

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département de 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

**Contribution au développement des matériaux de construction à
base des sous-produits du palmier dattier**

Présentée par :

Tahar MASRI

Soutenue publiquement le 02 Juillet 2018

Devant le jury composé de :

Abdelhafid MOUMMI
Adel BENCHABANE
Hocine BENMOUSSA
Fouad KHALDI
Mabrouk HECINI
Adel CHINE

Professeur
Professeur
Professeur
Professeur
Professeur
MC (A)

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Batna 2
Université de Batna 1
Université de Biskra
Université de M'Sila

Remerciements

Je voudrais exprimer ma gratitude à Mr. Adel BENCHABANE, mon directeur de thèse, pour m'avoir confié ce travail. Je lui suis très reconnaissante pour la qualité de ses conseils et pour tout ce que j'ai appris de lui pour mon parcours de chercheur.

J'adresse ma reconnaissance à Mr. Abdelhafid Moummi, professeur à l'université de Biskra, d'avoir accepté de présider le jury de la présente thèse. Ainsi, j'adresse mes remerciements à tous les membres du jury pour avoir accepté la tâche de l'évaluation de ce travail : Messieurs Hocine Ben Moussa professeur à l'université de Batna 2, Fouad Khaldi professeur à l'université de Batna 1, Mabrouk Hecini professeur à l'université de Biskra et Adel Chine maître de conférences à université de M'sila.

Je tiens à remercier également Mr. Abdelhak Kaci, Maître de conférences à l'université de Cergy-Pontoise, pour ses aides et efforts pour la réalisation des essais de caractérisations expérimentales (essai de flexion, Conductivité thermique, Microscopie à balayage électronique MEB) durant et après mes séjours scientifiques dans le laboratoire de mécanique et matériaux du génie civil de l'université Cergy-pontoise, L2MGC.

J'exprime mes sincères remerciements aux Messieurs Lakhdar Sedira, Maître de conférences au département de génie mécanique de l'université de Biskra, et Houdayfa Ounis, Maître de recherche au centre de développement des Energies Renouvelables d'Alger, pour leurs aides, soutiens et encouragements.

Je tiens remercier Mr. Lilian Cristofol, Ingénieur au laboratoire de mécanique et matériaux du génie civil, L2MGC de l'université Cergy-pontoise, et Mr. Sadek Sedrati, technicien hall technologique de l'université de Biskra, pour l'aide durant la réalisation de la partie expérimentale de la thèse. J'adresse aussi mes remerciements au Dr. Hocine Djemai, Tarek Djoudi et tous mes collègues de travail au département de génie mécanique de l'université de Biskra, pour leurs aides et encouragements. Je n'oublie pas bien évidemment de remercier Sabri Zeid pour son aide ainsi mes amis qui m'ont toujours suivi avec intérêt et m'ont apporté leur aide.

Enfin, mes grandes grâces à toute ma famille, en particulier ma petite famille pour le soutien et l'encouragement durant la réalisation de ce travail.

المخلص.

من أجل حماية البيئة وإعطاء قيمة للموارد النباتية، أنجزت -في إطار هذه المذكرة- دراسة تجريبية لإنتاج مواد مركبة مبتكرة صديقة للبيئة. المواد المبتكرة هي مواد مركبة (خشب - بلاستيك) مكونة من نفايات النخيل. في المادة المركبة الأولى تم استخدام السعف من بقايا النخيل كمعزز و نفايات البولسترين الموسع و المذوب في البنزين كمصفوفة. تم تحضير عدة تركيبات من أحجام التعزيز (0,1-0,315 مم، 0,5-0,315 مم و 0,5-1 مم) و عدة نسب بين الألياف/المصفوفة (70، 75 ، 80 % من الوزن) لدراسة تأثير النسبة الكتلية بين التعزيز و المصفوفة وحجم التعزيز على خصائص المادة المركبة (ألياف السعف/البولسترين). في هذه الدراسة، تم إجراء تجارب فيزيائية وميكانيكية وحرارية ومورفولوجية لتحديد الكتلة الحجمية الظاهرية ومعامل الانحناء والإجهاد الأقصى والناقلية الحرارية للمادة المركبة الأولى (LPC). لذلك، تم قياس الكتلة الحجمية باستخدام مقياس البيكنومتر، اختبار الأنحاء ثلاثي النقاط، وتم أيضا قياس الناقلية الحرارية بجهاز (Hotdisc). وبالإضافة إلى ذلك، تم إجراء المسح الضوئي بالمجهر الإلكتروني (SEM) لرؤية نوعية الرابطة بين الألياف/المصفوفة. أظهرت المادة المركبة الأولى (LPC) حالة التصاق جيدة بين الألياف و المصفوفة، كما أن الخصائص الميكانيكية مقبولة مع معامل الانحناء والحد الأقصى من الإجهاد تصل إلى 0,78 GPa و 2,84 MPa، على التوالي. أيضا، LPC لديه كثافة بين 542 و 824 كغ/م³، وهو مشابه للمواد الأخرى كالخشب الصلب واللين، MDF وغيرها من المواد المركبة المكونة من الخشب و البلاستيك. وأظهرت تجربة الناقلية الحرارية أيضا أن متوسط الناقلية الحرارية لمادة LPC يتراوح بين 0,11 و 0,16 W/m.K. المادة المركبة الثانية (CPNDE)، التعزيز فيها عبارة عن جسيمات ذات الحجم 0,2-0,4 مم ناتجة عن طحن بقايا التمر (النواة) ممزوج بمصفوفة من نوع الأيبوكسي. تم دراسة تأثير النسبة الكتلية بين التعزيز و المصفوفة على الخصائص الميكانيكية باتخاذ عدة نسب بين 0% و 40%. تم تحديد الخصائص الميكانيكية للمصفوفة و المادة المركبة الثانية باستخدام تجريبي الشد والانحناء ثلاثي النقاط. أجريت دراسة مقارنة للنتائج المتحصل عليها مع نتائج لمواد مركبة مشابهة. تجربة الشد التي أجريت على عينات من مادة الأيبوكسي تظهر قيمة متوسط معاملي يونغ و بواسون 322,22 MPa و 0,4 على التوالي. المادة المركبة فقط المكونة من نسب كتلية ضعيفة من التعزيز (من 0 الى 20%) تظهر تشوهات كبيرة في تجربة الانحناء. في حالة ما إذا كانت نسبة التعزيز أكبر أو تساوي 30%، أظهرت النتائج تحسن في كل من معامل الانحناء ومقاومة المادة المركبة للانحناء. انطلاقا من هذه النسبة من التعزيز، المادة المركبة CPNDE تصبح أكثر فأكثر هشاشة. مع تعزيز بنسبة 40%، معامل الانحناء يزيد بنسبة تصل 22 % مقارنة مع معامل الانحناء المادة المكونة فقط من الأيبوكسي. المادة المركبة الأولى LPC يمكن استعمالها في ميدان المنشآت البنائية كعازل حراري و كذلك كعنصر في هياكل مواد البناء الإنشائية. بالإضافة إلى ذلك، المادة المركبة الأولى LPC يمكن إعادة تدويرها بالكامل في نهاية عمرها الإنتاجي. وقد أظهرت المادة المركبة 'CPND' أن مصفوفة الأيبوكسي المستخدمة هو خيار جيد لأنه يسمح بالزيادة في الخواص الميكانيكية مقارنة مع خصائص مواد مركبة مماثلة موجودة في المراجع. إن استخدام بقايا نخيل التمر كتعزيز في المواد المركبة يمكن اعتباره تعزيرا طبيعيا جيدا.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة، بقايا النخيل، البولسترين الموسع، التوصيف التجريبي، الخواص الميكانيكية، الناقلية الحرارية، إعادة التدوير، مواد منخفضة التكلفة.

Abstract.

In order to protect the environment and enhance plant resources, an experimental study on innovative wood-plastic composite materials (WPC) based on date palm waste is realized. In a first place, Date palm leaflet waste is used as reinforcement and expanded polystyrene waste (EPS) dissolved in gasoline is used as a matrix. Several combinations of reinforcement sizes (0.1-0.315 mm, 0.315-0.5 mm and 0.5-1 mm) and fiber/matrix ratio (70, 75 and 80% by weight) were considered to study the properties of the Leaflet-Polystyrene composite (Leaflet Polystyrene Composite, LPC). In this study, physical, mechanical, thermal and morphological characterizations were carried out to determine the apparent density, the flexural modulus, the maximum stress and the thermal conductivity of the LPC material. Therefore, a density measurement with pycnometer, three-point bending test were performed and a thermal conductivity measurement by the Hotdisc were used. In addition, SEM characterization was performed to observe the fiber/matrix interface. LPC showed a good adhesion state of the fiber/matrix interface and acceptable mechanical properties with a flexural modulus and a maximum stress of up to 0.78 GPa and 2.84 MPa, respectively. LPC has a density between 542 and 824 kg/m³, which is comparable to that of the usual materials such as hard and soft wood, MDF and other WPCs found in the literature. The thermal characterization tests of the LPC also showed an average thermal conductivity of between 0.11 and 0.16 W/m.K.

In the second place, a second composite based on particle and an epoxy resin is prepared. The particle reinforcement is obtained from date pits with size of the reinforcement is 0.2-0.4 mm (CPNDE). The effect of the weight ratio between the reinforcement and the matrix on the mechanical properties is studied using five mass fractions between 0% and 40%. The mechanical properties of the matrix and composites were determined using three-point bending test and tensile test. A comparison study is presented between the results obtained and those available in the literature on a similar composite. The tensile test performed on pure epoxy samples, show a mean value of Young's modulus and Poisson's ratio of 322.62 MPa and 0.4 respectively. The pure resin and the composite material of low mass fraction in reinforcement (0, 10 and 20%) have a large bending deformation. For the quantity of reinforcement greater than or equal to 30%, the results showed improved flexural modulus and flexural strength. From this level of reinforcement, the composite material becomes more and more fragile. With 40% reinforcement, the flexural modulus increases by almost 44% compared to the bending modulus of pure epoxy material.

The LPC material can be used in the field of building construction as a good thermal insulation as well as a structural component in sandwich structures. In addition, the LPC material is obtained from waste and can be fully recycled at the end of its useful life. The CPND material has shown that the epoxy matrix used is a good choice because it allows the increase in mechanical properties compared to the properties of similar materials in the literature. The use of date palm waste as reinforcement in composites can be a good competitive to other natural reinforcement.

Keywords: Composite material, Date palm waste, Expanded polystyrene, Experimental characterization, Mechanical properties, Thermal conductivity, Recycling, Low-cost material.

Résumé.

Dans un but de protéger l'environnement et de valoriser les ressources végétales, une étude expérimentale de mise en œuvre et de caractérisation de matériaux innovants est réalisée dans le cadre de la présente thèse. Les matériaux élaborés sont des matériaux composites bois-plastique (WPC) à base de déchets de palmier dattier. Dans le premier composite, Les déchets de feuillets de palmier dattier sont utilisés comme renfort et les déchets de polystyrène expansé (EPS) dissolu dans l'essence sont utilisés comme matrice. Plusieurs combinaisons de tailles de renforcement (0,1-0,315 mm, 0,315-0,5 mm et 0,5-1 mm) et de rapport fibre/matrice (70, 75 et 80% en poids) ont été considérées pour étudier les propriétés du composite Feuilles-Polystyrène (LPC). Dans cette étude, des caractérisations physiques, mécaniques, thermiques et morphologiques ont été réalisées afin de déterminer : la densité apparente, le module de flexion, la contrainte maximale et la conductivité thermique du LPC. Des mesures de densité avec pycnomètre, essais de flexion trois points et des mesures de conductivité thermique par l'appareil Hotdisc ont été effectués. De plus, une caractérisation par MEB a été réalisée pour observer la liaison fibres/matrice. Le LPC a montré un bon état d'adhérence de l'interface fibre/matrice et des propriétés mécaniques acceptables avec un module de flexion et une contrainte maximale pouvant atteindre 0,78 GPa et 2,84 MPa, respectivement. Le LPC a une densité comprise entre 542 et 824 kg/m³, qui est comparable à celle des matériaux habituels tels que le bois dur et mou, le MDF et les autres WPC trouvés dans la littérature. Les essais de caractérisation thermique du LPC ont également montré une conductivité thermique moyenne comprise entre 0,11 et 0,16 W/m.K. Le deuxième composite est préparé à base de particules et une résine époxy. Le renfort de particules est obtenu à partir des noyaux de dattes avec un renfort de taille 0,2-0,4 mm (Particules de Noyaux de Dattes et d'une résine Epoxy, CPNDE). L'effet de la fraction massique entre le renfort et la matrice sur les propriétés mécaniques est étudié en utilisant cinq fractions massiques comprises entre 0% et 40%. Les propriétés mécaniques de la matrice et des composites ont été déterminés à l'aide des essais de traction et de flexion en trois points. Une étude de comparaison est présentée entre les résultats obtenus et ceux disponibles dans la littérature sur un composite similaire. L'essai de traction effectué sur des échantillons pure époxy, montrent une valeur moyenne du module de Young et du coefficient de Poisson de 322,62 MPa et 0,4 respectivement. La résine pure et le matériau composite de faible fraction massique en renfort (0, 10 et 20%) présentent une grande déformation en flexion. Pour une quantité de renfort supérieure ou égale à 30%, les résultats ont montré un module de flexion et une résistance à la flexion améliorés. A partir de ce niveau de renforcement, le matériau composite devient de plus en plus fragile. Avec 40% de renforcement, le module de flexion augmente de près de 44% par rapport au module de flexion du matériau pure époxy. Le matériau LPC peut être utilisé dans le domaine de la construction de bâtiments pour l'isolation thermique ainsi qu'un composant structurel dans les structures sandwich. De plus, le matériau LPC est obtenu à partir de déchets et peut être totalement recyclé à la fin de sa vie utile. Le matériau CPND a montré que la matrice époxy utilisée est un bon choix car elle permet l'augmentation des propriétés mécaniques par rapport aux propriétés des matériaux similaires de la littérature. L'utilisation des déchets de palmiers dattiers comme renfort dans les composites peuvent être considéré comme un bon renfort naturelles.

Mots-clés: Matériau composite, Déchets de palmier dattier, Polystyrène expansé, Caractérisation expérimentale, Propriétés mécanique, Conductivité thermique, Recyclage, Matériau à faible coût.

Sommaire

Remerciements	i
.الملخص	ii
Abstract	iii
Résumé	iv
Sommaire	v
Listes des figures	ix
Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art sur les fibres naturelles et les bio-composites	6
1 Classifications des fibres naturelles.....	6
1.1 Fibres végétales ou ligno-cellulosiques.....	8
1.2 Fibres Animales.....	8
1.3 Fibres minérales.....	9
2 Classifications des fibres végétales ligno-cellulosiques.....	9
2.1 Fibres de plantes (non-bois).....	10
2.1.1 Fibres libériennes.....	10
2.1.2 Feuilles de fibres.....	12
2.1.3 Fibres de grains et de fruits.....	12
2.1.4 Fibres de pailles.....	14
2.1.5 Fibres d'herbe.....	14
2.2 Fibres de Bois.....	14
3 Caractéristiques d'une fibre végétale ou matériau ligno-cellulosique.....	15
3.1 Structure générale d'une fibre végétale.....	15
3.1.1 Description.....	15
3.2 Composition chimique d'une fibre végétale.....	17
3.2.1 Cellulose.....	18
3.2.2 Hémicellulose.....	18
3.2.3 Lignine.....	19
3.2.4 Pectine.....	20
3.2.5 Extractives et matières étrangères.....	20
4 Propriétés des fibres ligno-cellulosiques.....	21
4.1 Propriétés mécaniques.....	22
4.2 Propriétés physiques.....	23
4.2.1 La densité.....	24

4.2.2	Propriétés d'humidité.....	25
4.2.3	Angle microfibrillaire	26
4.2.4	Défauts.....	27
5	Avantages et inconvénients des fibres végétales	28
5.1	Avantages.....	28
5.2	Inconvénients.....	29
6	Domaine d'application des fibres végétales	29
7	Composites basés sur des renforts végétales	31
7.1	Matrices utilisées dans la fabrication des composites	31
7.1.1	Résines thermodurcissables	31
7.1.2	Les résine thermoplastiques.....	33
7.2	Composites à base de fibres végétales.....	34
7.2.1	Fibres végétales utilisées dans la fabrication des composites	35
7.2.2	Propriétés mécaniques des composites à fibres végétales.....	36
7.3	Composites à base de particules végétales	42
8	Conclusion	44
Chapitre II : Etat de l'art sur les composites à base de déchets de palmier dattier		47
1	Palmier dattier.....	47
1.1	Variétés des dattes	48
1.2	Description	49
1.2.1	Le tronc du palmier dattier.....	50
1.2.2	Le pétiole	50
1.2.3	Le fibrillum.....	51
1.2.4	Les feuilles où palmes.....	51
1.2.5	Organes reproducteurs.....	53
1.3	Le palmier dattier en Algérie	55
1.4	Déchets du palmier dattier	55
1.5	Utilisation des déchets de palmier dattier	58
1.5.1	Utilisation traditionnel.....	58
1.5.2	Utilisation actuelle.....	59
2	Fibres de palmiers dattiers.....	60
2.1	Introduction	60
2.2	Morphologie de fibre de palmier dattier	61
2.3	Composition chimique	65
2.4	Propriétés physiques et mécaniques	67
2.4.1	Propriétés physiques	67

2.4.2	Propriétés mécaniques	71
2.4.3	Propriétés thermiques.....	74
3	Matériau composite à base des déchets industrielle et naturelle	76
4	Conclusion	78
Chapitre III : Matériaux et méthodes expérimentales		82
1	Matériaux composite à base des déchets de palmier dattiers et de polystyrène expansé (LPC)82	
1.1	Le renfort	82
1.2	Matrice à base de déchets de polystyrène expansé.....	83
1.3	Protocole d'élaboration du matériau LPC	84
1.3.1	Préparations des moules	84
1.3.2	Préparation des éprouvettes.....	84
1.4	Effet de la lignine sur les propriétés mécaniques du LPC.....	86
2	Matériaux à base de déchets de noyaux de dattes et d'une résine Epoxy (CPNDE)	86
2.1	Le renfort	86
2.2	La matrice époxy	87
2.3	Protocole d'élaboration du matériau CPNDE	88
2.3.1	Matériau 100% résine	88
2.3.2	Matériau à base de Particules de Noyaux de Dattes et d'une résine Epoxy (CPNDE)89	
3	Méthodes de caractérisation expérimentale.....	90
3.1	Matériau LPC.....	90
3.1.1	Masse volumique.....	90
3.1.2	Essais de flexion trois points.....	91
3.1.3	Conductivité thermique.....	93
3.1.4	Microscopie électronique à balayage (MEB).....	94
3.2	Matériau CPNDE	94
3.2.1	Essais de traction	94
3.2.2	Essai de flexion trois points	96
4	Conclusion	96
Chapitre IV : Caractérisation expérimentale des composites à base de déchets de palmier dattier		99
1	Matériau LPC.....	99
1.1	Densité	99
1.2	Propriétés en flexion trois points du matériau LPC.....	99
1.3	Conductivité thermique du matériau LPC.	102
1.4	Récapitulation.	102

1.5	Caractérisation par microscopie électronique à balayage (MEB)	105
1.6	Effet de la lignine sur les propriétés mécaniques du LPC.....	107
2	Matériau CPNDE.....	108
2.1	Propriétés de traction du matériau pure résine	108
2.2	Propriétés de flexion du matériau	110
2.2.1	Module de flexion.....	111
2.2.2	Contrainte maximale	112
3	Conclusion	112
	Conclusion générale.....	116
	Références bibliographiques	119
	Annexes.....	128

Listes des figures

Figure I. 1: Classification des fibres naturelles (Campilho 2015).....	7
Figure I. 2 : Classification des fibres végétales (Biagiotti et al. 2004).....	10
Figure I. 3: Fibres de fruits de Coir (Bongarde and Shinde 2014).	13
Figure I. 4: Schématisation de la structure fine d'une fibre ligno-cellulosique (Azwa et al. 2013).	16
Figure I. 5: Disposition de fibrilles, de micro fibrilles et de cellulose dans les parois cellulaires d'une fibre végétale (Bismarck et al. 2005; Kalia et al. 2011).	16
Figure I. 6: Schématisation de la structure polymérique de la cellulose (Bismarck et al. 2005).....	18
Figure I. 7: Liaison chimique du hémicellulose (Westman et al. 2010).....	19
Figure I. 8 : Structure de la lignine (Mohanty et al. 2005).	19
Figure I. 9: Structure de pectine (Stokke et al. 2013).	20
Figure I. 10: Compositions chimiques de diverses fibres végétales (Azwa et al. 2013).	21
Figure I. 11: Angle microfibrillaire (Macdonald and Hubert 2002).....	26
Figure I. 12: Défaut des fibres végétales (Charlet 2008).....	27
Figure I. 13: Différentes formes de renforts (Michaud 2003).	31
Figure II. 1: Description des principales parties du palmier dattier (Agoudjil et al. 2011).....	49
Figure II. 2 : Le pétiole de palmier dattier.	50
Figure II. 3 : Fibrillum de palmier dattier.	51
Figure II. 4: Composition d'une palme.	52
Figure II. 5: Les spathes de palmier dattier.	53
Figure II. 6: Estimation annuel de nombre et du tonnage des déchets de palmiers dattiers en Algérie (Almi et al. 2015).....	57
Figure II. 7: Image MEB du composite original obtenu à partir de la partie pétiole (Touloum et al. 2016).	61

Figure II. 8: Images MEB d'une fibre de pétiole (variété Deglet-Nour), échelle (a) et (b) 100µm et (c) 20µm (Agoudjil et al. 2011).....	62
Figure II. 9: Micrographe d'une fibre de palmier dattier traitée (Alsaeed et al. 2013).....	62
Figure II. 10: Photographies MEB des feuilles : (a) femelle (b)male (AlMaadeed et al. 2013).	63
Figure II. 11: Fibre de palmiers dattiers traités avec différentes concentrations de NaOH (Alsaeed et al. 2013).	63
Figure II. 12: Photographie par MEB des sections de fibres de palmiers dattiers : (c) traité 0.5% NaOH femelle, (d) traité 0.5% NaOH male, (e) traité 2% NaOH femelle, (f) traité 2% NaOH male, (g) traité 5% NaOH femelle, (h) traité 5% NaOH male (AlMaadeed et al. 2013).....	64
Figure II. 13: Comparaison de la composition chimique des fibres de palmiers dattiers avec d'autres fibres ligno-cellulosiques (Almi et al. 2015).	66
Figure II. 14: Comparaison de la densité des fibres de palmier dattier avec d'autres fibres naturelle (Al-Oqla and Sapuan 2014).....	68
Figure II. 15: Comparaison entre le rapport d'aspect L/D de fibre de palmier dattier avec d'autre fibres (Al-Oqla and Sapuan 2014).	69
Figure II. 16: Comparaison des valeurs moyennes de module de Young des fibres de palmier dattier (Almi et al. 2015).....	74
Figure II. 17: Module de Young spécifique de fibres de palmiers dattier (Almi et al. 2015).	74
Figure II. 18: Analyse thermogravimétrique de fibre de palmier dattier brut, échantillon de 10 mg chauffé à 10 °C/min⁻¹ dans l'air (Al-Khanbashi et al. 2005).	75
Figure II. 19: Courbe thermogravimétrique des fibres de palmier dattier : (DPP) Pétiole, (DPT) Epines, (DPD) Pédicelles, (DPS) Spathe, (DPF) Fibrillum, (DPL) Leaflets, (DPR) Rachis et (DPB) Grappes (Almi et al. 2015).....	75
Figure III. 1: Sizes of palm leaflet reinforcement.	83
Figure III. 2: Essence, déchets de polystyrène expansé et mélange polystyrène expansé/essence.	83

Figure III. 3: Moules métalliques pour la préparation des éprouvettes : (a) Essais de flexion trois points,	84
Figure III. 4: Dimensions des éprouvettes de flexion et de conductivité thermiques.	84
Figure III. 5: (a) Plaque composite, (b) éprouvettes de flexions, (c) Eprouvette de conductivité thermique, obtenus après compression.	85
Figure III. 6: (a) Noyaux de dattes (b) Particules des noyaux de dattes d'une granulométrie de 0.2-0.4mm.	87
Figure III. 7: Moules métalliques pour la préparation des éprouvettes d'essais de flexion trois points.	88
Figure III. 8: Echantillons d'essai normalisés: (a) Eprouvette de traction, (b) éprouvettes de flexion trois points.....	89
Figure III. 9: Géométrie d'une éprouvette de traction normalisée.	89
Figure III. 10: Eprouvettes de flexion trois points du matériau CPNDE.	90
Figure III. 11: Essai de flexion trois points.	91
Figure III. 12: Essai de mesure de conductivité thermique.....	93
Figure III. 13: Essai de traction sur des éprouvettes marquées.	95
Figure III. 14: Essai de flexion : (a) Eprouvette 100% résine epoxy, (b) Matériau CPNDE.....	95
Figure IV. 1: Densité du matériau LPC.....	100
Figure IV. 2: Courbes types contrainte/déformation des essais de flexion du matériau LPC.	100
Figure IV. 3: Effet de la tailles du renfort et la proportion massique matrice/renfort sur: (a) le module de flexion et (b) la contrainte maximale.	101
Figure IV. 4: Visualisation par MEB d'échantillons LPC avec différentes tailles de renfort (A1, B1 et C1).	105
Figure IV. 5: Visualisation par MEB d'échantillons "A" avec 80, 75 et 70wt% de renforcement.....	106
Figure IV. 6: Visualisation par MEB de l'échantillon C1: Illustration d'une fissure dans la fibre.	106
Figure IV. 7: Courbe contrainte/déformation du matériau LPC avec la présence la lignine.	107

Figure IV. 8: Propriétés du LPC avec la présence de la lignine : (a) Module de flexion, (b) Contrainte maximale.....	108
Figure IV. 9: Courbe contrainte/déformation d'essai de traction du matériau pure résine.	108
Figure IV. 10: Courbes de déformation transversale/longitudinale d'essai de traction du matériau pure résine.....	109
Figure IV. 11: Courbe contrainte/déformation de tous les cas étudiés.....	110
Figure IV. 12: Modules de flexion des cas étudiés.	111
Figure IV. 13: Contrainte maximale de flexion des cas étudiés.	112

Tableau I. 1 : Les six types des fibres végétales.	11
Tableau I. 2 : Composition chimique des fibres ligno-cellulosiques.	17
Tableau I. 3 : Propriétés physiques et mécanique des fibres végétales et synthétiques (Monteiro et al. 2011).	22
Tableau I. 4: Propriétés mécaniques et physiques de différentes fibres ligno-cellulosiques (Campilho 2015).	24
Tableau I. 5: Teneur en eau à l'équilibre de différentes fibres végétales (Pickering 2008).	25
Tableau I. 6: Angle microfibrillaire des fibres végétales (Charlet 2008).	27
Tableau I. 7: Propriétés des résines thermodurcissables (Holbery and Houston 2006).	32
Tableau I. 8: Propriétés des résines thermoplastiques (Holbery and Houston 2006).	34
Tableau I. 9: Différents types et propriétés des fibres végétales utilisées (Fuqua et al. 2012).	36
Tableau I. 10: Fibre/matrice utilisés dans la fabrication des composites à base des fibres végétales (Saheb and Jog 1999).	37
Tableau I. 11: Propriétés mécanique des composites à base des fibres végétales (Saheb and Jog 1999).	38
Tableau I. 12: Comparaison entre les propriétés des composites fibre de verre/polyester et fibre végétale/Polyester (Holbery and Houston 2006).	40
Tableau I. 13: Application des composites à renfort végétales dans le domaine d'automobile (Holbery and Houston 2006).	41
Tableau II. 1: Caractéristiques des dattes.	54
Tableau II. 2: Estimation annuel du déchet de palmier dattier à Biskra (Algérie) (Meradi et al. 2016).	57
Tableau II. 3: Composition chimique de différences types de fibres de palmiers dattiers.	65
Tableau II. 4: Composition chimique de différences types de fibres ligno-cellulosiques	66
Tableau II. 5: Propriétés physiques des fibres de palmier dattier (Almi et al. 2015)	69
Tableau II. 6: Propriétés mécaniques des fibres de palmier dattier et d'autres fibres naturelles (AL-Oqla et al. 2014).	72

Tableau II. 7: Valeurs moyennes des propriétés mécaniques des fibres de palmiers dattier (Al-Khanbashi et al. 2005).....	72
Tableau II. 8: Propriétés mécaniques des huit types de fibres de palmier dattier (Almi et al. 2015). ...	73
Tableau III. 1: Divers échantillons testés.....	85
Tableau III. 2: Composition du matériau LPC avec la présence de la lignine.	86
Tableau III. 3: Dimensions normalisées de l'éprouvette de traction.....	89
Tableau III. 4: Différents échantillons étudiés.....	90
Tableau IV. 1: Propriétés mécaniques, physiques et thermiques du LPC et des matériaux similaires.	103
Tableau IV. 2: Propriétés mécaniques de la matrice époxy.....	109
Tableau IV. 3: Propriétés mécanique des matériaux.	110

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur du bâtiment, l'un des plus dynamiques en termes de consommation d'énergie, consomme environ 40% de l'énergie mondiale. Ce même secteur est également responsables d'environ 1/3 des émissions de gaz à effet de serre de la planète entière (Asdrubali et al. 2015). Les dernières décennies ont vu une augmentation considérable de l'utilisation des matériaux composites dans pratiquement tous les domaines notamment dans les constructions en génie civil. Cette augmentation est le résultat direct des performances remarquables offertes par ces types de matériaux (Kaw 2005).

