâte molle de fixation (colle naturelle) est d'environ 16.66% en poids (*Figure III.6*).



Figure III.6. Protocole de préparation de la colle naturelle :
a) poudre de lignine, b) colle vinylique, c) pâte de colle naturelle.

III.1.2 Elaboration des matériaux composites

Les matériaux composites sont réalisés pour différentes valeurs de fraction massique de fibre, déterminées par la relation suivante:

$$w_f = \frac{m_f}{m_c} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Où

- w_f : fraction massique de la fibre,
- m_f : la masse de la fibre,
- m_c : la masse du composite.

III.1.2.1 Epoxy/Fibre de rachis

Le moulage manuel des plaques du mélange Epoxy/Fibre de Rachis (EFR) et Epoxy/Fibre de Foliotée (EFF), est réalisé par l'utilisation d'un moule en plastique de volume (180x130x3) mm³ soumis à une pression sous une charge de 15 kg pendant 24 heures. Les plaques obtenues ont été conservées dans un **déstillateur** pendant une semaine. La mise en œuvre des plaques en matériau composite est effectuée pour différentes valeurs

de fraction massique des fibres (04%, 07%,10% et 15%). Les éprouvettes obtenues après la découpe sont référencées selon le type de fibres (EFR ou EFF) et la fraction massique des fibres (EFR04, EFR07, EFR10, EFF07 et EFR15). La [Figure III.7](#) présente les différentes étapes de préparation des plaques composites et les éprouvettes.

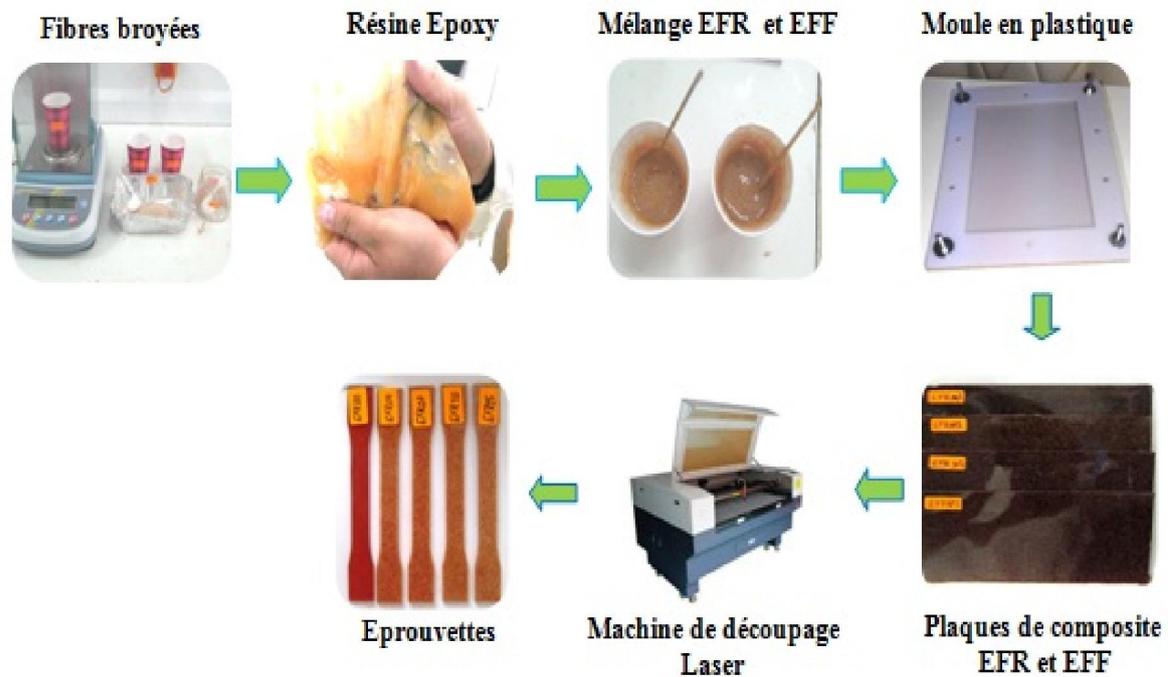


Figure III.7. Protocole de préparation des plaques : époxyde/fibre de la palme.

III.1.2.2 Polypropylène (PP)/Fibre de rachis

La préparation des compounds polypropylènes (PP)/fibre de rachis ont été préparées en collaboration avec le Laboratoire de l'IFTS (Charleville-Mézière.France) dans le cadre de la collaboration entre Laboratoire de Génie Mécanique (LGM) Université de Biskra et le Laboratoire d'Ingénierie et Sciences des Matériaux (LISM) Université de Reims. Une extrudeuse mono-vis de type axon ab S-26550 Plastics Machinery a été utilisée pour mélanger la fibre du rachis et le PP. Le mélange PP/ fibre de rachis est effectuée à partir de différentes valeurs de fraction massique des fibres (04%, 07%, 10% et 15%). On ajoute lentement les fibres et le PP à l'extrudeuse pr chaque taux. L'extrudeuse est réglée dans les conditions suivantes: la vitesse de rotation de la vis est de 80 tr/min et les températures de fusion pour les six zones sont de 192°C pour les zones 1 et 2, 189°C pour les zones 3 et 6, 190°C pour la zone 4 et 194°C pour la zone 5. Des granulés de taille 10-15 mm sont obtenus par l'utilisation d'un broyeur à lame après le refroidissement des fils extrudés en matériaux composites à l'eau tiède. La [Figure III.8](#) présente le protocole de préparation des compounds polypropylènes (PP) /fibre de rachis

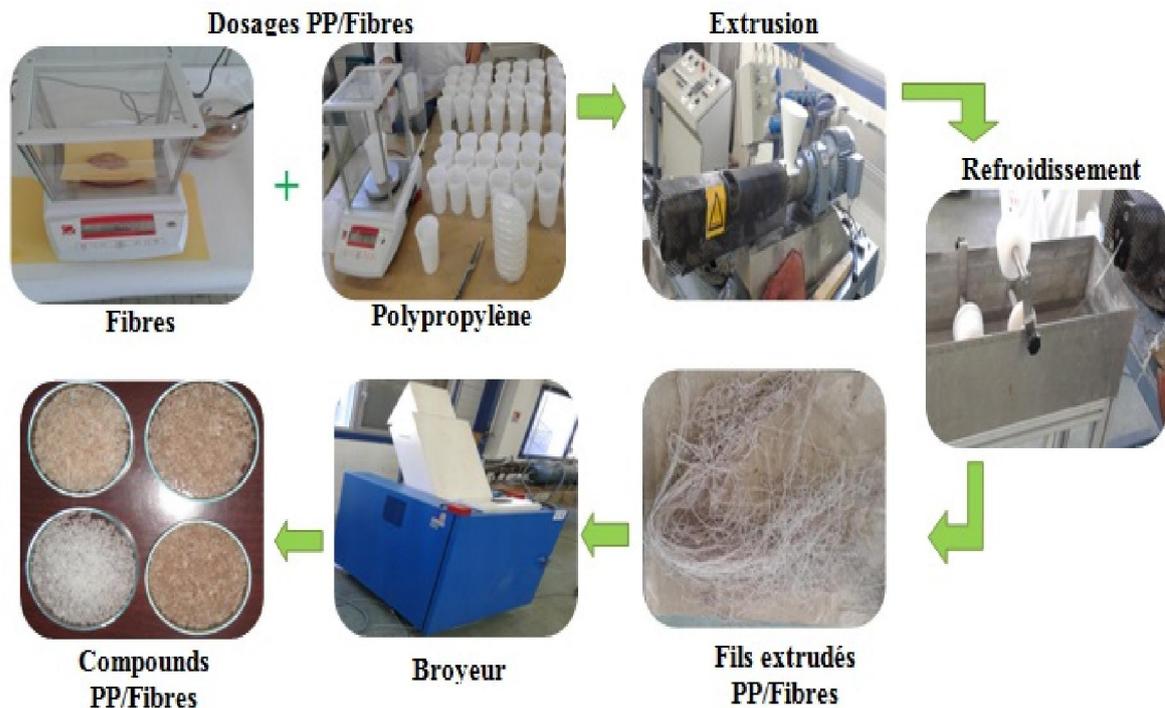


Figure III.8. Protocole de préparation des compounds PP/fibre de rachis.

Le moulage des plaques a été préparé en collaboration avec le laboratoire de plasturgie de l'entreprise des câbles électrique [ENICA-Biskra](#). La fabrication des plaques composites rectangulaires a été réalisée par le procédé de pressage à chaud des compounds obtenus dans une presse à compression de type Polystat 300s. Un moule carré en acier inoxydable constitué de deux empreintes rectangulaires de dimensions (290x130x2.5) mm³ à été utilisé. Les conditions de moulage des plaques composites sur la presse à compression à chaud sont illustrées au [Tableau III.1](#).

Tableau III.1. Conditions du moulage par compression à chaud.

N° opérations	T (°C)	P (bar)	t (min)
1.Préchauffage	194	1	15
2.Compression 1	194	100	3
3.Compression 2	194	200	3
4.Compression 3	194	300	3
5.Ouvrir / Fermer	Pour dégagé les gaz		2 à 3fois
6.Refroidissement	20	300	-

La pression a été maintenue jusqu'à 24 minutes, puis le moule est refroidi à 20°C par circulation de l'eau dans le circuit de refroidissement.

Les éprouvettes obtenues après le découpage des plaques sont référencées selon le type de la fraction massique des fibres (PFR04, PFR07, PFR10 et PFR15). La Figure III.9 présente les différentes étapes de préparation des plaques composites et les éprouvettes.

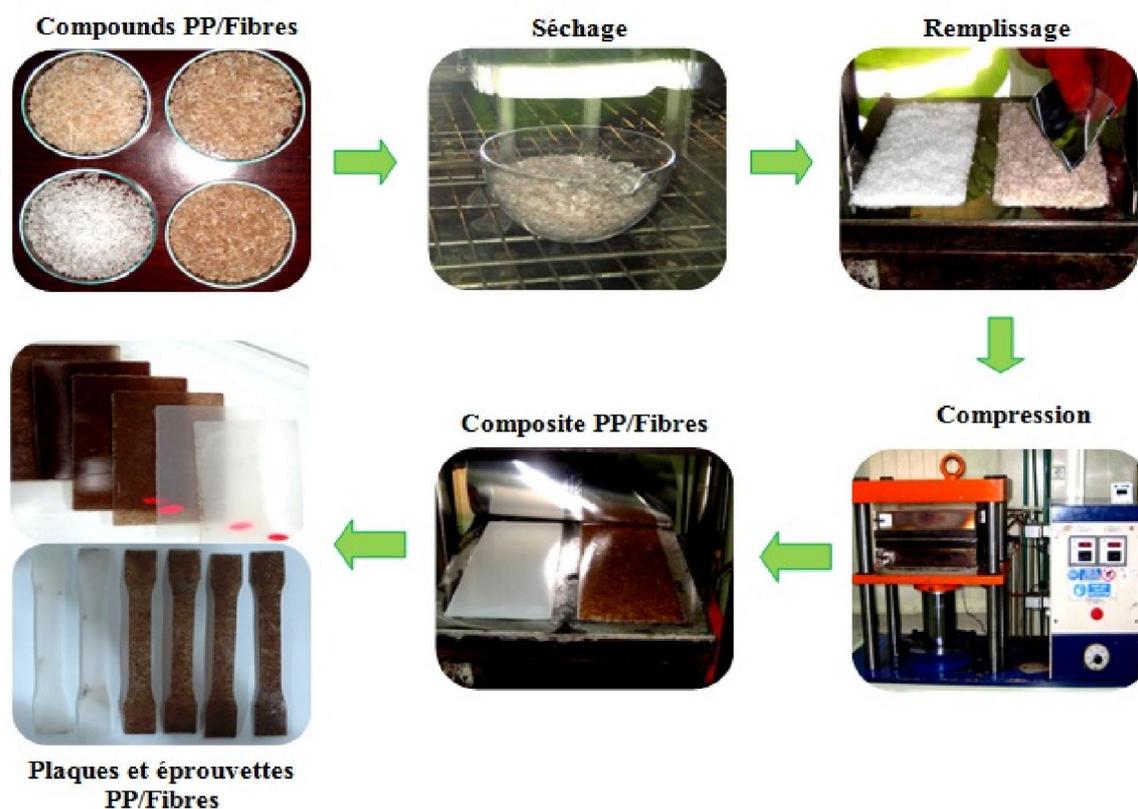


Figure III.9. Protocole de préparation des plaques : PP/fibre de rachis.

III.1.2.3 Matrice naturelle/Particule de bois

Les plaques de composite à particules de bois de pétiole et la matrice naturelle sont effectuées à partir de différentes tailles des particules (0 à 1, de 1 à 3 et de 3 à 5 mm) qui sont référencées selon ces tailles maximales (CBP1, CBP3 et CBP5). Le moulage des plaques a été réalisé par l'utilisation d'un moule métallique démontable de dimension (150x110x25) mm³. Pour cela, les particules de bois de pétiole sont soumises à la vapeur d'eau distillée dans un récipient fermé pendant 25 minutes, pour leur permettre de gonfler. Un mélange de 240 grammes de colle naturelle avec 50 grammes de ces particules est ensuite versé dans le moule. Le moule est soumis à une pression de 10 bars pendant 45 minutes à une température de 110°C pour diminuer la densité des particules [1]. Les plaques moulées sont ensuite séchées dans une étuve à une température de 200°C pendant

2 heures avant le démoulage. Les plaques composites de particules sont séchées une seconde fois après le démoulage à une température de 70°C pendant 72 heures, et puis laissées au repos pendant une semaine dans l'air ambiant afin de se stabiliser avant le découpage des échantillons. La [Figure III.10](#) présente le protocole de préparation des plaques composites matrice naturelle/particule de bois.

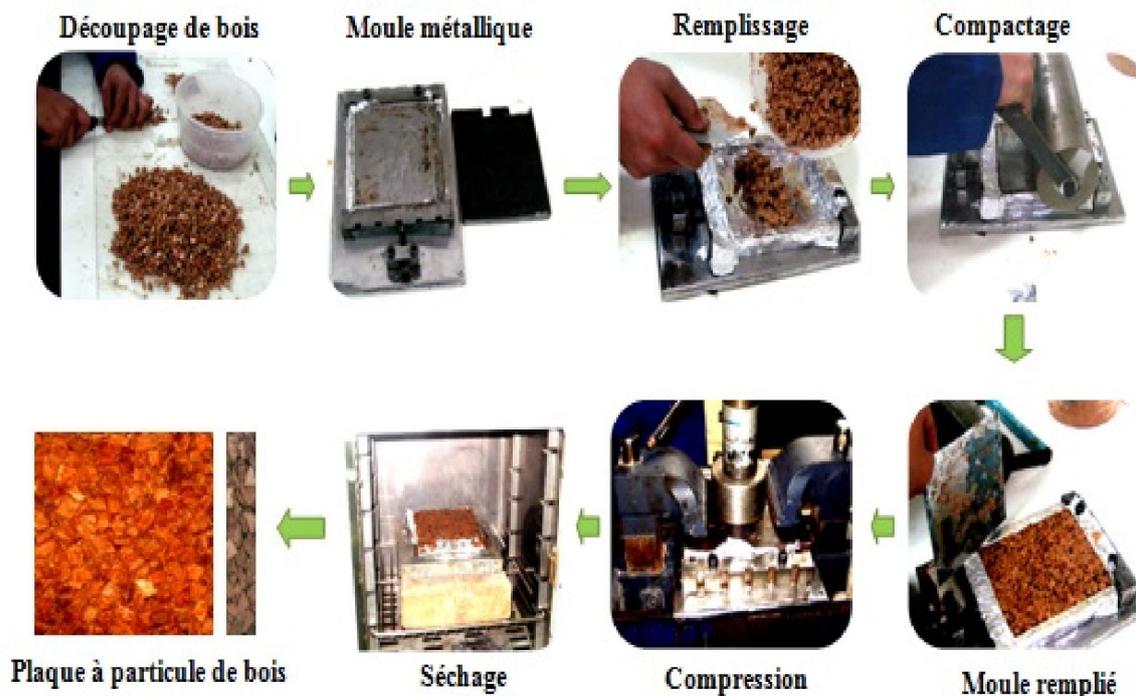


Figure III.10. Protocole de préparation des plaques : matrice naturelle/particule de bois.

III.2 Caractérisation mécanique

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques des différents matériaux composites à base de renforts des différentes parties de la palme, des essais mécaniques (essais de traction et essai de compression) ont été réalisés sur une machine universelle de type **Instron 5969** pilotée par un ordinateur avec le logiciel Bluehill3. Les cellules utilisées ont une capacité maximale de 5 kN pour tous les essais.

III.2.1 Présentation des essais mécaniques

Les éprouvettes en forme d'haltère pour les tests mécaniques de traction ont été découpées à l'aide d'une machine de découpe CO₂ laser (Guangzhou Great Year Lazer Technology série **GY-9060 E**) conformément à la norme **NF ISO 527**. ([Figure III.11](#))

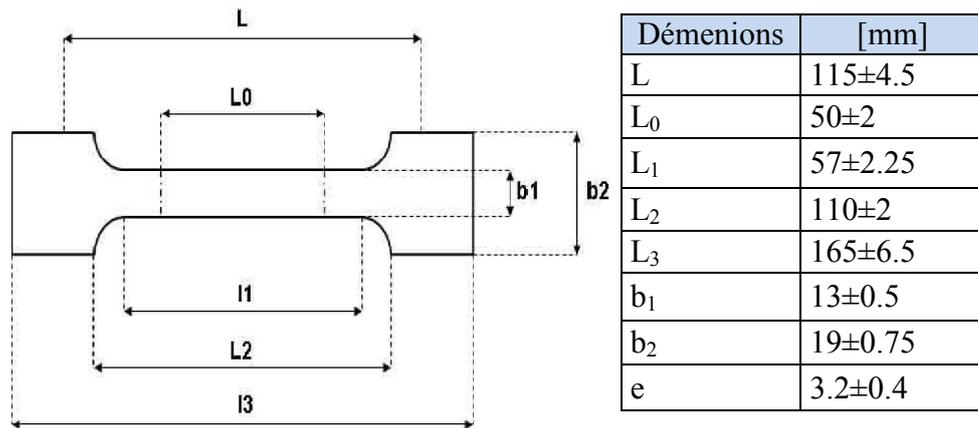


Figure III.11. Eprouvtes d'essai de traction conformément à la norme NF ISO 527.

Les éprouvettes de test mécanique de compression ont été préparées selon la norme NF B51-007-ISO3132-1975, en découpant les plaques de particules de bois obtenues à l'aide d'une table de découpe de bois. La taille des éprouvettes est 15x15x15 mm³. La Figure III.12 présente le protocole de préparation des éprouvettes de l'essai de compression de composite matrice naturelle/particule de bois.

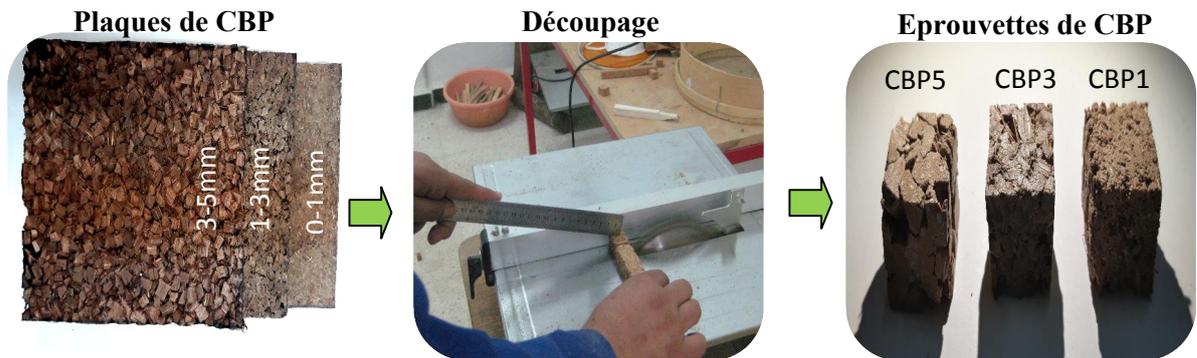


Figure III.12. Protocole de préparation des éprouvettes : matrice naturelle/particule de bois.