La fabrication de structures composites ainsi que les constituants du composite lui-même doit répondre aux exigences imposées par beaucoup de défis notamment de nature environnementale (Zhang et al. 2005; Ljungberg 2007; Cheung et al. 2009). Pour cette raison, l'architecture durable devrait rechercher des matériaux de construction soumis au moindre nombre de manipulations technologiques, éventuellement d'origine renouvelable ou entièrement recyclables ou réutilisables en fin de vie, et produits sur place ou à proximité pour éviter les longues distances du transport (Melià et al. 2014). Actuellement, l'une des solutions alternatives proposées par la recherche est le recours aux ressources naturelles comme constituant dans les matériaux composites (Cheung et al. 2009). L'utilisation des ressources naturelles dans la formulation des matériaux n'est pas un concept nouveau; nos ancêtres ont utilisé de la paille pour renforcer les briques faites de boue pour la construction de maisons (Herakovich 2012). Aujourd'hui, le choix des ressources naturelles est inévitable et cela est principalement dû au faible coût, au caractère renouvelable, à la bonne biodégradabilité et aux propriétés thermiques et mécaniques importantes ajoutées au produit final (Mitra et al. 1998).

L'une des ressources renouvelables les plus sollicitées dans la formulation d'élaboration de matériaux composites, de nos jours, provient de sources végétales (Cheung et al. 2009), obtenue à partir des déchets solides générés par l'activité de production agricole et industrielle (Madurwar et al. 2013). En effet, les dernières années ont vu une augmentation spectaculaire de l'utilisation des déchets agricoles issus des fibres naturelles telles que les feuilles de lin, jute, chanvre, ananas, sisal et palme pour fabriquer des nouveaux types de composites respectueux à l'environnement (Cheung et al. 2009; Almi et al. 2015; Korjenic et al. 2016). Le bois peut être utilisé comme un agent de renforcement avec différentes formes et dimensions pour augmenter la résistance, la rigidité et diminuer le coût de la matière première dans certains

domaines comme les matériaux thermoplastiques et thermodurcissables (Bogoeva-Gaceva et al. 2007; Xie et al. 2010).

Dans les années 1970, un nouveau concept connu sous le nom de Wood-Plastic Composites (WPC) a vu le jour. Les WPCs ont des propriétés mécaniques et physiques proches de celles du bois massif (Ashori 2008). Le terme WPC désigne tous les composites qui contiennent des renforcements d'origine végétale (fibres de bois et non-bois) et des matrices thermodurcissables ou thermoplastiques (Lomelí-Ramírez et al. 2009; Nourbakhsh and Ashori 2010). Diverses recherches ont été menées dans ce domaine afin d'extraire du bois et des matières plastiques recyclables du site d'enfouissement dans des applications utiles (Faruk and Matuana 2008; Binhussain and El-Tonsy 2013; Félix et al. 2013; Najafi 2013; Nörnberg et al. 2014; Turku and Kärki 2014).

Le polystyrène et le polystyrène expansé (PS/EPS), représente 72% de la demande en matière plastique: emballage, construction, automobile et équipements électriques et électroniques (Nkwachukwu et al. 2013). Dans tous les pays du monde, le polystyrène expansé est couramment utilisé pour l'isolation et les matériaux d'emballage (Poletto et al. 2011). L'utilisation de polystyrène expansé génère des quantités importantes de déchets non biodégradables qui finissent généralement dans les décharges ou sont incinérés, ce qui provoque de graves problèmes environnementaux (Poletto et al. 2011; Agoua et al. 2013).

Le recyclage des déchets issus du bois industriel ou forestier et du polystyrène expansé des emballages pour produire d'autres matériaux composites apparaît comme une alternative environnementale et économique (Agoua et al. 2013). Une des solutions proposées est l'inclusion des déchets de polystyrène dans le béton et le mortier (Ravindrarajah and Tuck 1994; Chen and Liu 2007; Sarbu et al. 2009; Bhutta et al. 2011; Ayse and Filiz 2016). Une autre solution proposée dans la littérature est le renforcement du polystyrène par les déchets végétales sous formes des fibres de bois ou des fibres cellulosiques pour obtenir un composite innovant ayant des propriétés similaires aux matériaux classiques (Maldas et al. 1989; Nair et al. 1996; Agoua et al. 2013).

L'Algérie (au nord de l'Afrique) a une grande ressource collectée à partir des déchets agricoles de palmier dattier (*Phoenix Dactylifera L.*) (Almi et al. 2015; Touloum et al. 2016). Chaque année, quatorze nouvelles feuilles et huit grappes par palmier peuvent en moyenne être conservées (Agoudjil et al. 2011). Agoudjil et al. (Agoudjil et al. 2011) ont rapporté que certains

agriculteurs utilisent partiellement ce bois de palmier, mais la plus grande partie de la matière est jetée comme déchet. En effet, le développement de matériaux composites renforcés à partir de ce type de déchets peut être une excellente solution d'un point de vue environnemental. Il a été rapporté que l'utilisation de fibres de palmier dattier avec différents types de polymères peut améliorer les caractéristiques des composites comme la résistance à la traction, le module d'Young, la résistance à la flexion et le module de flexion, les propriétés thermiques et acoustiques (AL-Oqla et al. 2014).

Dans ces contextes, environnemental, économique et innovation, le présent travail a comme objectif la mise en œuvre et la caractérisation de nouveaux matériaux composites destinés à la construction en génie civil et en mécanique. Les matériaux développés sont à base de déchets végétales (de palmier dattier) et de déchets industrielles de polystyrène expansé. Le manuscrit de la thèse est organisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre est une recherche bibliographique sur les composites à base de fibres naturelles et les composites à base de particules naturelles. La première partie de ce chapitre expose une synthèse bibliographique sur les fibres naturelles, notamment les fibres végétales et leurs caractéristiques, compositions chimiques et propriétés physiques et mécaniques. Ensuite, une synthèse bibliographique est présentée sur les propriétés des composites à base de renfort végétales (ligno-cellulosique) avec la considération de deux types de matrices thermodurcissable et thermoplastique.

Le deuxième chapitre est consacré aux déchets de palmiers dattier et les composites à base de ces déchets. Ce chapitre présente une description des palmiers dattiers en Algérie, des déchets générés par cette plante ainsi qu'aux applications (traditionnelle et actuelles) utilisant ces déchets. Ainsi, une synthèse bibliographique est conduite sur l'importance des propriétés morphologiques, physiques, mécaniques de renfort à base de palmiers dattier utilisé dans l'obtention des composites. Une comparaison de ces propriétés avec les propriétés d'autres fibres végétales de la littérature est également présentée.

Le troisième chapitre décrit la partie matériaux et méthodes expérimentales de la présente thèse. D'abord, une partie décrivant les types de renforts et de matrices utilisés est présentée en montrant les détails de la mise en œuvre des composites, des méthodes et des conditions de préparations des échantillons. Ensuite, les différents essais de caractérisations effectués pour chaque matériau composite sont présentés. Le premier matériau, à base des déchets de

palmier dattier et de polystyrène, est caractérisé par des mesures de la densité, des essais de flexion trois points, de conductivité thermique et de caractérisation morphologique par MEB. Pour le deuxième matériau, à base de particules de noyaux des dattes, on a présenté une caractérisation mécanique, notamment par flexion trois points, de la résine époxy utilisée et du composites élaborés à base de cette matrice et des particules de noyaux de dattes.

Le dernier chapitre est consacré à la partie résultats et discussion de la caractérisation expérimentale des composites à base de déchets de palmier dattier. Pour le matériau à base de feuillets de palmier dattier, la densité, le module et la résistance à flexion, la conductivité thermique ainsi la morphologie du matériau sont présentés et discutés. De même pour le deuxième matériau, à base de particule de noyaux de dattes, où on a discuté le module de Young, la résistance à la rupture, le coefficient de Poisson, le module de flexion de la matrice ainsi le module de flexion, la contrainte maximale du composite. De plus, une étude de l'influence des paramètres, taille du renfort et la fraction massique entre le renfort et la matrice sur les propriétés des composites est effectuée. Les propriétés des composites obtenues sont comparées avec des propriétés de d'autres matériaux conventionnelles et similaires obtenus de la littérature.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale synthétisant les résultats obtenus en proposant des perspectives relatives à l'étude réalisée.

Chapitre I

**Etat de l'art sur les fibres
naturelles et les bio-composites.**

Chapitre I : Etat de l'art sur les fibres naturelles et les bio-composites

Les contraintes écologiques des dernières décennies ont conduit la communauté scientifique à rechercher des nouvelles alternatives pouvant remplacer les composites classiques par des matériaux composite à faible impact environnemental (Ramamoorthy et al. 2015). Cela a suscité un intérêt croissant pour les matériaux naturels qui pourraient être utilisés comme renforts, ou charges, dans la formulation des composites (Bolton 1994). Ces composites à renfort naturelles sont appelés aussi «éco-composites» (Ramamoorthy et al. 2015). De plus, leur disponibilité, renouvelabilité, faible densité et prix, les propriétés mécaniques de ces composites sont souvent satisfaisantes en devenant une alternative écologique aux fibres de verre, de carbone et aux fibres artificielles utilisées pour la fabrication des composites (Chandramohan and Marimuthu 2011).

Dans la nature, il existe une large gamme de fibres naturelles qui peuvent être distinguées par leur origine : fibres animales, fibres minérales et fibres végétales (Célino et al. 2013).. Les fibres végétales peuvent également être classées et leurs composition chimiques varient selon l'emplacement des fibres dans la plante (Célino et al. 2013).

Ce chapitre présente une recherche bibliographique sur les composites à base de fibres et à base de particules naturelles. Une partie entière est réservée à la synthèse bibliographique des fibres naturelles, notamment les fibres végétales et leurs caractéristiques, compositions chimiques et propriétés physiques et mécaniques. Ainsi, une synthèse bibliographique sur les propriétés des composites à base de renfort végétales (ligno-cellulosique) est également présentée en considérant deux types de renfort, fibreux et particulaires, et deux types de matrices, thermodurcissable et thermoplastique.

1 Classifications des fibres naturelles

La fibre est un objet allongé avec un rapport longueur/diamètre (L/D) supérieur à un. Bien que le terme « fibre » a beaucoup d'utilisation, on peut considérer les fibres naturelles comme des matières fibreuses qui sont extraites de l'environnement.

Ainsi, les matières fibreuses produites à partir des produits pétrochimiques et du carbone sont évidemment fabriquées à partir de matériaux trouvés dans l'environnement, mais comme les matières premières ne sont pas des fibres dans leur état natal et ne sont pas extraites directement d'organismes vivants, elles ne sont pas considérées comme des fibres naturelles (Stokke et al. 2013). Les fibres naturelles peuvent être traitées à la main, des outils simples ou des procédés industriels sophistiqués pour les rendre utiles dans un certain but, mais elles se distinguent nettement des fibres fabriquées qui sont synthétisées.

Il existe de nombreuses façons de classer les fibres naturelles. Certains auteurs classifient les fibres par rapport à leurs utilisations industrielles, d'autres utilisent des systèmes tels que les fibres dures et molles, les fibres longues et courtes, la teneur en cellulose, animale, végétale, minérale, etc. (Pickering 2008). D'autres auteurs classent les fibres végétales en fonction de leur utilité, telles que primaire et secondaire. Les fibres primaires comprennent le chanvre, le jute, le kenaf, etc., tandis que les sous-produits de plantes comme le coco, l'ananas, etc., sont du groupe secondaire. Les plantes primaires sont cultivées pour leurs fibres tandis que les plantes secondaires sont des plantes où les fibres sont extraites du produit de déchet (Nguong et al. 2013). Les fibres naturelles peuvent également être classées selon leur origine; fibres animales, fibres végétales et fibres minérales (Figure I.1) (Wallenberger and Weston 2003; Magniont 2010; Kalia et al. 2011; Campilho 2015; Ramamoorthy et al. 2015).

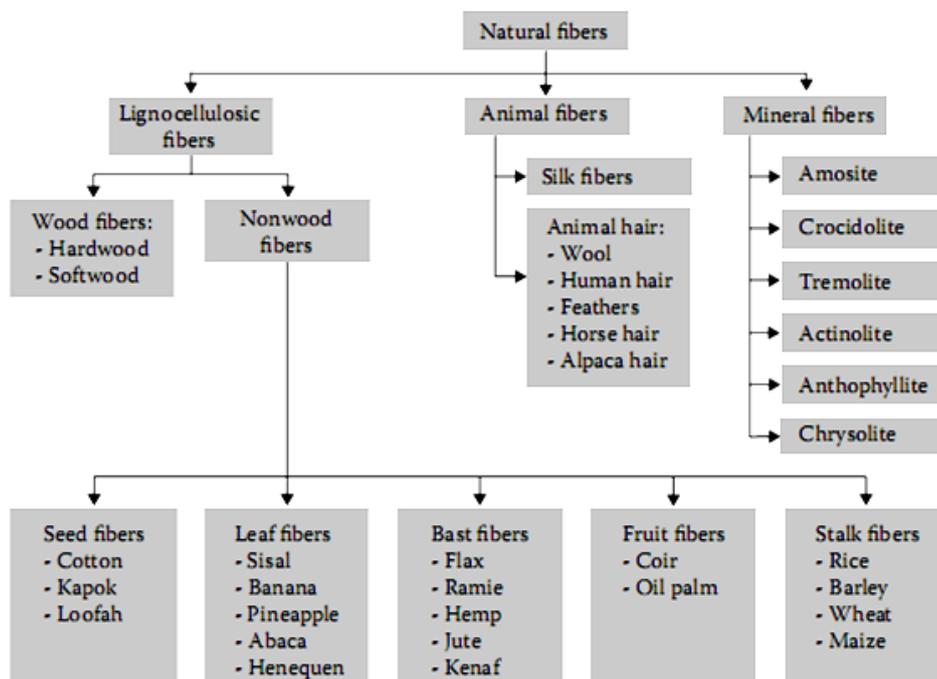


Figure I. 1: Classification des fibres naturelles (Campilho 2015).

1.1 Fibres végétales ou ligno-cellulosiques

Les fibres végétales sont généralement constituées principalement de cellulose: par exemple, le coton, le jute, le lin, la ramie, le sisal et le chanvre. Une très grande variété de fibres végétales "ligno-cellulosiques" existe dans la nature, parmi lesquelles les fibres ligno-cellulosiques du bois qui sont les plus utilisées au niveau mondial, spécialement à cause de leur utilisation dans la fabrication des pâtes à papiers, tissu, dans les industries du mobilier et la construction, et aussi comme combustible (Chandramohan and Marimuthu 2011; Sbiai 2011).

La plupart des études portent sur les fibres végétales et en particulier sur les fibres libériennes (flax, chanvre, jute et kenaf). Ce choix est dicté par leur bonne propriété mécanique et par la possibilité de séparer facilement les fibres de la plante. Contrairement aux fibres synthétiques, les fibres végétales présentent une plus grande variabilité de leurs propriétés mécaniques en raison de l'âge des plantes, des conditions de croissance géographique et climatique, des méthodes de récolte, de la technologie de purification, etc. Cette variabilité pose des inconvénients pour certaines applications industrielles. Un autre inconvénient potentiel des fibres végétales est leur tendance à absorber l'eau (teneur en humidité comprise entre 5 et 10% en poids) en raison de la teneur élevée en hydroxyle de la cellulose. Par contre, leurs disponibilités en grandes quantités au prix bas, leurs bonnes propriétés mécaniques et un certain nombre de protocoles de traitement bien évalués, réussissent les fibres végétales d'être appliquées dans les matériaux composites polymériques (Zini and Scandola 2011).

1.2 Fibres Animales

Les fibres animales telles que la soie, la laine, les cheveux, les plumes, etc., sont la deuxième source la plus importante de fibres naturelles après les fibres végétales pour le renforcement des composites. C'est aussi la deuxième source naturelle en termes de disponibilité. (Ramamoorthy et al. 2015). Généralement, les fibres animales sont plus coûteuses que les fibres végétales et la disponibilité est inférieure aux fibres végétales qui les rendent coûteuses pour certaines applications. Ces fibres pourraient être utilisées dans des applications plus sophistiquées telles que les applications biomédicales. La soie et la laine sont utilisées dans les industries textiles à de nombreuses fins. Ces fibres sont coûteuses pour les utiliser comme renfort dans les composites même si la composition chimique et les propriétés mécaniques et thermiques de ces fibres sont cruciales pour être utilisées comme renforcement (Ramamoorthy et al. 2015).

1.3 Fibres minérales

Les fibres minérales sont des fibres naturelles ou des fibres légèrement modifiées obtenues à partir de minéraux. Ceux-ci peuvent être classés dans les catégories suivantes (Chandramohan and Marimuthu 2011) : (i) Amiante : la seule fibre minérale naturelle. Les variétés sont le serpentinite (chrysotile) et les amphiboles (amosite, crocidolite, tremolite, actinolite et anthophyllite) ; (ii) Fibres céramiques : fibres de verre (laine de verre et quartz), oxyde d'aluminium, carbure de silicium et carbure de bore ; (iii) Fibres métalliques : Fibres d'aluminium.

2 Classifications des fibres végétales ligno-cellulosiques

Les plantes fibreuses ligno-cellulosiques peuvent être classées dans un premier classement selon leur utilisation dans un groupe de plantes alimentaires cultivées uniquement pour la production de fibres. Le deuxième classement contient des plantes cultivées pour d'autres produits, par exemple, les fruits, la production de noix de coco. Un troisième classement indique que la plupart des fibres importantes sont obtenues non seulement à partir de plantes cultivées dans l'agriculture, comme le lin, le chanvre ou le ramie, mais aussi des plantes sauvages, comme l'ortie (Kalia et al. 2011).

Un autre système de classification géographique couvre les informations relatives à la localisation principale de la culture des plantes fibreuses. La production de fibre de lin est principalement cultivée en France, en Belgique, aux Pays-Bas, en Europe de l'Est, en Chine et en Egypte. De petites quantités sont cultivées dans d'autres pays, par exemple, le Brésil et le Chili. Le chanvre est cultivé principalement en Europe, au Canada et en Chine. Kenaf est cultivé pour sa fibre en Inde, en Chine, au Bangladesh, aux États-Unis d'Amérique, en Indonésie, en Malaisie, en Afrique du Sud, au Vietnam, en Thaïlande, dans certaines parties de l'Afrique et dans une petite mesure en Europe du Sud-Est. L'Inde est le plus grand pays en croissance de jute au monde. Le jute est également cultivé au Bangladesh, en Chine, au Myanmar, au Népal et en Thaïlande (Kalia et al. 2011).

Ainsi, d'autres classifications des fibres ligno-cellulosiques ont été données dans la littérature, certains auteurs divisent les fibres ligno-cellulosiques en deux catégories : fibres de bois et fibres non bois (Thiruchitrambalam et al. 2010; Campilho 2015), d'autres les considèrent comme une seule catégorie (Chandramohan and Marimuthu 2011; Kozłowski 2012; Ramamoorthy et

al. 2015). La classification la plus courante pour les fibres végétales est la classification botanique. En utilisant ce système, on propose trois types de fibres végétales, en l'occurrence fibre de grain, fibre libérienne et feuille de fibre (Bledzki et al. 2002). Thiruchitrabalam et al. (Thiruchitrabalam et al. 2010) ajoute la fibre de fruits, Campilho (Campilho 2015) ajoute la fibre de paille, Chandramohan et al. (Chandramohan and Marimuthu 2011) et Biagiotti et al. (Biagiotti et al. 2004) regroupent la fibre de grain et la fibre de fruits dans un seule type et ajoute la fibre d'herbe. Une récente classification de six types de fibres végétales est donnée par (Wallenberger and Weston 2003; Chandramohan and Marimuthu 2011; Mukherjee and Kao 2011; Sbiai 2011; Nguong et al. 2013; Ramamoorthy et al. 2015) contient : Les fibres libériennes "Bast fibers" (Lin, chanvre, jute, kenaf et ramie), les fibres de feuilles "Leaf fibers" (abaca, ananas et sisal), les fibres de graines et de fruits "seed an fruit fibers" (coco, coton et kapok), les fibres de paille "straw fibers" (maïs, riz et blé) Les fibres d'herbes "grass fibers" (Bagasse et bambou) et les fibres de bois (bois tendre et bois dur) (Figure I.2 et Tableau I.1).

2.1 Fibres de plantes (non-bois)

2.1.1 Fibres libériennes

La majorité des fibres végétales qui sont considérées comme des renforts pour les matériaux polymères sont des fibres libériennes. Ces dernières sont des fibres obtenues à partir des couches cellulaires extérieures des tiges de diverses plantes (Summerscales et al. 2010). Les

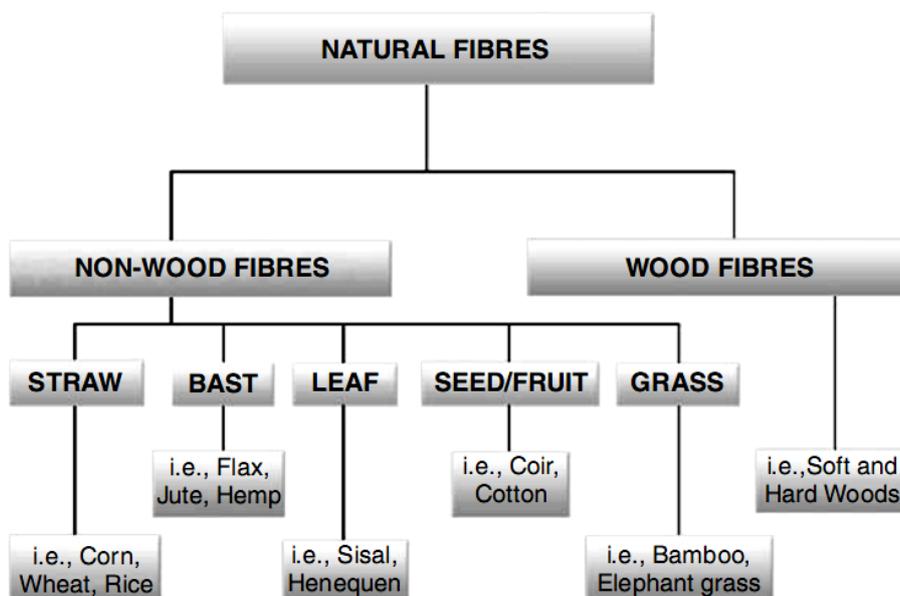


Figure I. 2 : Classification des fibres végétales (Biagiotti et al. 2004)

fibres libériennes fournissent une résistance structurale et une rigidité à la tige de la plante (Cook 1984; Pickering 2008). En général, les fibres libériennes varient en longueur mais peuvent atteindre 100 cm avec des diamètres d'environ 1 mm. Les plus petites unités de ces fibres appelées fibres ultimes certaines (lin, chanvre de ramie, kenaf et jute) sont très longues, avec un rapport longueur/diamètres de 1000 (Pickering 2008). Les faisceaux libériennes sont retirés de la matière mère par le processus de décortication (Thakur 2013).

Les parois des cellules végétales des fibres libériennes et autres fibres ligno-cellulosiques sont principalement constituées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les quantités de ces trois constituants varient considérablement entre les différentes fibres libériennes. Par exemple, le lin a une teneur élevée en cellulose et une faible teneur en lignine. Le jute a une teneur en lignine relativement élevée. La composition chimique de ces fibres change pendant la croissance où la teneur en lignine augmente particulièrement à la fin de la période de croissance de la plante (Wallenberger and Weston 2003).

Les fibres libériennes ont le plus haut degré de polymérisation par rapport à la plupart des autres fibres végétales (Ramamoorthy et al. 2015). Ainsi, ces fibres ont aussi une résistance à la traction plus élevée que les autres fibres. Par conséquent, ces fibres sont utilisées pour la fabrication des cordes le tissu, l'emballage et le papier durables. Quelques exemples sont le lin, le jute, le kenaf, le chanvre industriel, le ramie, le rotin, la fibre de soja et même les fibres de vine et les fibres de banane (Chandramohan and Marimuthu 2011).

Tableau I. 1 : Les six types des fibres végétales.

Bast	Leaf	Seed				Core	Grass/ reeds	Other	
		Fibers	Pod	Husk	Fruit				Hulls
Hemp	Pineapple	Cotton					Kenaf	Wheat	Wood
Ramie	Sisal		Kapok			Jute	Oat	Roots	
Flax	Agava		Loofah			Hemp	Barley	Galmpi	
Kenaf	Henequen		Milk weed			Flax	Rice		
Jute	Curaua			Coir			Bamboo		
Mesta	Banana				Oil palm		Bagasse		
Urena	Abaca					Rice	Corn		
Roselle	Palm					Oat	Rape		
	Cabuja					Wheat	Rye		
	Albardine					Rye	Esparto		
	Raphia						Sabai		
	Curauá						Canary grass		

2.1.2 Feuilles de fibres

Les feuilles de fibres ou fibres foliaires, également dénommées fibres "dures", sont obtenues à partir des feuilles ou des tiges de feuilles de diverses plantes. Abaca, banane, ananas, sisal sont les exemples de plantes les plus courants dans la littérature fournissant des fibres foliaires. Les fibres peuvent être extraites de leurs feuilles par le rouissage, l'ébullition et les méthodes d'extraction mécanique. En générale, le rouissage est un processus de biodégradation traditionnel impliquant la décomposition microbienne impliquant la rupture des liaisons chimiques de la plante (Thakur 2013).

2.1.3 Fibres de grains et de fruits

Les plus importantes plantes produisant des graines avec des fibres à utilisation industrielle sont la plante du coton, du Kapok, de coco et la palmier à huile (Thakur 2013).

2.1.3.1 Fibres de la plante du coton

Le coton (*Gossypium*) est la fibre naturelle la plus célèbre qui est originaire des régions tropicales et subtropicales du monde entier. Aujourd'hui, la Chine, l'Inde et les États-Unis sont les trois premiers producteurs de coton au monde (Thakur 2013; Rana and Figueiro 2016).

Les fibres de coton sont cultivées dans une capsule protectrice dans la cotonnière et récoltées à maturité. La fibre de coton peut être facilement filée, sa biodégradabilité, douceur, absorbance et respirabilité rendent l'utilisation de la fibre comme tissu dans le textile. La fibre de coton contient 82,7% de cellulose et 5,7% de hémicellulose, et le reste en tant qu'impuretés naturelles (Kalia et al. 2011; Ramamoorthy et al. 2015).

La propriété hydrophile des fibres de coton est élevée en raison de la grande quantité de cellulose (groupes OH). Les fibres de coton ont une résistance à la traction entre 287-800 MPa, un module entre 5,5-12,6 GPa et un allongement entre 7-8 % (Ramamoorthy et al. 2015).

2.1.3.2 Fibre de coco (Coir)

Les principaux producteurs de cocotier sont l'Inde et Sri Lanka (Rana and Figueiro 2016). Les fibres de fruits (Fibres de noix de coco appelées coir) ont été utilisées en Inde pendant environ 3000 ans. Ce tissu fibreux se trouve entre l'exocarpe et l'endocarpe autour du noyau (Figure I.3) (Thakur 2013). Le Coir a plus de vie par rapport aux autres fibres végétales en raison de sa teneur élevée en lignine (Bongarde and Shinde 2014). D'autre part, les fibres de graines ou de fruits sont plus minces et moins résistantes aux forces mécaniques (Roth and Lindorf 2013).



Figure I. 3: Fibres de fruits de Coir (Bongarde and Shinde 2014).

Le processus de rouissage est traditionnellement utilisé pour extraire les faisceaux de coco. Le procédé de décortication peut également être utilisé pour séparer le faisceau (Thakur 2013).