III.2.1.1 Essai de traction

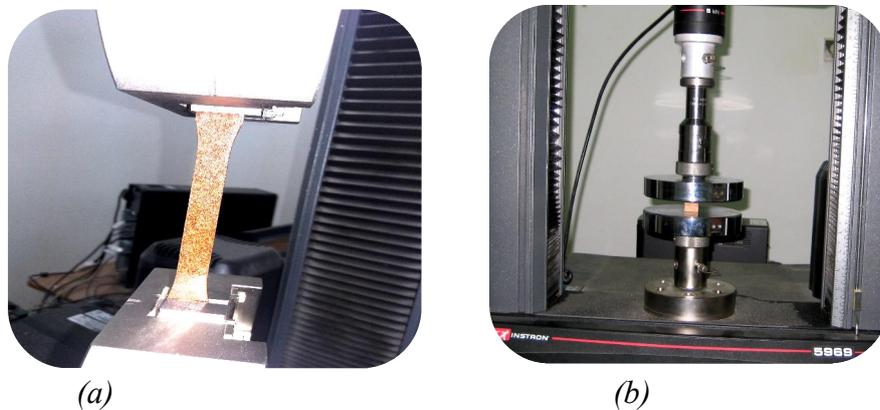
Dans le cas des essais de traction sur les matériaux composites, Les échantillons composites (EFR, EFF et PFR) ont été utilisés à différentes fractions massiques pour les composites Epoxy/Fibres de palme et PP/Fibre de rachis.

L'étude de l'influence du taux des fibres sur les propriétés mécaniques du composite a été effectuée avec les fibres de la partie rachis. La comparaison entre les composites réalisés avec les fibres la partie rachis EFR et de la partie foliotée EFF a été effectuée avec le seul pourcentage de 07 %.

III.2.1.2 Essai de compression

L'essai de compression a été effectué avec des éprouvettes de différentes composites matrice naturelle/particule de bois (CBP) dans les deux directions longitudinale (CL) et transversale (CT). La vitesse de l'essai est constante de 5mm/min. La contrainte et la déformation maximale dans le cas des éprouvettes (CT) sont déterminées au point de changement de la linéarité de la courbe charge-déplacement, tandis que, dans le cas des éprouvettes (CL) elles ont déterminées au point de la chute franche de la charge due à la rupture de l'éprouvette.

La [Figure III.13](#) montre les tests mécaniques effectués sur les matériaux composites.



*Figure III.13. Tests mécaniques sur le Composite :
a) essai de traction, b) essai de compression.*

III.2.2 Résultats et discussion

III.2.2.1 Essai de traction

Les résultats obtenus de l'essai de traction sur des éprouvettes en matériaux composites à base de différentes fractions massiques de fibres de la palme (EFR, EFF et PFR) sont présentés par des courbes contrainte-déformation ([Figure III.14](#), [III.16](#) et [III.18](#)). Elles présentent une partie linéaire relativement importante et un domaine réduit où apparait la non-linéarité.

La [Figure III.14](#) présente un exemple de courbe contrainte-déformation des résultats obtenues par les essais de traction sur des éprouvettes de composite en Epoxyde chargé par différents pourcentages de fibres de rachis.

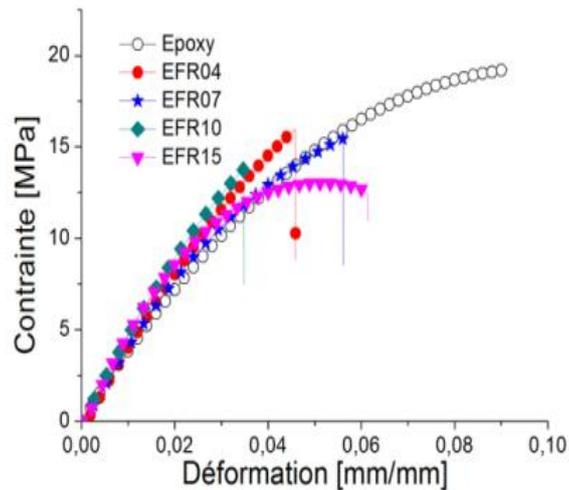


Figure III.14. Résultats de l'essai de traction sur le matériau composite EFR, exemple de courbe contrainte-déformation.

Le [Tableau III.2](#) donne les caractéristiques mécaniques de la résine vierge et des matériaux composites (EFR) obtenues à partir de plusieurs essais.

Tableau III.2. Résultats de l'essai de traction des éprouvettes composites (EFR).

Eprouvettes	Pourcentage de fibre [%]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E [GPa]
Epoxy vierge	00	16.73±0.42	0.181±0.020	0.31±0.01
EFR04	04	16.35±0.66	0.052±0.003	0.46±0.02
EFR07	07	16.32±0.86	0.060±0.007	0.46±0.03
EFR10	10	15.07±1.10	0.044±0.002	0.52±0.06
EFR15	15	11.04±1.95	0.040±0.009	0.44±0.06

Nous remarquons d'après les résultats obtenus que le module d'élasticité et la contrainte maximale varient selon le taux de fibres. Notons qu'il y a une amélioration pour les valeurs du module d'élasticité de composite à base de fibres de palmier dattier due au renforcement de la résine par les fibres, alors que les valeurs de la contrainte maximale diminuent avec l'augmentation du taux de fibres.

La [Figure III.15](#) présente la variation du module d'élasticité et de la contrainte maximale du matériau composite à différents taux de fibres. A partir des résultats obtenus, le renforcement de la matrice époxyde par les fibres de palmier dattier entraîne une augmentation du module d'élasticité jusqu'à 73% pour un taux de fibre de 10%. Pour les autres taux de fibres (4% ,7% et 15%), les valeurs de module d'élasticité sont sensiblement les mêmes, supérieures jusqu'à 48% par rapport à la matrice époxyde vierge. D'autre part, il convient de noter que la variation de la contrainte maximale est très faible pour les matériaux EFR04 et EFR07, avec une réduction de 2%. A partir de 10% de fibres, la

contrainte maximale diminue de 10 et 34% par rapport à la matrice, respectivement pour les matériaux EFR10 et EFR15.

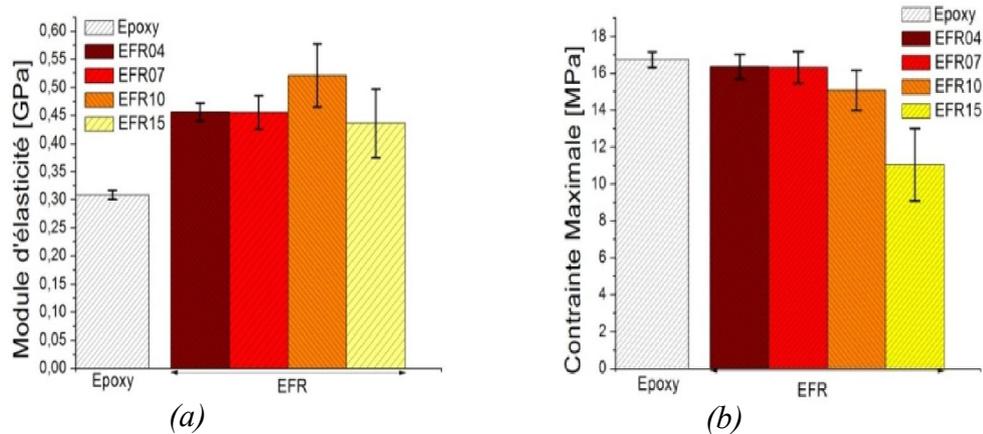


Figure III.15. Résultats de l'essai de traction pour différents taux de fibre (EFR) : a) module d'élasticité, b) contrainte maximale.

Le Tableau III.3 donne les caractéristiques mécaniques des matériaux composites (EFR et EFF) avec la même fraction massique (7%) obtenues à partir de plusieurs essais. Il s'agit ici de comparer deux zones d'extraction des fibres dans la partie rachis et la partie foliotée, pour une même fraction. La Figure III.16 permet de comparer l'allure des courbes de traction des deux matériaux EFR07 et EFF07.

Tableau III.3. Résultats de l'essai de traction des éprouvettes composites (EFR07 et EFF07).

Eprouvettes	Pourcentage de fibre [%]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E [GPa]
Epoxy vierge	00	16.73±0.42	0.181±0.016	0.31±0.01
EFR07	07	16.32±0.86	0.060±0.007	0.46±0.03
EFF07	07	14.08±0.72	0.047±0.005	0.43±0.04

La Figure III.17 présente une comparaison du module d'élasticité et de la contrainte maximale des matériaux EFR et EFF avec une fraction massique de fibres identique de 7%. Les résultats obtenus indiquent que le module d'élasticité du matériau EFR07 a augmenté par rapport à celui de la matrice époxyde vierge de près de 50% alors que celui du matériau EFF07 a augmenté de 40%. D'autre part, la variation de la contrainte maximale est très faible pour le matériau EFR07 en baisse de 2% et la réduction passe à 16% pour le matériau EFF07.

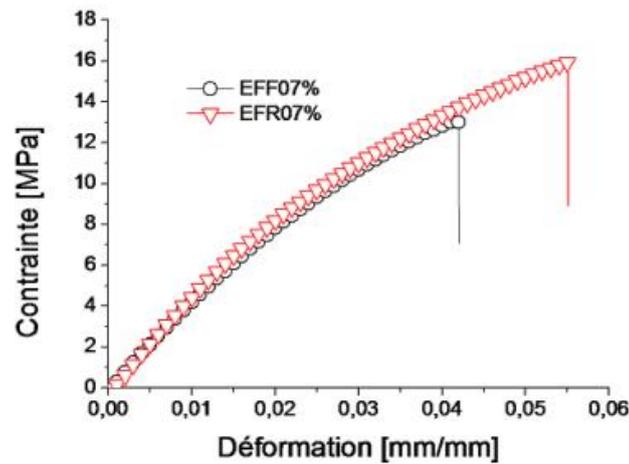


Figure III.16. Exemple de courbe contrainte-déformation des matériaux (EPR07, EPF07) pour une fraction massique de fibres fixe de 7%.

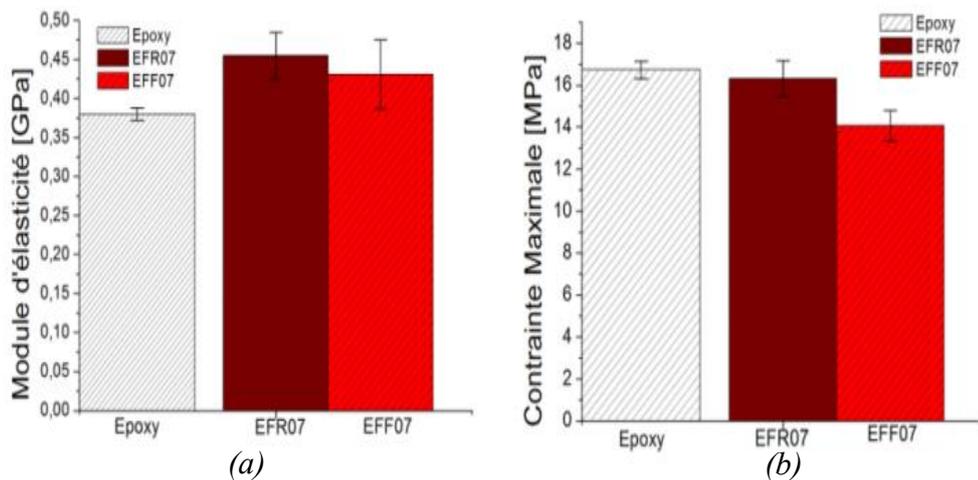


Figure III.17. Résultats de l'essai de traction de (EFR et EFF) à un taux de fibre fixe de 7% : a) module d'élasticité, b) contrainte maximale.

Les courbes de contrainte-déformation de la [Figure III.18](#) présentent les résultats obtenus par les essais de traction sur des éprouvettes de composite en polypropylène chargé par des fibres de rachis.

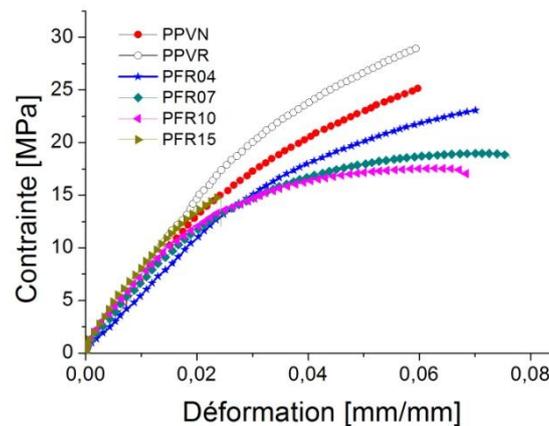


Figure III.18. Résultats de l'essai de traction sur le matériau composite PFR.

Le Tableau III.4 donne les caractéristiques mécaniques de polypropylène vierge et des matériaux composites (PFR) obtenues à partir de plusieurs essais.

Tableau III.4. Résultats de l'essai de traction des éprouvettes composites (PFR).

Eprouvettes	Pourcentage de fibres [%]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E [GPa]
PP vierge	00	31.66±0.57	0.155±0.008	0.66±0.03
PP vierge recyclé	00	32.21±3.51	0.144±0.005	0.66±0.04
PFR04	04	23.06±0.65	0.064±0.002	0.66±0.02
PFR07	07	18.81±0.59	0.064±0.008	0.79±0.08
PFR10	10	18.14±0.06	0.062±0.008	0.90±0.12
PFR15	15	10.79±3.71	0.019±0.005	0.99±0.13

Les propriétés mécaniques des composites PFR avec différentes fractions massiques et les propriétés mécaniques du polypropylène vierge et recyclé sont présentées à la Figure III.19.

La Figure III.19 montre l'évolution de module d'élasticité et la contrainte maximale en fonction de la fraction massique des fibres, alors que celui du polypropylène vierge et le polypropylène recyclé les valeurs de module sont sensiblement les mêmes. Les valeurs de module d'élasticité augmentent graduellement jusqu'à 50% à fraction massique de 15%. D'autre part, les valeurs de la contrainte maximale des composites diminue significativement par rapport au polypropylène vierge jusqu'à 66% pour un taux de 15%.

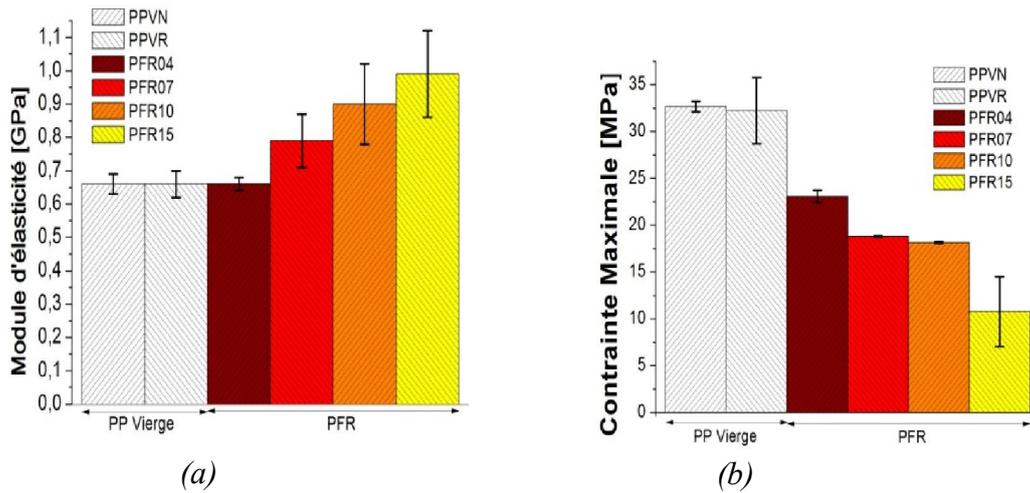


Figure III.19. Résultats de l'essai de traction pour différents taux de fibres (PFR) : a) module d'élasticité, b) contrainte maximale.

III.2.2.2 Essai de compression

Les résultats obtenus des essais de compression dans le sens longitudinal (CL) et le sens transversal (CT) sur des éprouvettes en matériaux composites à différentes tailles de particules de bois de pétiole (CBP) sont présentés par des courbes de contrainte-déformation de la Figure III.20.

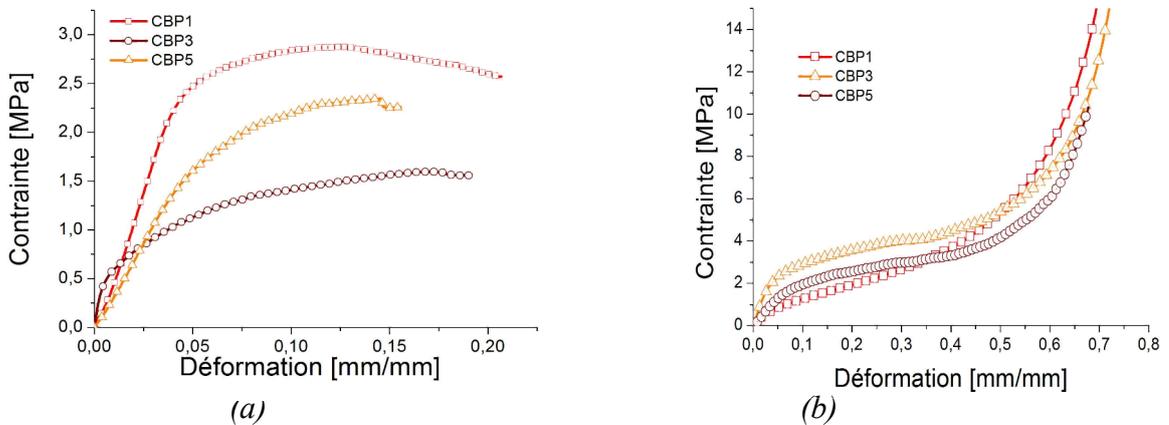


Figure III.20. Résultats de l'essai de compression sur le matériau composite CBP : a) CT, b) CL.

Les courbes d'évolution de la contrainte appliquée en fonction de la déformation pour différents types éprouvettes (CBP1, CBP3 et CBP5) sont similaires dans la Figure III.20 (a) et dans la Figure III.20 (b). Le comportement des éprouvettes sont similaires dans chaque sens de l'essais (CL) et (CT). Dans le domaine élastique, les éprouvettes conservent leur forme cubique pour les deux essais. Après le changement de la linéarité de la courbe contrainte-déformation, les éprouvettes sont complètement désintégrés dans le test (CT).

Le [Tableau III.5](#) donne les caractéristiques mécaniques des matériaux composites (CBP) obtenues à partir de plusieurs essais de compression dans le sens longitudinal (CL) et le sens transversal (CT).

Tableau III.5. Résultats de l'essai de compression des éprouvettes composites (CBP).

Nombres des éprouvettes	Sens longitudinal (CL)			Sens transversal (CT)		
	σ_{\max} [MPa]	ε_{\max} [mm/mm]	E_L [MPa]	σ_{\max} [MPa]	ε_{\max} [mm/mm]	E_T [MPa]
CBP1	1.74±0.85	0.102±0.041	117.01±63.72	2.41±0.06	0.193±0.045	62.73±19.97
CBP3	2.04±0.65	0.225±0.085	116.58±16.03	3.34±0.65	0.273±0.007	97.56±19.86
CBP5	1.94±0.79	0.155±0.038	48.84±16.29	1.79±0.87	0.194±0.147	49.98±3.61
Liège[4]	-	-	5.41±0.53	-	-	20.993±0.18

La [Figure III.21](#) présente la variation du module d'élasticité du matériau composite à différents tailles de particules dans le sens longitudinal (CL) et le sens transversal (CT).

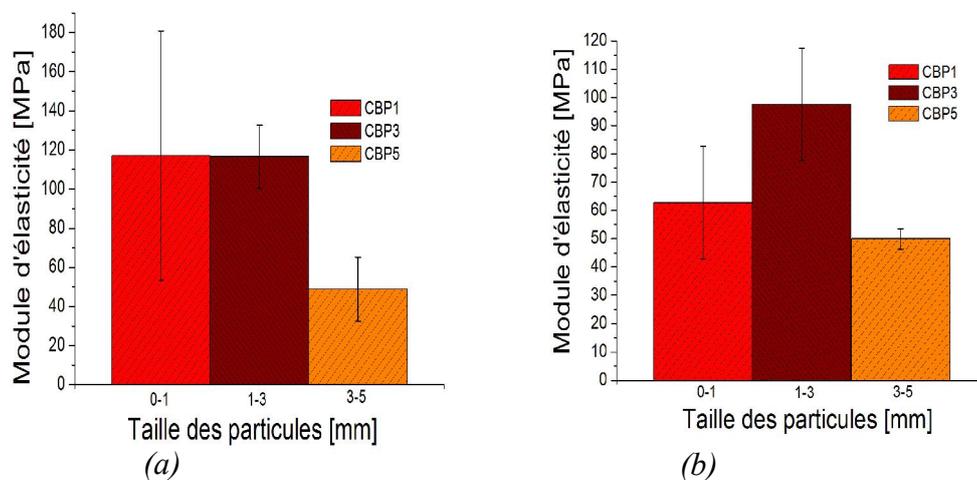


Figure III.21. Résultats de l'essai de compression pour différents composite (CBP) : a) module d'élasticité (CL), b) module d'élasticité (CT).

Nous remarquons d'après les résultats obtenus que le module d'élasticité dans les deux sens d'essai varient selon la taille des particules ([Tableau III.5](#)). En effet, les valeurs des propriétés mécaniques dans les deux sens obtenues à partir de ces courbes ([Figure III.20](#)), sont proches dans les deux sens pour les composites (CBP3 et CBP5), montrant le caractère isotrope de ces matériaux testés. En opposition, les résultats obtenus du matériau (CBP1) testé sont très différentes ([Tableaux III.5](#)). Ceci Montre le caractère anisotrope de ce matériau. Le mélange (colle /particules de bois) étant initialement isotrope (mélange

homogène), l'anisotropie provient de la mise en œuvre (la pression) sur le matériau. Dans le cas des gros particules, le bois s'oppose à l'influence de la mise en œuvre et reste isotrope. Dans le cas des petites particules, l'opposition des particules est minime, et la mise en œuvre influe directement sur la colle et crée l'anisotropie du matériau.

Nous notons également que les valeurs du module d'élasticité et les valeurs de la contrainte maximale obtenues par les essais de compression longitudinal (CL) pour les matériaux CBP1 et CBP3 sont presque identiques aux valeurs obtenues dans le tableau II.5. pour le bois de pétiole brut (BP). Les propriétés mécaniques les plus faibles dans cet essai concernent les matériaux CBP5. Ceci est dû à la grande taille des particules et la liaison entre les particules. Les valeurs des propriétés mécaniques obtenues par le test de compression transversal (CT) sur le composite (CBP) dans tous les cas sont supérieures à celles du bois (BP). Le composite (CBP) présente un module d'élasticité élevée par rapport au module de liège aggloméré sollicité par la compression [4].

III.3 Analyse morphologique

L'étude morphologique des matériaux composites renforcés par des renforts issus de la palme, ont été effectuées selon des observations microscopiques par l'utilisation de différents appareils : microscope optique numérique de type (DigiBlue_QX5_QSG) et un microscope électronique, TESCAN VEGA3 (*Chapitre II*).

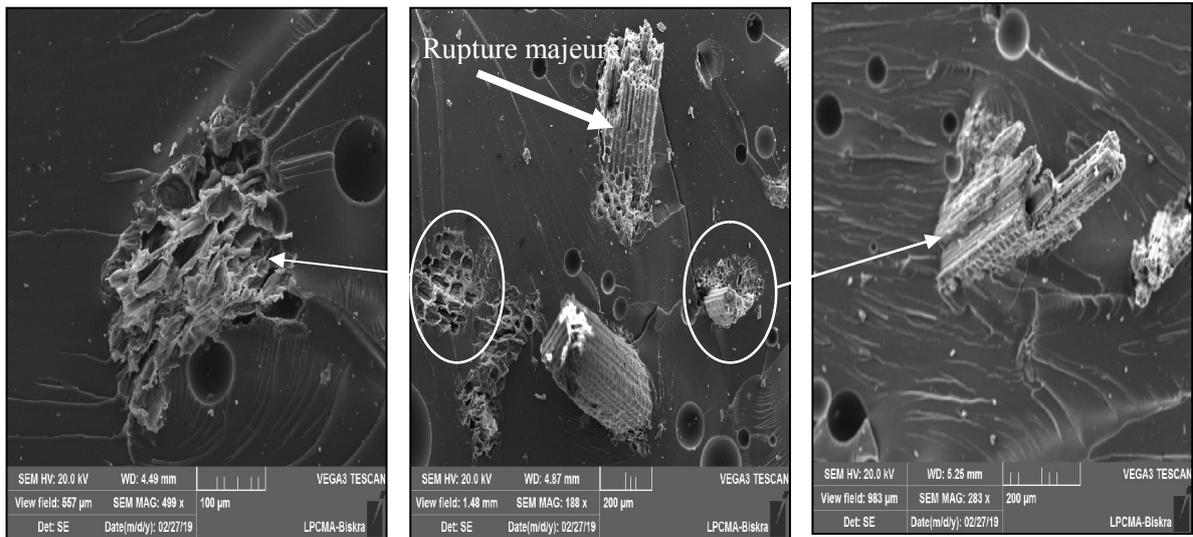
La *Figure III.22* présente une observation microscopique de la répartition des fibres courtes dans des plaques en matériau composite (EFR et PFR) pour différents taux de fibres.



Figure III.22. Observations microscopiques des plaques en matériau composite pour différents taux de fibres: a) EFR (X 10), b) PFR (X 10).

Les observations microscopiques obtenues pour les matériaux composites (EFR et PFR) montrent la distribution homogène des fibres dans les plaques à différents taux de fibres. On note également la différence entre la distribution des fibres dans les deux matériaux composites (EFR et PFR) à même taux de fibres de 4% à 10%. Cela est dû à la nature de la matrice et au processus de mise en œuvre des matériaux. Les observations microscopiques de matériaux composites (15% d'EFR et 15% de PFR) sont très sombres à cause de la densité des fibres.

Les Figures III.23 et III.24 présentent l'observation microscopique par le MEB du matériau composite (EFR10) et (PFR15) après l'essai de traction.

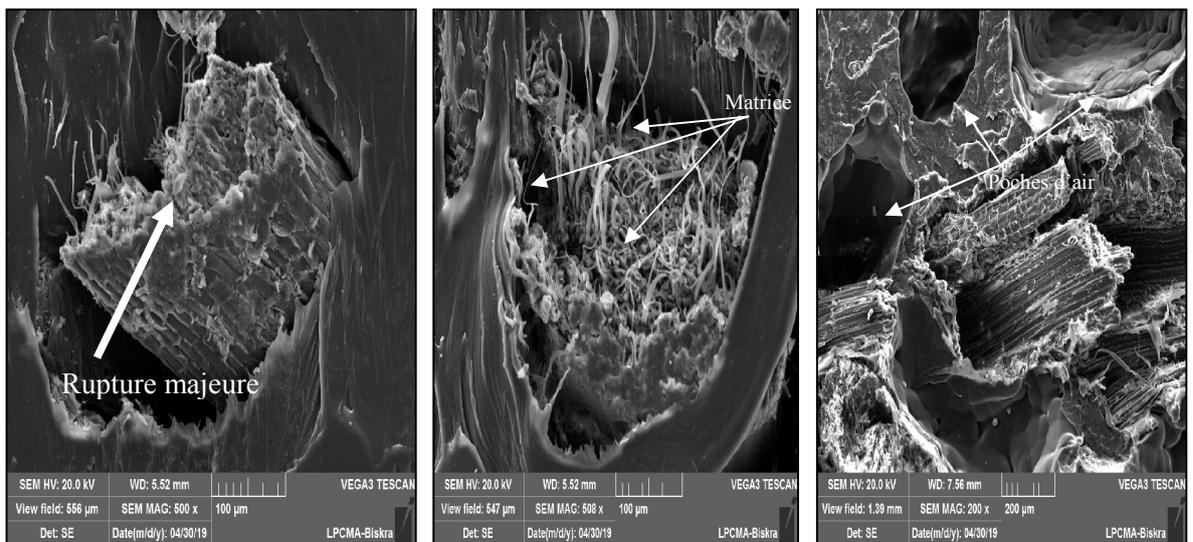


(a)

(b)

(c)

Figure III.23. Observations microscopique par le MEB du matériau composite EFR10 après le test de traction: a) rupture de fibres; b) surface de rupture; c) adhérence matrice / fibres.



(a)

(b)

(c)

Figure III.24. Observations microscopique par le MEB du matériau composite PFR15 après le test de traction: a) adhérence matrice / fibres; b) rupture de fibres; c) surface de rupture.

La [Figure III.23](#) et [III.24](#) montre l'observation microscopique par le MEB des faciès de rupture après le test de traction sur les matériaux composites. On observe une bonne adhésion interfaciale entre les fibres et la matrice époxy due à l'amélioration de la morphologie de la surface de la fibre (FPR) après le processus de lavage qui peut être observée sur les [Figures II.6\(e\)](#). La présence de contact est clairement visible entre les deux composants Fibres / Epoxy après la rupture des éprouvettes ([Figure III.23](#)). D'autre part, On peut observer la présence des poches d'air dans la matrice PP([Figure III.24.\(c\)](#)) et de vide autour des fibres ([Figure III.24\(a\)](#)). Cette observation avait déjà été rapportée dans les études de [Kaddami et al.\[5\]](#); [Alsaed et al.\[6\]](#) et [Al-khanbashi et al.\[7\]](#). Dans le cas des matrices renforcé de fibres courtes, les fibres qui se sont rompues dans le sens de la force d'essai ont pu être observées (indiqué par la flèche sur la [Figure III.23\(b\)](#) et [III.24.\(a\)](#)). La surface de fracture montre la rupture majeure de la fibre en raison de la bonne adhérence entre la surface de la fibre et la résine, ce qui a été observé dans l'étude [Sbiai et al \[8\]](#). La [Figure III.24\(b\)](#) montre des traces de matières étrangères à l'intérieure de la fibre. Ces traces ne peut être que du polypropylène infiltré dans les fibres à travers des pores 'lumières' sous l'effet de la pression de mise en oeuvre. Ce phénomène contribue à améliorer l'adhérence fibre/matrice. La rupture de la fibre est causée par la combinaison des différents types de forces (normal et tranchant) ([Figure III.23](#) et [III.24](#)). Ceci explique l'amélioration des propriétés mécaniques des matrices renforcées par de fibres courtes de palmier dattier.

III.4 Conclusion

A travers les résultats de ce chapitre, les propriétés mécaniques des différents matériaux composites à base de fibres et des particules de palmier dattier ont été identifiées. On observe que la valeur du module d'élasticité du matériau composite à base de fibres courtes de palmier dattier (EFR, EFF et PFR) est en amélioration par rapport à la matrice vierge, bien que les valeurs du module d'élasticité et de la contrainte maximale obtenues par l'essai de traction sur les fibres sont différentes. L'amplitude de la variance dans les propriétés mécaniques des matériaux EFR07 et EFF07 pour un taux de fibres fixe de 7% n'est pas significative, allant de 2% à 10%. Le taux de 10% des fibres FPR permet d'obtenir la valeur de module d'élasticité la plus élevée avec une augmentation de 73% alors que les taux à 4% ,7% et 15% de ce type de fibres n'augmentent le module d'élasticité que de 48%. Nous concluons que, pour les deux taux de fibres 4% et 7%, il y a une

amélioration des valeurs du module d'élasticité avec une légère diminution de la valeur de la contrainte maximale. Le taux de fibres de 10% avec la matrice epoxy, donne une très forte augmentation du module d'élasticité avec une diminution de la contrainte maximale. Les taux de fibres supérieurs à 10% diminuent les valeurs du module d'élasticité et de la valeur de la contrainte maximale. En effet, le pourcentage élevé des fibres rend le matériau rigide et difficile à déformer, mais il peut former des points faibles pour la résistance à la rupture. A partir de cela, le choix du taux de fibres est fonction des priorités des usages requis.

Les mêmes fibres courtes utilisés pour renforcer la matrice de polypropylène ne font qu'augmenter le module d'élasticité de 50% pour la taux de fibres de 15% avec une diminution de la contrainte maximale pour tous le taux de fibres. L'effet des fibres est meilleur avec la matrice époxyde que la matrice polypropylène, en raison de l'adhérence inter-faciale entre la fibre et la matrice .

Les résultats obtenus par les essais de compression dans les deux sens sur les composites (CBP) montrent des différences d'anisotropie de ces matériaux testé selon la taille des particules, plus la taille des particules augmente, plus le matériau devient isotrope, ce qui n'est pas le cas du matériaux avec les particules les plus fins. on peut noter que les meilleurs propriétés mécaniques de ces matériaux bio-sourcés sont obtenues avec une taille de particules intermédiaire de (1-3mm).

L'observation microscopique des échantillons montre une bonne adhérence interfaciale entre la fibre et la matrice époxyde. Contrairement à la matrice polypropylène où l'on observe la présence d'un vide entre la fibre et la matrice. Les propriétés mécaniques des composites bio-sourcés peuvent être améliorées en assurant une bonne adhérence interfacial fibres/matrice. La chute de la contrainte de rupture des composites renforcé par des fibres courtes de palmier dattier peut être due à l'influence de la présence de ces fibres sur la structure du composite. En effet, la présence des fibres courtes provoque une concentration locale des contraintes et l'amorçage précoce des microfissures dans la matrice renforcée.

Références

- [1] 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.
- [2] F. Touloum, A. Benchabane, and A. Kaci, "Nouveau bio-composite local à base de fibres cellulosiques. Application à l'isolation thermique en bâtiment," *Premier Séminaire National de Génie Mécanique (SNGM01)*, Biskra, Algérie, Décembre 2011.
- [3] N. Benmansour, "Etude des performances de produits renouvelables et locaux adaptés aux applications de l'isolation thermique dans le bâtiment," *Mémoire de Magistère*, Université de Batna, Algérie 2011.
- [4] H. Djemai, "Contribution à l'étude de l'endommagement dans les matériaux composites sandwichs," thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2017.
- [5] H. Kaddami, A. Dufresne, B. Khelifi, A. Bendahou, M. Taourirte, M. Raihane, N. Issartel, H. Sautereau, J.-F. Gérard, and N. Sami, "Short palm tree fibers–Thermoset matrices composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, pp. 1413-1422, 2006.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] A. Sbiai, A. Maazouz, E. Fleury, H. Souterneau, and H. Kaddami, "Short date palm tree fibers/polyepoxy composites prepared using RTM process: effect of tempo mediated oxidation of the fibers," *BioResources*, vol. 5, pp. 672-689, 2010.

*Caractérisation mécanique
d'une poutre en structure
sandwich*

Sommaire

Page

IV.1 Présentation des matériaux de type sandwichs	107
IV.1.1 Choix des constituants de la poutre sandwich	107
IV.1.1.1 Peaux	108
IV.1.1.2 Cœurs	108
IV.1.2 Préparation des éprouvettes	109
IV.2 Caractérisation mécanique	110
IV.3 Résultats et discussion	113
IV.4 Observations des faciès de rupture après les tests de flexion trois points	116
IV.5 Conclusion	119
Références	120

La technique de mise en œuvre des panneaux sandwichs est une technique connue et utilisée depuis longtemps dans de nombreuses industries. Ces structures se caractérisent par la légèreté avec des bonnes propriétés, telles que l'isolation thermique et acoustique, la résistance aux chocs et à la fatigue. Ces propriétés sont directement liées aux choix du matériau des deux peaux et du cœur, ainsi qu'à la qualité de leurs interfaces. L'utilisation de matières végétales est d'un grand intérêt environnemental dans la fabrication de ces panneaux sandwichs. Nous avons consacré cette partie de la thèse à la préparation des structures sandwichs basée sur les matériaux présentés dans les chapitres précédents. Ainsi, ce chapitre porte sur l'élaboration et la caractérisation des structures sandwichs constituées de différents cœurs (liège aggloméré, bois fibreux de pétiole et plaques à particules de bois de pétiole) et des peaux en matériau composite à base de fibres de rachis.

IV.1 Présentation des matériaux de type sandwichs

L'objectif de ce chapitre est l'étude de la faisabilité de la mise en œuvre d'un composite de type sandwich à base des matériaux issus de palmier dattier avec des propriétés mécaniques intéressantes. Plusieurs types de plaques sandwichs ont été élaborées en utilisant le bois et des fibres issus de la palme du palmier dattier. Les caractéristiques mécaniques seront déterminées par les tests mécaniques de flexion trois points. Les faciès de la rupture après l'essai de flexion trois points seront analysés pour caractériser la nature des endommagements.

IV.1.1 Choix des constituants de la poutre sandwich

La sélection des matériaux utilisés dans cette partie de l'étude a été basée sur les résultats obtenus par les études réalisées aux chapitres précédents. Les matériaux sélectionnés sont utilisés comme peaux et cœurs dans la préparation de structures sandwichs (*Figure IV.1*).



Figure IV.1. Matériaux utilisés dans les structures sandwichs.

IV.1.1.1 Peaux

Les peaux utilisées dans la préparation des structures sandwichs sont des matériaux composites à base d'une matrice époxyde et de fibres de rachis (Epoxy/Fibres de rachis) pour une fraction massique 10% de fibres dénommés (EFR10) (*Chapitre III*). La *Figure IV.2* présente une plaque de matériau composite (EFR10). Les bonnes propriétés mécaniques des matériaux (EFR10) par rapport aux autres matériaux (EFR4, EFR7 et EFR15) sont présentées dans le *Tableau III.2*.



Figure IV.2. Composite EFR10 utilisé comme peau des structures sandwichs.

IV.1.1.2 Cœurs

Les matériaux utilisés dans l'élaboration des cœurs sont deux types: brute et composite à particules de bois de pétiole. Pour les matériaux bruts, on a utilisé le bois de pétiole brut (BPB). L'élaboration et l'étude des composites à particules de bois de pétiole (CBP) utilisés sont décrites dans le *Chapitre III*. De plus, le Liège aggloméré de granulés de 2 à 3mm (PL3) a été utilisé pour la comparaison des propriétés obtenues selon la nature du cœur. La *Figure IV.3* présente les différents matériaux utilisés comme cœur dans les structures sandwichs. Les caractéristiques mécaniques sont présentées dans les *Tableaux II.8* et *III.5*.

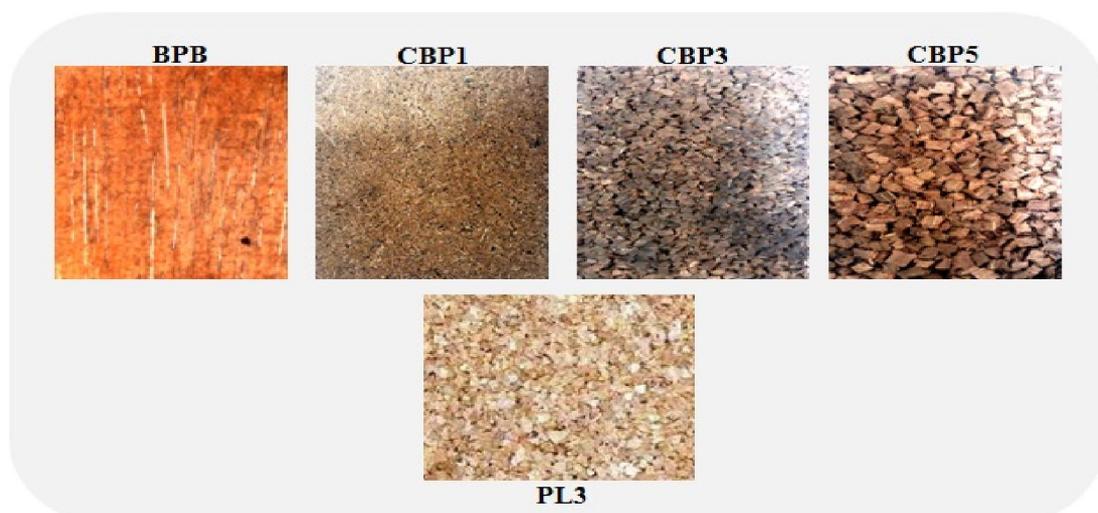


Figure IV.3. Matériaux utilisés comme cœur des structures sandwichs.

Les procédés de préparation et la caractérisation mécanique des différents matériaux constituant la structure sandwich, c'est-à-dire les peaux (EFR10) et le cœur (CBP), sont définis en détail dans le [Chapitre III](#).

IV.1.2 Préparation des éprouvettes

La préparation des plaques de structures sandwichs a été réalisée par une méthode d'adhésion directe avec la matrice des peaux sans utiliser d'adhésif. Supplémentaire un moule en plastique démontable a utilisé pour le processus de moulage des peaux (EFR10). Ensuite, les plaques de Liège aggloméré (PL3), ou de bois bruts (BPB) ou en particules (CBP), sont placées sur ces moules pendant 20 minutes pour obtenir le collage de la première face de la structure sandwich. De la même façon, la deuxième face est collée.

La [Figure IV.4](#) présente ce protocole de préparation des plaques composites de type sandwich.