Les composite de polymères renforcés de fibres de Coir sont développés pour des applications industrielles et socio-économiques telles que l'intérieur, le revêtement et la toiture des automobiles comme matériaux de construction, réservoir de stockage, matériaux d'emballage, casques et boîtes postales, boîtier de miroir, poids de papier, couvercle de projecteur, capot stabilisateur de tension. La fibre de Coir a montré une adhérence inter-faciale très élevée dans des conditions sèches (Bongarde and Shinde 2014).

Les fibres de coir sont plus efficaces et supérieures aux performances de renforcement par rapport à d'autres composites de renforcement. Cependant, les principales limitations des fibres de coco sont une teneur élevée en humidité. Il peut être contrôlé avec un traitement chimique (Bongarde and Shinde 2014).

2.1.3.3 Fibre de palmier à huile

Le palmier à huile est l'une des cultures pétrolières pérennes. Il est originaire des forêts tropicales d'Afrique de l'Ouest. La principale culture industrielle est dans les pays Sud-est d'Asie comme la Malaisie et l'Indonésie (Sreekala et al. 1997). Les fibres de palmier à huile sont obtenues des grappes de palme après l'élimination des graines. Ces fibres sont laissées en tant que déchets après l'extraction de l'huile. Les seules utilisations actuelles de ce matériau fortement cellulosique sont comme combustible de chaudière et dans la préparation d'engrais de potassium (Sreekala et al. 1997). La fibre de palmier à huile est donc un produit secondaire utilisés comme renforcement dans les bio-composites. Il est également possible d'extraire des fibres d'autres parties de la plante, mais le rendement est très faible par rapport à celui des fruits (Ramamoorthy et al. 2015).

2.1.4 Fibres de pailles

La paille est un résidu agricole ou un sous-produit obtenu à partir de plantes céréalières lorsque le grain et la paille ont été enlevés (Ramamoorthy et al. 2015). Dans le monde entier, des tonnes de résidus de paille de blé inutilisés sont générés chaque année. Des faibles quantités sont utilisées pour des applications telles que l'alimentation et la production d'énergie (Panthapulakkal et al. 2006). Ces produits agricoles tels que la paille de blé, la paille de riz, les épis et les tiges de maïs sont également des sources de fibres à base de cellulose bien qu'ils présentent une teneur en cellulose inférieure à celle du bois et d'autres fibres végétales (Panthapulakkal et al. 2006). La paille gagne également une importance dans la recherche des bio-composite (Ramamoorthy et al. 2015). La paille de blé a déjà été utilisée pour fabriquer des composites, des panneaux, ...etc. (Panthapulakkal et al. 2006).

2.1.5 Fibres d'herbe

En raison de la disponibilité limitée ou des difficultés de traitement, la plupart des herbes à fibres (sauf la bagasse de canne à sucre) n'ont jamais été largement utilisés. Cependant, ils sont souvent fréquents dans certaines localités. Ceux-ci incluent la bagasse de canne à sucre, le bambou, l'esparto, et l'herbe sabai (Thakur 2013). Les fibres d'herbe ont également attiré l'attention des scientifiques en tant que fibres de renforcement pour les applications de bio-composites (Mohanty et al. 2005). Par exemple, les fibres de jute, ne prennent que quelques mois pour se développer, selon le climat, et ont une reproductibilité assez bonne. Par conséquent, des fibres telles que le jute et le kenaf ont été largement utilisées et sont disponibles dans le commerce à des prix raisonnables en tant que matériaux textile, industriel, de construction et agricoles. Les fibres de bambou, d'autre part, sont moins connues sauf pour des usages artistiques, de jardinage, et décoratifs et certains matériaux de construction (Wallenberger and Weston 2003).

2.2 Fibres de Bois

Les bois sont divisés en deux grandes classes, appelées bois doux et bois durs (Pickering 2008). Les bois doux sont non poreux et ne contiennent pas de vaisseaux. Généralement, les bois doux poussent en pyramide. On peut citer par exemple le cèdre, le pin et le sapin. Par contre, les bois durs sont poreux et contiennent des éléments de cuve. Les bois dur ont généralement une couronne pleine avec un tronc comme l'hêtre par exemple (Pickering 2008). De point de vue fibres, la distinction la plus importante entre les deux types de bois est que les fibres de bois

doux sont plus longues que les fibres de bois dur. Les fibres de bois doux typiques ont une longueur moyenne de 4,1 mm ($3,5 \pm 5$ mm) et de 2,5 m de largeur. Les fibres de bois dur mesurent en moyenne 1,2 mm ($1 \pm 1,8$ mm) de long et 3 m de largeur (Pickering 2008). En raison de leur faible densité et de leurs propriétés mécaniques, l'utilisation des fibres de bois comme renforcement avec des polymères est une façon de produire des matériaux composites renouvelables et biodégradables pour l'emballage et les applications structurelles (Thakur 2013).

3 Caractéristiques d'une fibre végétale ou matériau ligno-cellulosique

En général, toutes les plantes contiennent de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine, les trois principaux constituants organiques des parois des cellules végétales. Collectivement, ces polymères structuraux naturels sont connus sous le nom de ligno-cellulose (Stokke et al. 2013).

3.1 Structure générale d'une fibre végétale

3.1.1 Description

Une fibre végétale unique ou élémentaire est une cellule unique typiquement d'une longueur de 1 à 50 mm et d'un diamètre d'environ 10-50 μm . Les fibres végétales sont comme des tubes microscopiques, c'est-à-dire des parois cellulaires entourant le lumen central qui contribue au comportement d'absorption d'eau des fibres végétales. La représentation schématique de la structure fine d'une fibre ligno-cellulosique est présentée à la figure 1.4 (Bismarck, Mishra et al. 2005). La fibre se compose de plusieurs parois cellulaires qui sont formées à partir d'un microfibre de cellulose, semi-cristallin de renforcement orienté, semé dans une matrice hémicellulosique-lignine de composition variable. Les parois cellulaires sont divisées en deux sections, la paroi cellulaire primaire et secondaire. La paroi cellulaire primaire contenant un réseau régulier de microfibrilles de cellulose, qui sont étroitement emballées. La paroi secondaire est composée de trois couches distinctes et éloignées S1 (couche externe), S2 (couche intermédiaire) et S3 (couche interne). La couche S2 est la plus épaisse et la plus importante dans la détermination des propriétés mécaniques (Bismarck et al. 2005; Kalia et al. 2011).

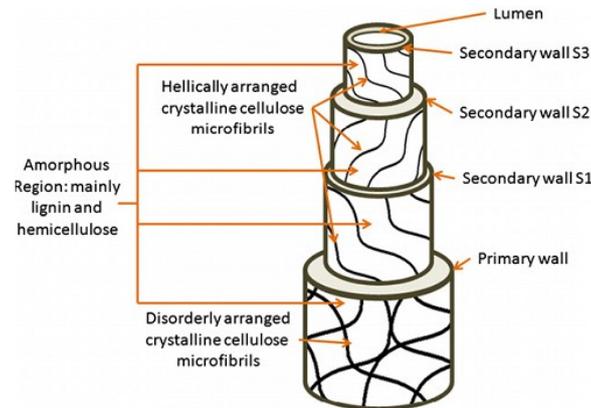


Figure I. 4: Schématisation de la structure fine d'une fibre ligno-cellulosique (Azwa et al. 2013).

La figure I.5 montre la disposition de fibrilles, de micro fibrilles et de cellulose dans les parois cellulaires d'une fibre végétale. En générale, les fibres cellulosiques sont constituées de microfibrilles, de 3 à 15 nm d'épaisseur et de 10 à 30 nm de largeur, constituées de 30 à 100 une chaîne de molécules de cellulose qui offre à la fibre sa résistance mécanique (Bismarck et al. 2005; Kalia et al. 2011; Samui et al. 2015). Les microfibrilles sont hélicoïdalement organisées le long de l'axe des fibres et forment finalement des couches annulaires dans la section transversale de la fibre (Samui et al. 2015). Les molécules d'hémicellulose dans une paroi cellulaire sont liées par l'hydrogène à la cellulose et agissent comme une matrice de cimentation entre les microfibrilles de cellulose. Ceci forme le réseau cellulose/hémicellulose considéré comme le composant structural principal de la cellule de fibre. Les lignines hydrophobes d'autre part agissent comme un ciment d'agent et augmente la raideur du composite cellulose/hémicellulose.

Les propriétés mécaniques de la fibre dépendent de la teneur en cellulose, de l'angle de microfibre et du degré de polymérisation. L'angle spiral ou l'angle de microfibre varie d'une fibre de plante à l'autre. Le degré de polymérisation dépend également de la partie de la plante à partir de laquelle on obtient des fibres (Bismarck et al. 2005; Kalia et al. 2011) .

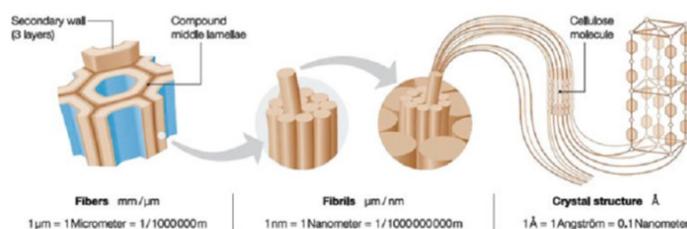


Figure I. 5: Disposition de fibrilles, de micro fibrilles et de cellulose dans les parois cellulaires d'une fibre végétale (Bismarck et al. 2005; Kalia et al. 2011).

3.2 Composition chimique d'une fibre végétale

La composition chimique ainsi que la structure des fibres végétales est assez compliquée (Bismarck et al. 2005). Si on ignore l'eau absorbée, les constituants principaux des renforts à base de cellulose se composent de trois types de produits chimiques : environ la moitié d'entre eux est la cellulose et environ un quart d'entre eux est l'hémicellulose et la lignine. D'autres extraits présents dans les sources de plantes comprennent la pectine et les cires (Biagiotti et al. 2004). Les compositions de certaines fibres végétales sont récapitulées de la littérature dans le tableau I.2.

Tableau I. 2 : Composition chimique des fibres ligno-cellulosiques.

Constituants	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Cendre	Extractives	Cire	Références
Lin (Flax)	71	18.6-20.6	2.2			0.3	(Bismarck et al. 2005; Li et al. 2007)
	43-47	16	21-23				(Sbiai et al. 2010)
Chanvre (Hemp)	70-74	17.9-22.4	3.7-5.7			0.8	(Bismarck et al. 2005)
	57-77	14-22.4	3.7-13	0.8			(Li et al. 2007)
Jute	61-71.5	13.6-20.4	12-13			0.5	(Bismarck et al. 2005)
	45-71.5	13.6-21	12-26	0.5-2			(Li et al. 2007)
	45-53	15	21-26				(Sbiai et al. 2010)
Kenaf	45-57	21.5	8-13				(Bismarck et al. 2005)
	31-57	21.5-23	15-19	2-5			(Li et al. 2007)
	31-39	19	15-19				(Sbiai et al. 2010)
Banane	63-64	10	5				(Bismarck et al. 2005)
	15,7-24,84	25,65- 31.48	14.98-17.04	7.02-8.65	4.46- 9.84		(Pacheco-Torgal and Jalali 2011)
Abaca	56-63	-	12-13				(Bismarck et al. 2005)
	56-63	15-17	7-9	3			(Li et al. 2007)
	60,8	20	8,8				(Sbiai et al. 2010)
Coconut	32-43	0.15-0.25	40-45				(Bismarck et al. 2005)
	29,7-46,48	21,46-31,05	19,22	1,74	8,39		(Pacheco-Torgal and Jalali 2011)
Sisal	78	10	8	1	/	2	(Jacob et al. 2004)
	60-75.2	10-16.5	7.6-12				(Siqueira, Bras et al. 2010)
	66-78	10-14	10-14			2	(Bismarck et al. 2005)
	47-78	10-24	7-11	0.6-1			(Li et al. 2007)
huile de Palmier	65	-	19	2	/	/	(Jacob, Thomas et al. 2004)
	60-65	-	11-19	-	-	-	(Bismarck et al. 2005)
	42.7-65	17.1-33.5	13.2-25.31	1.3-6.04	2.8-14.79	/	(Shinoj et al. 2011)
Luffa Cylindrica	65.5	17.5	15.2	0.7	3.1		(Siqueira et al. 2010)
Ramie	68.6-85.0	3.0-13.1	0.5-0.6				(Siqueira, Bras et al. 2010)
	68.6-76.2	13.1-16.7	0.6-0.7			0.3	(Bismarck et al. 2005)
	68.6-91	5-16.7	0.6-0.7				(Li et al. 2007)
Cotton	82-7-90.0	5.7-6.0	-				(Siqueira, Bras et al. 2010)
	85-90	5.7	-			0.6	(Bismarck et al. 2005)
Hardwood	40.0-45.0	32.0-33.0	17.0-26.0				(Siqueira, Bras et al. 2010)
Paille de Céréale	38-45	15-31	12-20				(Bismarck et al. 2005)
	28-36	0-27	12-21				(Sbiai et al. 2010)

Les fibres végétales sont un matériau composite conçu par la nature. Les fibres sont essentiellement une matrice de lignine et/ou d'hémicelluloses amorphe renforcée par des micro-fibrilles cellulose rigides et cristallines. La plupart des fibres végétales, à l'exception du coton, sont composées de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine, de cires et de certains composés hydrosolubles (Bismarck et al. 2005).

3.2.1 Cellulose

La composante principale de la plupart des fibres végétales est la cellulose qui se présente sous la forme d'une tige mince de microfibrilles cristallines alignées sur la longueur de la fibre (Bismarck et al. 2005; Azwa et al. 2013). Une schématisation de la structure polymérique de la cellulose (chaîne de glucose D-glucose $C_6H_{12}O_6$) est rapportée dans la figure I.6 (Bismarck et al. 2005). En raison du positionnement des trois groupes hydroxyle dans chaque monomère de glucose, des liaisons hydrogène forts sont formées entre ces groupes et les groupes hydroxyle sur des chaînes adjacentes (Biagiotti et al. 2004). La liaison H de nombreuses molécules de cellulose se produit l'une par rapport à l'autre entraînant la formation de microfibrilles qui peuvent interagir pour former des fibres. C'est le lien H qui constitue la base de la haute résistance à la traction de la cellulose (Bismarck et al. 2005).

La quantité de cellulose dans une fibre influe sur les propriétés, l'économie de la production de fibres et l'utilité de la fibre pour diverses applications. Par exemple, les fibres ayant une teneur en cellulose plus élevée seraient préférables pour les textiles, le papier et d'autres applications fibrilles (Reddy and Yang 2005).

3.2.2 Hémicellulose

Après la cellulose, l'hémicellulose est le deuxième carbohydrate le plus abondant des parois cellulaires végétales (Akin 2010). Les hémicelluloses sont des polysaccharides de poids moléculaire relativement bas, avec un degré de polymérisation et d'orientation inférieur à celui de la cellulose (Figure I.7) (Franck 2005; Reddy and Yang 2005; Azwa et al. 2013).

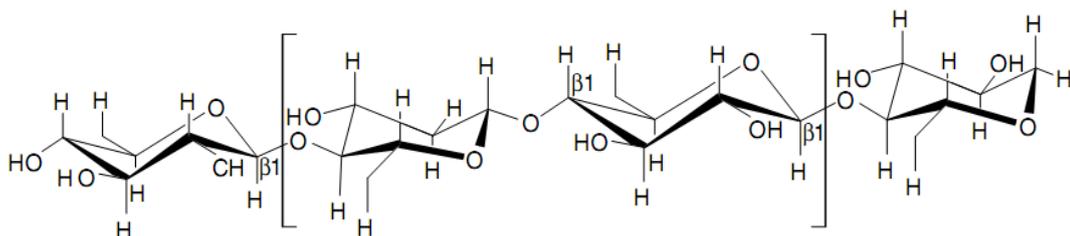


Figure I. 6: Schématisation de la structure polymérique de la cellulose (Bismarck et al. 2005).

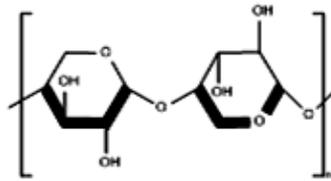


Figure I. 7: Liaison chimique du hémicellulose (Westman et al. 2010).

Les chaînes polymères sont beaucoup plus courtes (Densité de polarisation de 50 à 300) et ramifiées, contenant des groupes latéraux, donnant naissance à sa nature non cristalline. L'hémicellulose est très hydrophile et soluble dans l'alcali et facilement hydrolysé dans les acides (Bismarck et al. 2005; Azwa et al. 2013). Les fibres ayant une teneur en hémicellulose plus élevée, serait préférable de l'utilisés dans la production de l'éthanol et d'autres produits de fermentation (Reddy and Yang 2005). Mécaniquement, l'hémicellulose contribue peu à la rigidité et à la résistance des fibres ou des cellules individuelles (Reddy and Yang 2005). L'hémicellulose est responsable de la biodégradation, de l'absorption d'humidité et de la dégradation thermique de la fibre car elle présente moins de résistance (Saheb and Jog 1999). Dans des conditions sèches, l'hémicellulose se décompose en dioxyde de carbone et en eau. Dans des conditions humides, l'hydrolyse acide accélère la dégradation de l'hémicellulose dans principalement des molécules de sucre. De toute évidence, ces processus de dégradation sont plus rapides à des températures plus élevées (Biagiotti et al. 2004).

3.2.3 Lignine

Lignine est un polymère hydrocarboné complexe et un constituant majeur qui donne la rigidité aux plantes (Figure I.8) (Bismarck et al. 2005; Azwa et al. 2013). Elle est hydrophobe, résiste à l'hydrolyse acide et à la plupart des attaques de microorganismes, car les anneaux aromatiques sont résistants aux processus anaérobies tandis que la décomposition aérobie de la lignine est lente (Summerscales et al. 2010). Elle est solubles dans des alcalis chauds, facilement oxydés et facilement condensables avec du phénol (Bismarck et al. 2005; Azwa et al. 2013).

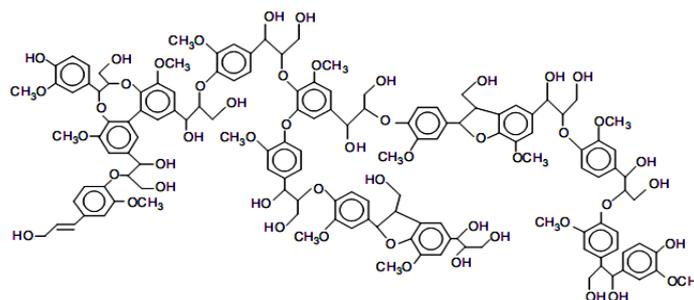


Figure I. 8 : Structure de la lignine (Mohanty et al. 2005).

La lignine est un polymère thermoplastique, présentant une température de transition vitreuse d'environ 90 °C et une température de fusion à laquelle le polymère commence à s'écouler d'environ 170 °C (Bismarck et al. 2005). La lignine est thermiquement stable, mais elle est responsable de la dégradation ultraviolet (Saheb and Jog 1999). Il existe de nombreux monomères possibles de la lignine et les types et les proportions dépendent de la source dans la nature. Parfois, la lignine est isolée sous forme de poudre endommagée, mais plus souvent, elle est sous forme d'un mélange gommeux de lignines avec une large gamme de poids moléculaires. La lignine associée à l'hémicellulose est le ciment de la nature dans l'exploitation de la force de la cellulose tout en conférant une certaine souplesse (Biagiotti et al. 2004).

3.2.4 Pectine

Les pectines sont des polymères complexes les plus hydrophiles de la plante en raison de la présence de groupes acide carboxylique (Figure I.9) (Thakur 2013). Les pectines, ainsi que la lignine et l'hémicellulose, sont utilisées pour relier les fibres élémentaires ensemble et peuvent facilement être hydrolysées à des températures élevées (Figure I.14).

Comme récapitulation, la figure I.10 montre quelques exemples de compositions chimiques de diverses fibres végétales.

3.2.5 Extractives et matières étrangères

3.2.5.1 Les extractives

En plus de la cellulose, des hémicelluloses, des lignines et des pectines, les parois des cellules végétales contiennent de nombreuses autres molécules organiques telles que des protéines, des tanins, des cires, des aromatiques et des hydrates de carbone de bas poids moléculaire. Ces matériaux sont considérés comme non structuraux, c'est-à-dire bien qu'ils soient présents dans la paroi cellulaire, mais ils ne forment pas la structure fondamentale de la paroi comme le font la cellulose, les hémicelluloses et les lignines. Néanmoins, ils ont un effet profond sur la nature chimique des matériaux ligno-cellulosiques.

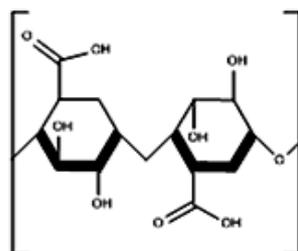


Figure I. 9: Structure de pectine (Stokke et al. 2013).

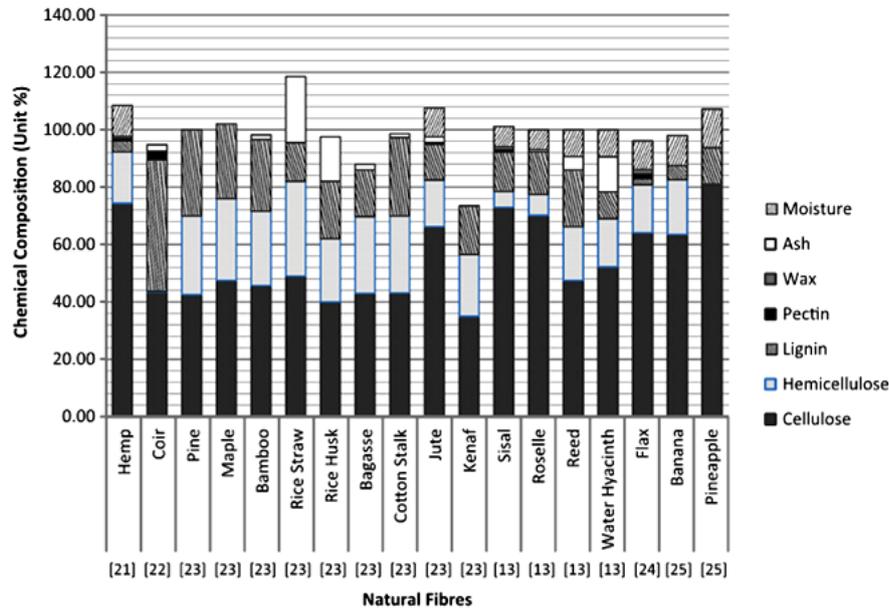


Figure I. 10: Compositions chimiques de diverses fibres végétales (Azwa et al. 2013).

Ces produits chimiques naturels sont habituellement solubles dans l'eau et/ou les solvants organiques, et sont donc classiquement classés comme extractifs, ce qui signifie qu'ils peuvent être éliminés ou extraits de la matière végétale par un traitement chimique relativement doux. En ce qui concerne la fabrication des composites, les extractifs jouent un rôle clé dans la détermination des interactions chimiques de surface qui affectent le collage (Stokke et al. 2013).

3.2.5.2 Matières étrangères

Les parois des cellules végétales contiennent également des substances organiques telles que le calcium et la silice. Ces matières peuvent présenter des difficultés supplémentaires dans le traitement. Par exemple, des matières végétales à haute teneur en silice sont abrasives, ce qui conduit à une usure rapide de l'outil pendant l'usinage (par exemple, un amortissement rapide des lames de scie). Certains panneaux de particules de paille de blé, par exemple, ont un contenu minéral qui se traduit littéralement par des «étincelles de chasse» lorsque la planche est coupée à l'aide d'une scie circulaire (Stokke et al. 2013).

4 Propriétés des fibres ligno-cellulosiques

Les variables importantes qui déterminent les propriétés des fibres sont leur structure, leur angle de microfibre, leurs dimensions de cellules, leurs défauts et la composition chimique (Azwa et al. 2013).

Tableau I. 3 : Propriétés physiques et mécanique des fibres végétales et synthétiques (Monteiro et al. 2011).

Lignocellulosic Fiber	Density ρ (g/cm ³)	Tensile Strength σ (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Maximum σ/ρ (MPa·cm ³ /g)
Bagasse (<i>Saccharum officinarum</i>)	0.34 to 0.49	135 to 222	15 to 17	493
Bamboo (<i>Bambusa vulgaris</i>)	1.03 to 1.21	106 to 204	—	—
Banana (<i>Musa sapientum</i>)	0.67 to 1.50	700 to 800	27 to 32	1194
Buriti (<i>Mauritia flexuosa</i>)	0.63 to 1.12	129 to 254	—	403
Coir (<i>Cocos nucifera</i>)	1.15 to 1.52	95 to 220	4 to 6	191
Cotton (<i>Gossypium M.</i>)	1.51 to 1.60	287 to 800	6 to 13	530
Curaua (<i>Ananas erectifolium</i>)	0.57 to 0.92	117 to 3000	27 to 80	2193
Flax (<i>Linum usitatissimum</i>)	1.30 to 1.50	344 to 1035	26 to 28	496
Hemp (<i>Cannabis sativa</i>)	1.07	389 to 690	35	649
Jute (<i>Corchorus capsularis</i>)	1.30 to 1.45	393 to 800	13 to 27	615
Piassava (<i>Attalea funifera</i>)	1.10 to 1.45	109 to 1750	5 to 6	1591
Pineapple (<i>Ananas comosus</i>)	1.44 to 1.56	362 to 1627	35 to 83	1130
Ramie (<i>Boehmeria nivea</i>)	1.5	400 to 1620	61 to 128	1080
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	1.26 to 1.50	287 to 913	9 to 28	725
Soft wood (spruce)	0.46 to 1.50	112 to 1000	11 to 40	2174
Hard wood (birch)	0.67 to 1.50	300 to 1500	30 to 80	2239
E-glass	2.50 to 2.58	2000 to 3450	70 to 73	1380
Carbon	1.78 to 1.81	2500 to 6350	230 to 400	3567
Aramid	1.44	3000 to 4100	63 to 131	2847

Les fibres végétales sont généralement adaptées pour renforcer les plastiques (thermodurcissables et thermoplastiques) en raison de leur forte résistance et rigidité relative et de leur faible intensité (Tableau I.3) (Bledzki and Gassan 1999). On remarque sur le tableau I.3 que les propriétés mécaniques des fibres végétales sont comparables à celles des fibres de verre (Bismarck et al. 2005; Mohanty et al. 2005).

Généralement, les fibres végétales avec une résistance mécanique plus élevée possèdent une teneur plus élevée en cellulose, un degré plus élevé de polymérisation de la cellulose, une longueur de cellule plus longue et un angle de microfibre inférieur qu'on discutera par la suite dans ce chapitre.

La résistance à la traction et le module de Young augmentent à mesure que la teneur en cellulose et la longueur de la cellule augmentent. Des vides sont également présents dans des fibres indiquant un certain degré de porosité. Un degré plus élevé de vides se retrouve dans les fibres de plantes vivant dans des habitats humides. Cette condition favorise une absorption d'humidité plus élevée (Azwa et al. 2013).

4.1 Propriétés mécaniques

La quantité de constituants cellulosiques et non cellulosiques dans une fibre détermine la structure et les propriétés et influe sur sa cristallinité et son taux d'humidité. Des propriétés telles que la résistance à la traction, le module d'élasticité, l'humidité et la cristallinité sont liées

à la composition, à la structure interne, et le nombre de défauts des fibres. Bien que la résistance des fibres ne puisse pas être exactement corrélée à la teneur en cellulose et à l'angle microfibrillaire (Reddy and Yang 2005). Généralement, les fibres ayant une teneur en cellulose plus élevée, un degré plus élevé de polymérisation de la cellulose et un angle microfibrillaire inférieur donnent de meilleures propriétés mécaniques. Les fibres ayant une teneur plus élevée en lignine et un rapport L/d inférieur et un angle de microfibrillaire plus élevé présentent une résistance et un module plus faibles, mais ont une plus grande élasticité.

Les fibres de cellulose avec des modules allant jusqu'à 40 GPa peuvent être séparées du bois, par exemple, par des procédés de fabrication de pâte chimique. De telles fibres peuvent être subdivisées par une hydrolyse suivie d'une désintégration mécanique dans des microfibrilles avec un module élastique de 70 GPa. Les calculs minéraux des modules élastiques des chaînes de cellulose ont donné des valeurs allant jusqu'à 250 GPa, mais aucune technologie n'est disponible pour les séparer des micro-fibrilles (Bledzki and Gassan 1999).