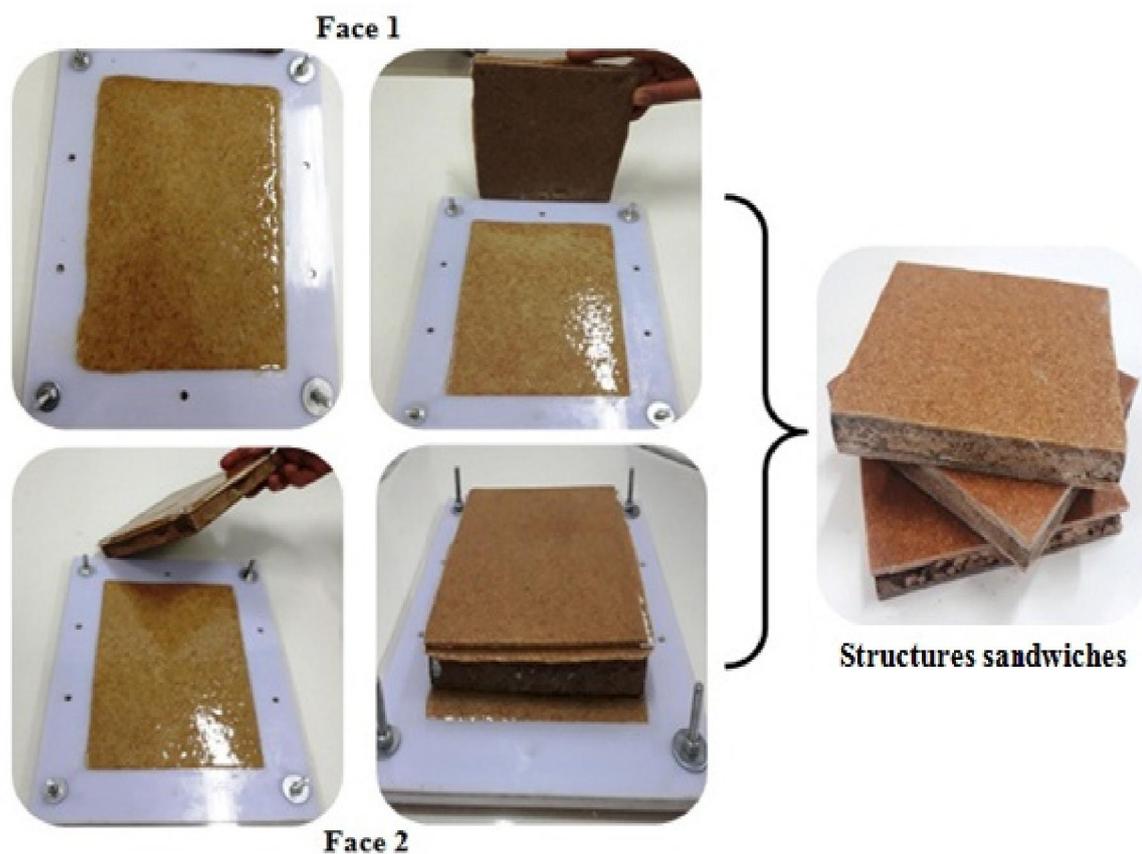


Figure IV.4. Protocole de préparation des plaques composites de type sandwich.

Enfin, après stabilisation des plaques obtenues de composite type structure en sandwichs pendant 72 heures, les éprouvettes ont été découpées à l'aide d'une scie à disque en diamant. Les éprouvettes obtenues après le découpage sont codées selon la nature et la taille de particule du cœur (SBPB, SBP1, SBP3, SBP5 et SPL3).

La Figure IV.5 présente les poutres de test de flexion trois points de type structure sandwich.



Figure IV.5. Poutres composites de structure sandwich.

IV.2 Caractérisation mécanique

Soit une poutre sandwich de longueur l et largeur b constitué de deux peaux symétriques d'épaisseur h_1 et d'un cœur d'épaisseur h sollicitée en flexion trois points. La Figure IV.6 présente la géométrie et les dimensions de cette poutre.

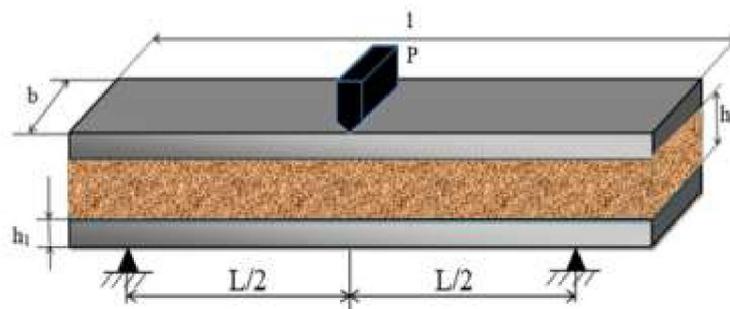


Figure IV.6. Dimensionnement d'une poutre sandwich [1].

Le **Tableau IV.1** présente les dimensions de poutres testées.

<i>Eprouvettes</i>	<i>b[mm]</i>	<i>h₁[mm]</i>	<i>h[mm]</i>
SBP1	20.27±0.19	3.21±0.18	15.85±0.72
SBP3	19.96±0.02	3.47±0.24	15.71±0.50
SBP5	20.71±0.28	3.03±0.57	15.00±0.14
SBPB	19.58±0.65	2.68±0.15	14.83±0.24
SPL3	20.12±0.10	2.37±0.15	15.37±0.06

Les essais de flexion trois points effectués sur les poutres à structure sandwich permettent de déterminer le module de rigidité global de chaque types de ces sandwichs élaborés. Ces essais ont été menés sur des éprouvettes d'une poutre de dimension (140x20x20) mm³ selon les normes [NF EN ISO 178](#) et [ASTM C393-62](#) [2-4]. Ils ont été effectués en appliquant la charge dans la direction perpendiculaire à la surface supérieure de l'éprouvette. L'éprouvette a été placée sur deux supports distants de 80 mm l'une de l'autre. Ces tests ont été menés sur la même machine universelle de type [INSTRON 5969](#) utilisant une cellule de capacité de 5 KN avec une vitesse de déplacement de 1 mm/min.

La [Figure IV.7](#) présente le test de flexion trois points sur les éprouvettes de composite de type structure sandwich.

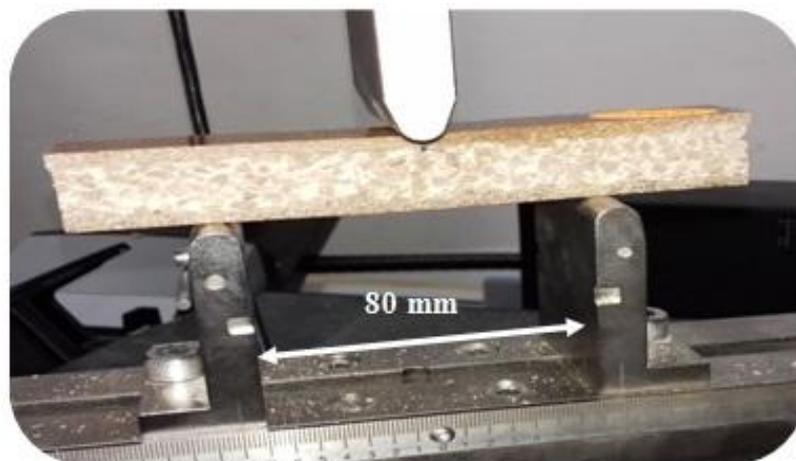


Figure IV.7. Test de flexion trois points

Les caractéristiques mécaniques ont été calculées à partir de la courbe de charge-déplacement obtenue par cinq essais de flexion trois points pour chaque type des poutres sandwichs.

La flèche δ de la structure sandwich au point de chargement dans le cas d'essais de flexion trois points, est due à la fois aux déformations en flexion et en cisaillement. La déformation en cisaillement est dominée dans le cœur du sandwich. Par conséquent, la flèche δ élastique peut s'exprimer comme suit [5-7]

$$\delta = \delta_f + \delta_c \tag{IV.1}$$

$$\delta = \frac{PL^3}{48D} + \frac{PL}{4S} \tag{IV.2}$$

$$\delta = \left[\frac{L^3}{48D} + \frac{L}{4S} \right] P \tag{IV.3}$$

$$\delta = [F_G]P \quad \text{Où } P = [D_G]\delta \quad \text{avec } D_G = \frac{1}{F_G} \tag{IV.4}$$

- P : la charge appliqué en milieu ;
- D : la rigidité en flexion du sandwich ;
- S : la rigidité en cisaillement du cœur ;
- F_G : la souplesse globale du sandwich ;
- D_G : la rigidité globale.

La rigidité globale D_G est déterminée expérimentalement par l'essai de flexion trois points, où D_G représente la pente de la courbe charge-déplacement.

L'équation (IV.4) est valable uniquement pour le début des essais de flexion lorsque la flèche est relativement petite (zone élastique) [8, 9].

Les chercheurs Berthelot [10], Chemami [8] et Shahdin [11] ont déterminé le module d'élasticité des peaux (E) et le module de cisaillement du cœur (G) d'une poutre sandwich par des différentes formules qui sont présentés dans le Tableau IV.2.

Ces paramètres sont définis en fonction de la rigidité de flexion des peaux (D) et la rigidité du cisaillement du cœur (S) qui sont présentés dans la formule (IV.2).

Tableau IV.2. Différentes formules du module d'élasticité des peaux (E) et du module de cisaillement du cœur (G).

Module	E [MPa]	G [MPa]
Berthelot [10]	$E = \frac{2D}{b(h + h_1)hh_1}$	$G = \frac{S}{bh}$
Chemami [8]	$E = \frac{2D}{b(h + h_1)^2}$	$G = \frac{hS}{b(h + h_1)^2}$
Shahdin [11]	$E = \frac{2D}{bh_1(h + h_1)^2}$	$G = \frac{S}{b(h + h_1)}$

Selon les différentes équations données dans le [Tableau IV.2](#) et l'équation (IV.3), nous pouvons calculer la flèche (δ) analytiquement selon les équations suivantes :

$$\delta_b = \left[\frac{L^3}{24h_1hEb(h+h_1)} + \frac{L}{4bhG} \right] P \quad (\text{IV.5})$$

$$\delta_c = \left[\frac{L^3}{24Eb(h+h_1)^2} + \frac{Lh}{4bG(h+h_1)^2} \right] P \quad (\text{IV.6})$$

$$\delta_s = \left[\frac{L^3}{24h_1Eb(h+h_1)^2} + \frac{L}{4bG(h+h_1)} \right] P \quad (\text{IV.7})$$

Ces résultats seront comparés avec les résultats expérimentaux de la flèche (δ).

IV.3 Résultats et discussion

La [Figure IV.8](#) présente des exemples de courbes charge-déplacement obtenues par les essais de flexion trois points sur des différents poutres sandwichs élaborées à base de palmier dattier (SBPB, SBP1, SBP3 et SBP5). Les courbes donnent l'évolution de la charge appliquée en fonction de la flèche prise au milieu de la poutre pour différents types de cœur. Dans tous les cas des types de structures sandwichs testées, le comportement mécanique en flexion trois points est similaire. Les trois phases principales sont: une augmentation linéaire de la charge appliquée avec la flèche, un comportement non linéaire jusqu'à la charge maximale et la chute de la charge jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. Dans la partie linéaire, la rigidité globale D_G est déterminée en calculant la pente de la courbe charge-déplacement p ([Formule IV.4](#)).

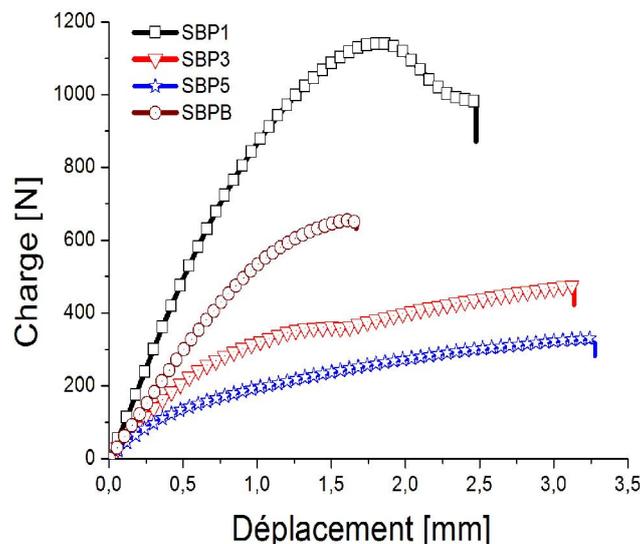


Figure IV.8. Exemple de courbes charge-déplacement lors de l'essai de flexion trois points sur les poutres en structures sandwichs SBP et SBPB.

Les valeurs expérimentales de la rigidité globale D_G (N/mm) et la charge maximale des structures sandwichs étudiés obtenues à partir des courbes charge-déplacement sont présentées dans les [Tableau IV.3](#) et [Tableau IV.4](#).

Ces deux tableaux donne est la charge maximale, la flèche maximale et la rigidité globale des sandwichs élaborés (SBPB, SBP1, SBP3 et SBP5), obtenues à partir de plusieurs essais de flexion trois points, pour les sandwichs SBPB, SBP1, SBP3 et SBP5 ([Tableau IV.3](#)) et pour les sandwichs SPL3 et SBP3 ([Tableau IV.4](#))

Tableau IV.3. Résultats de l'essai de flexion trois points des éprouvettes sandwichs (SBP) et (SBPB).

Eprouvettes	P_{\max} [N]	δ_{\max} [mm]	D_G [N/mm]
SBPB	551.33±120.8	2.82±1.79	550.23±7.74
SBP1	1058.69±70.04	1.91±0.06	818.91±32.77
SBP3	402.14±67.56	3.18±0.15	485.90±17.06
SBP5	329.93±16.64	3.06±0.44	355.83±34.74

La [Figure IV.9](#) permet de comparer l'allure des courbes de flexion trois points des deux structures en sandwichs (SPL3) et (SBP3). Il s'agit ici de comparer deux structures sandwichs à différente type de cœur (SPL3) et (SBP3) mais avec la même taille de particules de 1 à 3 mm.

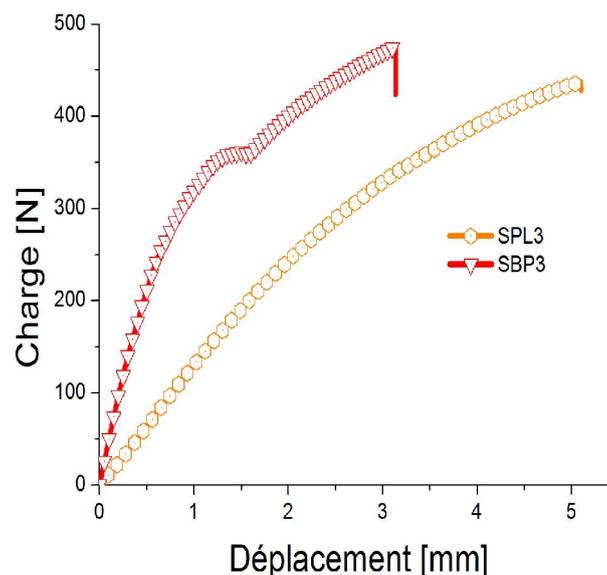


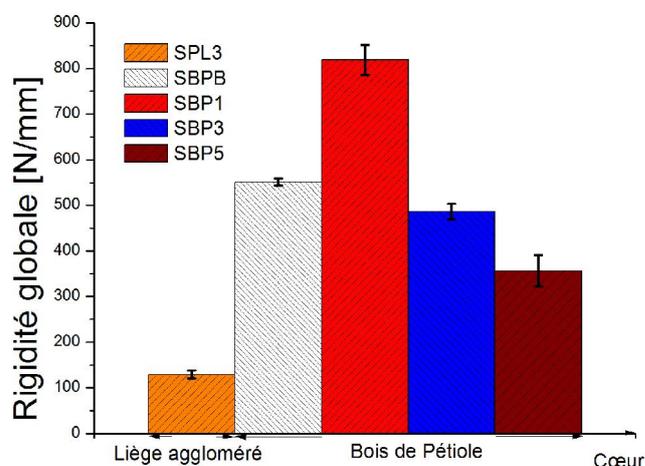
Figure IV.9. Exemple de courbe charge-déplacement des matériaux (SPL3, SBP3) pour une taille de particule de 1 à 3mm.

Tableau IV.4. Résultats de l'essai de flexion trois points des éprouvettes sandwichs (SPL3) et (SBP3).

Eprouvettes	P_{\max} [N]	δ_{\max} [mm]	D_G [N/mm]
SPL3	351.02±115.60	6.00±2.50	128.99±8.56
SBP3	402.14±67.56	3.18±0.15	485.90±17.06

Nous remarquons d'après les résultats obtenus que les valeurs de la rigidité globale et la force maximale varient selon le type et la taille des particules utilisées dans cœur. Notons qu'il y a une amélioration pour les valeurs de la rigidité globale de sandwichs avec un cœur composite à particules du bois de pétiole (CBP1) par rapport au cœur de bois de pétiole brut (BP), alors que les valeurs de la rigidité globale diminuent avec l'augmentation de la taille des particules de cœur (CBP3 et CBP5). D'autre part, il convient de noter que la rigidité globale dans les sandwichs à base de bois de pétiole est plus élevée par rapport aux sandwichs avec un cœur du liège aggloméré (SPL3) (*Figure IV.10*). La variation des valeurs de la rigidité globale dans les structures sandwichs dépendent de la nature et de la taille des particules du cœur. De plus, la variation de la rigidité globale au fonction de la nature des peaux étudié par H. Djemai [3] pour les différentes structures sandwichs avec le cœur en liège (PL3) était plus élevée que la valeur de la rigidité globale de (SPL3). Cela est dû au module d'élasticité des peaux utilisées.

La *Figure IV.10* présente la variation de la rigidité globale du matériau composite de type structure sandwich à différents nature et taille des particules du cœur.

**Figure IV.10.** Rigidité globale de la structure en sandwich pour différents cœurs.

Le calcul analytique de la flèche (δ) a été effectué uniquement pour une poutre de structure sandwich de type (SBPB).

Les modules d'élasticité de cœur et de peaux sont obtenus expérimentalement, est précisés dans les Tableaux II.4 et III.2.

Le module de cisaillement du cœur (G) est déterminé par l'équation suivante:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{IV.8})$$

La Figure IV.11 présente la partie linéaire de la courbe charge-déplacement obtenue par les résultats expérimentaux et les résultats analytiques de la flèche en fonction de la charge appliquée sur la poutre (SBPB).

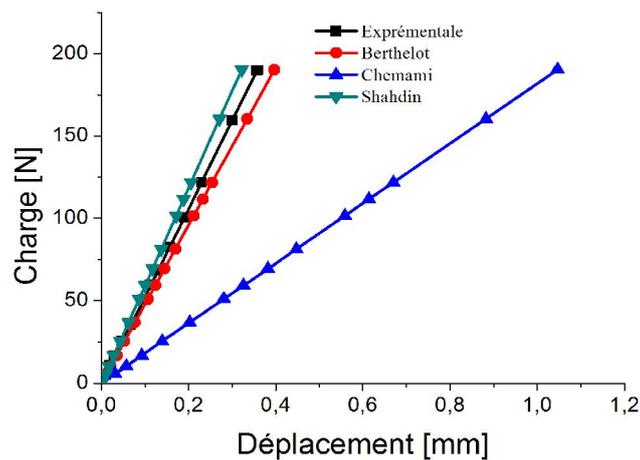


Figure IV.11. Comparaison des courbes expérimentale et analytique pour (SBPB) dans la partie linéaire.

Les résultats du calcul analytique de la flèche (δ) selon les différentes équations montrent un très léger écart entre les deux courbes obtenues par les équations de Berthelot et Shahdin. En effet, les résultats expérimentaux de la flèche (δ) sont très proches des résultats analytiques calculés par ces équations. La courbe charge-déplacement tracée à travers l'équation de Chemami montre un très large écart avec les courbes et les valeurs expérimentales.

IV.4 Observations des faciès de rupture après les tests de flexion trois points

Cette analyse macroscopique est basée sur la prise de photos numériques des éprouvettes et des faciès de rupture des différentes poutres sandwichs. Ces prises de photos sont effectuées au cours des essais de flexion trois points.

La [Figure IV.12](#) nous a permis d'observer les étapes conduisant à la rupture d'éprouvette de structure sandwich lors du test de flexion trois points.

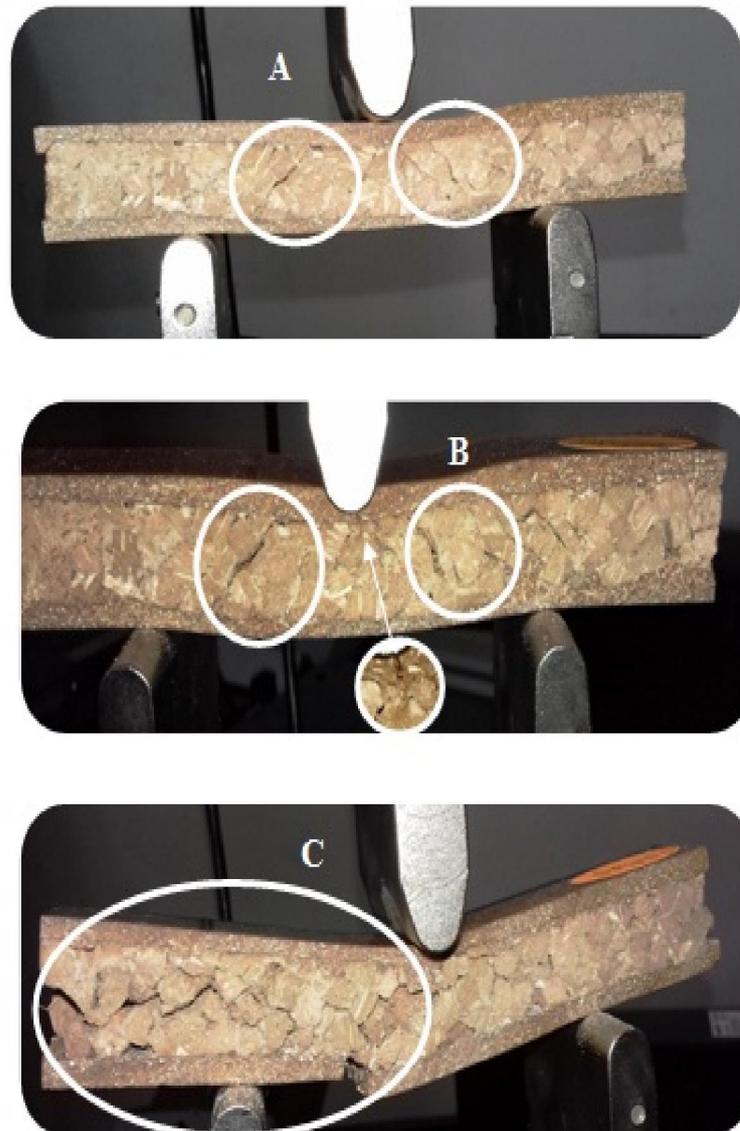


Figure IV.12. Observations macroscopiques des étapes de rupture d'une éprouvette au cours du test de flexion trois points.