L'allongement des fibres dépend du degré de cristallinité, de l'orientation et de l'angle des microfibrillaires par rapport à l'axe des fibres. Par exemple, la ductilité élevée des fibres de coco est principalement due aux spirales hélicoïdales parfaites formées par les micro-fibrilles autour de l'axe de la fibre. La rupture sous chargement de traction se produit par des modes intercellulaires et/ou intracellulaires. Dans les fibres ayant une teneur en cellulose plus élevée, comme dans les bananes et les pommes de pin, les fissures se propagent par une liaison faible entre les cellules, provoquant une fracture intercellulaire sans l'élimination des micro-fibrilles. En revanche, les fissures se propagent à travers les cellules dans des fibres avec une teneur en cellulose inférieure telle que le coco, ce qui entraîne une fracture intracellulaire avec un retrait microfibre (Reddy and Yang 2005).

4.2 Propriétés physiques

La structure, la composition chimique, l'angle microfibrillaire et les dimensions des défauts cellulaires sont les variables les plus importantes qui affectent toutes les propriétés des fibres (Malkapuram et al. 2009). Il existe une énorme variabilité des propriétés des fibres selon que les fibres sont prélevées à partir de quelle partie de la plante, de la qualité de la plante et de l'emplacement. Différentes fibres ont des longueurs différentes et des zones de section transversale et également différents défauts tels que des micro compressions, ou des fosses ou des fissures (George et al. 2001; Célineo et al. 2013).

4.2.1 La densité

La densité d'une fibre de renfort est une mesure importante, car elle est le principal facteur déterminant le potentiel de la fibre pour la construction légère en dehors de ses propriétés mécaniques. En outre, la mesure de la densité est un outil important pour le contrôle de la qualité dans la production de fibres, car elle peut être utilisée pour déterminer si des défauts sont présents (Rana and Fanguero 2016).

Les données de densité représentent la densité apparente, qui est la densité de la fibre entière non de la paroi cellulaire de la fibre (Pickering 2008). En général, toutes les fibres végétales ont une densité de paroi cellulaire d'environ 1,5 g/cm³, avec des valeurs allant de 1,48 pour le chanvre et le jute, jusqu'à 1,56 pour la ramie (Charlet 2008). Les tableaux I.3 et I.4 montrent l'existence d'une très large gamme de propriétés physiques selon le type de fibre. En général, les fibres libériennes sont les plus fortes (Pickering 2008). La faible densité de tous les fibres lingno-cellulosiques actuellement étudiés est un avantage majeur pour les utilisations possibles en tant que matériaux d'ingénierie. C'est particulièrement le cas des applications dans les composants automobiles comme renforcement dans les composites plus légers.

Tableau I. 4: Propriétés mécaniques et physiques de différentes fibres ligno-cellulosiques (Campilho 2015).

Fiber	Density (g/cm ³)	Lenght (mm)	Diameter (µm)
E-glass	2.5-2.59	-	<17
Abaca	1.5	-	-
Alfa	0.89	-	-
Bagasse	1.25	10-300	10-34
Bamboo	0.6-1.1	1.5-4	25-40
Banana	1.35	300-900	12-30
Coir	1.15-1.46	20-150	10-460
Cotton	1.5-1.6	10-60	10-45
Curaua	1.4	35	7-10
Flax	1.4-1.5	5-900	12-600
Hemp	1.4-1.5	5-55	25-500
Henequen	1.2	-	-
Isora	1.2-1.3	-	-
Jute	1.3-1.49	1.5	20-200
Kenaf	1.4	-	-
Nettle	-	-	-
Oil palm	0.7-1.55	-	150-500
Piassava	1.4	-	-
Palf	0.8-1.6	900-1500	20-80
Ramie	1.0-1.55	900-1200	20-80
Sisal	1.33-1.5	900	8-200

Les tableaux I.3 et I.4 présentent la densité de plusieurs fibres lingnocellulosiques, certains sont bien connus et communs (coton, jute, chanvre, flèche, sisal et coir), d'autres sont connus mais moins utilisés (ramie, banane, ananas et bambou) et d'autres relativement inconnus (curaua, piassava, bagasse à la canne à sucre et buriti). Dans ces tableaux, les densités de trois fibres synthétiques par rapport aux fibres lingnocellulosiques sont comparables. L'intervalle de valeurs pour chaque fibre correspond aux limites maximales et minimales obtenues dans la littérature. Dans l'ensemble, la gamme de densités des fibres lingnocellulosiques s'étend de 0,45 à 1,60 g/cm³ (Monteiro et al. 2011).

4.2.2 Propriétés d'humidité

La nature hydrophile des fibres est un problème majeur pour toutes les fibres de cellulose si elles sont utilisées comme renforcement dans les composites. La teneur en humidité des fibres dépend du contenu des parties non cristallines et de la teneur en vide des fibres. Dans l'ensemble, la nature hydrophile des fibres végétales influe sur les propriétés mécaniques (Faruk et al. 2012). La teneur en humidité peut avoir un grand effet sur la performance biologique d'un composite fabriqué à partir de fibres végétales (Faruk et al. 2012). Dans des conditions ambiantes normales, la teneur en humidité des fibres ligno-cellulosiques peut varier entre 5 et 10 % (Monteiro et al. 2011).

Comme pour les données mécaniques, il existe une certaine variation dans les données dans la littérature. Le tableau I.5 montre la teneur en humidité à l'équilibre de certaines fibres végétales (Faruk et al. 2012).

Tableau I. 5: Teneur en eau à l'équilibre de différentes fibres végétales (Pickering 2008).

Fiber	EMC (%)
Sisal	11
Hemp	9.0
Coir	10
Aloe	12.0
Banana	15
Pineapple	13
Wood	12
Abaca	9.5
Cotton	8
Jute	12
Kapok	10
Ramie	9
Flax	7

Le séchage de la fibre avant le traitement est un facteur important, car l'eau sur la surface de la fibre agit comme agent de séparation dans l'interface avec une matrice polymère hydrophobe. En outre, en raison de l'évaporation de l'eau, des vides peuvent apparaître dans la matrice (Monteiro et al. 2011). Une différence importante entre les fibres végétales et synthétiques est l'interaction avec l'eau (Monteiro et al. 2011). Par exemple, un composite fabriqué à partir de fibres d'abaques aurait un contenu d'humidité beaucoup plus élevé qu'un composite fabriqué à partir de fibres métalliques (Faruk et al. 2012).

4.2.3 Angle microfibrillaire

L'angle microfibrillaire (θ) est le nom donné à l'angle entre les micro-fibrilles et l'axe longitudinal de la cellule dans les fibres cellulosiques (Lichtenegger et al. 1999; Yilmaz 2014). Les micro-fibrilles sont parallèles les unes aux autres et sont organisées en hélice (Magniont 2010; Kalia et al. 2011; Saad 2013). L'angle microfibrillaire est l'angle d'enroulement des micro fibrilles de cellulose dans la couche principale S2 de la paroi secondaire comme le montre la figure I.11 (Macdonald and Hubert 2002).

Dans la couche S1 (0,2-0,3 μm) et S3 (0,1 μm) les micro-fibrilles ont les mêmes orientations, les micro-fibrilles forment un angle de 50 à 70° par rapport à l'axe de la fibre, dans la couche S2 (1-5 μm) qui constitue 90% de la masse de la paroi, cet angle n'est plus que de 10 à 30° (Augier 2007). Les mesures des angles microfibrillaires dans le bois fournissent des informations précieuses comme indice de propriétés mécaniques et de qualité du bois (Senft and Bendtsen 2007). Les angles microfibrillaires sont responsables des propriétés mécaniques des fibres. Un angle plus petit conduit à une résistance et une rigidité accrues, tandis que les angles plus grands offrent une plus grande ductilité (Azwa et al. 2013). Ceci est particulièrement vrai pour les propriétés de résistance telles que la flexion et la compression et la résistance à la traction parallèlement au grain.

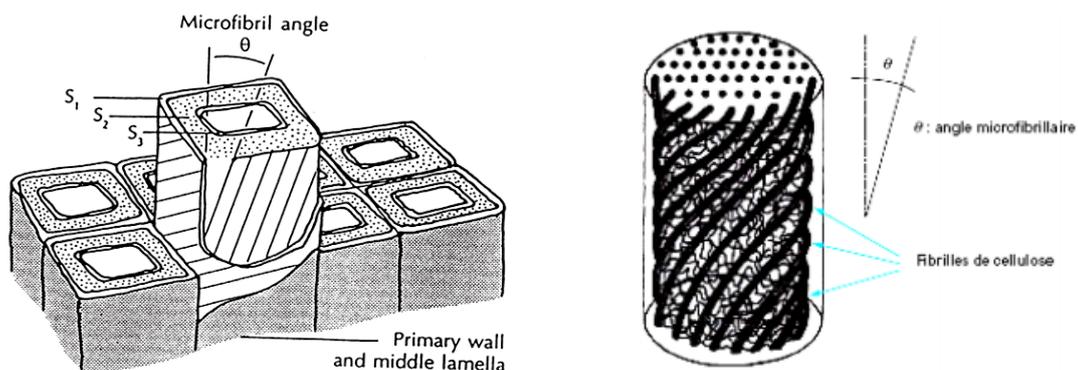


Figure I. 11: Angle microfibrillaire (Macdonald and Hubert 2002).

Tableau I. 6: Angle microfibrillaire des fibres végétales (Charlet 2008).

Fibre	Lin	Jute	Chanvre	Ramie	Sisal	Cotton	Noix de coco
Angle (°)	6-11	7,5-8	6-7,5	3-7,5	20-36	1-45	40-45

Le module d'élasticité est également proportionnel à la teneur en cellulose mais inversement proportionnel à l'angle microfibrillaire (ce dernier est proportionnel à la déformation à la défaillance due à une déformation irréversible de la paroi cellulaire). Par exemple, la fibre de bambou a un pourcentage élevé de lignine et son angle microfibrillaire est relativement faible. Ces facteurs conduisent à une résistance à la traction extrêmement élevée, à la résistance à la flexion et à la rigidité de la structure de paroi de polyamide (Samui et al. 2015).

La fibre de lin, possède des micro-fibrilles orientées majoritairement dans la paroi S2 à 10° de l'axe de la fibre. Les angles microfibrillaires principaux (de la plus grosse paroi) de quelques fibres végétales sont donnés dans le tableau I.6. Les bonnes propriétés mécaniques de la fibre de lin peuvent s'expliquer en partie sur la base de cette organisation microfibrillaire (Charlet 2008).

4.2.4 Défauts

En règle générale, dans les sciences des matériaux, les défauts déterminent les propriétés mécaniques des matériaux. Il s'avère tout aussi vrai dans le cas des fibres (Baley 2002). De nombreux défauts, souvent appelés genoux, nœuds, bandes ou dislocations (Figure I.12), sont présents à la surface et dans le volume d'une fibre de lin (Charlet 2008). Ces défauts sont répartis de manière hétérogène sur la longueur d'une fibre et sont rassemblés par groupes; la longueur moyenne entre deux défauts est d'environ $100 \mu\text{m} \pm 40 \mu\text{m}$, sans aucune corrélation avec le diamètre de la fibre (Charlet 2008).

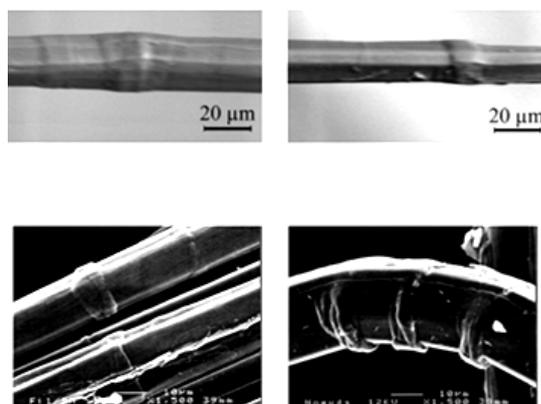


Figure I. 12: Défaut des fibres végétales (Charlet 2008).

Cependant, l'un des principaux paramètres structurels qui n'a pas été considéré est la présence de ses défauts dans les fibres (Satyanarayana et al. 1986). Les défauts de fibres peuvent jouer un rôle majeur dans les propriétés de traction et de flexion des composites en fibres végétales (Campilho 2015). Ceci a un effet important sur la résistance à la rupture et l'allongement à la rupture. Ce paramètre a été ignoré en raison du manque de données quantitatives disponibles concernant les défauts présents dans les fibres, à l'exception d'une estimation qualitative dans certaines fibres (Satyanarayana et al. 1986).

Pendant un test de traction, la rupture se produit souvent là où le défaut est situé. Les défauts de fibres sont produits de manière irréversible soit pendant la croissance des plantes, soit pendant le processus de décortication par lequel les fibres sont isolées de la plante. En conséquence, le contrôle de défauts des fibres reste délicat et est l'une des raisons de la grande dispersion dans les propriétés mécaniques des fibres (Baley 2002).

5 Avantages et inconvénients des fibres végétales

5.1 Avantages

Le public considère généralement les produits de matières premières renouvelables comme respectueux de l'environnement. D'autres paramètres écologiquement pertinents offrent certains avantages distincts à l'utilisation des cultures de fibres végétales (Bismarck et al. 2005; Mohanty et al. 2005).

Les principaux avantages du composite en fibres végétales sont (Bismarck et al. 2005; Mohanty et al. 2005; Chandramohan and Marimuthu 2011; Fanguero and Rana 2016):

- Considérer comme une source renouvelable, la production nécessite peu d'énergie, et le CO₂ est utilisé alors que l'oxygène est rendu à l'environnement
- Les fibres végétales ne sont pas abrasives pour les équipements de mélange et de moulage, ce qui peut contribuer à des réductions de coûts significatives.
- Produite avec un faible investissement à faible coût, avec des conditions de travail plus saines (santé et sécurité) et pas d'irritation cutanée pendant la manipulation que d'autres matières fibreuses.
- Faible densité qui peut conduire à une réduction de poids de 10 à 30% et qui donne une résistance et une rigidité spécifiques plus élevées que la fibre de verre.

- Le recyclage thermique est possible alors que le verre pose problème dans les fours de combustion.
- Bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique.
- Performance favorable des accidents, stabilité élevée, moins d'éclats.

5.2 Inconvénients

Parmi les inconvénients des charges ligno-cellulosiques est leur forte absorption d'humidité et la diminution des propriétés mécaniques (Azizi Samir et al. 2005). Ainsi, l'un des principaux inconvénients liés à l'utilisation de fibres végétales comme renforcement dans les composites est la mauvaise adhérence entre la fibre et la matrice (Ku et al. 2011; Célineo et al. 2013). Dans les composites, la matrice agit comme liant pour transférer la rigidité des fibres dans le matériau. Si son adhérence avec les fibres est faible, le composite n'aura pas les propriétés souhaitées. En outre, il sera vulnérable à l'environnement dans lequel il sera utilisé et sa durée de vie devrait être raccourcie. Beaucoup de recherches sont menées pour améliorer l'adhérence des fibres avec une matrice polymère en modifiant la surface de la fibre.

Un autre inconvénient de ces fibres est la variabilité de leurs propriétés en fonction du lot, de la variété et même de l'emplacement de la fibre dans la plante.

La résistance à basse température de ces fibres constitue un autre inconvénient. Ainsi, la température de procédé du composite dans lequel ils sont équipés ne doit pas dépasser 200 °C. Au-delà de cette température, l'intégrité de la fibre optique n'est pas garantie. L'utilisation des simplifications de la fibre végétale dépend du choix de la matrice.

La résistance de ces fibres aux champignons peut également soulever des problèmes (conditions de stockage, conditions de traitement, utilisation dans des conditions humides).

Enfin, la nature hydrophile des fibres est un problème majeur pour leur utilisation comme renforcement dans les polymères. En fait, il a été démontré que l'absorption de l'eau par les fibres de plantes entraîne une diminution des performances du composites dans lesquelles elles jouent le rôle de renforcement (Célineo et al. 2013; Saad 2013).

6 Domaine d'application des fibres végétales

Les ligno-cellulosiques sont utilisés pour diverses applications, en fonction de leur composition et de leurs propriétés physiques. La paille de blé et de riz, et même les tiges de maïs dans une

certaine mesure, ont été traditionnellement utilisées pour la fabrication de pâte à papier et de papier. Le coco, la pomme de pin et les feuilles de bananier ont été utilisés comme source naturelle de fibres de cellulose pour les textiles, les composites et aussi pour le papier (Reddy and Yang 2005).

Les caractéristiques écologiques, la biodégradabilité et le prix des fibres végétales sont très importants pour leur acceptation dans les grands marchés de l'ingénierie, tels que l'automobile et la construction. Les polymères renforcés par des fibres végétales innovatrices trouvent rapidement de plus en plus d'applications dans des applications structurelles secondaires en particulier pour diverses applications dans l'industrie automobile (Mohanty et al. 2005).

Les fibres végétales sont actuellement utilisées en quantités considérables dans diverses applications dans l'industrie automobile seulement à l'intérieur des voitures particulières et des cabines de camion (Bismarck et al. 2005; Mohanty et al. 2005; Satyanarayana et al. 2007). Par exemple, l'utilisation de la fibre naturelle dans l'industrie d'automobile en Allemagne et en l'Autriche est de 14 000 t en 1999 et de 17 000 t en 2000 (Bismarck et al. 2005; Mohanty et al. 2005; Summerscales et al. 2010).

Les fibres végétales sont utilisées comme garnitures dans les panneaux de portes ou les garnitures de cabine. Les fibres de cire collées au latex naturel sont utilisées comme coussins d'assise. Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées pour l'isolation thermo-acoustique. Ces matériaux isolants sont principalement basés sur des textiles recyclés et ont une teneur élevée en fibres dépassant 80% en poids. À l'heure actuelle, il existe très peu de pièces extérieures fabriquées à partir de composites de fibres végétales (Bismarck et al. 2005; Mohanty et al. 2005).

D'autre part, L'augmentation des coûts du combustible et la pénurie de sources pétrolières ont conduit à l'utilisation de ligno-cellulosiques pour produire de l'éthanol et d'autres sucres par fermentation. Les biomasses peuvent également être transformées en carbone, en hydrogène et en oxygène pour produire divers produits chimiques, enzymes et protéines (Reddy and Yang 2005). De plus, les composites de fibres végétales peuvent être des matériaux très rentables pour les applications de l'industrie du bâtiment (Chandramohan and Marimuthu 2011) : panneaux pour cloisons et faux plafonds, cloisons, murs, planchers, cadres de fenêtres et de portes, tuiles, bâtiments mobiles ou préfabriqués pouvant être utilisés en cas de calamités naturelles telles que les inondations, les cyclones, les tremblements de terre, etc.

7 Composites basés sur des renforts végétales

Pour la fabrication des composites à base de renfort végétale, de nombreux matrices, de nombreux types et forme de renfort (Particule, fibres, farine,...) et plusieurs façons de les associer ensemble avec ou sans modification de l'interface sont utilisés (Michaud 2003). La figure I.13 présente les différentes formes possibles de renfort : (i) renfort particulaire : sans dimension longue, (ii) renfort fibreux : avec une longue dimension, (iii) stratifié : avec deux longues dimensions et (iv) imprégné (Michaud 2003; Do Thi 2011; John and Thomas 2012).

7.1 Matrices utilisées dans la fabrication des composites

Le polymère peut être classé en deux classes, thermoplastiques et thermodurcissables. Les matériaux thermoplastiques dominent actuellement, en tant que matrices pour les fibres biologiques; les thermoplastiques les plus couramment utilisés sont le polypropylène (PP), le polyéthylène et le chlorure de polyvinyle (PVC); tandis que les résines phénoliques, époxydes et polyesters sont les matrices thermodurcissables les plus utilisées (Ku et al. 2011).

7.1.1 Résines thermodurcissables

La plupart des résines thermodurcissables utilisées pour la production des composites traditionnelles peuvent être utilisées comme matrices pour les composites de fibres végétales (Fuqua et al. 2012). Les colles, ou polymères thermodurcissables, sont largement utilisées pour le collage du bois ou dans les composites à base de bois, en particulier ceux à base de fibres celluliques. Ces résines servent à lier les fibres entre elles afin d'assurer la cohésion de l'ensemble (Michaud 2003). Les résines thermodurcissables primaires utilisées aujourd'hui dans les composites de fibres naturelles pour les applications automobiles sont le polyester, le vinylester et les résines époxy. Une comparaison des propriétés thermodurcissables typiques est fournie dans le tableau I.7 (Holbery and Houston 2006). De nombreux travaux traitent des composites à base de bois utilisant ce types de résines comme agent liant dans la fabrication des composites (Michaud 2003).

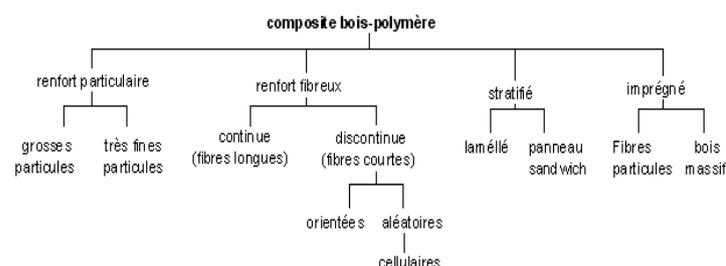


Figure I. 13: Différentes formes de renforts (Michaud 2003).

Tableau I. 7: Propriétés des résines thermodurcissables (Holbery and Houston 2006).

Property	Polyester resin	Vinyl ester resin	Epoxy
Density (g/cm ³)	1.2–1.5	1.2–1.4	1.1–1.4
Elastic modulus (GPa)	2–4.5	3.1–3.8	3–6
Tensile strength (MPa)	40–90	69–83	35–100
Compressive strength (MPa)	90–250	100	100–200
Elongation (%)	2	4–7	1–6
Cure shrinkage (%)	4–8	N/A	1–2
Water absorption (24 h@20 °C)	0.1–0.3	0.1	0.1–0.4
Izod impact strength (J/m)	0.15–3.2	2.5	0.3

Les résines de polyester sont largement utilisées, en particulier le type "insaturé" capable de durcir d'un liquide à un solide dans diverses conditions. Le polyester ortho-phthalique est la résine économique standard couramment utilisée, et il donne des produits très rigides avec une faible résistance à la chaleur. Le polyester iso-phthalique est maintenant plus commun lorsque la résistance à l'humidité est nécessaire (Holbery and Houston 2006).

Les résines époxy offrent des performances élevées et une résistance à la dégradation dans l'environnement. Les époxydes ont un large attrait dans l'industrie, bien que dans l'industrie automobile, les époxydes n'aient pas été largement utilisés en raison de calendriers de durcissement plus longs et d'un coût en monomères élevé (Holbery and Houston 2006).

Les résines vinylester, un ajout relativement nouveau dans la famille des résines thermodurcissables, sont habituellement produites par la réaction entre la résine époxy et un acide carboxylique éthylénique saturé, avec des acides communément utilisés tels que l'acide acrylique et l'acide méthacrylique. Les résines vinylesters combinent une excellente résistance chimique, de bonnes propriétés thermiques et mécaniques. Ceux-ci ont une meilleure résistance à l'humidité que les époxydes lorsqu'ils sont durcis à température ambiante. (Holbery and Houston 2006).

Les résines thermodurcissables donnent une liaison interfaciale acceptable avec les fibres ligno-cellulosiques, même avant la modification de la surface. En outre, la plupart des résines thermodurcissables peuvent être traitées et durcies à des températures modérées, normalement en dessous du point de dégradation du matériau ligno-cellulosique, ce qui procure des avantages distincts pour le traitement par rapport aux matériaux thermoplastiques (Fuqua et al. 2012).

Différentes tailles et types de fibres ligno-cellulosiques peuvent être utilisés pour la production de composites thermodurcissables, comprennent des fibres longues et courtes libres, des nappes de fibres tissées et non tissées et des particules de charge. Leurs composites ont donné des résultats prometteurs, surtout avec des modifications des surfaces des fibres, ce qui montre un potentiel de remplacer les fibres artificielles par les fibres végétales (Fuqua et al. 2012).

7.1.2 Les résine thermoplastiques

La fabrication de composites de fibres végétales comprend l'utilisation d'un système de liant polymère thermodurcissable ou thermoplastique combiné avec la préforme ou le mat de fibre végétale (Holbery and Houston 2006). Les liants (résines) thermoplastiques sont dérivés de monomères linéaires ou légèrement ramifiés qui forment le motif de base d'une chaîne où ils sont maintes fois répétés. Sous l'action de la chaleur, le thermoplastique se ramollit conduisant à l'apparition de mouvements à longue portée dans les chaînes moléculaires. Le thermoplastique peut alors être solidifié par refroidissement en prenant la forme souhaitée. Ce processus de ramollissement par excitation thermique et de durcissement par refroidissement peut être répété indéfiniment car, contrairement aux résines thermodurcissables, quasiment aucune modification chimique ne vient altérer les thermoplastiques. Cette aptitude confère aux déchets thermoplastiques des propriétés de recyclage très intéressantes (Michaud 2003).

Pour des bonnes propriétés du composite à base d'une résine thermoplastique, la compatibilité entre la matrice est un facteur important pour assuré une bonne adhésion entre la fibre et la matrice. Dans la littérature, l'amélioration de l'adhésion entre la fibre et la matrice se fait par un agent de couplage. Le couplage est un procédé dans lequel des polymères ou des charges différentes sont transformés en un alliage en utilisant des agents externes. Il existe de nombreux types d'agents de couplage comprenant des agents tensioactifs et des réactions chimiques réactives qui améliorent l'adhérence interfaciale entre la matrice et le renfort. Cette amélioration augmentation les propriétés physiques, mécanique et de la durabilité environnementale du matériau composite (Holbery and Houston 2006).

Dans les applications automobiles, le système le plus couramment utilisé aujourd'hui est le polypropylène thermoplastique, en particulier pour les composants non structuraux. Le polypropylène est favorisé en raison de sa faible densité, de son excellente aptitude au traitement, de ses propriétés mécaniques, de ses excellentes propriétés électriques et de sa

bonne stabilité dimensionnelle et résistance aux chocs. Cependant, plusieurs thermoplastiques synthétiques sont utilisés, y compris le polyéthylène, le polystyrène et les polyamides (Nylon 6 et 6, 6). Les propriétés thermoplastiques communes sont énumérées dans le tableau I.8 (Holbery and Houston 2006).

Le développement des composites de fibres végétales thermoplastiques est limité par deux limites physiques principales: la température supérieure à laquelle la fibre peut être traitée et la différence significative entre l'énergie de surface du bois et la matrice polymère. La température du procédé est un facteur limitant dans les applications de fibres végétales. La limite supérieure généralement perçue avant la dégradation des fibres est de l'ordre de 150 °C pour les longues durées de traitement, bien que les fibres puissent supporter des expositions à court terme à 220 ° C. Le résultat d'une exposition prolongée à haute température peut être une décoloration, une libération de matières volatiles, une mauvaise adhérence interfaciale ou une fragilisation des composants cellulotiques (Holbery and Houston 2006).

7.2 Composites à base de fibres végétales

Ces dernières années, les composites renforcés de fibres végétales ont reçu beaucoup d'attention en raison de leurs propriétés (légères, non abrasives, combustibles, non toxiques, à faible coût et biodégradables, écologique et recyclabilité). Parmi les différentes fibres végétales; les fibres de bois, de bambou, de sisal, de chanvre, de ramie, de jute et de bois sont particulièrement intéressantes. De nombreux travaux de recherche ont été menés dans le monde entier sur l'utilisation des fibres végétales comme matériau de renforcement pour la préparation de divers types de composites (Bledzki and Gassan 1999).

Tableau I. 8: Propriétés des résines thermoplastiques (Holbery and Houston 2006).