De ces observations macroscopiques, on a constaté deux types de rupture du cœur : La rupture en cisaillement transversal (A) et la rupture en cisaillement longitudinal (C).

La rupture du sandwich commence par l'endommagement du cœur par la rupture en cisaillement transversal (A). Celui-ci est suivi par l'endommagement de la peau supérieure par compression. Cette étape de déformation est détectée sur les courbes de la [Figure IV.8](#), après la partie linéaire des courbes. La rupture en cisaillement transversal a commencé de se développer à partir de la peau supérieure et le cœur (B) suivi par le cisaillement longitudinal dans le plan moyen jusqu'à l'extrémité de l'éprouvette (C) et donc la ruine finale de la structure sandwich.

La [Figure IV.13](#) indique les faciès de la rupture des différentes structures sandwichs (SBPB, SBP1, SBP3, SBP5 et SPL3) après les tests de flexion trois points.

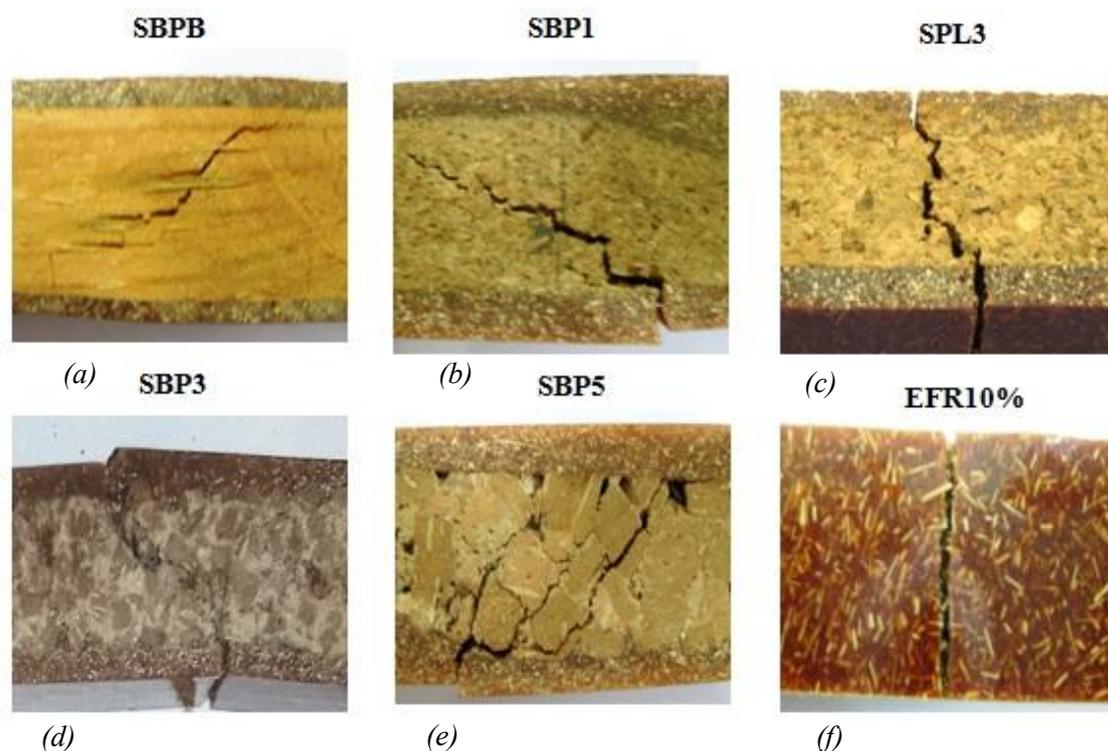


Figure IV.13. Observations macroscopiques des faciès de rupture des différentes structures sandwichs.

On remarque, d'après l'observation macroscopique des faciès de rupture des sandwichs, une rupture transversale le long de largeur de l'éprouvette dans les peaux, visible sur la [Figure IV.13\(f\)](#). Concernant les ruptures dans les cœurs des sandwichs, deux types de ruptures différentes sont constatés selon la nature de cœur. Rupture transversale dans le cœur de liège (SPL3) [Figure IV.13\(c\)](#) et rupture longitudinale et transversale selon la direction des fibres (SBP1) [Figure IV.13\(b\)](#) et (SBPB) [Figure IV.13\(a\)](#). Pour les tailles de particules supérieures de 1mm, les ruptures des cœurs sont tortueux a travers les particules (SBP3) [Figure IV.13\(d\)](#) et (SBP5) [Figure IV.13\(e\)](#).

De plus, on observe une absence de délaminage entre les peaux et le cœur pour tous les types de sandwichs, ce qui indique la qualité et l'efficacité de la mise en œuvre choisie pour ces structures sandwichs.

VI.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une caractérisation mécanique à partir du test de flexion trois points a été menée sur une structure sandwich. Celle-ci a nécessité la proposition de méthodes de mise en œuvre pour l'élaboration de ces structures sandwichs à base des matériaux issus de la palme de palmier dattier.

Les différents types de structure sandwich ont été préparés avec les mêmes peaux (EFR10) mais avec différents cœurs (CBP1, CBP3, CBP5, BPB et PL3).

Les courbes de type charge-déplacement obtenues par les tests de flexion trois points ont permis de calculer la rigidité globale D_G de chaque type de sandwich (SBPB, SBP1, SBP3, SBP5 et SPL3).

La valeur de la rigidité globale du sandwich avec un cœur (CBP3) est élevée par rapport au cœur du bois de pétiole brut (BP). La rigidité globale dans les sandwichs à base de bois de la palme est plus élevée par rapport aux sandwichs avec un cœur de liège aggloméré (SPL3).

L'observation macroscopique des faciès de rupture montre la bonne adhérence entre les peaux et le cœur. Ceci est dû à la méthode utilisée dans la préparation de structure sandwich, qui montre sa pertinence puisque le délaminage entre la peau et le cœur est absent.

En conclusion, l'utilisation des matériaux qui sont extraits de la palme (bois et fibres) associée à la mise en œuvre choisie pour la préparation des structures sandwichs donnent des résultats mécaniques acceptables.

Références

- [1] C. M. Abdesslem, "Comportement mécanique d'un matériau composite sandwich," *Mémoire de master*, Université de Biskra, Algérie, 2017.
- [2] N. EN, "Plastics determination of flexural properties amendment," *ISO*, vol. 178, pp. A1, 2005.
- [3] H. Djemai, "Contribution à l'étude de l'endommagement dans les matériaux composites sandwichs," thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2017.
- [4] A. C393-62, "Standard Test Methods for the Flexural Properties of Flat Sandwich Constructions", 1962.
- [5] F. Arias, P. J. Kenis, B. Xu, T. Deng, O. J. Schueller, G. M. Whitesides, Y. Sugimura, and A. G. Evans, "Fabrication and characterization of microscale sandwich beams," *Journal of Materials Research*, vol. 16, pp. 597-605, 2001.
- [6] G. R. Kelsey S, Clark BW., "The Shear Modulus of Foil Honeycomb Cores, A Theoretical and Experimental Investigation on Cores Used in Sandwich Construction " *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 30 (3) : 249-308, 1958.
- [7] J. E. Arbaoui, "Etude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches," These de Doctorat, Université Paul Verlaine-Metz, 2009.
- [8] A. Chemami, "'Etude de la Performance des Matériaux Composites Sandwichs- Application en Fatigue," Thèse de doctorat, Université de Annaba, Algérie, 2012.
- [9] H. Djemai, M. Hecini, and A. Labeled, "On the characterization of sandwich panels for solar flat plate collectors' applications: theoretical and experimental investigation," *Journal of Applied Engineering Science & Technology*, vol. 2, pp. 15-22, 2016.
- [10] J. Berthelot, "'Matériaux composite. Tome 4. Comportement mécanique et analyse des structure," *Tec et doc, Lavoisier, Paris*, 2010.
- [11] A. Shahdin, L. Mezeix, C. Bouvet, J. Morlier, and Y. Gourinat, "Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams: A comparison with honeycomb and foam sandwich beams," *Composite structures*, vol. 90, pp. 404-412, 2009.

Conclusion générale

La disponibilité en quantité importante des sous-produits renouvelables et durables des palmiers dattiers, constitue un atout important et encourage leur exploitation. Entre autre, leur utilisation est à considérer comme renfort dans les matériaux composites et comme alternative au bois classique. Au cours de sa croissance et de son évolution naturelle, les palmerais produisent chaque année d'énormes quantités de palmes sèches sous forme de déchets souvent abandonnés et inexploités. Contrairement à d'autres fibres végétales utilisées comme renfort de différents matériaux bio-sourcés, la collecte de ces déchets ne nécessite pas la replantation des palmiers. Cette particularité est un atout indéniable de point de vue écologique et développement durable surtout si on considère l'analyse du cycle de vie (ACV) du produit fabriqué à partir de certains constituants de ces palmes sèches. Ceci nous conduit tout naturellement au développement de diverses applications de nouveaux matériaux bio-sourcés à faible coût en termes de matières premières et à faible impact environnemental.

Ce travail constitue une contribution à l'étude de la faisabilité d'exploiter ces ressources naturelles dans l'industrie des bio-composites à base de fibres et du bois issus d'une palme mûre de palmier dattier.

La recherche bibliographique effectuée au début de cette thèse a été dédiée à la classification des matériaux composites en fonction de plusieurs paramètres, y compris la classification selon la catégorie du renfort utilisé. En outre, la présentation a montré les différents constituants entrant dans la mise en forme des matériaux composites bio-sourcés et l'importance de la matière végétale dans la fabrication des ces matériaux bio-sourcés. L'étude a ensuite abordé certains domaines d'applications des matériaux composites renforcés par des fibres végétales, en particulier par des fibres de palmier dattier. Leur importance en termes de tonnage annuel a été montrée à travers une présentation de la répartition géographique des palmerais en Algérie d'une part et une estimation de la disponibilité des déchets des palmiers d'autre part. Enfin, une synthèse des travaux réalisés sur les matériaux composites à base de matériaux extraits de palmiers dattiers selon une classification par la matrice utilisée et la structure de matériaux composites a été présentée.

Cette étude bibliographique nous a conduits à diviser ce travail en trois parties expérimentales qui concernent en premier lieu les constituants de base (fibres, bois) puis le bio-composite et enfin les structures sandwichs:

La première partie est consacrée à l'étude des matières premières utilisées dans cette étude. C'est une caractérisation physico-mécanique sur les bois fibreux et les fibres extraites de différentes parties de la palme.

La deuxième partie est une caractérisation des différents types de composites élaborés à base d'époxy ou de polypropylène (PP) d'une part et des fibres du rachis (EFR, PFR) ou du bois de pétiole d'autre part (CBP). Les propriétés mécaniques et morphologiques ont été évaluées pour de différentes fractions massiques des fibres et pour de différentes tailles des particules du bois.

La troisième partie présente une des possibilités d'application des différentes bio-composites élaborées. Des plaques en structure sandwichs ont été élaborées avec des peaux en matériau composite (époxy/fibre de palme) et un cœur en différentes matières (matrice naturelle, particule de bois de pétiole, bois de pétiole brut et liège aggloméré). Le comportement mécanique de ses structures sandwichs a été étudié par l'essai de flexion trois points.

Les résultats obtenus à travers la première partie de l'étude ont permis d'identifier les propriétés physiques du bois fibreux et des fibres extraites de la palme mûre du palmier dattier. Il s'agissait d'évaluer le pourcentage volumique de fibres et de lignine dans la palme, la composition chimique des fibres, le comportement thermique des fibres, la masse volumique du bois et de la fibre et le taux d'humidité des différentes parties de la palme. Ensuite, Les différents tests mécaniques classiques (traction, compression et flexion trois points) ont été utilisés pour déterminer les caractéristiques mécaniques du bois fibreux de la palme mûre après séchage le long de la palme, depuis la partie pétiolaire (BP) jusqu'à la partie rachis (BR).

Les résultats obtenus et ceux de la littérature montrent une importante dispersion des valeurs des caractéristiques physiques et mécaniques du bois fibreux et des fibres extraites du palmier dattier. Ceci est dû à plusieurs facteurs tels que la grande diversité des types de palmier dattier et la présence de plusieurs types de fibres dans le même palmier. Ainsi, cette dispersion des résultats a nécessité de les présenter sous forme de borne inférieure et borne supérieure.

Dans la deuxième partie de l'étude les propriétés morphologiques et mécaniques des différents matériaux composites à base de fibres et de particules de bois palmier dattier ont été identifiées. On observe que les valeurs du module d'élasticité des matériaux composites à base de fibres courtes de palmier dattier (EFR, EFF et PFR) se sont améliorées accompagné d'une légère diminution de la valeur de la contrainte maximale dû à l'augmentation du taux de fibres. En effet, le pourcentage élevé de fibres rend le matériau rigide et difficile à déformer, mais il peut créer des points faibles pour la résistance à la rupture.

Les résultats obtenus par les essais de compression dans les deux sens sur les composites à base de particules de bois de pétiole (CBP) montrent un caractère isotrope dans le cas des grandes particules et un caractère anisotrope pour les particules de petites taille. En effet, le mélange (colle /particules de bois) étant initialement isotrope (mélange homogène), l'anisotropie provient de la mise en œuvre du matériau, en particulier de la pression exercée. Dans le cas des particules de grande taille, le bois s'oppose à la pression de la mise en œuvre et le composite reste isotrope. Dans le cas des particules de petite taille, l'opposition des particules étant minime, la mise en œuvre influe directement sur la colle et crée l'anisotropie du matériau.

La caractérisation mécanique et morphologique après le test de flexion trois points sur différentes structures sandwichs proposées ont fait l'objet de la troisième partie de cette étude. Les propriétés mécaniques obtenues sont intéressantes et une exploitation industrielle de ces matériaux extraits de la palme (bois et fibres) est envisageable dans le cas où la rigidité en flexion est demandée à faible poids spécifique. L'observation macroscopique des faciès de rupture montre une bonne adhérence entre les peaux et le cœur, résultats de la méthode utilisée dans la préparation de ses structures sandwiches.

A l'issue de ce travail de recherche, cette étude a permis d'approfondir les connaissances actuelles sur le bois fibreux et les fibres des palmiers dattiers qui demandent encore d'être enrichies et d'éclairer ainsi la communauté scientifique sur la faisabilité et les limites de leur utilisation dans les divers secteurs. C'est une nouvelle source naturelle à bas coût qui peut être exploitée par l'industrie des matériaux composites.

Diverses perspectives futures à ce travail doctoral peuvent être envisagées tels que:

- *Une étude complémentaire de l'effet du placement des fibres dans le sens transversal de coupe du bois de rachis pour déterminer la différence entre les fibres de la peau et les fibres de cœur de rachis. Ainsi, l'influence des différentes tailles des fibres sur le comportement des matériaux composites constitue une étude supplémentaire à envisager.*

- *Une étude de l'influence du taux de la colle naturelle sur les différentes plaques en particules de bois.*

- *Une étude thermique (conductivité thermique) et dynamique (cyclique) des différentes structures sandwichs élaborés.*

- *Une étude de l'endommagement de ces matériaux (les modes de rupture dans les composites et le délaminage des structures sandwichs).*

- *Le développement des techniques adéquates pour la production semi-automatique de compound homogène et à taux de fibres contrôlé.*

Caractérisation physique et mécanique du bois et des fibres issus d'une palme mûre de palmier dattier

Tarek Djoudi^{1,*}, Mabrouk Hecini¹, Daniel Scida³, Youcef Djebbloun², and Belhi Guerira¹

¹ Laboratoire de Génie Mécanique (LGM), Université de Mohamed KHIDER-BP 145, 07000 Biskra, Algérie

² Laboratoire de Génie Energétique et Matériaux (LGEM) Université de Mohamed KHIDER-BP 145, 07000 Biskra, Algérie

³ Laboratoire d'Ingénierie et Sciences des Matériaux (LISM EA 4695) Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA), 9 rue de Québec, 10026 Troyes Cedex, France

Reçu le 18 juin 2017 / Accepté le 9 octobre 2018

Résumé. La disponibilité en quantité importante des sous-produits renouvelable des palmiers dattiers laisse envisager leur utilisation comme renfort dans les matériaux composites et les structures d'isolation. Ceci nécessite la caractérisation physico-mécanique des différentes composantes du palmier. Dans ce contexte, cette étude a été entamée pour la caractérisation d'une composante importante du palmier qui est la palme mûre. La palme étant décomposée essentiellement en deux parties, le *Pétiole* et le *Rachis*, la caractérisation a été portée alors sur le bois fibreux et les fibres de ces deux parties. La caractérisation physique concernera la masse volumique des fibres et de la matrice végétale (lignine) ainsi que le taux d'humidité dans les différentes parties de la palme. Les essais mécaniques ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques du bois fibreux et des fibres extraites des deux parties de la palme après le séchage. À l'issue de cette étude, les résultats obtenus montrent l'influence de la position de l'échantillon testé sur les propriétés physico-mécaniques. Ils ont permis également de situer ce type de bois fibreux et ces fibres parmi d'autres résultats de la littérature scientifique et d'envisager de les utiliser dans la mise en œuvre des matériaux composites et dans des éléments d'isolation.

Mots clés : bois fibreux / fibres végétales / palmier dattier / palme / physico-mécanique

Abstract. Physical and mechanical characterization of wood and fibers from a mature frond of date palm. The large availability of the date palm by-products suggests their use as reinforcement in composite materials and insulation elements. This requires the physic-mechanical characterization of the various components of the palm. In this context, this study was initiated for the characterization of an important component of the palm, which is the mature palm. The palm is divided into two parts, the petiole and the rachis, and the characterization will then be on the fibrous wood and the fibers of these two parts. The physical characterization will concern the density of fibers and the plant matrix (lignin) as well as the humidity content in the different parts of the mature palm. The mechanical tests will determine the mechanical characteristics of the fibrous wood and the fibers extracted from the two parts of the ripe palm after drying. At the end of this study, the results obtained show the influence of the position of the sample tested (fibrous wood and fibers) on the physic-mechanical properties. These results make it possible to highlight this type of fibrous wood and fibers in the scientific literature, and to consider their use in composite materials and insulation elements.

Keywords: fibrous wood / vegetal fibers / date palm tree / palm / physic-mechanical

1 Introduction

Actuellement, le monde industriel se tourne vers la construction dite écologique. Cette notion de construction englobe plusieurs concepts, dont celui de l'utilisation des matériaux à faible impact environnemental tel que les matériaux bio-sourcés. Leur utilisation couvre plusieurs

domaines tels que: l'isolation thermique dans le bâtiment, l'industrie automobile, l'emballage... Les matières issues d'une source végétale se présentent aujourd'hui comme une solution prometteuse pour l'élaboration des matériaux composites bio-sourcés destinées aux structures sandwichs légères et dans la mise en place des éléments d'isolation, grâce à leurs performances mécaniques et thermiques et à leur faible poids. En effet, l'évolution actuelle des procédés d'élaboration des matériaux composites, nous a amené à constater un accroissement de

* e-mail: t.djoudi@univ-biskra.dz

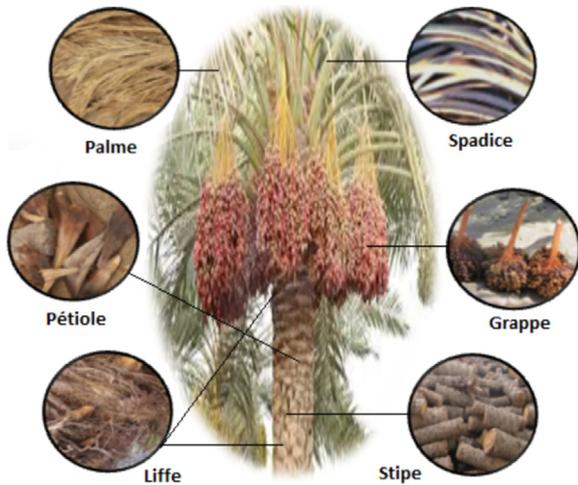


Fig. 1. Différentes parties d'un palmier dattier.

Fig. 1. Different parts of a date palm tree.

l'utilisation de ces matériaux dans différents secteurs, particulièrement la fabrication des matériaux composites pour les éléments d'isolation [1–3].

Plusieurs types de fibres végétales utilisées comme renfort dans les matériaux composites à matrice organique ont suscité l'intérêt de nombreux chercheurs à cause de leurs performances mécaniques et physiques à faible densité en plus de leurs avantages économiques et environnementaux. On peut citer entre autres le chanvre [4,5], le sisal [6,7], le bambou [8] et le lin [9,10]. Le bois [11,12] et le liège [13] qui sont utilisés comme matériaux naturels pour la fabrication des éléments d'isolation écologique. Dans le même contexte, le bois fibreux comme les fibres extraites de diverses parties du palmier dattier ont suscité l'intérêt des chercheurs, à cause de leurs propriétés mécaniques techniquement acceptables à faible densité [14–16]. Il est intéressant de noter que les parties renouvelables du palmier dattier (pétiole et grappe) sont les plus isolantes et les plus légères [17]. Dans ce domaine, plusieurs études ont été menées au cours des dernières années sur les propriétés des fibres du palmier dattier. Parmi elles, on peut citer une étude sur le liffe [18] ; le bras de grappe [19], la tige spadice [20] et une autre sur le rachis [21]. Cependant, les fibres du palmier dattier ont une bonne résistance à la traction malgré un faible module d'élasticité ainsi qu'un faible poids spécifique, ce qui se traduit par une résistance et rigidité spécifique plus élevées [22–25]. En dépit de ces caractéristiques du bois fibreux et des fibres extraites d'un palmier dattier, les études des polymères renforcées par ces fibres restent insuffisantes à l'état actuel [26–29]. L'idée d'utiliser le bois fibreux et les fibres extraites du palmier dattier dans l'industrie des matériaux est récente, par rapport à l'utilisation d'autres variétés de bois et des fibres végétales [29–31].

Les caractéristiques du matériau à produire, dit bio-source, varient suivant la partie considérée du palmier. La figure 1 présente les différentes parties du palmier dattier avec les différents déchets renouvelables (palme, grappe et liffe). La croissance et l'évolution naturelle d'une palme passent par quatre étapes successives qui sont définies par

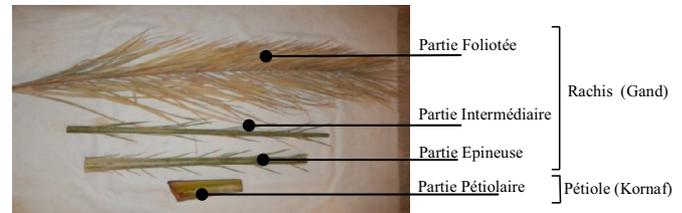


Fig. 2. Les quatre parties de la palme mûre.

Fig. 2. The four parts of the mature palm.

les termes palmes jeunes, palmes adultes, palmes mûres et palmes sèches [32]. Un palmier dattier produit chaque année une quantité très importante de bois fibreux et de fibres (liffe) 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, rebuts de dattes, et liffe...). Cette quantité de déchets peut atteindre 80 milles tonnes par an dans la seule région de Biskra (Algérie) [33]. Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir de bourgeons et perd un nombre similaire de palmes par dessèchement [32–34]. Une palme pèse en moyenne 1,4 kg. Le palmier dattier donne en moyenne 15 palmes par an [35] ; on dénombre environ 18,2 millions de palmier dattier en Algérie dont 4,2 millions dans la région de Biskra [33]. On peut estimer le total de palmes séchées à environ 38 2200 tonnes/an en Algérie. Ainsi, l'intérêt de ce travail est de contribuer à la valorisation industrielle du bois fibreux et des fibres extraites des différentes parties de la palme (dite localement Djerid).

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) (Fig. 2). 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 [34]. 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 2 présente les différentes parties d'une palme mûre.

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...). Cette technique est utilisée par nombreux fabricants industriels dans le monde [36–38]. D'autre part, les fibres extraites du bois fibreux de palme attirent l'intérêt des chercheurs pour être utilisés comme renfort dans les matériaux composites [39–41]. En général, les utilisateurs ont considéré que le bois et les fibres extraites de palmier ont les mêmes propriétés.

Le présent travail concerne la caractérisation mécanique et physique du bois fibreux et des fibres extraites de la palme mûre du palmier dattier. Il s'agit en premier lieu de déterminer la masse volumique de la matrice végétale (lignine) et de la fibre ainsi que la masse volumique du bois fibreux dans différentes parties de la palme mûre, en plus de la détermination du taux d'humidité le long des parties de

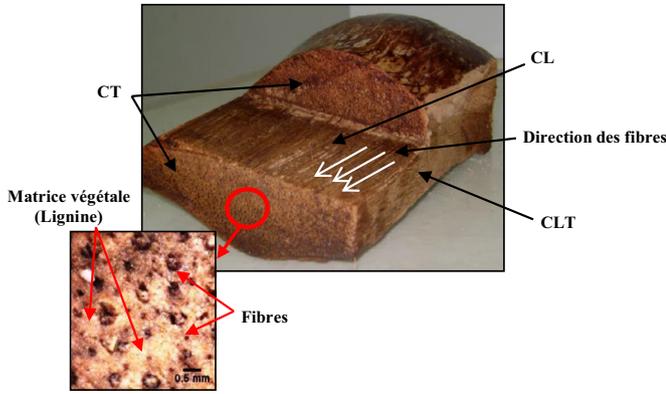


Fig. 3. Présentation structurale du bois du pétiole.

Fig. 3. Structural presentation of petiole wood.

la palme mûre. En deuxième lieu des éprouvettes découpées le long de la palme sèche est soumise à des essais de traction, de compression et de flexion, trois points pour déterminer les caractéristiques mécaniques. Les caractéristiques mécaniques des fibres sont obtenues après soumission des fibres extraites de la palme à l'essai de traction. Ainsi, cette étude tente à montrer que ces caractéristiques varient en fonction de plusieurs facteurs y compris la zone d'extraction des bois fibreux et la fibre.

2 Matériaux et caractérisation physico-mécanique

Le matériau de cette étude est une palme mûre d'un palmier dattier type Deglet-Nour de la région de Biskra (Algérie). L'âge du palmier est d'environ 50 ans. Les palmes utilisées sont séchées pendant six mois sous des conditions naturelles avant d'effectuer les tests de caractérisation.

2.1 Morphologie de la palme

La figure 3 présente la structure morphologique du bois du pétiole suivant trois coupes selon la direction de l'axe de la palme: coupe transversale (*CT*), coupe longitudinale (*CL*) et coupe longitudinale tangentielle (*CLT*). On observe que la taille de la section de la palme varie tout au long de la palme et que la direction des fibres suit la variation de la section avec une diminution de leur section. L'observation microscopique de la section transversale de la palme montre la faible concentration des fibres par rapport à celle de la matrice végétale (lignine).

La figure 4 présente une coupe longitudinale d'une partie du bois du rachis de 60 cm de longueur et d'une largeur variant entre 10 à 4,5 cm. L'observation microscopique des coupes transversales (*CT*) des différentes zones du rachis obtenues de la même ligne sur le long de la palme, montre que la section des fibres et le pourcentage de la matrice végétale (lignine) diminuent avec une augmentation de la concentration des fibres.

2.2 Matériaux et spécimens

Pour la préparation des échantillons, des palmes du même palmier dattier ont été découpées en quatre parties, notées de I à IV (Fig. 5). Quatre échantillons sont découpés de chaque partie de la palme. La figure 6 présente les spécimens utilisés pour la mesure des propriétés physiques et la caractérisation mécanique. Les essais mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes issues du bois fibreux du pétiole (*BP*) et d'autres issues du bois fibreux du rachis (*BR*) de la même palme.

L'extraction mécanique des fibres à l'aide d'un outil métallique a été précédée par l'utilisation de la technique de rouissage à l'eau [42] qui consiste à tremper des morceaux de bois fibreux de pétiole et de rachis dans un bain d'eau pendant une semaine à dix jours. Ensuite, on soumet plusieurs fois les fibres obtenues à un lavage à l'eau distillée et au séchage dans une étuve d'humidité. L'élimination de la matrice végétale (lignine) sur la surface latérale de la fibre a été vérifiée par observation microscopique. La figure 7 présente l'observation microscopique de la surface de fibres avant et après lavage.

Les fibres ont été classées suivant deux catégories: leur position le long de la palme, la fibre de la partie pétiolaire (*FP*) et celle de la partie du rachis (*FR*).

2.3 Caractérisation physico-mécanique

2.3.1 Propriétés physiques

Pour déterminer le rapport de la fibre/matrice végétale (lignine), la technique choisie consiste à calculer le volume total des fibres présentes dans un volume donné d'échantillon de $(10 \times 5 \times 5) \text{ mm}^3$ (Fig. 8). La technique de la photo microscopique (Light microscopie) a été utilisée pour mesurer la section des fibres. On a utilisé un microscope optique numérique de type (Digi-Blue_QX5_QSG). Les mesures de la section des fibres ont été effectuées dans la direction transversale et longitudinale de l'échantillon.

Selon le volume de chaque échantillon, l'image grossie de la coupe longitudinale (Fig. 8b) permet de déterminer le diamètre moyen de chaque fibre. La coupe transversale donne le nombre de fibres dans chaque échantillon (Fig. 8a). La masse volumique du bois fibreux et des fibres de la palme est mesurée sur plusieurs échantillons pris le long de la longueur. L'échantillon est pesé par une balance électronique (Kern V3.1) d'une précision de 0,0001 g. Le volume de l'échantillon est déterminé par trempage dans un récipient rempli d'eau distillée et un autre rempli du propanol. La masse volumique de la matrice végétale (lignine) est calculée à partir de la loi de mélange suivante:

$$\rho_c = \rho_l v_l + \rho_f (1 - v_l), \quad (1)$$

$$v_l + v_f = 1. \quad (2)$$

ρ_c : masse volumique de bois, ρ_f : masse volumique de fibre, ρ_l : masse volumique de lignine, V_l : fraction volumique de lignine.

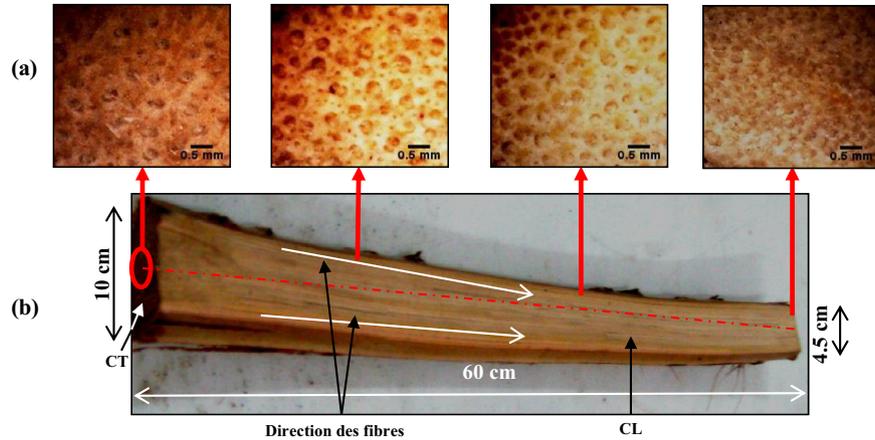


Fig. 4. Présentation structurale du bois du rachis : (a) sens longitudinal ; (b) sections transversales (CT) ($\times 10$).

Fig. 4. Presentation of the rachis wood: (a) longitudinal direction; (b) cross sections (CT) ($\times 10$).

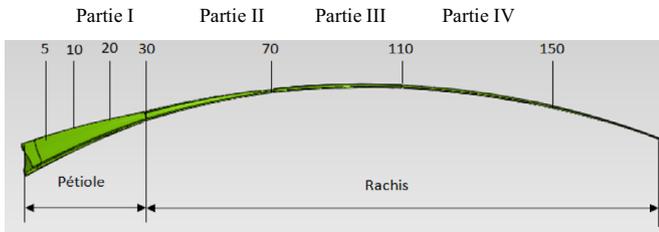


Fig. 5. Zone de coupe.

Fig. 5. The cutting area.

La teneur en eau dans la palme est déterminée par la méthode gravimétrique. Les échantillons prélevés de la palme de masse initiale M_h sont placés dans une étuve (BINDER) à une température de $(110 \pm 1)^\circ\text{C}$. Les échantillons sont pesés chaque heure jusqu'à la stabilisation de la masse de l'échantillon M_s . Le taux d'humidité H est déterminé à partir de la formule suivante :

$$H\% = \frac{(M_h - M_s)}{M_h} \times 100. \quad (3)$$

$H\%$: pourcentage d'eau dans le bois de la palme ; M_h : masse d'échantillon avant séchage ; M_s : masse d'échantillon après séchage.

La température de séchage est choisie suite à une étude de l'influence de ce paramètre sur le taux d'humidité. On utilise différentes températures : 60, 110 et 150°C pour le séchage des échantillons sous forme d'un cube de la même taille et de la même zone de coupe.

2.3.2 Propriétés mécaniques

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques du bois fibreux et des fibres, des essais de traction, de compression et de flexion à trois points ont été réalisés à l'aide d'une machine universelle de type Instron 5969 pilotée par un ordinateur avec le logiciel Bluehill3. Les cellules utilisées ont une capacité maximale de 50 kN pour les essais sur le bois (BP et BR), et de 5 kN pour les essais sur les fibres (FP et FR).

2.3.2.1 Essai de traction longitudinale du bois (TL)

Les éprouvettes (BP) des essais de traction sont de forme haltère selon la norme NF ISO 527. La position des fibres est longitudinale. La largeur du pétiole ne permettait pas de découper des éprouvettes dans le sens transversal. Les éprouvettes de traction longitudinale (BP) sont fixées aux têtes d'amarrage après avoir couvert la zone de fixation par un ruban adhésif en papier pour éviter le glissement et l'écrasement de l'éprouvette. La vitesse de l'essai est de 2 mm/min.

2.3.2.2 Essai de compression du bois

L'essai de compression a été effectué avec des éprouvettes (BP) de $(30 \times 30 \times 30) \text{ mm}^3$ dans les deux directions longitudinale (CL) et transversale (CT) selon la norme NF B51-007-ISO3132-1975. La vitesse de l'essai est constante de 5 mm/min. La contrainte et la déformation maximale dans le cas des éprouvettes (CT) sont déterminées au point de changement de la linéarité de la courbe charge-déplacement, tandis que et dans le cas des éprouvettes (CL) elles ont été déterminées au point de la chute franche de la charge due à la rupture de l'éprouvette.

2.3.2.3 Essai de flexion trois points du bois (F3P)

Le test de flexion statique s'effectue suivant la norme NF ISO 178. Les éprouvettes (BP) sont de dimensions $(260 \times 30 \times 20) \text{ mm}^3$. La partie du rachis est découpée en trois zones (BR1, BR2, BR3) et trois éprouvettes ont été préparées pour chaque zone. Les éprouvettes sont de dimensions $(140 \times 15 \times 7) \text{ mm}^3$. La vitesse de l'essai est de 2 mm/min. En exploitant les courbes charge-déplacement obtenues par l'essai de la flexion trois points, on peut déterminer le module d'élasticité en flexion E_f selon la formule (4), sous la norme (NFT 51 001). La déformation en flexion ε et la contrainte de flexion σ sont déterminées respectivement selon les formules (5) et (6).

$$E_f = \frac{L^3 F}{4bh^3 S}, \quad (4)$$

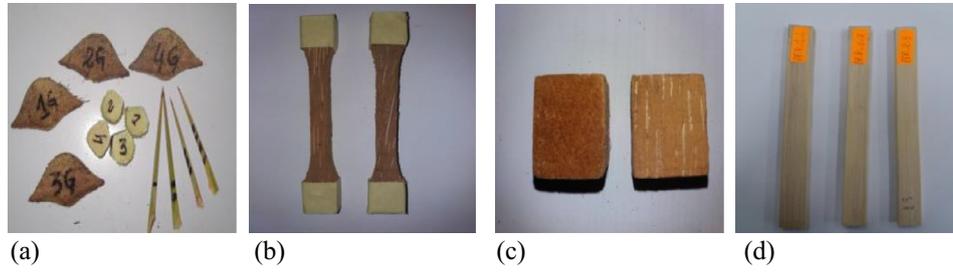


Fig. 6. Spécimens : (a) échantillons des tests physiques ; (b) éprouvette haltère de l’essai de traction du bois (BP) ; (c) éprouvette de l’essai de compression du bois (BP) ; (d) éprouvette de l’essai de flexion du bois (BR).

Fig. 6. Specimens: (a) physical test samples; (b) dumbbell shaped specimen (BP) for wood tensile test; (c) wood compression test specimen (BP); (d) wood bending test specimen (BR).

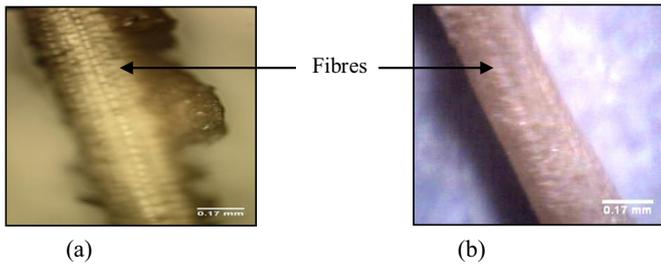


Fig. 7. Fibres extraite de la palme ($\times 200$) : (a) avant lavage ; (b) après lavage.

Fig. 7. Fibers extracted from the palm ($\times 200$): (a) before washing, (b) after washing.

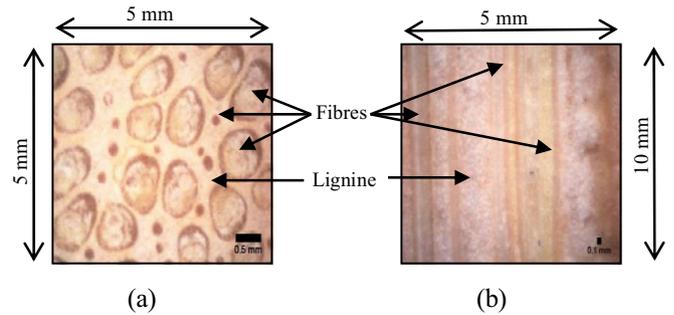


Fig. 8. Photo microstructure pour la mesure de la section de fibre : (a) coupe transversale ($\times 10$) ; (b) coupe longitudinale ($\times 60$).

Fig. 8. Photo microstructure for measurement of fiber section: (a) cross section ($\times 10$) ; (b) longitudinal section ($\times 60$).

$$\varepsilon = \frac{6h}{L^2} s, \tag{5}$$

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}. \tag{6}$$

L : distance entre les appuis (mm), S : flèche obtenue par la charge (mm). b : épaisseur de l’éprouvette (mm), h : hauteur de l’éprouvette (mm). F : charge pour un point choisi sur la tangente à l’origine (N).

2.3.2.4 Essai de traction des fibres

La figure 9 présente une coupe transversale du bois de la palme (BP). On peut observer deux catégories de fibres, les fibres principales de diamètre plus grand que celui des fibres secondaires. Les fibres sont classées en deux catégories par rapport à leur diamètre moyen, (FPr) pour les fibres principales ($d \geq 0,5$ mm) et (FSc) pour les fibres secondaires ($d \leq 0,5$ mm). La section des fibres varie tout au long de sa longueur ; ceci peut influencer directement la valeur du module d’élasticité E et de la contrainte maximale σ_{max} lors des calculs. Les essais de traction sur fibres ont été effectués selon la norme ASTM D882 et ASTM D339-75. La vitesse de déplacement des mors a été adaptée à 0,1 mm/min. Les fibres sont fixées entre deux feuilles de forme rectangulaire munies à leur milieu d’une ouverture de 60 mm de longueur. Les deux feuilles sont collées pour maintenir de manière permanente la fibre (Fig. 9b).

3 Résultats et discussion

3.1 Propriétés physiques

La forme et la structure de la palme sont complexes, à cause de la répartition des fibres et du taux de la matrice végétale (lignine) qui diffère le long de la palme. Le bois fibreux étant constitué par des groupes organiques de la palme, il est considéré comme un matériau hydrophile. Il est donc nécessaire de quantifier les paramètres relatifs à cette propriété par le pourcentage volumique ses constituants (fibres et matrice végétale (lignine)) et le taux d’humidité. Ces caractéristiques sont déterminées dans différentes parties de la palme.