Property	PP	LDPE	HDPE	PS	Nylon 6	Nylon 6,6
Density (g/cm ³)	0.899–0.920	0.910–0.925	0.94–0.96	1.04–1.06	1.12–1.14	1.13–1.15
Water Absorption –24 hours (%)	0.01–0.02	<0.015	0.01–0.2	0.03–0.10	1.3–1.8	1.0–1.6
T _g (°C)	–10 to –23	–125	–133 to –100	—	48	80
T _m (°C)	160–176	105–116	120–140	110–135	215	250–269
Heat Deflection Temp (°C)	50–63	32–50	43–60	Max. 220	56–80	75–90
Coefficient of Thermal Expansion (mm/mm/ °C × 10 ⁵)	6.8–13.5	10	12–13	6–8	8–8.6	7.2–9
Tensile Strength (MPa)	26–41.4	40–78	14.5–38	25–69	43–79	12.4–94
Elastic Modulus (GPa)	0.95–1.77	0.055–0.38	0.4–1.5	4–5	2.9	2.5–3.9
Elongation (%)	15–700	90–800	2.0–130	1–2.5	20–150	35–>300
Izod Impact Strength (J/m)	21.4–267	>854	26.7–1,068	1.1	42.7–160	16–654

L'utilisation de fibres végétales offre le potentiel de remplacer une grande partie des charges de verre et de minéraux dans de nombreuses pièces intérieures (les panneaux de porte, les dossiers, les garnitures de pavillon, les plateaux, les tableaux de bord) et extérieures d'automobiles. Au cours de la dernière décennie, La législation de l'Union européenne mise en œuvre en 2006 a accéléré l'insertion récente de véhicules automobiles en plastique renforcé de fibres naturelles; en 2006, 80% d'un véhicule doit être réutilisé ou recyclé. Le Japon exige que 88% d'un véhicule soit récupéré. Par conséquent, la plupart des constructeurs évaluent aujourd'hui l'impact environnemental du cycle de vie complet d'un véhicule de la fabrication à l'élimination (Holbery and Houston 2006).

Les fibres végétales, comme matériaux de construction pour les bâtiments, étaient connues depuis longtemps. Le gouvernement de l'Inde a fait la promotion de grands projets dans lesquels des résines de polyester renforcées de jute étaient utilisées pour des bâtiments et des élévateurs à grains. En Egypte, pendant des siècles, des mélanges de paille et de limon, séchés au soleil, ont été utilisés comme matériaux de construction (Kalia et al. 2009). À l'heure actuelle, les plastiques renforcés de fibres de verre se sont avérés répondre aux exigences structurelles et de durabilité des pièces intérieures et extérieures des automobiles. De bonnes propriétés mécaniques et une base de fabrication bien développée et installée ont contribué à l'insertion de plastiques renforcés de fibre de verre dans l'industrie automobile (Holbery and Houston 2006). Les composites obtenus à partir de fibres végétales varient dans leurs méthodologies de traitement. En particulier en ce qui concerne les performances finales des matériaux composites, le nombre de variables existantes rend difficile la création de déclarations de performance inconditionnelles. Les composites de fibres végétales peuvent être produits en utilisant une grande variété de matrices polymères et de procédés de traitement. Globalement, ces systèmes renforcés peuvent être classés en trois catégories: les composites thermo-durcissables, les composites thermoplastiques à fibre courte/longue et les mélanges thermoplastiques remplis (Fuqua et al. 2012).

7.2.1 Fibres végétales utilisées dans la fabrication des composites

Le concept d'utilisation de fibres naturelles dérivées de plantes comme renforcement dans une structure composite a été utilisé avec succès par de nombreuses civilisations à travers l'histoire du monde et n'est donc pas nouveau. Une variété de matériaux peut historiquement être indiquée en ce qui concerne la fibre végétale à utiliser comme moyen d'améliorer la rigidité, la résistance et la résistance aux chocs d'un matériau donné.

Tableau I. 9: Différents types et propriétés des fibres végétales utilisées (Fuqua et al. 2012).

Category	Fiber Type	Density (g/cm ³)	Diameter (μm)	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)
Bast	Flax	1.5–1.54	—	450–1500	27.6–38	1.5–3.2
	Hemp	1.48	53.7	690–873	9.93	1.6–4.7
	Nettle	—	10–63	1594	87	1–6
	Jute	1.3–1.45	25–200	393–773	2.5–26.5	1–2
	Kenaf	0.749	43.3–140	223–624	11–14.5	2.7–5.7
	Ramie	1.45	34	400–938	24.5–128	1.2–3.8
	Kudzu	—	46–200	130–418	—	—
	Okra	—	40–180	68–282	5.74–16.55	2
	Roselle	—	—	147–184	2.76	11–15
Leaf	Sisal	1.45	50–200	80–640	1.46–15.8	3–15
	Abaca	1.5	28	756	31.1	2.9
	Henequen	1.2	180	500	13.2	4.8
	Pineapple Fiber	1.44	20–80	413–1627	34.5–82.5	0.8–1.6
	Banana Fiber	1.35	50–280	529–914	7.7–32	1.8–3.7
	Curaua	1.38	9–10	913	30	3.9
	Date Palm	0.92	100–1000	170–275	5–12	5–10
	Piassava	—	—	109–147	1.1–4.6	6.4–21.9
	Fruit/Seed	Cotton	1.5–1.6	15.6–21	287–800	1.1–12.6
Coir (Coconut)		1.15–1.45	40–450	106–175	1.27–6	15–59.9
Oil Palm		0.7–1.55	150–500	100–400	1–9	8–18
Grasses	Straw - Wheat	1.49	84–94	59–140	3.7–4.8	—
	Straw - Rice	—	—	150–200	3.3–12.5	3.2–4.6
	Alfa (Esparto)	0.89	—	350	22	5.8
	Bamboo	0.6–1.1	88–125	140–441	11–36	1.3–8
	Wildcane	0.844	190–560	159	11.8	1.3
Wood	Hardwood	0.3–0.88	16	51–120.7	5.2–15.6	—
	Softwood	0.3–0.59	30	45.5–111.7	3.6–14.3	—
Manmade	E-Glass	2.5	9.8–17	2000–3500	70	0.5–4.8
	S-Glass	2.5	9	4570	86	2.8–5.7
	Aramid	1.4	12	3000–3150	63–67	3.3–3.7
	Carbon	1.4	5–17	4000	230–240	1.4–1.8

Cependant, au cours des deux dernières décennies, de nouveaux intérêts et un intérêt accru pour l'utilisation avancée de différentes variétés de fibres végétales en tant qu'agents de renforcement dans des matrices polymères ont été réalisés dans le monde entier. Avec la variance de types des fibres, couplées à des variances de géométrie et de la constitution des compositions, une large gamme de propriétés mécaniques a été documentée pour différentes fibres végétales, comme le montre le tableau I.9. Généralement, les densités plus faibles des fibres végétales par rapport aux fibres synthétiques usuelles telles que le verre donnent des propriétés mécaniques spécifiques qui rendent les fibres végétales comparables en termes de performance (Fuqua et al. 2012).

7.2.2 Propriétés mécaniques des composites à fibres végétales

Les propriétés mécaniques des matériaux composites basés sur des fibres végétales comme renforcement dépendent fortement de la morphologie des fibres, le rapport d'aspect (L/D) des fibres, de la concentration des fibres, des propriétés de la matrice, de la dispersion/distribution de la fibre dans la matrice et de l'adhérence entre la fibre et la matrice (Saheb and Jog 1999; Qaiss et al. 2014).

Tableau I. 10: Fibre/matrice utilisés dans la fabrication des composites à base des fibres végétales (Saheb and Jog 1999).

Matrix Polymer	Fibers
PE, PP, PVC, PS, PolyUrethane	Wood flour/fiber
PP, SBR, Epoxy, Polyester, Phenol-formaldehyde	Jute
PE, Natural rubber, Polyester-epoxy	Sisal
Epoxy	Abaca
PE, Polyester	Pineapple
Polyester, PP	Sunhemp
Rubber	Oil palm
PE, PP	Kenaf
Natural rubber	Coir
Polyester	Banana
PP	Flax
PP	Wheat straw
Epoxy	Bambou

Une bonne dispersion et distribution des fibres dans la matrice peut être obtenue par une combinaison efficace des divers composants et par un procédé de mélange approprié (Qaiss et al. 2014). Les propriétés de résistance à la traction, à la flexion et aux chocs sont les propriétés mécaniques les plus fréquemment étudiées des composites plastiques renforcés de fibres végétales (Faruk et al. 2014). La résistance à la traction est plus sensible aux propriétés de la matrice, où le module d'élasticité dépend des propriétés de la fibre. Le rapport d'aspect (D/L) est très important pour déterminer les propriétés de la rupture. La plupart des études sur les composites de fibres végétales impliquent l'étude des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en fibres, de l'effet de divers traitements des fibres et de l'utilisation d'agents de couplage externes. De nombreux travaux sont disponibles dans la littérature sur les composites de fibres végétales. Le tableau I.10 résume le travail rapporté sur les composites de fibres végétales à base de plusieurs types de matrices polymériques (thermoplastique et thermodurcissable). Comme le montre le tableau I.10, la majorité des travaux porte sur les fibres de bois, avec quelques travaux sur d'autres fibres telles que le jute, le sisal et le kénaf (Saheb and Jog 1999).

7.2.2.1 Contrainte de rupture

a) Composites thermodurcissables

Les composites développés en utilisant des fibres végétales peuvent donner une grande variété de résistance, comme le montre le tableau I.11. Les propriétés engendrées par un composite renforcé par des fibres ligno-cellulosiques et de résines thermodurcissables dépendent de :

Tableau I. 11: Propriétés mécanique des composites à base des fibres végétales (Saheb and Jog 1999).

Natural Fiber Composite	Tensile		Flexural	
	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
Unidirectional - Vinyl Ester	82–248	11–24	95–146	13
Unidirectional - Polyester	45–143	4–17	63–280	4–41
Unidirectional - Epoxy	65–535	6–16	84–325	5–24
Random Mat - Polyester	18–92	2–7	50–155	4–5
Random Mat - Epoxy	49–59	60–11	77–180	2–8

La source du renfort, orientation de la fibre, fraction volumique entre la fibre et la matrice, l'adhésion entre la fibre et la matrice et le type de modification de la surface. Le tableau I.11 montre des plages de résistance et de module qui peuvent être obtenues en utilisant des renforts de fibres végétales dans un certain nombre de matrices (Saheb and Jog 1999).

Les travaux rapportés sur les composites thermodurcissables couvrent l'effet des paramètres de processus tels que la température de durcissement et divers traitements sur les propriétés des composites. Par exemple, pour les composites jute/polyester, une augmentation du module et de la résistance a été rapportée jusqu'à une fraction volumique de 0,6 suivie d'une diminution. Une augmentation supplémentaire de la fraction volumique a entraîné une diminution des propriétés, ce qui a été attribué à un mouillage insuffisant de la fibre. Dans une autre étude sur les composites jute/polyester, il a été noté que les propriétés mécaniques dépendaient de la liaison chimique entre la fibre de jute et le polyester (Saheb and Jog 1999). La modification de la surface du renfort apportait des améliorations significatives de 40 à 80% des performances du composite par rapport aux fibres non modifiés (Tableau I.11). Par contre ces améliorations, sont en moyenne plus faibles que les fibres artificielles comme les fibres de verres (Fuqua et al. 2012).

b) Composites thermoplastiques

En général, sans modification de surface, la résistance à la traction des thermoplastiques sera diminuée avec l'addition du renfort ligno-cellulosiques à faible rapport d'aspect. L'augmentation du renfort produit des pertes de résistance de composite. Cela est dû au faible rapport d'aspect des fibres et à leur mauvais état d'adhésion qui les fait agir comme des défauts de continuité dans la matrice. L'ajout du renfort dans le composite forme plus de vides de

surface, ce qui entraîne une performance de résistance défavorable. Cependant, la modification de l'interface du renfort par des traitements de surfaces peut atténuer ce problème (Fuqua et al. 2012).

Les propriétés mécaniques des composites thermoplastiques peuvent être améliorées en améliorant la compatibilité entre la fibre et la matrice. Des agents de compatibilité tels que l'éthylène et le propylène maléaté et quelques polymères linéaires greffés avec de l'acrylique renforcent l'adhérence entre la fibre et la matrice polymérique. La meilleure amélioration de la résistance à la traction et du module de traction a été obtenue avec l'amélioration de la liaison fibre/matrice avec l'utilisation de l'éthylène maléaté (Saheb and Jog 1999). De plus, lorsque le rapport d'aspect (D/L) des fibres est plus grand, et que les matériaux ligno-cellulosiques peuvent être définis comme matériau avec des fibres courtes, le composite thermoplastique devient moins préjudiciable à la résistance. Cependant, la résistance de la fibre a encore peu d'influence sur la résistance finale du composite lorsque l'interface fibre/matrice est médiocre. Mais avec l'utilisation de la modification de surface, des améliorations de la résistance du composite peuvent être obtenues. Ces améliorations de la résistance des composites sont encore nettement inférieures à celles du verre par exemple. Ceci constitue l'un des principaux obstacles au remplacement végétale de la fibre de verre dans les systèmes thermoplastiques (Fuqua et al. 2012).

7.2.2.2 Module d'élasticité

a) Composites thermodurcissables

Les composites thermodurcissables développés en utilisant des fibres végétales donneront une grande variété de performances du module d'élasticité en fonction du type de fibre et du degré de charge, comme indiqué précédemment dans le tableau I.11. En raison de la raideur élevée de nombreuses fibres ligno-cellulosiques, les composites de fibres végétales peuvent avoir des modules relativement élevés et sont en mesure de se comparer directement aux composites renforcer par de fibres de verre dans de nombreux cas sur une base absolue (Fuqua et al. 2012). Ainsi, sur une base spécifique, les composites thermodurcissables renforcés avec des fibres végétales peuvent être extrêmement performants. Bien que le module d'élasticité du composite ne soit pas aussi dépendant de l'interaction inter-faciale entre fibre et matrice. Il a été montré que la modification de la surface donne de petites améliorations de la performance dans certains cas (Fuqua et al. 2012).

Tableau I. 12: Comparaison entre les propriétés des composites fibre de verre/polyester et fibre végétale/Polyester (Holbery and Houston 2006).

Property	Glass Fiber (30 wt.%)	Natural Fiber (35 wt.%)
Flex Strength (MPa)	80	70
Flex Modulus (GPa)	6.0	6.0
Elongation at Break (%)	2.2	1.9
Impact Strength (kJ/mm ²)	38	20
Density (g/cm ³)	1.54	1.42

a) Composites thermoplastiques

En général, le module de Young des matériaux composites augmente avec une augmentation de la teneur en fibres. Par exemple, dans le cas des composites à base de chanvre et de Polypropylène (PP), le module de Young atteint une valeur maximale à 50% de renfort, puis diminuant légèrement à 70%. Le module d'Young était presque deux fois et demie plus élevé avec une charge de 50% de fibres de qu'avec une teneur en fibres de 0%, c'est-à-dire du PP (Ku et al. 2011). D'après le tableau I.12, les composites thermoplastiques à base des fibres végétales ont des propriétés similaires par rapport aux composites à base de fibres de verres. Le renfort végétal est donc un bon concurrent aux fibres de verre synthétique.

Pour une fibre ou un renfort donné, l'inclusion et les augmentations subséquentes du renfort donneront des augmentations presque linéaires du module d'élasticité d'un système thermoplastique. Les améliorations du module sont le résultat des fibres et charges ligno-cellulosiques, qui ont des modules plus élevés que les matrices thermoplastiques correspondantes, exerçant une résistance à la déformation de la matrice, limitant ainsi l'allongement de la chaîne polymère. A mesure que le rapport d'aspect (L/D) des matériaux ligno-cellulosiques augmente, une plus grande partie de la fibre est complètement sollicitée, car le transfert de contrainte à travers les extrémités des fibres devient moins important à mesure que la longueur augmente (Fuqua et al. 2012).

7.2.2.3 La résilience

a) Les composites thermodurcissables

Par rapport aux résines non diluées, les composites thermodurcissables renforcés de fibres végétales amélioreront les performances de résistance aux chocs. La performance d'impact est basée à la fois sur les propriétés de la matrice et sur celle des fibres, en plus des propriétés interfaciales des deux. Tandis que l'inclusion des fibres végétales fournit un moyen d'absorber

et de réorienter l'énergie d'impact comme c'est le cas pour la plupart des types de renforcement, les effets de la modification de la surface sont variés. Dans certains cas, la modification de la surface améliore les performances d'impact par rapport aux fibres non traitées. Cependant, la résistance aux chocs est sensible à cette adhérence, et il est plus communément constaté qu'une liaison inter-faciale améliorée entraîne des effets préjudiciables à la performance d'impact composite (Fuqua et al. 2012).

b) Les composites thermoplastiques

En général, l'augmentation des charges ligno-cellulosiques entraînera des diminutions significatives de la résistance aux chocs des thermoplastiques. Les charges végétales ont des modules relativement élevés par rapport aux matrices thermoplastiques respectives. Ils tendent à fournir des points de concentration des contraintes dans la matrice puisque les charges ne sont pas capables d'absorber suffisamment d'énergie pour provoquer un durcissement. La résistance aux impacts dans les systèmes remplis peut être améliorée en utilisant la compatibilisation, mais en raison des faibles proportions, cela produira toujours une performance d'impact médiocre, ou au mieux équivalente, par rapport à la plupart des matrices. Au fur et à mesure que la longueur des fibres (et donc le rapport d'aspect L/D) augmente, le potentiel de la matière ligno-cellulosique n'est pas préjudiciable, mais plutôt bénéfique pour les performances d'impact. Puisque l'interface entre les charges compatibilisation et la plupart des thermoplastiques est relativement faible, la réorientation de la fissure le long de la longueur de la fibre produit le cisaillement dans la matrice. Des fibres plus longues réorientent la propagation des fissures et augmentent surtout la dureté (Fuqua et al. 2012). Le tableau I.13 donne des exemples d'application des renforts végétales (Holbery and Houston 2006).

Tableau I. 13: Application des composites à renfort végétales dans le domaine d'automobile (Holbery and Houston 2006).

Vehicle Part	Material Used
Interior	
Glove Box	Wood/cotton fibers molded, flax/sisal
Door Panels	Flax/sisal with thermoset resin
Seat Coverings	Leather/wool backing
Seat Surface/Backrest	Coconut fiber/natural rubber
Trunk Panel	Cotton fiber
Trunk Floor	Cotton with PP/PET fibers
Insulation	Cotton fiber
Exterior	
Floor Panels	Flax mat with polypropylene

7.3 Composites à base de particules végétales

Dans les composites à base de renfort végétales, les géométries des renforts peuvent être adaptées aux propriétés requises et prendre différents aspects : des particules, des fibres de longueur variable ou bien encore de plaquettes (Tlijani 2016).

Les particules végétales sont des copeaux de bois ou d'autres déchets ligneux provenant du façonnage du bois et/ou d'autres matières fibreuses ligno-cellulosiques (anas de lin, bagasse de canne à sucre, chènevotte de chanvre, etc.) avec ou sans apport de liant. Les particules ligno-cellulosiques sont donc des structures à renfort fibreux issues de bois natifs ou recyclées (copeaux, sciures, et chutes), de déchets de bois de post-consommation (palettes et matériau d'emballage rejetés, débris de la construction), de résidus agricoles (chaumes, tiges de cotonnier, etc.), de plantes à fibres (kénaf, chanvre, jute, etc.) (Nenonene 2009).

Le renfort végétal sous forme de particules pourrait avoir un avenir prometteur pour les bio-composites de matrices polymériques. Contrairement aux bio-composites à renfort fibreux, les bio-composites à renforts particulaires ne sont pas influencés par l'orientation (Essabir 2015).

Actuellement le terme WPC (Wood Plastic Composite) fait référence à tous les composites qui contiennent des renforts à base de bois et des polymères thermodurcissable ou thermoplastiques. Puisque les propriétés chimiques et physiques des composants principaux sont très différentes, ce type de composite contient habituellement des additifs pour favoriser la compatibilité entre la matrice polymère et le renfort (particule ou fibre).

Concernant les critères de sélection des polymères pour les composites, les thermoplastiques sont généralement préférés car ils offrent l'avantage de permettre des procédés de fusion répétés, contrairement aux polymères thermodurcissables qui deviennent irréversiblement à l'état solide après un seul cycle de traitement conduisant à une polymérisation après augmentation de température initiale. Les WPC innovants ont inspiré de nouvelles solutions pour les industries environnantes dans les domaines de la construction, de l'architecture, de l'automobile, de la décoration (Martins et al. 2017).

Pour les composites bois-plastique avec des particules de bois utilisées comme renfort, la résistance du composite est fréquemment utilisée comme mesure de la contrainte interfaciale, parce que c'est les particules de bois qui supportent les contraintes appliquées. Pour les composites de particules, la résistance s'améliore avec l'amélioration des interfaces renfort/matrice, à condition que tous les autres paramètres de matériau restent inchangés.

Cependant, pour la plupart des thermoplastiques, l'interface doit être aussi forte que possible si la résistance du composite est le but, car l'interaction entre le renfort et la matrice de polymère est très faible (Thakur 2013).

Les particules de grandes tailles induisent au niveau des composites à la fois une meilleure résistance à la propagation de fissures et une diminution de la résistance à l'initiation de fissures. Les particules les plus fines et les plus fibreuses bien dispersées conduisent à de meilleures propriétés mécaniques (Nenonene 2009).

Généralement, les propriétés élastiques sont améliorées aussi lorsque l'interface entre le renfort et la matrice est plus forte, c'est-à-dire que la capacité de transfert de contrainte est améliorée (Thakur 2013).

Dans la littérature beaucoup de chercheurs ont effectués des études sur les composites à base de particules végétales. Le panneau de particules a été développé en Allemagne en 1941 comme un moyen d'utiliser les résidus primaires de transformation du bois pour fabriquer des panneaux. Même si des résidus sont utilisés (par exemple, des copeaux de rabotage), le matériau est typiquement davantage broyé et criblé pour séparer les particules fines et grossières. Les particules fines sont appropriées pour être utilisées dans les faces du panneau de particules pour donner une surface moite et pour modifier le profile de la densité vertical, avec des particules plus grossières réservées à l'utilisation dans le cœur. Le panneau de particules est utilisé comme matériau de base pour les armoires et les meubles, comme substrat de stratification, pour les étagères et d'autres utilisations utilitaires et pour la sous-couche de plancher (Stokke et al. 2013).

Les propriétés des panneaux de particules ont une influence significative par la densité de la matière première. Une particule de bois de faible densité produit un panneau de particules avec une résistance supérieure à celle d'une densité plus élevée. La raison réside dans le fait que le bois à faible densité présente un taux de compactage relativement élevé lorsqu'il est pressé à chaud dans un panneau, ce qui entraîne un meilleur contact entre les particules. Pour obtenir une valeur de résistance élevée, un certain taux de compactage est nécessaire. De nombreuses études ont été réalisées sur le développement de panneaux de particules à faible densité (Xu et al. 2004).

(Khedari et al. 2004) ont développés des panneaux de particules à faible conductivité thermique avec l'optimisation du rapport entre le mélange de peau de durian et de fibres de

coco. Le rapport de mélange optimal de la peau de durian et de la fibre de coco est respectivement de 10% et 90% (en poids), avec une densité de panneau de 856 kg/m³. Les propriétés de panneau correspondantes sont les suivantes: conductivité thermique de 0,1342 W/m.K, module de rupture (MOR) de 440,46 kgf/cm², module d'élasticité (MOE) de 21,867 kgf/cm², gonflement d'épaisseur de 10,49% et teneur en humidité de 6,22%.

Des panneaux de particules de faible densité sans liant à base de noyau de kéraf ont été développés avec succès par Xu et al. (Xu et al. 2004). Les résultats ont montrés que les panneaux de particules de kenaf sans liant de faible densité avaient de bonnes propriétés mécaniques et une bonne stabilité dimensionnelle par rapport à leurs faibles densités. Le panneau de densité de 0,20 g/cm³ a une résistance à la rupture de 1,1 MPa, un module d'élasticité de 0,3 GPa, une force de liaison interne de 0,10 MPa, gonflement de l'épaisseur en immersion dans l'eau de 6,6% et absorption d'eau de 35%. La conductivité thermique des panneaux de particules de kenaf présentait des valeurs similaires à celles du matériau d'isolation (Xu et al. 2004).

(Chaharmahali et al. 2010) ont fabriqués des panneaux de particules WPC (Wood plastique composite) à partir de polyéthylène haute densité, des déchets de MDF et de panneaux de particules à 60, 70 et 80 wt% de renfort en utilisant la méthode du mélange sec sous pression à chaud. La résistance à la flexion et la résilience des panneaux de particules WPC sont réduites avec l'augmentation de la teneur en fibres de 60% à 80%, le module de flexion est augmenté en augmentant la quantité du renfort particulaire de 60% à 70% puis réduit à 80%. Il semble que 70% de renfort (ou 30% de matière plastique) est la fraction optimale pour améliorer le module d'élasticité des composites. En outre, la résistance à la flexion et le module d'élasticité des panneaux de particules WPC fabriqués étaient inférieurs à ceux des panneaux de contrôle MDF. Les panneaux de particules WPC à 70% de renfort particulaire présentaient des valeurs de module d'élasticité comparables à celles de panneaux de particules commerciaux. Cela a été atteint à 80% de particules pour la résistance à la flexion (Chaharmahali et al. 2010).

8 Conclusion

Le présent chapitre présente une étude bibliographique sur les fibres naturelles et les bio-composites. Il a été établi que les fibres naturelles peuvent être classées selon leurs natures en trois catégories : Animales, végétales et minérales. La classification la plus courante pour les

fibres végétales est par leur type botanique. Cette dernière classification contient : Les fibres libériennes, les feuilles de fibres, les fibres de graines et de fruits, les fibres de paille, les fibres d'herbes et les fibres de bois.

La plupart des fibres végétales sont composées de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine, de cires et de certains composés hydrosolubles. La structure, la composition chimique, l'angle microfibrillaire et les dimensions des défauts cellulaires sont les variables les plus importantes qui affectent notamment les propriétés physiques et mécaniques des fibres. Généralement, les fibres végétales avec une résistance mécanique plus élevée possèdent une teneur plus élevée en cellulose, un degré plus élevé de polymérisation de la cellulose, une longueur de cellule plus longue et un petit angle de microfibrillaire. Les composites renforcés par des fibres végétales ont reçu beaucoup d'attention dans la littérature en se basant sur les propriétés des fibres elles-mêmes : fibres légères, non abrasives, combustibles, non toxiques, à faible coût et biodégradables, écologique et recyclabilité. Les propriétés mécaniques des matériaux composites basés sur des fibres végétales comme renfort dépendent fortement de la morphologie des fibres, le rapport d'aspect (L/D) des fibres, de la concentration des fibres, des propriétés de la matrice, de la dispersion/distribution de la fibre dans la matrice et de l'adhérence entre la fibre et la matrice.

Chapitre II

**Etat de l'art sur les composites à
base de déchets de palmier
dattier.**

Chapitre II : Etat de l'art sur les composites à base de déchets de palmier dattier

La récolte des dattes et le processus d'élagage saisonnier des palmiers génèrent de grandes quantités de déchets de palmiers accumulés chaque année dans les terres agricoles de différents pays. Ces quantités de déchets de biomasse importantes présentent un intérêt économique potentiel car ce type de déchet peut être considéré comme de nouvelle source de fibres cellulosiques. Ces résidus agricoles des palmiers dattiers, principalement des rachis et des feuilles, peuvent être considérés comme des sources de fibres végétales pour l'élaboration des matériaux composites en répondant à la demande croissante de matériaux renouvelables et biodégradables.

Ainsi, ce chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les déchets de palmiers dattier et leur utilisation comme renfort dans l'élaboration des matériaux composites. En premier lieu, une description générale des palmiers dattiers est donnée notamment pour le cas de l'Algérie. Les déchets générés par le palmier dattier et leur utilisation et applications sont également présentées. La synthèse bibliographique, conduite dans le présent chapitre, met l'accent sur l'importance des propriétés morphologiques, physiques, mécaniques de renfort à base de palmiers dattier utilisé dans l'obtention des composites. Une comparaison de ces propriétés avec les propriétés d'autres fibres végétales de la littérature est également présentée.

1 Palmier dattier

Le palmier dattier a longtemps été l'une des cultures fruitières les plus importantes dans les régions arides de la péninsule arabique, de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Au cours des trois derniers siècles, les dattes ont également été introduites dans de nouvelles zones de production en Australie, en Inde, Pakistan, le Mexique, l'Afrique du Sud, Amérique du Sud et aux États-Unis. La datte est l'une des plus anciennes cultures fruitières connues et a été cultivée en Afrique du Nord et au Moyen-Orient depuis au moins 5000 ans (Chao and Krueger 2007).

Le palmier dattier, monocotylédone pérenne à port arborescent, fut dénommé *Phoenix dactylifera* par Linné en 1753. Cette dénomination découle de la forme des fruits qui se présentent sous forme de doigts (*dactylus* en latin). Il fait partie de la famille des *Arecacea* (*Palmaceae*) qui comprend environ 2600 espèces et qui occupe, parmi les monocotylédones, le

4^{ème} rang après les graminées, les liliacées et les orchidées (El Hadrami et al. 1998). Le genre Phoenix comprend douze espèce dont cinq, en dehors du palmier dattier, sont à fruits consommables : Phoenix atlantica Chev, Phoenix reclinata Jacq, Phoenix farinifera Roxb, Phoenix humilis Royal et Phoenix acoulis Roxb (Saad 2013).