La figure 10 présente le pourcentage volumique des fibres et celui de la matrice végétale (lignine) suivant la longueur de la palme.

La forme des courbes obtenues montre que le pourcentage volumique des fibres dans la partie pétiolaire (BP) comprise entre 5 à 30 cm de la longueur, est faible, entre 10 et 20 % environ, et que le taux de la matrice végétale (lignine) dans cette partie est par conséquent très élevé et atteint 90 %. Pour les parties plus les éloignées, le taux de la matrice végétale (lignine) diminue rapidement jusqu’à 56 % devenant quasiment constant suivant la longueur de la palme. Dans cette partie du rachis (BR), le pourcentage de fibres peut atteindre 44 %. Cette variation importante du taux de fibres et celui de la matrice végétale (lignine) le

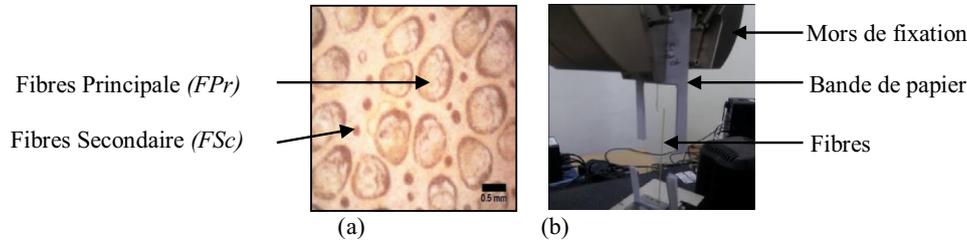


Fig. 9. Essai de traction des fibres : (a) coupe transversale (BP) ($\times 60$) ; (b) dispositif de l'essai.

Fig. 9. Tensile test of the fibers: (a) cross section (BP) ($\times 60$); (b) test device.

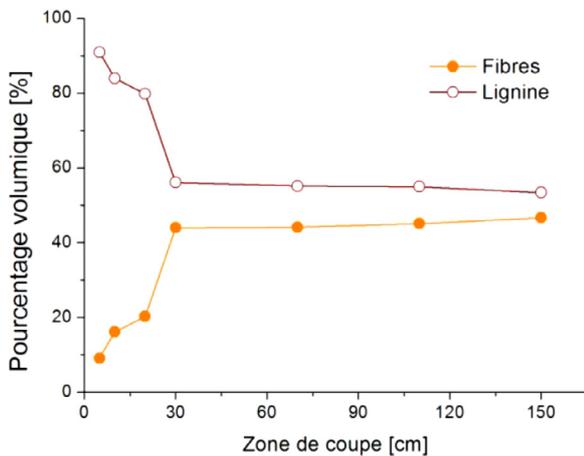


Fig. 10. Pourcentage volumique de fibres et du lignine dans la palme.

Fig. 10. Percentage of fibers and lignin in the palm.

long de la palme est un paramètre qu'il faut prendre en compte dans l'interprétation de la variation éventuelle des caractéristiques mécaniques.

Dans la même optique, la masse volumique du bois fibreux et des fibres et de la matrice végétale (lignine) de la palme sèche ont été mesurées le long de la palme et les valeurs trouvées sont synthétisées dans les [tableaux 1 et 2](#).

Le [tableau 1](#) montre que la masse volumique du bois fibreux augmente le long de la palme à partir de la partie pétiolaire (BP) jusqu'à la partie rachis (BR). En moyenne, elle est trois fois supérieure dans la partie (BR) que de la partie (BP). La masse volumique des fibres de la partie pétiolaire (FP) est légèrement inférieure à celle dans la partie rachis (FR) ([Tab. 2](#)). Nous pouvons conclure que la proportion des fibres augmente la valeur de la masse volumique, et le pourcentage de la matrice végétale (lignine) la réduit. D'autre part, la masse volumique des fibres varie en fonction de leur emplacement dans la palme. Ceci affecte naturellement les propriétés hygroscopiques et mécaniques du bois fibreux de la palme.

La mesure du taux d'humidité à différentes températures de séchage a montré que ce paramètre n'a pas d'influence sur le taux initial d'humidité dans différentes parties de la palme. Ce paramètre affecte seulement la

vitesse de séchage. En effet, le [tableau 3](#) montre le taux d'eau perdue d'échantillons de même taille et de même zone d'emplacement dans la palme pendant une durée de 30 minutes à différentes températures. La température accélère et augmente la quantité d'eau perdue, le pourcentage de la perte d'eau à une température de 60 °C est très inférieure que celle perdue à une température de 110 et 150 °C. La température de séchage sera choisie entre 110 et 150 °C.

La [figure 11a](#) présente la variation de la quantité d'eau perdue en fonction du temps dans différentes parties de la palme. Le taux d'humidité est déterminé après la stabilisation de la quantité d'eau perdue à la température de 110 °C ([Fig. 11b](#)).

Nous remarquons que les courbes de la variation de la quantité d'eau perdue au cours de temps dans les différentes parties de la palme ont la même allure, mais présentent différents niveaux d'importance selon les différents constituants de la palme. Le pourcentage d'eau restitués au niveau de (BP) est de 70 % suivi de celui de (BR) avec 50 %. Le pourcentage le plus bas est enregistré dans les folioles de 5,5 % juste après les épines à 41 %. Nous constatons ainsi que la teneur en eau diminue le long de la palme. Ceci est en concordance avec l'augmentation de la masse volumique du bois fibreux dans le même sens pour les palmes sèches. Ainsi, la valeur de la masse volumique du bois fibreux dans les différentes parties de la palme est grandement affectée par la perte d'eau après le séchage. Ce pourcentage d'humidité peut affecter les propriétés mécaniques des constituants de la palme après le séchage.

3.2 Propriétés mécaniques

3.2.1 Essai de traction longitudinal du bois (TL)

Les résultats obtenus de l'essai de traction sur les éprouvettes (BP) sont présentés par les courbes de contrainte-déformation. Elles présentent une partie linéaire relativement importante et un domaine réduit où apparaît la non-linéarité. La [figure 12a](#) présente une courbe type de cet essai. La [figure 12b](#) montre la rupture au milieu des éprouvettes de forme haltère après l'essai de traction, confirmant la validité du test avec une position de la rupture au milieu de l'éprouvette. Le [tableau 4](#) donne les caractéristiques mécaniques du bois (BP) obtenues à partir de plusieurs essais.

Tableau 1. Masse volumique du bois de la palme sèche.**Table 1.** Density of dry palm wood.

Matière	(BP)			(BR)			
	[0–5]	[5–10]	[10–20]	[20–30]	[30–70]	[70–110]	[110–150]
Position d'échantillon [cm]							
Masse volumique [g/cm ³]	0,15	0,16	0,17	0,27	0,54	0,69	0,75
Masse volumique moyenne [g/cm ³]	0,19 ± 0,05	0,66 ± 0,11					

Tableau 2. Masse volumique des composantes du bois de la palme sèche.**Table 2.** Density of the components of the dry palm wood.

Matière	(BP)	(BR)
Position [cm]	[0–30]	[30–150]
Masse volumique de fibres [g/cm ³]	0,61 ± 0,18	0,81 ± 0,58
Masse volumique de la matrice végétale (lignine) [g/cm ³]	0,09 ± 0,03	0,54 ± 0,37
Fraction volumique des fibres V_f [%]	20	44
Fraction volumique de la matrice végétale (lignine) V_l [%]	80	56

Tableau 3. Influence de la température sur le séchage pendant 30 min.**Table 3.** Influence of temperature on drying for 30 min.

Température [°C]	Eau perdue [%]
60	7
110	59
150	68

3.2.2 Essai de compression du bois

Les courbes contraintes de la [figure 13](#) issues des essais de compression dans le sens longitudinal (*CL*) et le sens transversal (*CT*) montrent le caractère anisotrope du matériau (*BP*) testé. Dans le domaine élastique les éprouvettes conservent leur forme cubique pour les deux essais. Dans le cas de l'essai (*CT*) et après le changement de la linéarité de la courbe contrainte-déformation, la contrainte tangentielle importante provoque un glissement dans le sens perpendiculaire de la charge ([Fig. 13c](#)). En effet, les propriétés mécaniques dans les deux sens présentées dans le [tableau 5](#) obtenues à partir de ces courbes sont très différentes.

3.2.3 Essai de flexion trois points du bois (*F3P*)

Les résultats obtenus à partir des essais de flexion trois points sur les éprouvettes issues du pétiole sont représentés sur le graphe type de charge-déplacement de la [figure 14a](#). Le [tableau 6](#) présente les caractéristiques mécaniques déduites de cet essai.

Les résultats obtenus à partir des essais (*F3P*) sur les éprouvettes issues des différentes parties du rachis sont représentés sur le graphe type de charge-déplacement de la [figure 15a](#). Les caractéristiques mécaniques relatives aux trois parties du rachis sont illustrées dans le [tableau 7](#).

La [figure 14b](#) et la [figure 15b](#) présentent les éprouvettes rompues après l'essai de flexion trois points.

La [figure 16](#) présente la variation du module d'élasticité et la contrainte maximale du bois fibreux le long de la palme. À partir des résultats obtenus, on remarque que le module d'élasticité et la contrainte sont différents dans les différentes parties de la palme. Le module d'élasticité augmente jusqu'à 11 GPa pour la partie de rachis (*BR*) de la palme. Ceci est dû à la nature micro-fibrillaire de la fibre dans cette zone et d'à la bonne adhérence des fibres dans l'autre partie (*BP*).

Le [tableau 8](#) présente une comparaison des caractéristiques mécaniques du bois fibreux de différentes parties du palmier dattier obtenue dans la présente étude avec ceux tirées de quelques références.

3.2.4 Essai de traction des fibres

Les [figures 17](#) et [18](#) présentent les courbes contrainte-déformation de l'essai de traction pour les deux catégories de fibres suivant la longueur de la palme :

- (*FPPr*): fibre de pétiole principale;
- (*FPSc*): fibre de pétiole secondaire;
- (*FRPr*): fibre de rachis principale;
- (*FRSc*): fibre de rachis secondaire.

Nous remarquons que les deux types de courbes de traction reflètent la différence du comportement mécanique des fibres testées. Cette différence provient de l'influence de différents paramètres tels que la position de la fibre dans la palme et leur structure interne. Ceci est en corrélation avec les résultats de l'étude morphologiques ([Fig. 4](#)) et des propriétés physiques ([Tabs. 1](#) et [2](#)) de la palme. La [figure 17](#) montre deux changements brusques dans l'allure de la courbe pendant sa montée. Ce phénomène est intrinsèque aux courbes de traction des fibres principales (*FRPr* et *FPPr*) et qui peut être attribué

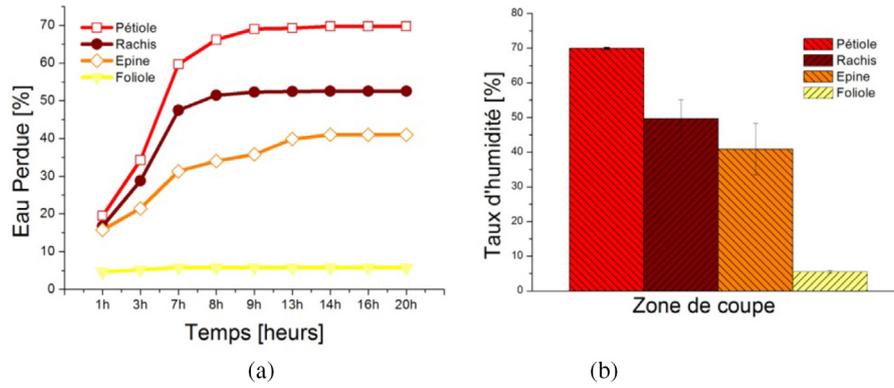


Fig. 11. Taux d’humidité de différentes parties de la palme : (a) quantité d’eau perdue en fonction du temps ; (b) taux d’humidité.

Fig. 11. Humidity content of different parts of the palm: (a) amount of water lost over time; (b) humidity content.

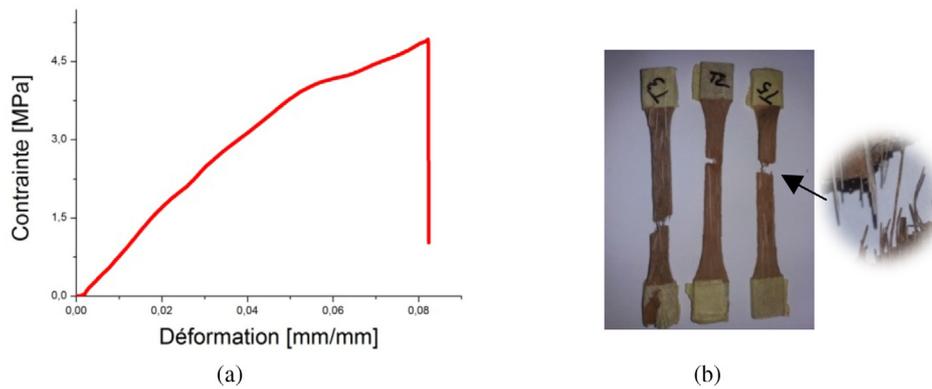


Fig. 12. Résultats de l’essai de traction (TL) : (a) courbe type contrainte-déplacement ; (b) éprouvettes (BP) après l’essai.

Fig. 12. Tensile test (TL) results: (a) stress-strain type curve; (b) test specimens (BP) after the test.

Tableau 4. Résultats de l’essai de traction (BP).

Table 4. Results of the tensile test (BP).

σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [mm/mm]	E [GPa]
$6,80 \pm 1,69$	$0,532 \pm 0,133$	$1,303 \pm 0,301$

à la rupture interne des micro-fibrilles. Ce phénomène n’est pas observé dans les fibres secondaires (Fig. 18). Les fibres (FR) ont une bonne résistance à la traction que les fibres (FP). Les résultats sont présentés dans le tableau 9.

Nous remarquons d’après les résultats obtenus que le module d’élasticité et la contrainte maximale varient selon la position de la fibre sur la palme. Ces caracté-

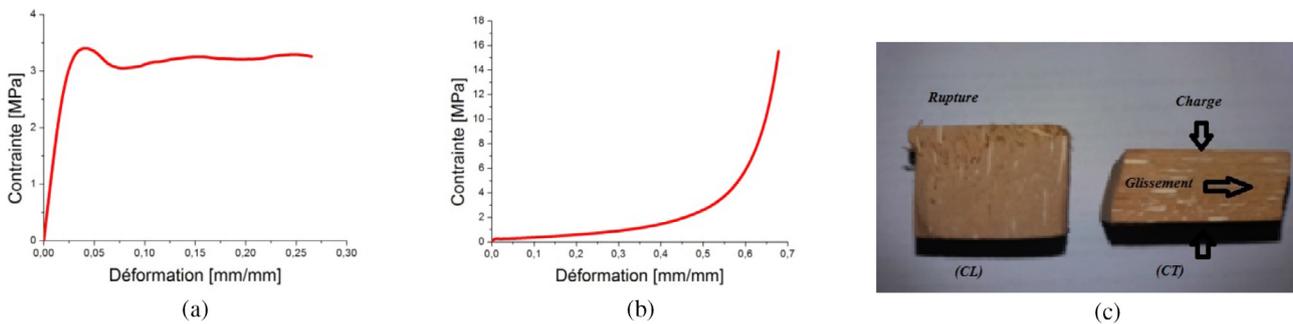


Fig. 13. Résultats de l’essai de compression : courbes types contrainte-déformation, (a) (CL), (b) (CT) et (c) éprouvettes (BP) après l’essai.

Fig. 13. Results of the compression test: typical stress-strain curves, (a) (CL), (b) (CT) and (c) test specimens (BP) after the test.

Tableau 5. Résultats des essais de compression (BP).

Table 5. Results of the compression tests (BP).

Sens longitudinal (CL)			Sens transversal (CT)		
σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [mm/mm]	E_L [GPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [mm/mm]	E_T [GPa]
$3,70 \pm 0,42$	$0,025 \pm 0,015$	$0,224 \pm 0,069$	$3,85 \pm 0,04$	$0,634 \pm 0,069$	$0,067 \pm 0,014$

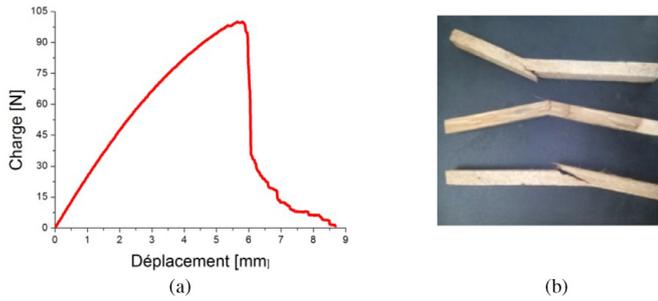


Fig. 14. Résultats de l'essai de flexion trois points (BP): (a) courbe type charge-déplacement; (b) éprouvette (BP) après l'essai.

Fig. 14. Results of the three-point bending test (BP): (a) load-displacement type curve; (b) test specimen (BP) after the test.

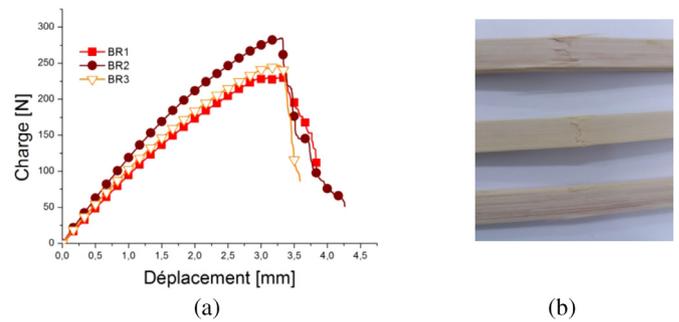


Fig. 15. Résultats de l'essai de flexion trois points (BR): (a) courbes types charge-déplacement; (b) éprouvettes (BR) après l'essai.

Fig. 15. Results of the three-point bending test (BR): (a) load-displacement typical curves; (b) test specimens (BR) after the test.

Tableau 6. Résultats de l'essai de flexion trois points (BP).

Table 6. Résultats de l'essai de flexion trois points (BP).

F_{max} [N]	E_f [GPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [mm/mm]
$96,29 \pm 12,41$	$0,585 \pm 0,001$	$10,33 \pm 2,36$	$0,017 \pm 0,003$

ristiques qui reflètent la rigidité mécanique des fibres de la palme sont plus importantes dans la partie rachis que dans la partie pétiolaire. Cette différence de comportement mécanique des différentes catégories de fibres de la palme en fonction de leur diamètre et de leur emplacement dans la palme permet de les classer par rapport aux champs d'application en tant que charge dans l'élaboration des matériaux composites à base de fibres végétales.

Le **tableau 10** présente une comparaison des résultats de cette étude avec d'autres résultats des différentes références bibliographiques.

La différence entre les résultats des différents auteurs dans le cas du bois fibreux et des fibres extraites du palmier dattier (**Tabs. 8 et 10**) peut être attribuée à plusieurs facteurs tels que la nature du bois fibreux du palmier (le type du palmier dattier) et la région de sa croissance. La partie d'extraction peut être aussi un facteur d'influence car la structure du bois fibreux et de la fibre diffère d'une zone à une autre dans le même palmier dattier.

4 Conclusion

Les résultats obtenus à travers ce travail ont permis d'identifier les propriétés physiques du bois fibreux et des fibres extraites de la palme mûre du palmier dattier, telles que la masse volumique de la matrice végétale (lignine) et de la fibre ainsi que la masse volumique du bois fibreux dans différentes parties de la palme mûre. À partir des tests de séchage, le taux d'humidité pour chaque partie de la palme a été évalué. Ensuite, les caractéristiques mécaniques du bois fibreux de la palme mûre après le séchage ont été déterminées le long de la palme à partir de la partie pétiolaire (BP) jusqu'à la partie rachis (BR). Les caractéristiques mécaniques des fibres ont été obtenues par la sollicitation en traction des fibres extraites de la palme. L'étude a porté sur les deux parties de la palme mûre, la partie pétiolaire (BP et FP) et le rachis (BR et FR). La partie (BP) présente la masse volumique et les propriétés mécaniques les plus faibles. Ceci peut être dû au pourcentage très élevée de la matrice végétale (lignine) et du taux d'humidité dans cette partie. D'autre part, la partie (BR) présente des comportements mécaniques remarquables par rapport à ceux des autres parties de la palme. Ceci est dû à ses propriétés physiques car le pourcentage des fibres est plus élevé et cohérent. En plus, la rigidité et la résistante à la traction des fibres (FR) dans cette partie sont meilleures.

Les résultats obtenus et ceux de la littérature montrent une importante dispersion des valeurs des caractéristiques physiques et mécaniques des bois fibreux et des fibres

Tableau 7. Résultats de l'essai de flexion trois points (*BR*).