Le dattier occupe actuellement des superficies considérables et comporte environ 100 millions de plants de par le monde (El Hadrami et al. 1998). Chaque arbre peut croître pendant plus de 100 ans (Alawar et al. 2009; AlMaadeed et al. 2012; Alsaeed et al. 2013).

Le palmier dattier est une plante rustique s'adaptant aux régions les plus arides du monde. Il constitue la principale source de vie de la population saharienne (Saad 2013). Les palmeraies les plus importantes étant localisées en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Sa culture fut introduite dans différentes régions (l'Espagne, le Mexique, l'Argentine, l'Australie), et les dattes, principal produit du palmier dattier, font l'objet d'un commerce mondial aux revenus considérables (plus de 183000 tonnes de dattes d'une valeur d'environ 190 millions de dollars sont commercialisées chaque année) (El Hadrami et al. 1998).

Malgré son rôle économique primordial, en tant qu'espèce nourricière et élément structurant dans les cultures en palmeraie, son origine et l'histoire ancienne de son exploitation avaient jusqu'alors fait l'objet de très peu de recherches (Tengberg et al. 2014).

1.1 Variétés des dattes

Les variétés des dattes varient considérablement dans tous les caractères, végétaux et fruits. Ils sont généralement divisés en trois groupes : douce, semi-sèche ou sèche. Les divisions sont certaines, ce qui est arbitraire, car la cohérence de la chair est plus ou moins affectée par les conditions climatiques et les méthodes de manipulations, mais la classification est pratique et largement utilisée.

Dans les quartiers marginaux et dans de nombreux endroits où les dattes sont toutes consommées localement, la plupart des palmiers dattiers sont généralement des semis, mais chacun des pays ou régions les plus importants dans le Vieux Monde a développé ses propres variétés. Il n'y a probablement pas moins de 1000 qui ont été propagés et nommés, mais seulement quelques-uns ont été largement plantés et se trouvent au-delà des localités

D'où ils sont originaires. En Irak, Zahidi, une datte demi-sèche, est la variété la plus largement cultivée, mais les trois dattes douces, Sayer, Halawy et Khadrawy constituent la majeure partie

du fruit exporté du célèbre district de Shatt al Arab. En Égypte, Hayany est la variété la plus cultivée dans le delta du Nil densément peuplé, mais c'est une date très douce qui n'est pas exportée; Le Saily, une date douce, est la variété la plus importante dans le désert libyen. En Algérie et en Tunisie, Deglet Noor, une date semi-sèche, est la seule variété cultivée principalement pour l'exportation. Au Maroc, il y avait autrefois des exportations d'une date de douceur nommé Medjool. Avec toutes ces variétés nommées, Deglet Noor est la principale variété maintenant cultivée et comprend environ 75% de la superficie totale de la date dans ces pays (Algérie et Tunisie). Les dattes séchées, également connues sous le nom de «Bread», bien que populaires parmi les indigènes de l'Ancien Monde, n'ont pas trouvé beaucoup de faveur parmi les consommateurs européens et américains; Une variété, la Thoorie d'Algérie, a été cultivée dans une très large mesure en Californie (Nixon 1951).

1.2 Description

Au cours des siècles, la palmeraie a également fourni un grand nombre des sous-produits qui ont été largement utilisés par l'homme dans tous les aspects de la vie quotidienne. Pratiquement toutes les parties du palmier dattier sont utilisées dans un but qui leur convient le mieux. La figure II.1 montre les principales parties de palmier dattier (Agoudjil et al. 2011) : (a) le tronc de palmier dattier "Palm trunk", (b) les palmes où feuilles "Leaves", (c) les fruit où les dattes "Fruit", (D) le pétiole où cornaf "Petiole", (e) fibrillium où lif "Mesh" et (f) les grappes "Bunches".

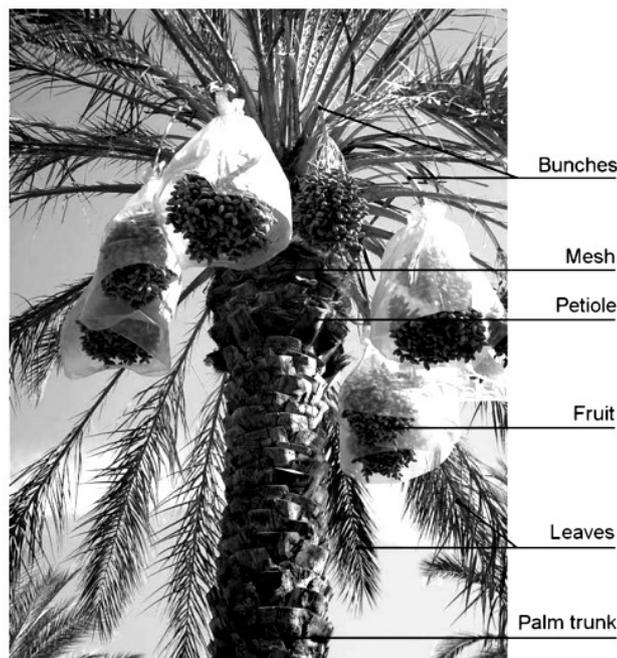


Figure II. 1: Description des principales parties du palmier dattier (Agoudjil et al. 2011).

1.2.1 Le tronc du palmier dattier

Le tronc du palmier dattier "the trunk" peut atteindre 30 à 40 m (Saad 2013). Egalement appelé tige ou stipe, est vertical, cylindrique et en forme de colonne de la même circonférence. La circonférence ne s'accroît pas une fois que la canopée des frondes s'est complètement développée. Il est de couleur brune, lignifié et sans ramification (Figure II.1). Sa circonférence moyenne est d'environ 1 à 1,10 m. Le tronc est composé de faisceaux vasculaires fibreux résistants, cimentés dans une matrice de tissu cellulaire qui est beaucoup lignifiée près de la partie externe du tronc. Étant un monocotylédon, le palmier dattier n'a pas de couche de cambium. Le tronc est couvert pendant plusieurs années avec les bases des anciennes frondes sèches, ce qui la rend grossière, mais avec l'âge, ces bases météorologiques et le coffre devient plus lisse avec des cicatrices visibles de ces bases. La croissance verticale du palmier dattier est assurée par son bourgeon terminal, appelé phyllophor, et sa hauteur pourrait atteindre 20 mètres (Zaid and De Wet 1999).

La croissance horizontale ou latérale est assurée par un cambium extra fasciculaire qui disparaît bientôt et qui aboutit à une largeur de tronc constante et uniforme pendant toute la vie de palmier (Zaid and De Wet 1999).

1.2.2 Le pétiole

Dans la partie centrale, on trouve les pétioles (kornafs) qui constituent les bases pétiolaires du palmier restant collées au stipe après la mort de la feuille (Figure II.2). il se dessèchent à leur extrémité et assurent une protection du tronc. Leur présence permet au grimpage de palmier (Saad 2013). Le pétiole est dur et relativement rigide, il a une largeur de fronde atteint 0,5 m, mais ailleurs elle n'est que la moitié de cette taille et se rétrécit rapidement de la base vers le haut (Saad 2013).



Figure II. 2 : Le pétiole de palmier dattier.

Le pétiole est triangulaire en coupe transversale avec deux angles latéraux et un dorsal. Il est dépourvu d'épines pour une courte distance, mais plein d'épines des deux côtés par la suite (Zaid and De Wet 1999). La ramification est très rare à partir des rejets aériens. Il peut présenter de multiples traces de rétrécissement et d'écrasement des bases pétiolaires, ou kornafs. Ces variations du diamètre sont les témoins de la vie biologique du palmier. Les rétrécissements indiquent les périodes de défaut de nutrition qui ont entraîné un développement réduit du bourgeon terminal. Les augmentations d'écart entre pétioles indiquent les périodes favorables de culture (Saad 2013).

1.2.3 Le fibrillum

Les feuilles de palmier dattier nouvelle sortent d'un tissu tendu qui, lors de la croissance de la feuille, reste à sa base attachée à ses bords latéraux et entourant le tronc de palmier (Barreveld 1993). Entre kornafs, le tronc est recouvert d'un fibrillum (Figure II.3), ce fibrillum est composé de fibres croisées de diamètres différents créent un tapis tissé naturel que l'on appelle lif (Alsaeed et al. 2013; Saad 2013). Traditionnellement, le lif est retiré chaque année des arbres et nettoyé pour faire des cordes (Barreveld 1993; Alawar et al. 2009).

1.2.4 Les feuilles où palmes

Les feuilles sont composées et pennées, elles se trouvent dans la partie terminale du tronc. L'ensemble des palmes vertes formes la couronne du palmier. On distingue : la couronne basale, avec les palmes les plus âgées, la couronne centrale, avec les palmes adultes, et les palmes du cœur, avec les palmes non ouvertes et les palmes n'ayant pas atteint leur taille définitive (Saad 2013). Selon la variété, l'âge de palmier et les conditions environnementales, les feuilles d'un palmier dattier ont une longueur de 3 à 6 m (moyenne de 4 m) et ont une durée de vie normale de 3 à 7 ans. Un palmier dattier adulte a environ 100 à 125 feuilles vertes avec une formation annuelle de 10 à 26 nouvelles feuilles. La valeur fonctionnelle de la feuille de palmier dattier diminue avec l'âge (Zaid and De Wet 1999).



Figure II. 3 : Fibrillum de palmier dattier.

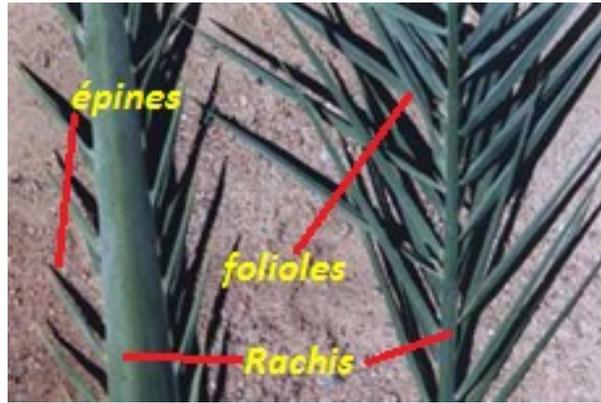


Figure II. 4: Composition d'une palme.

On excluant le pétiole qui fait partie du tronc et du palme on même temps, une palme se compose de rachis, épines, folioles (Figure II.4).

a- Le rachis : est semi-cylindrique et porte les épines et les folioles.

b- Les épines : ils sont des feuilletés spécialisés transformés en épingles pointues, qui peuvent varier de très courtes jusqu'à 20 cm de longueur et de très minces à 1 cm de largeur (Figure II.4) situés à l'extrémité inférieure de rachis (Barreveld 1993), sous forme des trappes de la colonne vertébrale et se transforment progressivement en folioles (Barreveld 1993; Zaid and De Wet 1999). ils ont la fonction évidente de protéger les parties centrales tendres de palmier. Lorsque les feuilles sont récoltées, les épines ont normalement été retirées au cours des pratiques culturelles pour permettre à l'opérateur d'accéder à la partie centrale de l'arbre (Barreveld 1993).

c- Les folioles où feuilletés

Les folioles (Figure II.4) varient en longueur d'environ 15 à 100 cm et de largeur de 1 à 6 cm. Le nombre de folioles sur une feuille peut être compris entre 120 et 240 (Barreveld 1993). La finesse, la rigidité et la couleur des folioles différent selon le cultivar. L'épiderme des folioles est recouvert d'une couche mince cireuse. Cependant, la couleur peut varier avec les conditions de culture (Saad 2013). Les feuilles peuvent être divisées en trois catégories (Zaid and De Wet 1999) :

- À l'extérieur, les feuilles sont vertes et photo synthétiquement actives;
- Au centre, des feuilles vertes à croissance rapide;
- À l'intérieur, au cœur du palmier, feuilles juvéniles, n'es pas encore photo synthétiquement activé, à une couleur blanche.

En moyenne, 40% des feuilles juvéniles, 10% de feuilles à croissance rapide et 50% de feuilles photosynthétiques (Zaid and De Wet 1999).

1.2.5 Organes reproducteurs

Les fleurs mâles, étant les premières à mûrir, et pour une courte période non encore requise pour la pollinisation, sont parfois consommées par le fermier. Les fleurs mâles ont également été utilisées pour distiller un parfum de l'eau Tara. Le pollen aurait été ingéré pour améliorer la fertilité. Ce qui reste après le cycle de reproduction annuel s'est terminé par la récolte des dattes, sont les tiges, les tiges de fruits et les spikelets de l'arbre femelle et quelques tiges et tiges de fleurs des palmes mâles, car celles-ci sont beaucoup moins nombreuses que la femelle de palmier dattier (Barreveld 1993).

a- Spathe

L'inflorescence, également appelée grappe de fleurs, dans ses premiers stades est enfermée dans une couverture/enveloppe dure connue sous le nom de spathe (Figure II.5) qui se divise lorsque les fleurs arrivent à maturité exposant l'inflorescence complète à des fins de pollinisation (Barreveld 1993; Zaid and Arias-Jimenez 1999).

La spathe protège les fleurs délicates de la chaleur intense jusqu'à ce qu'elles soient mûres et prêtes à fonctionner. Le spathe au début est verdâtre, devenant brun quand le fractionnement longitudinal est proche. Les inflorescences masculines sont plus courts et plus longs que les femelles. Chaque spikelet porte un grand nombre de minuscules fleurs jusqu'à 8 000 à 10 000 chez les femmes et plus dans l'inflorescence masculine. Le nombre annuel de spathes nés par un palmier varie de aucun à environ 25 chez les femelles et même plus chez les hommes, mais la moyenne est une douzaine pour les femmes et plus pour les hommes.



Figure II. 5: Les spathes de palmier dattier.

L'inflorescence masculine est encombrée à la fin du rachis, tandis que les branches de l'inflorescence de la grappe femelle sont moins encombrées à la fin du rachis. Lors de l'ouverture, les fleurs féminines montrent une couleur plus jaune tandis que les hommes présentent une poussière de couleur blanche, produite par tremblement (Zaid and Arias-Jimenez 1999).

b- Grappes vides

Sont composés de la tige de fruit concentrée sur une extrémité les spikelets auxquelles les dattes étaient attachées. Avec les épillets coupés dans l'ensemble peut servir de balai simple. Deuxièmement, elle a, comme les autres parties fibreuses de palmier, une valeur de carburant. Ayant dû supporter un poids considérable des dattes de maturation pendant la saison (en effet, dans certains cas, les variétés, les grappes doivent être artificiellement soutenues par crainte de bris), il est raisonnable de constater que les tiges de fruits doivent avoir une résistance à la traction notable. En outre, la fibre est longue, les tiges de fruits sont souvent préférées par rapport à l'autre fibre de palmier (Barreveld 1993).

c- Fruits où les dattes

La date du fruit est une baie unique, oblongue, beau, à une graine, avec un stigmate terminal, un péricarpe charnu et une endocarpe membranaire (entre la graine et la chair). Selon la variété, les conditions environnementales et les soins techniques donnés (fertilisation, pollinisation, éclaircie, ...), les caractéristiques des fruits varient énormément, le tableau II.1 illustre cette variation (Zaid and Arias-Jimenez 1999)

d- Graine où noyau

Comme pour le fruit, les caractéristiques des graines varient en fonction de la variété, de l'environnement et des conditions de croissance. Le poids d'une graine pourrait aller de moins de 0,5 g à environ 4 g, d'une longueur d'environ 12 à 36 mm et d'une largeur de 6 à 13 mm. La graine est habituellement oblongue, rainurée ventriculaire, avec un petit embryon (Zaid and Arias-Jimenez 1999). Le poids des graines est de 18,34 % des dattes frais (Nehdi et al. 2010).

Tableau II. 1: Caractéristiques des dattes.

	Poids (g)	Longueur (mm)	Largueur (mm)	Couleur
Gamme de variation	2 à 60	18 à 110	8 à 32	Grande variation (jaune à noir)

1.3 Le palmier dattier en Algérie

La cultivar de palmier dattier s'étend depuis la frontière Marocaine à l'ouest jusqu'à la frontière tuniso-lybienne à l'est et depuis l'Atlas Saharien au nord jusqu'à Reggane (sud-ouest), Tamanrasset (centre) et Djanet (sud-est) (Bouguedoura et al. 2010).

La culture de la palmeraie de datte demeure le pivot de l'écosystème du désert qui occupe près de 80% de la surface totale de l'Algérie (El-Juhany 2010), établi en plusieurs oasis réparties sur le Sud du pays où le climat est chaud et sec (zone saharienne), localisées dans les zones de la partie sud-est du pays (Biskra, El-Oued, Ouargla, Ghardaïa et Adrar)(Touloum et al. 2016).

L'Algérie est un pays sphoenicicole classé au sixième rang mondial et au premier rang dans le Maghreb pour ses grandes étendues de culture avec 169361 ha et plus de 2 millions de jardins, 18,7 millions de palmiers et sa production annuelle moyenne de dattes de 500000 tonnes soit 7,09% de la production mondiale totale (Bouguedoura et al. 2010; El-Juhany 2010; Touloum et al. 2016). En 2015, cette production est passée à 960 784 tonnes, les prévisions, pour 2019 sont estimées à 1 256 855 tonnes (Meradi et al. 2016). Les pratiques agricoles modernes aient contribué un rôle important pour accroître la production, l'expansion des terres agricoles et l'utilisation des ressources naturelles (Al-Khayri et al. 2015).

Les palmeraies algériennes disposent de près de 45% du cultivar Deglet Nour (Bouguedoura et al., 2008) ce qui classe l'Algérie comme deuxième producteur mondial de cette variété (1 million de palmiers) (El-Juhany 2010).

1.4 Déchets du palmier dattier

Avec une inquiétude croissante concernant l'épuisement des ressources fossiles et les risques environnementaux causés par leur utilisation excessive, on s'attend à ce que le monde se dirige vers des sources naturelles renouvelables telles que les ressources en biomasse. Les fibres naturelles comme renforcement ont un grand intérêt pour les nouvelles technologies qui traitent de l'aspect environnemental (Almi et al. 2015).

Récemment, les développements technologiques modernes et les communications améliorées ont influencé l'utilisation des produits dattiers (hors dates) (Agoudjil et al. 2011).

Les résidus de palmiers dattiers sont l'une des sources intéressantes des fibres naturelles car elles sont renouvelables et abondamment disponibles. Selon Almi et al. (Almi et al. 2015), le

palmier fournit huit types de résidus (Tronc, pétiole, febrilium, rachis, épines, feuillets, Spathe, grappes), dont on peut ajouté aussi les grains de dattes comme neuvième résidu. Ses résidus sont collectés à partir du processus d'élagage saisonnier comme une pratique agricole essentielle.

En effet, les feuilles de palmier datées sont l'une des sources naturelles importantes de fibres où les applications ont été étendues à presque tous les champs. D'autre part, le palmier dattier est considéré comme une source de matières premières à des limites industrielles (Agoudjil et al. 2011).

Le palmier dattier à une grande importance socioéconomique, en particulier en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Ces pays représentent 62 millions des 105 millions d'arbres disponibles dans le monde entier sur une superficie de plus d'un million d'hectares. Ces «arbres» sont cultivés non seulement pour leurs fruits précieux (dattes), mais aussi pour produire du carburant, du bois et des abris pour les cultures terrestres. La production des dattes est d'environ 6,5 millions de tonnes métriques dans le monde et génère une activité commerciale importante (El Hadrami and El Hadrami 2009).

Dans le monde, 1,5 millions de tonnes par an de déchets de palmier dattier sont abandonnés, 125000 tonnes (8,33 %) pour l'Algérie sont à considérer (Meradi et al. 2016).

Aujourd'hui, la production mondiale, l'utilisation et l'industrialisation des dattes ne cessent d'augmenter et selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) la production des dattes est à la hausse, comme enregistrée pour certains pays producteurs comme l'Egypte (1,352,950 tonnes métriques), Arabie Saoudite (1 078 300 tonnes), Iran (1 023 130 tonnes), Émirats arabes unis (775 000 tonnes) et Algérie (710 000 tonnes) (Chandrasekaran and Bahkali 2013).

Une enquête menée auprès des agriculteurs et des organisations agricoles dans la région de Biskra (Algérie) ont estimés qu'environ 47,57 kg de résidus par palmier sont obtenus chaque année. Cette quantité de résidus est constituée de 28,7% de feuilles, 27% de Rachis, 23,9% de pétioles, 6,3% de Fibrillium, 5% de Spathes, 4,9% de Bunches, 3,3% de pédicelles et 0,8% d'épines (Almi et al. 2015). Selon la direction des services agricoles de la région de Biskra, le nombre de palmiers dépasse 15 millions en Algérie, la décennie dernière (figure II.6). Ce nombre augmente chaque année et permet de dégager une énorme quantité de biomasse qui augmente chaque année (Almi et al. 2015).

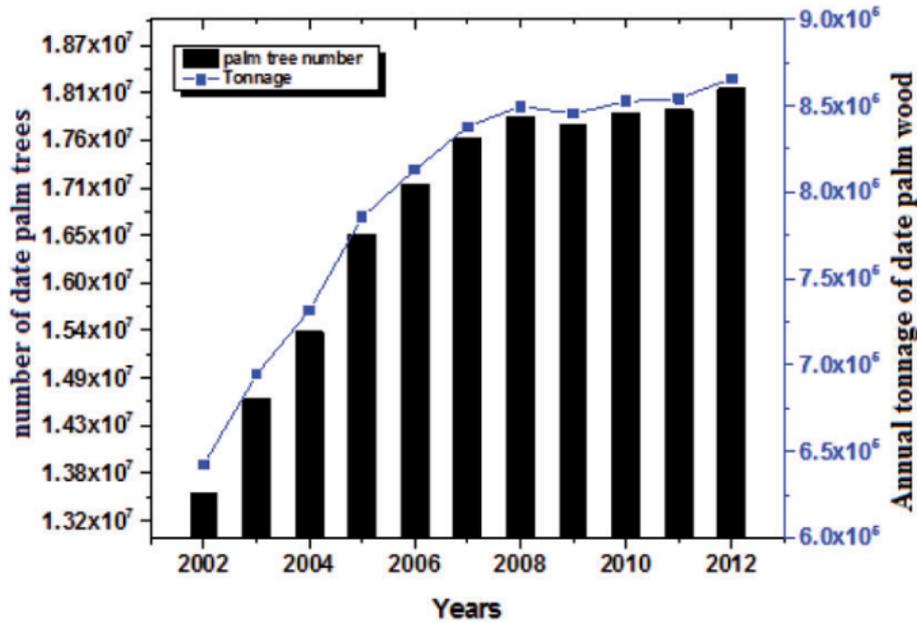


Figure II. 6: Estimation annuel de nombre et du tonnage des déchets de palmiers dattiers en Algérie (Almi et al. 2015).

Sur le plan quantitatif (Tableau II.2), les déchets de palmier dattier dans la région des Oasis (Biskra) constituent un tonnage non négligeable, qui représente 25% de la production annuelle en Algérie, et 20% en Tunisie. Au niveau de la wilaya de Biskra, de 2007 à 2013 il y a, en moyenne, 64×10^4 tonnes de rebuts de dattes par an et 12.71×10^4 tonnes par an de pédocelles, 867×10^4 tonnes de palmes (feuilles) sèches par an (Meradi et al. 2016) dont 335 000 t/an de déchets pétiole et rachis non valorisés (Touloum et al. 2016).

En fait, cette ressource naturelle n'est pas suffisamment exploitée autant que beaucoup d'autres fibres naturelles telles que les fibres de jute, lin, ramie, chanvre et de flocons, dont leur utilisation comme renforcement s'effectue dans plusieurs applications industrielles. Malgré les multiples études sur son utilisation comme renforcement composite, le palmier dattier n'est pas encore utilisé de manière adéquate dans l'industrie (Almi et al. 2015).

Tableau II. 2: Estimation annuel du déchet de palmier dattier à Biskra (Algérie) (Meradi et al. 2016).

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Moyenne
Production des dattes Tonnes* 10^4	173	186	220	220	291	321	377	255
Nombre de palmiers dattiers* 10^4	412	413	413	414	421	424	421	417
Palmes sèches Tonnes* 10^4	55	55	55	55	56	57	56	56
Pédocelles de dattes* 10^4	31	34	4	4	5	5	6	13
Déchets de date* 10^4	43	46	55	55	72	80	94	64

1.5 Utilisation des déchets de palmier dattier

Les sous produits du palmier dattier sont nombreux et peuvent être utilisés par les cultivateurs dans diverses applications comme l'artisanat, la construction ou la production d'énergie (Sbiai 2011).

1.5.1 Utilisation traditionnelle

Par la suite, un résumé sur l'utilisation traditionnelle des sous produits de palmier dattier donnée par (Barreveld 1993).

1.5.1.1 Le tronc

Le tronc ou la tige devient disponible lors d'une mort naturelle ou accidentelle de palmier ou par un retrait forcé. Le tronc est utilisé comme des poteaux, des poutres, des chevrons, des linteaux, des poutres, des piliers, des jetées et des ponts légers. Pour cela, ils peuvent être utilisés entiers ou divisés en deux ou demi. Les demi-troncs creusés sont utilisés comme conduits pour l'eau, ou à des longueurs plus courtes pour les mangeurs et les creux. Sciés dans des planches grossières, ils sont transformés en portes, volets et escaliers pour maisons...etc. Enfin, les troncs sont également utilisés comme bois de chauffage (Barreveld 1993).

1.5.1.2 Les feuilles

Les feuilles offrent les possibilités d'utilisation finale les plus variées qui sont discutées par les parties individuelles dans lesquelles la feuille peut être divisée:

a) La feuille dans son ensemble

les feuilles entières sont utilisées dans les clôtures en les fixant dans le sol et en les tenant avec deux ou trois couches de corde faites par feuillets, ou dans le cloisonnement dans les maisons et les enclos de terrasses offrant une intimité mais en gardant une certaine ventilation. Les feuilles sont également utilisées comme toiture pour donner de l'ombre. Lorsque la boue est utilisée dans la construction de la maison, les feuilles peuvent être posées sur les poutres du plafond (faites du tronc) dans un lit épais sur lequel une couche de boue est versée pour former le premier plancher ou le toit (Barreveld 1993).

b) Pétiole

Les pétioles ont été utilisées pour aligner les parois des puits ouverts lorsque la brique habituelle ou la pierre ne sont pas disponibles. Ils ont été utilisés par les pêcheurs pour flotter leurs filets. La base peut être divisée et battue avec la masse de fibres résultante utilisée comme

balai à main. Avec un peu plus longtemps, la base de la feuille a été utilisée comme batte pour densifier les parois de la boue par le maçon. Comme d'autres parties fibreuses de palmier, les pétioles sont particulièrement adaptées comme carburant.

c) Le rachis

L'utilisation la plus répandue de la nervure centrale où rachis est la fabrication de caisses, mais aussi de meubles. Par exemple des simples caisses à fruits, des cages à oiseaux et des poulaillers à des cages jumelles à double pont, parfois avec des portes coulissantes. L'art de la fabrication des caisses s'est étendu à d'autres produits domestiques comme les planches à transporter, les porte-bouteilles et les meubles, en particulier les chaises et les lits. (Barreveld 1993).

d) Les folioles où feuillets

Les feuillets sont principalement utilisés dans les tresses qui sont cousues ensemble dans un large éventail de paniers et sacs, mais aussi des tapis et des articles plus petits comme les fans et les chapeaux. On peut aussi fabriquer des paniers ou des sacs plus étroits et plus robustes. Pour les produits les plus raffinés, on utilise des feuilles fraîches provenant de leur couverture de protection sur la feuille et offrent une fibre moins fragile, mais la fourniture de ces fibres est limitée. À côté du panier de date, le panier de transport est un instrument le plus commun à la fois pour des utilisations privées et professionnelles. Outre les produits tissés, des brochures sont également utilisées pour fabriquer un cordon utilisé, par exemple, pour attacher des faisceaux de matériel de pépinière ou d'autres travaux de fixation temporaire dans l'horticulture.

e) Les épines

Ils peuvent être utilisés dans la fabrication de trappes et, évidemment, des cure-dents ou d'autres utilisations où un instrument pointu est nécessaire. Aucune référence n'a été trouvée que l'épine soit utilisée comme une aiguille à coudre dans la fabrication de panier, ce qui rendrait vraiment la feuille entièrement autonome dans l'obtention de matériaux d'emballage pour ses propres produits.