Table 7. Results of the three-point bending test (BR).

Éprouvettes	F_{max} [N]	E_f [GPa]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [mm/mm]
BR1	342,11 ± 80,43	7,247 ± 2,546	88,88 ± 29,78	0,016 ± 0,004
BR2	388,94 ± 92,11	10,252 ± 0,528	115,89 ± 23,22	0,015 ± 0,003
BR3	190,81 ± 18,55	8,321 ± 1,273	68,64 ± 7,64	0,008 ± 0,006
Moyenne (BR)	307,56 ± 103,56	8,607 ± 1,522	91,13 ± 19,36	0,013 ± 0,004

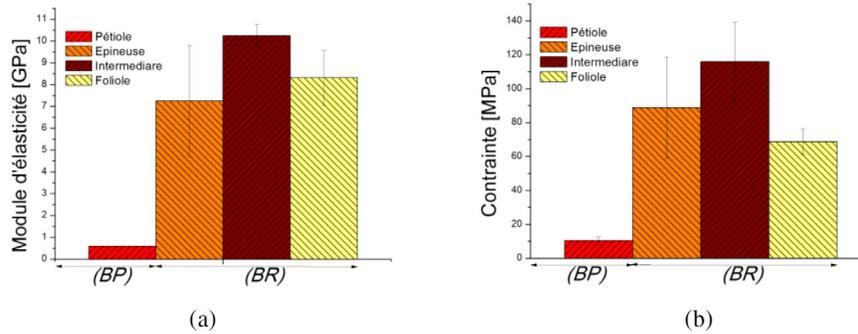


Fig. 16. Résultats de l'essai de flexion trois points pour les différentes parties du bois de la palme: (a) module d'élasticité; (b) contrainte maximale.

Fig. 16. Results of the three-point bending test for the different parts of the palm wood: (a) modulus of elasticity; (b) maximum stress.

Tableau 8. Comparaison des propriétés mécaniques des bois du palmier dattier.

Table 8. Comparison of mechanical properties of date palm tree woods.

	Module d'élasticité [GPa]	Contrainte max [MPa]	Références	Palmier dattier	
				Type	Région
<i>(BP)</i> (Kornaf)	1,30 ^(TL) 0,07 ^(CT) –0,22 ^(CL) 0,59 ^(F3P) 7,0 ^(TL)	6,80 ^(TL) 3,7 ^(CT) –3,85 ^(CL) 10,33 ^(F3P) 90 ^(TL)	Présente étude [14]	Pétiole Deglate-Nour	Tolga Biskra-Algérie
	0,23 ^(CL)	3,79 ^(CL)	[43]	Palmier dattier	Borj-rose Biskra-Algérie Biskra-Algérie
	5,6–11 ^(F3P)	58–337 ^(F3P)	Présente étude		Tolga Biskra-Algérie
<i>(BR)</i> (Gand)	8,5 ^(TL)	213 ^(TL)	[14]	Rachis Deglate-Nour	Borj-rose Biskra-Algérie
Tronc du palmier	3,87 ^(TL)	95,35 ^(TL)	[14]	Tronc Deglate-Nour	Borj-rose Biskra-Algérie
	9,8 ^(TL) 0,1 ^(CT) –2,2 ^(CL) 8,5 ^(F3P)	35 ^(TL) 5 ^(CT) –35 ^(CL) 65 ^(F3P)	[43]	Palmier dattier	Biskra-Algérie
	2,88 ^(CL) 6 ^(F3P)	22 ^(CL) 30 ^(F3P)	[25]	Palmier dattier	Sud de Tunisie

Notation des types d'essai mécanique; *(TL)*: Traction Longitudinale, *(CL)*: Compression Longitudinale, *(CT)*: Compression Transversale, *(F3P)*: Flexion trois points.

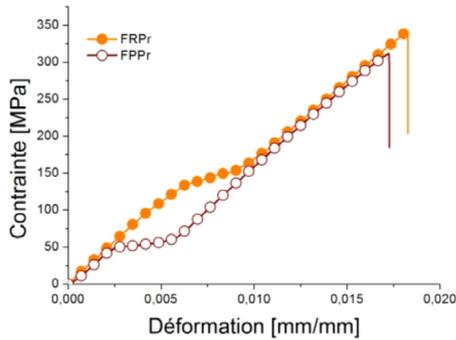


Fig. 17. Courbes types contrainte-déformation de l'essai de traction (*FPr*).

Fig. 17. Typical stress-strain curves of the tensile test (*FPr*).

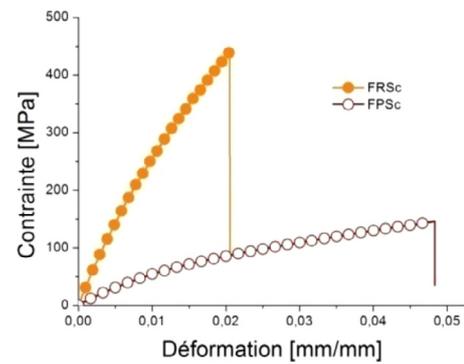


Fig. 18. Courbes types contrainte-déformation de l'essai de traction (*FSc*).

Fig. 18. Typical stress-strain curves of the tensile test (*FSc*).

Tableau 9. Résultats de l'essai de traction des fibres (*FSc* et *FPr*).

Table 9. Fiber tensile test results (*FSc* and *FPr*).

Zone d'extraction	Catégories des fibres	Module d'élasticité [GPa]	Conainte max [MPa]
Fibre de pétiole (<i>FP</i>)	FPPr	$11,863 \pm 1,206$	$270,24 \pm 29,63$
	FPSc	$6,718 \pm 1,435$	$120,19 \pm 38,54$
Interval (<i>FP</i>)		5–13	120–270
Fibre de rachis (<i>FR</i>)	FRPr	$25,430 \pm 1,534$	$337,42 \pm 56,89$
	FRSc	$20,200 \pm 5,054$	$420,26 \pm 45,24$
Interval (<i>FR</i>)		15–27	337–420

Tableau 10. Comparaison des propriétés mécaniques des fibres du palmier dattier.

Table 10. Comparison of the mechanical properties of date palm tree fibers.

Module d'élasticité [GPa]	Conainte max [MPa]	Références	Palmier dattier	
			Type	Région
9,29–22,81	195,21–378,83	Présente étude	Palme Deglate-Nour	Tolga Biskra-Algérie
7–8,5	90–213	[14]	Déférentes parties Deglate-Nour	Borj-rose Biskra-Algérie
6–11	180–320	[15]	Lif Palmier dattier	El-faiyum Egypte
2,7–5,8	95–190	[23]	Tige Berhi	Irak
2,5–12	97–275	[31]	Palmier dattier	–
2–7,5	58–203	[24]	Palmier dattier	–
$8,8 \times 610^{-3}$	125,97	[19]	Bras de grappe Palmier dattier	Hodna M'sila-Algérie

extraites de palmier dattier. Ceci est dû à plusieurs facteurs tels que la grande diversité des types de palmier dattier et la présence de plusieurs types de fibres dans le même palmier. Ainsi, les résultats ne peuvent être présentés que sous forme de borne inférieure et borne supérieure.

Il apparaît qu'une étude complémentaire de l'influence de l'épaisseur du (*BP*) et du sens du chargement par rapport à l'axe de la palme sur ses propriétés mécaniques est nécessaire pour une future utilisation comme renfort dans les matériaux composites et les éléments d'isolation

(sandwich). Sur la base des résultats présentés dans ce document, des recherches plus approfondies devraient rendre possible l'utilisation de toutes sortes de fibres de la palme dans l'élaboration de nouveaux matériaux composites.

Références

1. K. Saidani, Analyse des composites sandwichs et qualification de leur intégrité vis-à-vis de la ruine, Thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 2014
2. F. Touloum, A. Benchabane, A. Kaci, Nouveau bio-composite local à base de fibres cellulósiques, Application à l'isolation thermique en bâtiment, Premier séminaire national de génie mécanique (SNGM01), Biskra, Algérie, décembre 2011
3. P. Glouannec, F. Collet, C. Lanos, P. Mounanga, T. Pierre, P. Poullain, S. Pretot, J. Chamoin, A. Zaknoune, Propriétés physiques de bétons de chanvre, Matériaux & Techniques **99**, 657 (2011)
4. F. Ilczyszyn, A. Cherouat, G. Montay, Caractérisation des propriétés mécaniques de fibres de chanvre, Matériaux & Techniques **100**, 451 (2012)
5. D. Vasconcellos, F. Sarasini, F. Touchard, L. Chocinski-Arnault, M. Pucci, C. Santulli, J. Tirillò, Fatigue post-impact d'un composite à renfort tissé de fibres de chanvre et matrice époxy, Matériaux & Techniques **102**, 302 (2014)
6. K. Joseph, S. Thomas, C. Pavithran, M. Brahmakumar, Tensile properties of short sisal fiber-reinforced polyethylene composites, J. Appl. Polym. Sci. **47**, 1731 (1993)
7. A. Bezazi, A. Belaadi, M. Bourchak, F. Scarpa, K. Boba, Novel extraction techniques, chemical and mechanical characterisation of *Agave americana* L. natural fibres, Composites Part B: Eng. **66**, 194 (2014)
8. P.N. Tri, A. Guinault, C. Sollogoub, Élaboration et propriétés des composites polypropylène recyclé/fibres de bambou, Matériaux & Techniques **100**, 413 (2012)
9. D. Scida, A. Bourmaud, C. Baley, Influence of the scattering of flax fibres properties on flax/epoxy woven ply stiffness, Mater. Des. **122**, 136 (2017)
10. C. Baley, A. Bourmaud, Average tensile properties of French elementary flax fibers, Mater. Letters **122**, 159 (2014)
11. R. Raj, B. Kokta, D. Maldas, C. Daneault, Use of wood fibers in thermoplastic composites: VI. Isocyanate as a bonding agent for polyethylene-wood fiber composites, Polym. Compos. **9**, 404 (1988)
12. D. Maldas, B. Kokta, C. Daneault, Thermoplastic composites of polystyrene: Effect of different wood species on mechanical properties, J. Appl. Polym. Sci. **38**, 413 (1989)
13. N. Lakreb, Élaboration, 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
14. K. Almi, A. Benchabane, S. Lakel, A. Kriker, Potential utilization of date palm wood as composite reinforcement, J. Reinforced Plas. Compos. **34**, 1231 (2015)
15. E.A. Elbadry, Agro-Residues: Surface treatment and characterization of date palm tree fiber as composite reinforcement, Hindawi Publishing Corporation, J. Compos. 2014, Article ID 189128, 2014
16. N. Saadaoui, A. Rouilly, K. Fares, L. Rigal, Characterization of date palm lignocellulosic by-products and self-bonded composite materials obtained thereof, Mater. Des. **50**, 302 (2013)
17. N. Benmansour, Étude des performances de produits renouvelables et locaux adaptés aux applications de l'isolation thermique dans le bâtiment, Mémoire de magister, Université El Hadj Lakhdar-Batna, Algérie, 2011
18. Y. Djebbloun, M. Hecini, T. Djoudi, B. Guerira, Experimental determination of elastic modulus of elasticity and Poisson's coefficient of date palm tree fiber, J. Nat. Fibers **11** (2018)
19. A. Bezazi, S. Amroune, 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 Sci. Technol. UBMA **31**, 108 (2015)
20. I. Taha, L. Steuernagel, G. Ziegmann, Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites, Compos. Interfaces **14**, 669 (2007)
21. H. Abdel-Rahman, R. Al-Juruf, F. Ahmad, I. Alam, Physical, mechanical and durability characteristics of date palm frond stalks as reinforcement in structural concrete, Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr. **10**, 175 (1988)
22. A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M. Khenfer, M. Chabannet, Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate, Cem. Compos. **27**, 554 (2005)
23. A.S. Hammood, Effect of erosion on water absorption and morphology for treated date palm fiber-reinforced polyester composites, Int. J. Mech. Mechatron. Eng. IJMME-IJENS **15**, (2015)
24. A. Alawar, A.M. Hamed, K. Al-Kaabi, Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement, Compos. Part B: Eng. **40**, 601 (2009)
25. E.S. Ellouze A, S. Medhioub, Détermination des caractéristiques mécaniques du bois tronc palmier, Séminaire International, INVACO2, Rabat-Maroc, n° 30-123, novembre 2011
26. A. Sbiai, Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres, INSA, Lyon, 2011
27. B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, M. Fois, Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood, Energy Build. **43**, 491 (2011)
28. H. Ibrahim, M. Farag, H. Megahed, S. Mehanny, Characteristics of starch-based biodegradable composites reinforced with date palm and flax fibers, Carbohydr. Polym. **101**, 11 (2014)
29. S. Arbaoui, B. Campanella, R. Paul, T. Bettaieb, Données ethnobotaniques, pharmacologiques et agro-industrielles sur une plante prometteuse: le kénaf (*Hibiscus cannabinus* L.), Phytothér. **12**, 292 (2014)
30. J.-L. Wertz, Les biocomposites et composites polymère-chanvre en particulier, Rapport d'unité de Chimie biologique industrielle, Valbiom, Université de Liège-Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique, 2014
31. F.M. Al-Oqla, S. Sapuan, Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry, J. Clean. Prod. **66**, 347 (2014)
32. G. Peyron, Cultiver le palmier-dattier, guide illustré de formation, CIRAD, Montpellier, France, 2000

33. Itdas, Rapport sur la situation du secteur agricole, Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne, Biskra, Algerie, 2012
34. P. Munier, Le palmier-dattier, Techn. Agric. Prod. Trop. **24**, 221 (1973)
35. A. Chehema, H. Longo, A. Siboukeur, Estimation du tonnage et valeur alimentaire des sous-produits du palmier dattier chez les ovins, Rech. Agron. **7**, 7 (2000)
36. N. Alp, N. Iskanderany, Manufacture of chipboard panels from indigenous date palm Bioma. Proceeding of the 2nd annual meeting for scientific research, Scientific Publishing Center of King Abdulaziz University, Saudi Arabia, 2003
37. T. Masri, H. Ounis, L. Sedira, A. Kaci, A. Benchabane, Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes, Constr. Build. Mater. **164**, 410 (2018)
38. S.S. Hegazy, K. Ahmed, Effect of date palm cultivar size, panel density and hot water extraction on particle boards manufactured from date palm fronds, Agriculture **5**, 267 (2015)
39. F.M. AL-Oqla, O.Y. Alothman, M. Jawaïd, S. Sapuan, M. Es-Saheb, Processing and properties of date palm fibers and its composites, in: K. Hakeem, M. Jawaïd, U. Rashid. (Eds.) Biomass and bioenergy, Springer, 2014, pp. 1–25.
40. A. Dehghani, S.M. Ardekani, M.A. Al-Maadeed, A. Hassan, M.U. Wahit, Mechanical and thermal properties of date palm leaf fiber reinforced recycled poly (*ethylene terephthalate*) composites, Mater. Des. (1980–2015), **52**, 841 (2013)
41. K.M.M. Rao, K.M. Rao, Extraction and tensile properties of natural fibers: vakka, date and bamboo, Compos. Struct. **77**, 288 (2007)
42. C. Baley, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, (Ed). Techniques de l'ingénieur, Réf : N2220 v1, Paris, France, 2005
43. M. Baali, Contribution à la caractérisation et à l'exploration de la microstructure et des propriétés des constituants du palmier, Mémoire de magistère, Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie, 2012

Citation de l'article : Tarek Djoudi, Mabrouk Hecini, Daniel Scida, Youcef Djebloun, Belhi Guerira, Caractérisation physique et mécanique du bois et des fibres issus d'une palme mûre de palmier dattier, Matériaux & Techniques **106**, 403 (2018)

Annexe

Les fiches techniques des polymères



FICHE TECHNIQUE

Scapa Polymerics 41

Résine époxyde

DESCRIPTION

Scapa 41 est une résine époxyde bi-composant, polymérisable à température ambiante, semi-rigide non chargée. La couleur du mélange est ambre.

APPLICATIONS

- Pour l'isolation électrique des accessoires de câbles B T.
- Pour la protection mécanique des accessoires de câbles HTA.
- Protection contre l'humidité.

AVANTAGES

- Conditionnée en bissac prêt à l'emploi. Proportions résine/durcisseur précises.
- Mélange aisé grâce aux proportions résine/durcisseur de 1/1.
- Polymérise même en milieu très humide sans formation de bulles.
- Temps de polymérisation adapté aux climats tempérés.
- Accrochage exceptionnel sur le PVC et le PE.
- Approuvée EDF (Type MPF 01-I et MPF-PM) elle est conforme à la spécification UTE C 33-010.
- Après mélange dans le bissac le produit restant est totalement inerte.

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Propriétés	Unité	Valeur Nominale	Méthode de test
Viscosité de la résine à 25°C (Brookfield)	mPa.s	3500	ISO 2555
Viscosité du durcisseur à 25°C	mPa.s	3500	ISO 2555
Proportion de durcisseur pour 100g de résine	g	100	-
Densité du mélange à 25°C	-	1.04	ISO 3521
Durée de vie en pot pour 100g à 25°C	min.	25	UTE C 33-010
Dureté Shore A		95	ISO 868
Résistivité volumique	Ohm.m	1×10^{12}	IEC 60093
Rigidité diélectrique	kV/mm	25	IEC 60243

PRESENTATION STANDARD

- Conditionnée en bismacs.

Bismacs	Poids en g	Volume en cm ³
41001	90	86
41002	190	183
41003	440	423
41004	513	493
41005	418	402

- Marque : Scapa

RECOMMANDATIONS

Stocker à l'abri du gel, dans son emballage d'origine, à l'abri de l'humidité et à une température de préférence comprise entre +10°C et +30°C. La durée de stockage est de 2 ans.

REPSOL
YPF

ISPLEN®
POLIPROPILENO

ISPLEN® PP 080 G2M

El **Isplen® PP 080 G2M** es un polipropileno homopolímero de fluidez alta dirigido a aplicaciones de moldeo por inyección. Se caracteriza por presentar una excelente procesabilidad que permite un llenado fácil de los moldes y ciclos cortos para piezas de gran tamaño.

El **Isplen® PP 080 G2M** es fácil de procesar en máquinas estándar de inyección en un amplio rango de temperaturas (210 – 260 °C) dependiendo del espesor de las paredes, la geometría de la pieza y otros parámetros de diseño. Los artículos fabricados con este grado tienen buenas propiedades mecánicas, alta resistencia química y facilidad de decoración.

APLICACIONES

El **Isplen® PP 080 G2M** es ampliamente utilizado para inyectar artículos como:

- Pequeños contenedores domésticos.
- Envases rígidos.
- Recipientes para cosmética.
- Mobiliario de jardín y producto base para la preparación de compuestos.

PROPIEDADES	METODO	UNIDAD	VALOR
Físicas			
Índice de fluidez (230 °C; 2,16 kg)	ISO 1133	g/10 min	20
Densidad	ISO 1183	g/cm ³	0,905
Mecánicas			
Módulo de Flexión	ISO 178	MPa	1600
Impacto Izod, con muesca (23 °C)	ISO 180	kJ/m ²	3
Alargamiento en el punto de rotura	ISO 527	%	50
Térmicas			
Temperatura H.D.T.	ISO 75/B	°C	85
Otras			
Dureza Shore	ISO 868	Escala D	70

Nota: Los valores mostrados son medios y no deben ser tomados como especificaciones del producto. Están obtenidos a partir de probetas inyectadas y acondicionadas siguiendo procedimientos recogidos en normas ISO.

El **Isplen® PP 080 G2M** cumple con las normas de la FDA y las Directivas Europeas relativas al contacto de alimentos. Para información más detallada pueden dirigirse a nuestras Delegaciones Comerciales.

ALMACENAMIENTO

El **Isplen® PP 080 G2M** debe almacenarse en ambiente seco, temperatura inferior a 60 °C y protegido de la radiación UV. El almacenamiento en condiciones no adecuadas puede iniciar procesos de degradación que influyen negativamente en la procesabilidad y en las propiedades del producto transformado.

Diciembre 2001

Esta publicación se da solamente a título orientativo. En cada caso el transformador será responsable de las condiciones de transformación, del uso final del producto y deberá tener en cuenta la posible existencia de patentes y derechos de la propiedad industrial.

Oficinas centrales:
 P.º de la Castellana, 280
 28046 Madrid
 España
www.repsol-ypf.com/quimica

Servicio de atención al cliente:
 España Tel. 901 11 63 91
 Fax +34 91 348 8991
 Portugal: Tel. 800 55 55 11
 Fax +34 91 348 89 91
 América del Sur: Tel. +54 11 4329 20 49
 Fax +54-114-329-50-31

E-mail
sac.quimica@repsol-ypf.com
sac.portugal@repsol-ypf.com
sac.americasur@repsol-ypf.com

Laboratorios de asistencia técnica y desarrollo:
 Tel. +34 91 348 8600
atdquimica@repsol-ypf.com
 Embajadores 183
 28045 Madrid
 España