1.5.2 Utilisation actuelle

Bien que ces déchets agricoles soient composés de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et d'autres composés qui pourraient être utilisés dans de nombreux processus biologiques, ils ont été brûlés dans les fermes, causant une grave menace pour l'environnement. Bien que

plusieurs chercheurs aient étudié la culture de palmier dattier, leur utilisation et leur portée pour utiliser les dattes dans les applications thérapeutiques, les revues disponibles dans la littérature sont plutôt limitées à la chimie et à la pharmacologie, à la composition phytochimique, à la signification nutritionnelle et les bénéfices potentiels pour la santé de la consommation des dattes (Chandrasekaran and Bahkali 2013). Au cours des dernières années, un certain nombre de chercheurs ont participé à l'étude de l'exploitation des fibres naturelles en tant que constituants portant des matériaux composites (John and Thomas 2008).

En général, ce qui est vrai pour le bois est également vrai pour d'autres matériaux lignocellulosiques bien qu'ils puissent différer en composition chimique et morphologie matricielle, en effet, les fibres naturelles sont disponibles sous différentes formes et produisent différentes propriétés lorsqu'elles sont ajoutées aux thermoplastiques. Contrairement aux fibres naturelles ces dernières années, l'utilisation de la farine de bois, la charge dérivée du bois la plus courante pour les thermoplastiques, dans la fabrication de composites bois-plastique a été d'un grand intérêt à de nombreux chercheurs. (Mirmehdi et al. 2014).

2 Fibres de palmiers dattiers

2.1 Introduction

Une fois que les fruits de palmiers sont récoltés, de grandes quantités de rachis et des déchets de feuilles accumulés chaque année dans les terres agricoles de différents pays. Ces quantités de déchets de biomasse importants et précieux présentent un intérêt potentiel pour les différents pays car ils peuvent être considérés comme de nouvelles sources de fibres cellulosiques. Ainsi, des moyens novateurs de valoriser cette abondante ressource renouvelable devraient être trouvés. L'une de ces idées consiste à utiliser des fibres naturelles dans des composites adaptées à différentes applications industrielles. Cela peut être une façon de répondre à la demande croissante de matériaux renouvelables et biodégradables. Par conséquent, les résidus agricoles des palmiers dattiers principalement des rachis et des feuilles peuvent être considérés comme des sources de fibres renforçantes pour les matrices polymères en composite. La compétitivité des feuilles de palmier dattiers dans la formation de composites naturels adaptés aux applications industrielles automobiles a été démontrée. D'autre part, plusieurs études ont prouvé que les feuilles de palmier dattiers ont le potentiel

d'être un agent efficace dans les matériaux thermoplastiques et thermodurcissables pour être utilisés dans différentes applications industrielles (AL-Oqila et al. 2014).

2.2 Morphologie de fibre de palmier dattier

Dans la littérature, des études sont réalisées pour comprendre la morphologie des fibres de palmier dattier.

La figure II.7 est une image MEB d'un échantillon prélevé sur la partie pétiolaire du bois de palmier dattier par Touloum et al. (Touloum et al. 2016). Il est rapporté par Touloum et al. (Touloum et al. 2016) que le pétiole contient une surface poreuse constituée d'un ensemble de différentes formes de fibres dispersées dans une matrice constituée principalement d'hémicelluloses et de lignine. Ainsi que les fibres denses, petits périmètres, soutiennent la structure du pétiole et agissent comme des fibres de soutien. La morphologie de ce type de fibre est rapportée dans les travaux (Agoudjil et al. 2011). Ces fibres consistent en un assemblage de fibrilles, la partie centrale de chaque fibrille, appelée la lumen, est creuse. Les fibres les moins denses consistent en un faisceau de fibrilles et quelques lumens de volume plus important. Cela donne au bois de dattier une très faible densité apparente.

Les figures II.8 montrent trois images MEB d'une fibre d'un échantillon de pétiole de la variété Deglet Nour. La figure II.8-a montre la surface rugueuse constituée essentiellement de lignine, une surface typique pour la plupart des fibres naturelles. La même observation a été trouvée sur plusieurs fibres de différentes parties de palmier dattiers étudiés par Almi et al. (Almi et al. 2016).

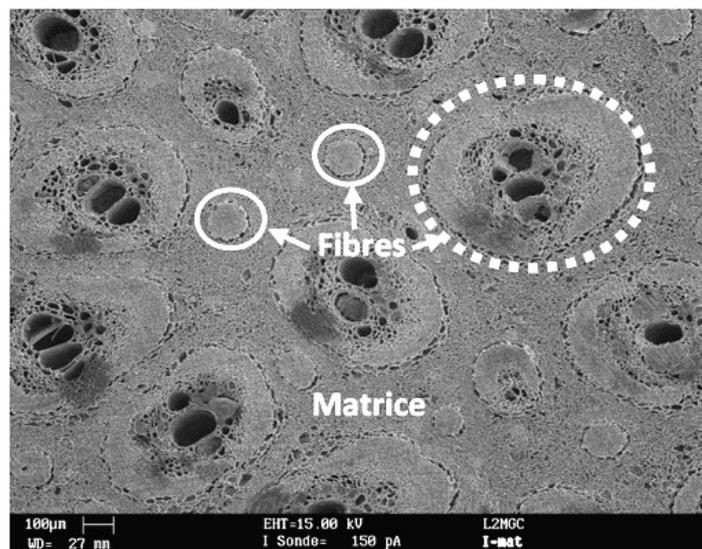


Figure II. 7: Image MEB du composite original obtenu à partir de la partie pétiolaire (Touloum et al. 2016).

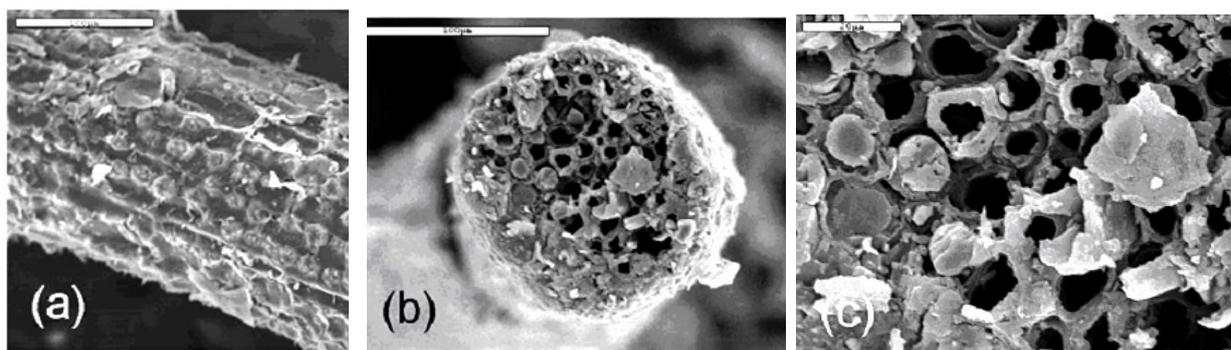


Figure II. 8: Images MEB d'une fibre de pétiole (variété Deglet-Nour), échelle (a) et (b) 100 μ m et (c) 20 μ m (Agoudjil et al. 2011).

Selon Agoudjil et al. (Agoudjil et al. 2011), chaque fibre est constituée d'un assemblage de fibrilles. La partie centrale de chaque fibrille, appelée lumen, est creuse (figure II.8-b et c). Il a été rapporté par Almi et al. (Almi 2018) que la présence de cellules dans la structure du bois assure une grande porosité qui peut influencer sa conductivité thermique.

Dans d'autres travaux, les mêmes études morphologiques sont réalisées sur les fibres de palmiers dattier par Alsaeed et al. (AlMaadeed et al. 2013; Alsaeed et al. 2013). L'état morphologique de la fibre non traitée et traitée a été effectué ou l'effet de traitement avec le NaOH est considéré (Alsaeed et al. 2013). La figure II.9 représente la micrographie de la fibre de palmier dattier non traitée. D'après la figure II.9, Alsaeed et al. (Alsaeed et al. 2013) ont observés une couche recouvre la fibres (couche cireuse) et que cette couche peut aggraver l'adhérence inter-faciale de la fibre avec la matrice (Alsaeed et al. 2013).

Dans d'autre étude de (AlMaadeed et al. 2013) le type de palmier male ou femelle est pris en considération. Les photographies au microscope électronique à balayage des feuilles mâles et femelles non traitées sont représentées sur la figure II.10.

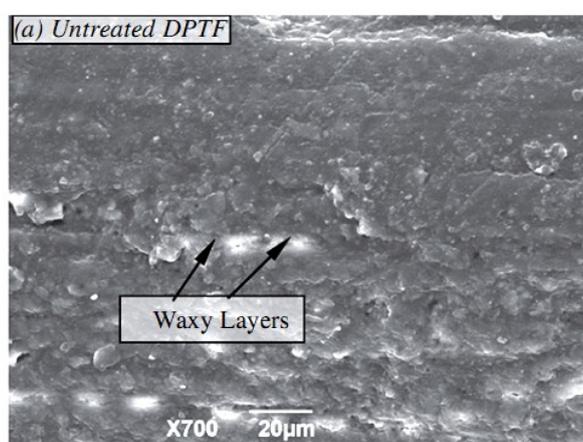


Figure II. 9: Micrographie d'une fibre de palmier dattier traitée (Alsaeed et al. 2013).

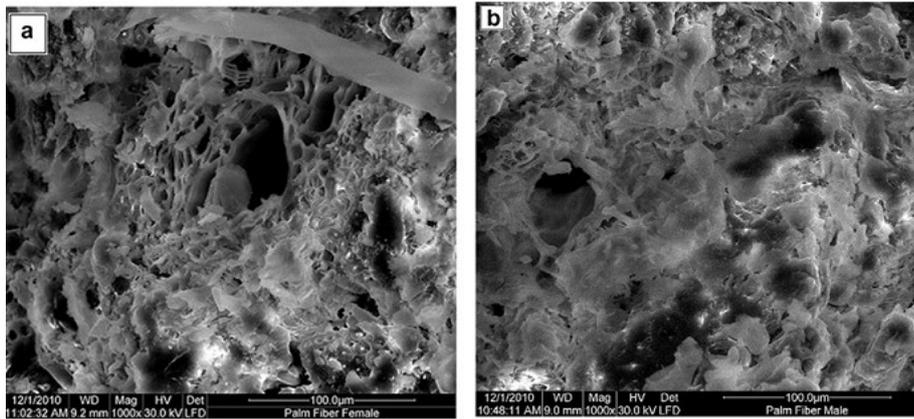


Figure II. 10: Photographies MEB des feuilles : (a) femelle (b)male (AlMaadeed et al. 2013).

Les photos de la coupe transversale des deux feuilles montrent que ces feuilles ont des structures multicellulaires. Ces structures cellulaires sont entourées et cimentées avec de la lignine et de l'hémicellulose. Une couche blanche est observée sur la feuille, ce qui peut être dû au composant hémicellulose. De plus, les feuilles femelles non traitées ont plus de pores que les feuilles mâles (AlMaadeed et al. 2013).

Par conséquent, il est recommandé d'enlever les substances (cire, lignin,...) par un traitement chimique tel que NaOH et alkali pour améliorer l'adhérence fibre-matrice.

Les figures II.11-b et c montrent les photographies au microscope électronique à balayage des fibres de palmier dattier traité par le NaOH avec différentes concentrations. D'après les résultats obtenus il est reporté par Alsaeed et al. (Alsaeed et al. 2013) que le traitement au NaOH élimine une partie de la couche cireuse en fonction de la concentration en NaOH.

Les figures II.12 montrent la morphologie des fibres de palmier dattier après un traitement avec différentes concentrations d'alcalin. Il été rapporté par AlMaadeed et al. (AlMaadeed et al. 2013) que la couche blanche observé dans les fibres non traité diminue par le traitement avec l'alcalin.

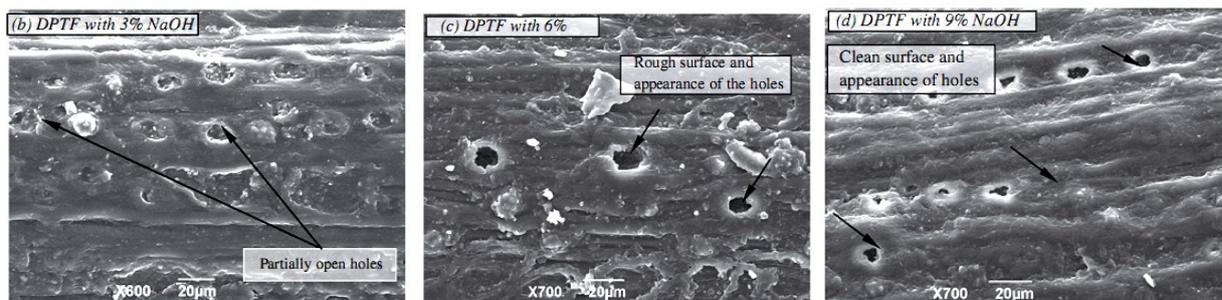


Figure II. 11: Fibre de palmiers dattiers traités avec différentes concentrations de NaOH (Alsaeed et al. 2013).

Une autre comparaison entre les images SEM des feuilles mâles et femelles traitées est effectuée, où il a été observé que les feuilles femelles ont plus de pores que les feuilles mâles. Les résultats présentés ont montré que le traitement alcalin réduisait la teneur en vides dans les feuilles mâles. On voit qu'après traitement alcalin, la surface des feuilles devient rugueuse en raison de l'élimination de la lignine, de l'hémicellulose et des substances cireuses. Cette surface rugueuse est bonne pour l'adhésion de la matrice dans les composites si mélangé avec des polymères (AlMaadeed et al. 2013).

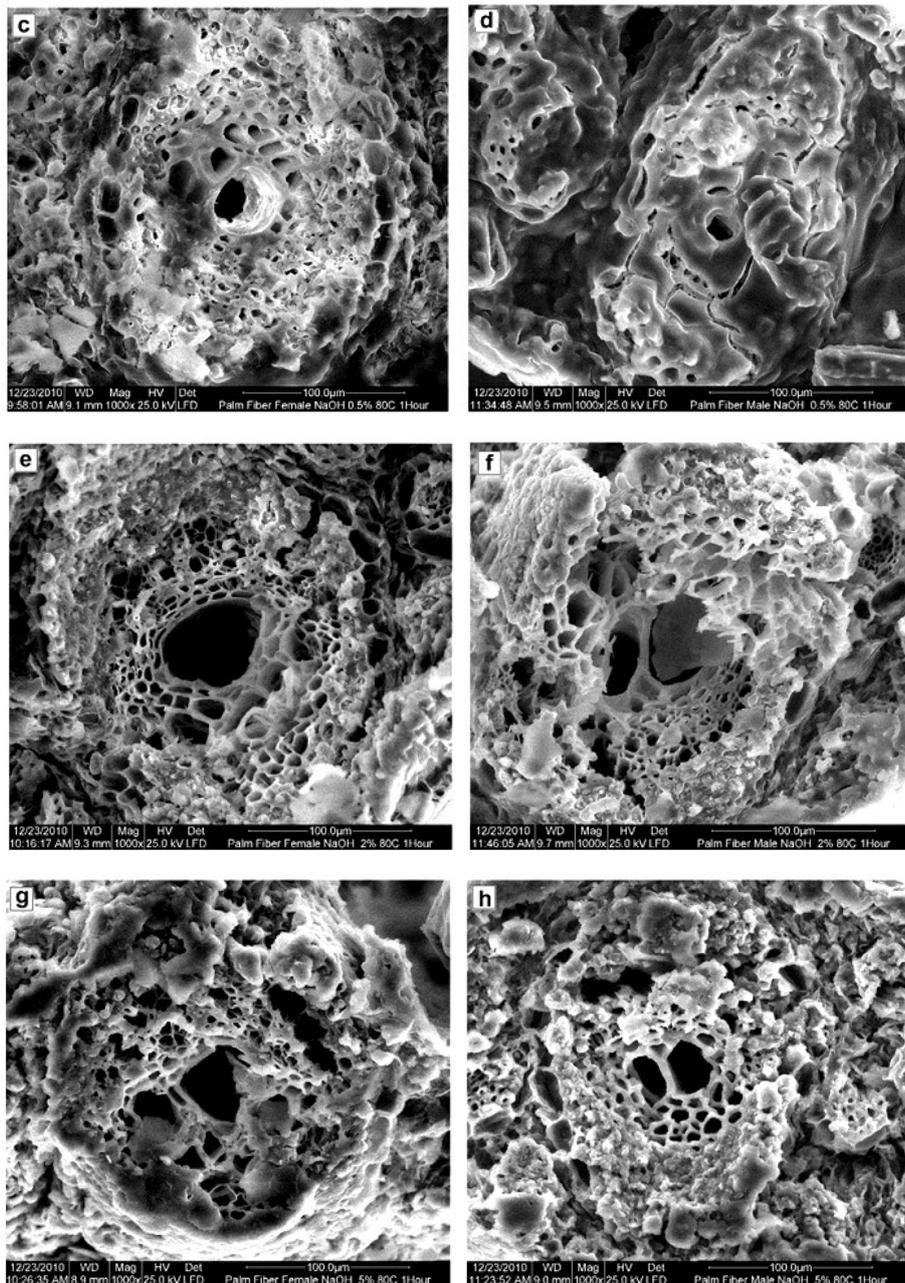


Figure II. 12: Photographie par MEB des sections de fibres de palmiers dattiers : (c) traité 0.5% NaOH femelle, (d) traité 0.5% NaOH male, (e) traité 2% NaOH femelle, (f) traité 2% NaOH male, (g) traité 5% NaOH femelle, (h) traité 5% NaOH male (AlMaadeed et al. 2013).

2.3 Composition chimique

On sait que la composition chimique des fibres naturelles est primordiale pour déterminer leur adéquation à différentes applications industrielles. C'est-à-dire que plusieurs caractéristiques de ces composites, comme la dégradabilité et la recyclabilité, la résistance aux intempéries, les champignons, etc. dépendent fortement de la composition chimique de la fibre. En fait, une variation de la qualité de la fibre peut être obtenue pour le même type de fibre en raison de plusieurs facteurs. Certains de ces facteurs sont : la qualité du sol, la fixation de la plante, les conditions météorologiques, la variété des cultures, la fertilisation, le climat et le temps de récolte. En outre, les méthodes de traitement de l'extraction, traitement des surfaces des fibres et les processus de séchage, affecteront également la qualité des fibres naturelles.

Par conséquent, les différences de propriétés chimiques et physiques de la fibre naturelle peuvent être trouvées dans la littérature (Al-Khanbashi et al. 2005; Sbiai et al. 2010; Mirmehdi et al. 2014; Almi et al. 2015).

La cellulose et la lignine sont les composants structurels les plus importants dans de nombreuses fibres naturelles. La cellulose est résistante à l'hydrolyse, aux alcalis forts et aux agents oxydants, elle est dégradable dans une certaine mesure lorsqu'elle est exposée à des traitements chimiques. La lignine est un polymère hydrocarboné complexe. Elle donne habituellement de la rigidité à la plante et aide au transport de l'eau. Elle est hydrophobe, résiste à la plupart des attaques de microorganismes ainsi qu'à l'hydrolyse acide, elle est généralement soluble dans un alcali chaud, facilement oxydé et facilement condensable avec du phénol. La nature de la cellulose et sa cristallinité peuvent déterminer l'efficacité des fibres naturelles comme renfort (AL-Oqla et al. 2014). Les tableaux II.3 et II.4 récapitulent la composition chimique de différents types de fibre de palmier dattier et de d'autres différents types de fibre ligno-cellulosique respectivement.

Tableau II. 3: Composition chimique de différences types de fibres de palmiers dattiers.

Constituants	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Cendre	Extractives	Cire	
Feuillets	40.21	12.8	32.2	10.54	4.25		(Mirmehdi et al. 2014)
	35	28	27				(Sbiai et al. 2010)
	38.58	20.05	28.57	2.62	9.56		(Almi et al. 2015)
	29.7±1.3	23.3±1.2	11.6±1.3	9.2±0.4	24.3±0.2	6.8±0.7	(Saadaoui et al. 2013)
Rachis	38.26	28.17	22.53	5.96	5.08		(Mirmehdi et al. 2014)
	41.42	19.35	33	4.0	7.68		(Almi et al. 2015)ALMI
	39.8±0.9	31.4±3.2	14.0±0.9	9.2±0.1	16.8±0.3	1.0±0.2	(Saadaoui et al. 2013)
Pétiole	46	18	20				(Al-Khanbashi et al. 2005)
	33.79	20.44	26.03	3.7	13.86		(Almi et al. 2015)
Lif (fibrilium)	50.6±1.3	8.1±0.3	31.9±1.3	6.8±0.2	9.7±1.5	0.4±0.1	(Saadaoui et al. 2013)

Tableau II. 4: Composition chimique de différences types de fibres ligno-cellulosiques.

Constituants	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Cendre	Extractives	Cire	
Lin (Flax)	71	18.6-20.6	2.2			0.3	(Bismarck et al. 2005; Li et al. 2007)
	43-47	16	21-23				(Sbiai et al. 2010)
Chanvre (Hemp)	70-74	17.9-22.4	3.7-5.7			0.8	(Bismarck et al. 2005)
	57-77	14-22.4	3.7-13	0.8			(Li et al. 2007)
Jute	61-71.5	13.6-20.4	12-13			0.5	(Bismarck et al. 2005)
	45-71.5	13.6-21	12-26	0.5-2			(Li et al. 2007)
	45-53	15	21-26				(Sbiai et al. 2010)
Kenaf	45-57	21.5	8-13				(Bismarck et al. 2005)
	31-57	21.5-23	15-19	2-5			(Li et al. 2007)
	31-39	19	15-19				(Sbiai et al. 2010)
Banane	63-64	10	5				(Bismarck et al. 2005)
	15,7-24,84	25,65- 31.48	14.98- 17.04	7.02- 8.65	4.46- 9.84		(Pacheco-Torgal and Jalali 2011)
Abaca	56-63	-	12-13				(Bismarck et al. 2005)
	56-63	15-17	7-9	3			(Li et al. 2007)
	60,8	20	8,8				(Sbiai et al. 2010)
Coconut (Coir)	32-43	0.15-0.25	40-45				(Bismarck et al. 2005)
	29,7-46,48	21,46-31,05	19,22	1,74	8,39		(Pacheco-Torgal and Jalali 2011)
Sisal	78	10	8	1	/	2	(Jacob et al. 2004)
	60-75.2	10-16.5	7.6-12				(Siqueira, Bras et al. 2010)
	66-78	10-14	10-14			2	(Bismarck et al. 2005)
huile de Palmier	65	-	19	2	/	/	(Jacob, Thomas et al. 2004)
	60-65	-	11-19	-	-	-	(Bismarck et al. 2005)
Ramie	68.6-85.0	3.0-13.1	0.5-0.6				(Siqueira, Bras et al. 2010)
	68.6-76.2	13.1-16.7	0.6-0.7			0.3	(Bismarck et al. 2005)
	68.6-91	5-16.7	0.6-0.7				(Li et al. 2007)
Cotton	82-7-90.0	5.7-6.0	-				(Siqueira, Bras et al. 2010)
	85-90	5.7	-			0.6	(Bismarck et al. 2005)
Hardwood	40.0-45.0	32.0-33.0	17.0-26.0				(Siqueira, Bras et al. 2010)
Paille de Céréale	38-45	15-31	12-20				(Bismarck et al. 2005)
	28-36	0-27	12-21				(Sbiai et al. 2010)

La composition chimique de huit types de bois de palmier dattier a été donnée dans l'étude de Almi et al. (Almi et al. 2015). La figure II.13 montre qu'il n'y a pas des différences significatives entre les échantillons sur le contenu de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine (Almi et al. 2015).

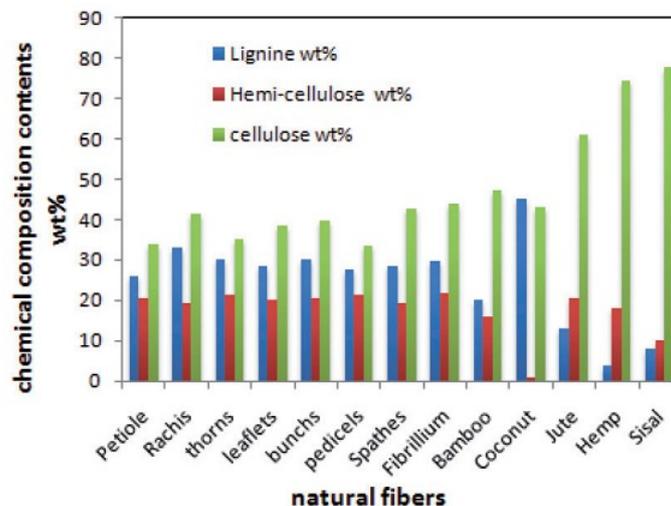


Figure II. 13: Comparaison de la composition chimique des fibres de palmiers dattiers avec d'autres fibres ligno-cellulosiques (Almi et al. 2015).

La cellulose est le premier constituant des fibres du palmier dattier, elle est entre 23,97% et 82,28% d'une moyenne de 54,61%. Ce pourcentage est comparable à celui des fibres péri-libériennes (lin, kéraf, jute) et les fibres de feuille (Abaca et Sisal), et il est supérieur au autre types de fibres (Paille, canne et d'herbe).

La lignine représente le deuxième constituant majoritaire dans les fibres de palmier dattier, qui n'est pas les cas dans les fibres des autres plantes. Les fibres de palmier dattier sont très riches en lignine, sa quantité varie de 26,04% à 33% avec une moyenne de 28,92%. En général, la quantité de la lignine dans les fibres de palmier dattier est plus grande que les autres types de fibres en excluant les fibres de bambou et fibre de jute. Néanmoins, on peut noter que la teneur en lignine chez Rachis est relativement élevée par rapport au contenu de lignine dans les autres échantillons.

Contrairement aux autres fibres naturelles où l'hémicellulose est le deuxième constituant principal des fibres naturelles, l'hémicellulose est le troisième constituant des fibres de palmiers dattier. La quantité d'hémicellulose varie de 19,10% à 21,68% avec une moyenne de 20,45%. En général, cette quantité est proche de la quantité hémicellulose de fibres de Kéraf, abaca et fibre de sucre.

A partir de cette comparaison (Tableau II.3 et II.4, Figure II.13), on constate que les fibres de palmiers dattiers sont compétitives d'être un potentiel comme renfort dans les composites à fibres naturelles.

2.4 Propriétés physiques et mécaniques

2.4.1 Propriétés physiques

Les propriétés physiques des fibres naturelles sont essentielles pour déterminer leur adéquation aux différentes applications industrielles ainsi qu'aux composites de fibres naturelles. La longueur, le diamètre et la densité de la fibre ainsi que le rapport d'aspect (L/D), la conductivité thermique, le coût et la disponibilité sont considérés comme des critères et des propriétés clés qui peuvent déterminer l'utilisation potentielle de tout type de fibre naturelle dans différentes applications industrielles. La fibre de palmier dattier peut être considérée comme l'un des types naturels les plus disponibles par rapport à d'autres fibres naturelles utilisées dans les composites polymères pour l'industrie automobile (AL-Oqila et al. 2014).

2.4.1.1 Densité

Cette propriété est l'une des caractéristiques les plus recherchées des fibres naturelles car elle permet non seulement de réduire le poids, mais rend également les fibres naturelles compétitives par rapport aux fibres synthétiques. Al-Oqla et al. (Al-Oqla and Sapuan 2014) ont effectués une comparaison entre la fibre de palmier dattier et les fibres de coco, chanvre et sisal concernant la propriété de densité (Figure II.14).

Cette comparaison était basée sur des valeurs moyennes rapportées dans la littérature. D'après ces résultats on peut remarquer que la fibre de palmier dattier a la plus faible valeur de densité. Cela signifie que la fibre de palmier dattier est très compétitive pour tous ces types de fibres, qui conduit a des composites de plus faible poids, ce qui la rend très appropriée à l'industrie automobile (Al-Oqla and Sapuan 2014).

Almi et al. (Almi et al. 2015) ont effectués des études sur huit variétés de bois de palmier dattier. Le tableau II.5 présente les propriétés physiques obtenues des ces huit variétés de bois de palmier dattier. On peut remarquer que les rachis et les grappes ont des valeurs de densité plus élevées par rapport aux autres types examinés. Selon la classification du bois signalée dans la littérature, les rachis et les grappes sont considérés comme du bois léger de 500 à 650 kg/m³. Alors que le pétiole, le lif, la spathe, les palmes, les pédicelles et les épines, sont classés comme de bois très léger (<500 kg/m³), ce qui les rend douces et faciles à manipuler. La légèreté du bois des palmiers est remarquable par rapport aux autres fibres de renfort. D'une part, c'est un avantage pour réduire la consommation industrielle. D'autre part, elle influe sur d'autres propriétés et, par conséquent, influe sur son traitement et son utilisation (Almi et al. 2015).

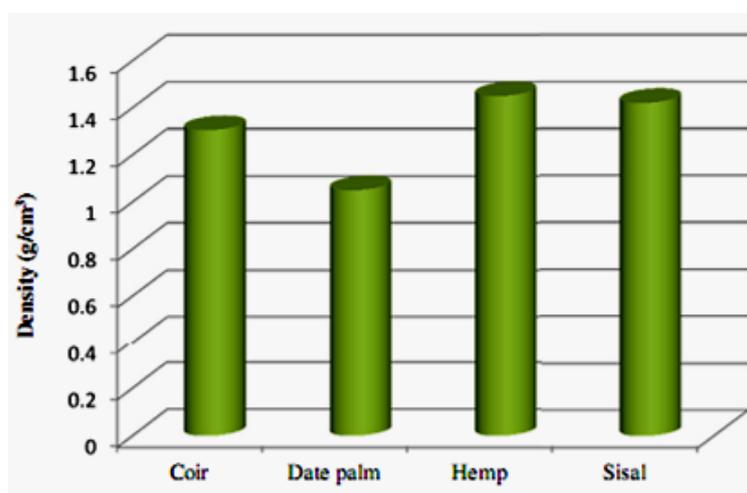


Figure II. 14: Comparaison de la densité des fibres de palmier dattier avec d'autres fibres naturelle (Al-Oqla and Sapuan 2014).

Tableau II. 5: Propriétés physiques des fibres de palmier dattier (Almi et al. 2015).

Property	Petiole	Rachis	Thorns	Leaflets	Bunch	Pedicels	Spathe	Fibrillum
Bulk density (kg/m ³)	160 ± 54	635 ± 22.8	431 ± 39.8	411 ± 41.4	555 ± 11.8	425 ± 23.6	328 ± 42.4	209 ± 31.7
Absolute density (kg/m ³)	866 ± 20.5	751 ± 10.2	716 ± 22.2	830 ± 23.6	826 ± 13.7	749 ± 25.6	897 ± 10.4	786 ± 23.6
Water absorption (% by mass)	146.32 ± 21	36.88 ± 10	83.85 ± 3.1	96.6 ± 1.4	63.2 ± 5	73.78 ± 3	130.83 ± 2	115.11 ± 15
Porosity (%)	81.52	15.44	39.80	50.6	32.8	43.25	63.43	73.41

2.4.1.2 Le rapport L/D

Plusieurs recherches ont révélé la signification du rapport d'aspect longueur/diamètre (L/D) de la fibre sur les propriétés des matériaux composites finaux. Des études ont étudié et prouvé que ce rapport d'aspect de la fibre de palmier dattier a une valeur intermédiaire par rapport à d'autres types de fibres naturelles qui peuvent attribuer son utilisation dans différentes applications industrielles. La fibre longue ou courte continue est déterminée par le rapport à l'aspect (L/D) de la fibre. Les fibres continues avec un rapport L/D très élevé sont généralement plus solides et plus rigides que les matériaux en vrac, où les fibres discontinues (dont la longueur > 100) conviennent à la production à grande échelle. Les fibres discontinues ont des caractéristiques souhaitées telles que le faible coût, la facilité de fabrication de pièces complexes et la nature isotrope. Il est évident que le rapport d'aspect L/D pour les fibres de palmier dattier occupe une position modérée par rapport à d'autres types de fibres naturelles comme le montre la Figure II.15. Il est proche de celui de la fibre de coco et légèrement plus grand que le chanvre, alors que le sisal a une valeur supérieure de L/D par rapport à tous les autres types (Al-Oqila and Sapuan 2014). Le rapport d'aspect L/D de la fibre est fortement modifié par l'attrition pendant le traitement (extrusion, injection) (Mohanty et al. 2005).

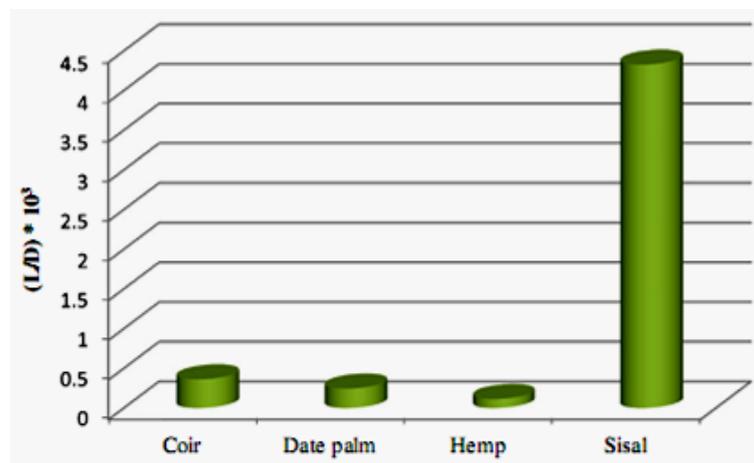


Figure II. 15: Comparaison entre le rapport d'aspect L/D de fibre de palmier dattier avec d'autre fibres (Al-Oqila and Sapuan 2014).

Ces propriétés classifie la fibre de palmier dattier comme l'un des types de fibres appropriés pour l'industrie automobile en raison de la possibilité de fabriquer des fibres continues et courtes qui conviennent à la fabrication de pièces complexes de nature isotrope. Par conséquent, ce résultat améliorera considérablement la productivité de l'industrie automobile (Al-Oqla and Sapuan 2014).

2.4.1.3 Absorption d'eau

Actuelle, de nombreux matériaux de recherche sont générés sur le potentiel des fibres à base de cellulose comme renforcement pour les plastiques. Tous les chercheurs qui ont travaillé dans le domaine des fibres naturelles et leurs composites sont convenus que ces renouvelables en abondance des matériaux disponibles ont plusieurs inconvénient (Wambua et al. 2003). Une restriction à l'exploitation réussie des fibres végétales pour des applications composites durables est leur forte absorption d'humidité, faible résistance microbienne, sensibilité à la pourriture, faible mouillabilité et incompatibilité avec certaines matrices (Wambua et al. 2003; Mohanty et al. 2005). Ces propriétés doivent être prises en considération, en particulier pendant l'expédition et le stockage à long terme, ainsi que pendant le traitement du composite. Le caractère hydrophile des fibres et, par conséquent, la forte absorption d'humidité affecte non seulement les propriétés de la surface et du volume de la fibre mais également les propriétés de leurs composites (Mohanty et al. 2005).

L'influence des agrégats ou des fibres sur l'absorption d'eau du composite a été très rarement étudiée, celle des stabilisants étant beaucoup plus étudiée. L'absorption d'eau par le matériau peut être mesurée par immersion ou par capillarité. Des études sur des composites à fibres de coton ont montrés que la quantité d'eau absorbée est proportionnelle à la teneur en coton. D'autre part, l'augmentation de la teneur en fibres à 0,2% entraîne une augmentation de l'absorption d'eau et du gonflement des fibres (Laborel-Préneron et al. 2016), ce qui entraîne à son tour des modifications des propriétés mécaniques et physiques et réduit la stabilité dimensionnelle du composite (Mohanty et al. 2005). De plus, l'absorption d'eau était accélérée par les agrégats et les fibres. L'absorption d'eau par les agrégats et les fibres a un effet important sur leur adhérence avec la matrice (Laborel-Préneron et al. 2016).

D'après les travaux de Almi et al. (Almi et al. 2015) sur des huit variétés de bois de palmier dattier, les résultats de taux d'eau absorbée après 24h en masse, montrent que le pétiole, le spathe et le fibrillium ont des valeurs relativement élevées par rapport aux autres parties. Le

taux de pétiole atteint 140%, est inférieur au taux moyen d'absorption du sisal 230% et supérieur à celui de la noix de coco qui était de 100%. Le taux moyen d'absorption des rachis, des épines, des pédicelles, des grappes et les feuilles était inférieur à celui de la noix de coco, ce qui pourrait avoir une incidence positive sur la consommation de traitement chimique pour réduire l'absorption d'humidité des fibres, en particulier du rachis (36,88%).

Globalement, le taux d'absorption d'eau des huit échantillons varie en rapport direct avec la valeur de porosité moyenne indiquée dans le tableau II.5. Le pétiole, le fibrillium et les spathes ont des valeurs élevées de porosité; il atteint 81,52% dans le cas du pétiole qui est moins élevé que la porosité de la paille 96% et plus que celle de beaucoup d'autres fibres naturelles.

En effet, cette dernière propriété contribue principalement dans le processus d'absorption, c'est pourquoi le pétiole a la capacité d'absorber une grande quantité d'eau par rapport aux autres parties. Cependant, la porosité est responsable des excellentes propriétés de l'isolation thermique et acoustique du matériau. Ainsi, l'utilisation de pétiole, de fibrillium et des spathes en raison de ces propriétés sera avantageuse (Almi et al. 2015).

2.4.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des fibres naturelles peuvent être fortement affectées et déterminées par plusieurs variables importantes telles que la structure, l'angle microfibrillaire, la composition chimique, les dimensions des cellules et les défauts. Les angles microfibrillaires sont responsables des propriétés mécaniques des fibres. Plus l'angle est élevé, plus la rigidité des fibres est élevée, tandis que les angles plus grands fournissent généralement une ductilité plus élevée.

En général, les fibres naturelles avec une résistance mécanique plus élevée possèdent une teneur en cellulose plus élevée, une longueur de cellule plus longue, un degré plus élevé de polymérisation de la cellulose et un angle de microfibre inférieur.

Les propriétés mécaniques importantes telles que la résistance à la traction et le module de Young augmentent habituellement à mesure que la teneur en cellulose et la longueur de la cellule augmentent. Les propriétés mécaniques de la fibre de palmier dattier et d'autres types de fibres naturelles sont indiquées dans le tableau II.6 (AL-Oqla et al. 2014).

Les propriétés mécaniques moyennes obtenues par Al-Khanbashi et al. (Al-Khanbashi et al. 2005) sur plusieurs fibres de palmier dattier (30 essais) sont présentées dans le tableau II.7.

Tableau II. 6: Propriétés mécaniques des fibres de palmier dattier et d'autres fibres naturelles (AL-Oqla et al. 2014).

Properties	Diameter (μm)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Jute	25–200	393–773	13–26.5	1.16–1.5
Flax	10–40	600–2,000	12–85	1–4
Sisal	50–200	468–640	9.4–22.0	3–7
Coir	100–450	131–175	4–6	15–40
Raw date palm fiber	100–1,000	58–203	2–7.5	5–10

Tableau II. 7: Valeurs moyennes des propriétés mécaniques des fibres de palmiers dattier (Al-Khanbashi et al. 2005)

Diameter (μm)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation to break (%)
100–1,000	170–275	5–12	5–10

Les valeurs typiques pour la résistance à la traction des fibres de palmier dattier brut étaient entre 170-275 MPa, où les valeurs pour le module de Young étaient comprises entre 5-12 GPa. L'allongement à la rupture était de 5 à 10%. Al-Khanbashi et al. (Al-Khanbashi et al. 2005) ont reportés que la résistance à la traction des fibres de palmier dattier est comparable à celle des autres fibres naturelles, part contre le module de Young est inférieur à celui de toutes les autres fibres naturelles, à l'exception de celui de la fibre de coco, qui présente un plus faible module. Il convient de mentionner que ces valeurs (résistance à la traction et de module de Young) sont sensibles à de nombreux paramètres, y compris les espèces et la variété de la plante, les variables agricoles telles que la qualité du sol, les conditions météorologiques, le niveau de maturité de la plante et la qualité de la plante. En outre, les fibres de palmier dattier ont un diamètre relativement important qui varie selon leur longueur. Les valeurs typiques pour le diamètre de fibres de palmier est de 100-1,000 μm , qui est plus élevé que celles pour d'autres fibres (Al-Khanbashi et al. 2005).

Les valeurs moyennes de la résistance à la traction, de l'allongement à la rupture et du module d'élasticité pour les huit échantillons de fibres de palmier dattier rapporté par Almi et al. (Almi et al. 2015) sont résumés dans le tableau II.8. Les résultats montrent que les propriétés mécaniques des huit résidus de palmiers dattiers diffèrent légèrement. La valeur la plus élevée de la résistance à la traction et du module de Young est celle de Rachis et cela peut être dû à ses propriétés chimiques et physiques (Teneur relativement élevée en cellulose et moindre taux de porosité).

Tableau II. 8: Propriétés mécaniques des huit types de fibres de palmier dattier (Almi et al. 2015).

Property	Petiole	Rachis	Thorns	Leaflets	Bunch	Pedicels	Spathe	Fibrillum
Diameter (mm)	0.40–1.00	0.60–0.75	0.70–0.73	0.35–0.90	0.30–0.50	0.63–0.77	0.43–0.51	0.50–0.80
Tensile strength (MPa)	90 ± 8.87	213 ± 58	95.35 ± 48	100.12 ± 43.87	113.95 ± 54	86 ± 5.00	120.5 ± 12.5	90 ± 30,70
Elongation (%)	0.95 ± 0.42	4.38 ± 1.96	3.67 ± 1.14	2.68 ± 0.49	3.37 ± 1.39	2.37 ± 0.15	2.41 ± 0.05	4.59 ± 0.90
Young's modulus (GPa)	7.00 ± 2.00	8.50 ± 2.33	3.87 ± 2.13	4.00 ± 1.33	4.33 ± 2.67	3.00 ± 1.00	5.00 ± 1.00	3.66 ± 2.33

La résistance à la traction et les valeurs de module de Young des fibres de fibrillum obtenues dans le travail de Almi et al. (Almi et al. 2015) sont comparables à celles rapportées dans la littérature, mais celles du pétiole obtenues dans ce travail sont significativement plus élevées que celles de la littérature. Cette différence peut être attribuée à plusieurs facteurs tels que les différentes sources de fibres, les différentes conditions de test, les défauts (fissures) de la fibre de cellulose et le mécanisme de rupture de la fibre. Ce pourrait être aussi la raison de la grande dispersion des résultats des essais mécaniques, même dans des conditions de laboratoire soigneusement contrôlées. On notera également que tous les échantillons, à l'exception des pétioles, ont un allongement important à la rupture. Cela pourrait avoir une relation avec le contenu élevé de la lignine qui caractérise le bois de palmier dattier, la lignine étant la composante chimique responsable du comportement tenace et élastique de la fibre; Néanmoins, le bois des palmiers se situent parmi les fibres naturelles qui ont des propriétés mécaniques faibles (Almi et al. 2015).

La figure II.16 montre que les valeurs de module de Young de feuilles de palmier dattiers sont proches de celles des fibres de coco et sont considérablement inférieures à celles de la plupart des fibres végétales. Cela s'explique par la structure physique des fibres naturelles telles que la structure cristalline, le degré de cristallinité, l'angle en spirale des fibres, le degré de polymérisation, le contenu de la porosité et la taille du lumen en plus la composition chimique.

Cependant, lorsque le module spécifique (module de Young/masse volumique apparente) est considéré, les fibres de palme de palmier dattiers indiquent des valeurs comparables ou supérieures à celles d'autres fibres naturelles, comme le montre la figure II.17. Ces propriétés spécifiques supérieures constituent l'un des principaux avantages de l'utilisation de composites avec des fibres de dattes dans les applications qui exigent en même temps une résistance élevée et une légèreté.

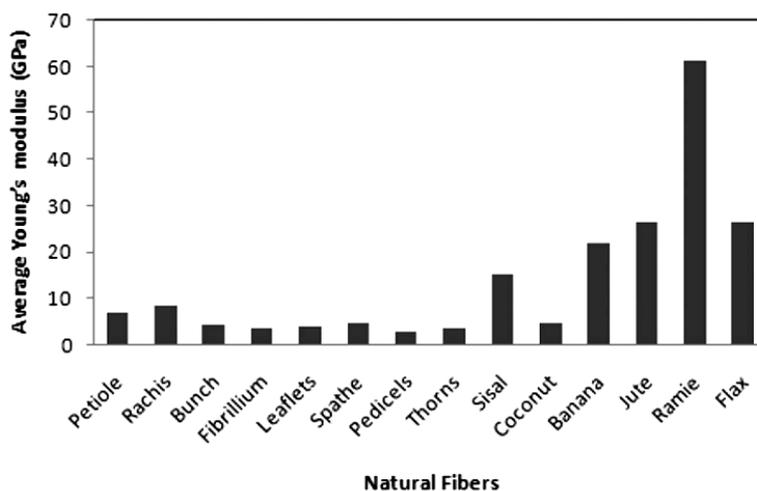


Figure II. 16: Comparaison des valeurs moyennes de module de Young des fibres de palmier dattier (Almi et al. 2015).

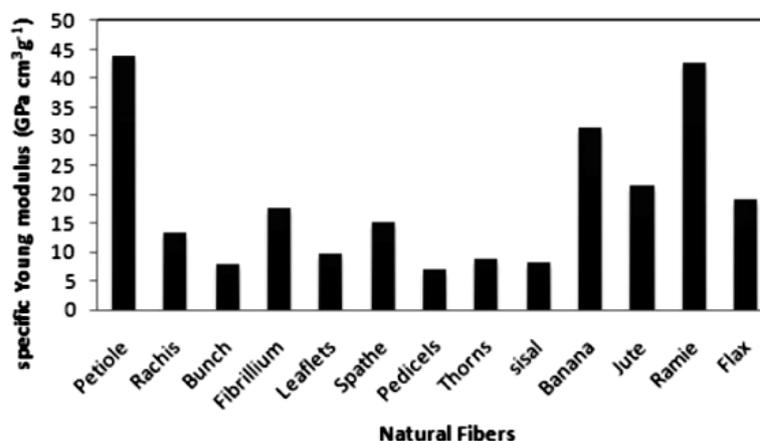


Figure II. 17: Module de Young spécifique de fibres de palmiers dattier (Almi et al. 2015).

2.4.3 Propriétés thermiques

Les polymères naturels et synthétiques sont soumis à une dégradation de leurs propriétés mécaniques sous l'influence de températures élevées. La stabilité thermique est considérée comme l'un des facteurs limitant l'utilisation des fibres naturelles. Il est bien connu que les différentes techniques de traitement du polymère sont réalisées à des températures relativement élevées. Ces fibres, lorsqu'elles sont utilisées comme renforcement, seront soumises à un gradient thermique (exotherme de pointe de la résine thermodurcissable ou à la température de fusion du thermoplastique). Il est évident que les températures de traitement ne doivent pas dépasser la température de dégradation thermique des fibres naturelles utilisées. Pour toutes ces raisons, il est important de comprendre la dégradation thermique de ces fibres. La figure II.18 montre une analyse thermique effectuée par Al-Khanbashi et al. (Al-Khanbashi et al. 2005) sur des fibres de palmier dattier brut. L'analyse thermique est

effectuée dans des températures entre 25-390°C à l'aide d'un instrument thermogravimétrique. L'analyse thermogravimétrique a montré que la température de début de la dégradation thermique est d'environ 250°C. Cette température correspond aux températures de dégradation thermique de d'autres types de fibres naturelles telles que la henequen, le kenaf et le sisal. Il est bien connu que les réactions exothermiques du polyester et de l'ester vinylique sont bien inférieures à cette température et peuvent donc être utilisées comme matrice avec des fibres de palmier dattier. En outre, le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) ont des points de fusion inférieurs à la température de dégradation des fibres de palmier dattier et peuvent également être utilisés comme matrice (Al-Khanbashi et al. 2005).

L'analyse thermique effectuée par Amli et al. (Almi et al. 2015) sur huit résidus de palmiers indiquent deux sommets exothermiques (Figure II.19).

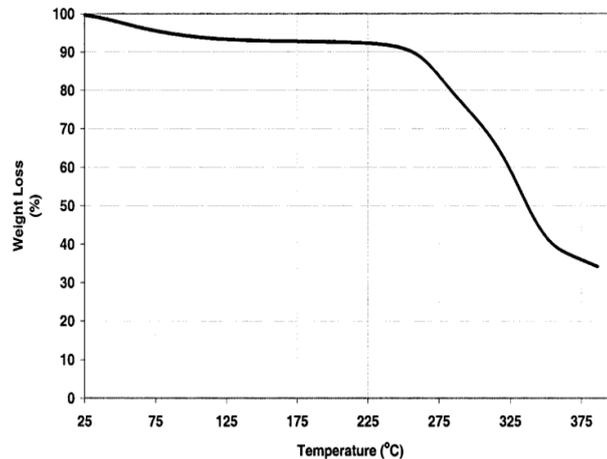


Figure II. 18: Analyse thermogravimétrique de fibre de palmier dattier brut, échantillon de 10 mg chauffé à 10 °C/min¹ dans l'air (Al-Khanbashi et al. 2005).

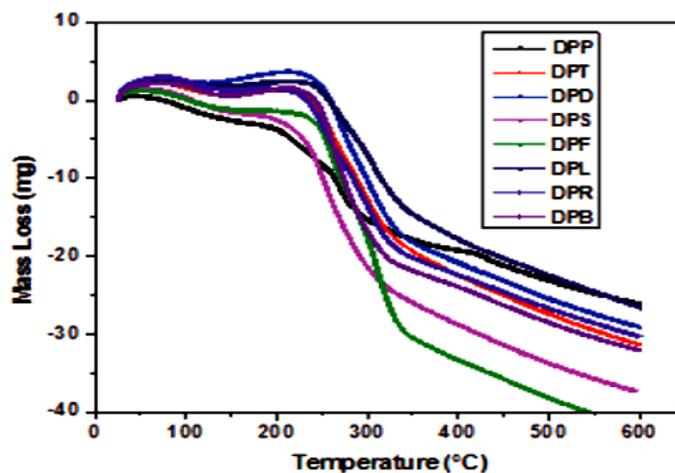


Figure II. 19: Courbe thermogravimétrique des fibres de palmier dattier : (DPP) Pétiole, (DPT) Epines, (DPD) Pédicelles, (DPS) Spathe, (DPF) Fibrillum, (DPL) Leaflets, (DPR) Rachis et (DPB) Grappes (Almi et al. 2015).

La figure II.19 montre que le premier pic situé à 320°C pour le pétiole, le spathe et le fibrilium, à 350°C pour le grappe et rachis, à 340°C pour l'épine, à 330°C pour pédicelles et à 360°C pour la palme. Il est attribué à la dépolymérisation thermique de l'hémicellulose et de la pectine. Le deuxième pic situé autour de 400°C pour tous les échantillons. Il est lié à la décomposition de la cellulose. Ainsi, les principales dégradations du bois de palmier dattier se sont produites à une température supérieure à 320°C. Par rapport à d'autres fibres naturelles, le premier pic des palmes de palmier dattier, notamment celui de feuillets, est situé à une température plus élevée que celle du sisal, de la noix de coco et du bambou et c'est proche de celui du chanvre. Les feuillets ont montré plus de résistance à la dégradation thermique que d'autres échantillons. Cela peut être lié aux compositions élémentaires et chimiques des échantillons (Almi et al. 2015).

3 Matériau composite à base des déchets industrielle et naturelle

De nos jours, l'une des ressources renouvelables les plus sollicitées dans la formulation d'élaboration de matériaux composites, provient de sources végétales (Cheung et al. 2009), des déchets solides générés par l'activité de production agricole et industrielle (Madurwar et al. 2013). En effet, les dernières années ont vu une augmentation spectaculaire de l'utilisation des déchets agricoles issus des fibres naturelles telles que les feuilles de lin, jute, chanvre, ananas, sisal et palme pour fabriquer un nouveau type de composites respectueux de l'environnement (Cheung et al. 2009; Almi et al. 2015; Korjenic et al. 2016). Selon Mohammed et al. (Mohammed et al. 2015), le secteur industriel mondial des composites polymères renforcés par des fibres naturelles a atteint 2,1 milliards de dollars en 2010.

Dans les années 1970, un nouveau concept connu sous le nom de Wood-Plastic Composites (WPC) a vu le jour, ayant des propriétés mécaniques et physiques proches de celles du bois massif (Ashori 2008). Le terme composite bois-plastique (WPC) désigne tous les composites qui contiennent des renforcements d'origine végétale (fibres de bois et non-bois) et des thermodurcissables ou des thermoplastiques (Lomelí-Ramírez et al. 2009; Nourbakhsh and Ashori 2010). Diverses recherches ont été menées dans ce domaine de recherche afin d'extraire du bois et des matières plastiques recyclables du site d'enfouissement dans des applications utiles (Faruk et al. 2012; Binhussain and El-Tonsy 2013; Félix et al. 2013; Najafi 2013; Nörnberg et al. 2014; Turku and Kärki 2014).

Le plastique est une clé d'innovation de nombreux produits dans divers secteurs tels que la construction, la santé, l'électronique, l'automobile, l'emballage et autres. La production mondiale de plastique a atteint environ 299 millions de tonnes en 2013 et a progressé de 4% par rapport à 2012. Cela montre que le pourcentage de déchets plastiques s'est retrouvé dans la décharge encore très élevée et occupait un espace immense. Les plastiques peuvent prendre jusqu'à des milliards d'années pour se dégrader naturellement (Sharuddin et al. 2016).

Dans tous les pays du monde, le polystyrène expansé est couramment utilisé pour l'isolation et les matériaux d'emballage (Poletto et al. 2011). De nombreuses industries utilisent le polystyrène expansé en raison de sa polyvalence, de sa stabilité dimensionnelle, de sa nature propre et de son faible coût (Shin 2006). Le polystyrène (PS/EPS), représente 72% de la demande en matière plastique: emballage, construction, automobile et équipements électriques et électroniques (Nkwachukwu et al. 2013). L'utilisation de polystyrène expansé génère d'importantes quantités de déchets non biodégradables qui finissent généralement dans les décharges ou sont incinérés, ce qui provoque de graves problèmes environnementaux (Poletto et al. 2011; Agoua et al. 2013).

Les nouveaux matériaux composites à base de bois et du plastique sont introduits dans les pays modernes pour promouvoir les déchets de bois et les fibres végétales (Davis and Song 2006). Les déchets plastiques représentent une source prometteuse de matière première pour le développement de composites thermoplastiques avec des fibres naturelles, notamment en raison du volume important et du faible coût de ce matériau. Ces composites présentent plusieurs avantages, notamment un faible coût, une faible densité, une faible énergie de fabrication, une faible émission de CO₂, une capacité de renouvellement et un haut niveau de biodégradabilité par rapport aux composites polymères thermoplastiques renforcés par des charges inorganiques (Poletto et al. 2011).

Dans ce contexte, le recyclage des déchets issus du bois industriel ou forestier et du polystyrène expansé des emballages pour produire d'autres matériaux composites apparaît comme une alternative environnementale et économique (Agoua et al. 2013). Une des solutions proposées est l'inclusion des déchets de polystyrène dans le béton et le mortier (Ravindrarajah and Tuck 1994; Chen and Liu 2007; Sarbu et al. 2009; Bhutta et al. 2011; Ayse and Filiz 2016). Une autre solution proposée dans la littérature est le polystyrène renforçant les déchets avec des fibres de bois ou des fibres cellulosiques (Maldas et al. 1989; Nair et al. 1996;

Agoua et al. 2013) pour obtenir un composite innovant avec des propriétés similaires aux matériaux conventionnels. Parmi ces déchets végétaux disponibles en Algérie, les déchets de palmiers dattier. Agoudji et al. (Agoudjil et al. 2011) ont rapporté que certains agriculteurs utilisent partiellement ce bois de palmier, mais la plus grande partie de la matière est jetée comme déchet. En effet, le développement de matériaux composites renforcés à partir de ce type de déchets peut être une excellente solution d'un point de vue environnemental. Il a été rapporté que l'utilisation de fibres de palmier dattier avec différents types de polymères peut améliorer la caractéristique désirée des composites comme la résistance à la traction, le module d'Young, la résistance à la flexion et le module, les propriétés thermiques et acoustiques (AL-Oqla et al. 2014). Al-Sulaiman et al. (Al-Sulaiman 2003) fabriqué des panneaux de composites renforcés par des feuilles de palmier dattier (DPL) où deux types de résines ont été sélectionnés. Ces panneaux présentaient de très faibles conductivités thermiques. Al-Juruf et al. (Al-Juruf et al. 1988) ont étudié la possibilité d'utiliser des feuilles sèches de palmier dattier et des liants appropriés (ciment Portland, gypse et mélange de ciment hydraulique et de gypse) pour obtenir des produits d'isolation thermique pour les bâtiments. Ils ont conclu que les panneaux de feuilles de palmier sont un bon candidat pour le développement de matériaux isolants efficaces et sûrs. Dehghani et al. (Dehghani et al. 2013) ont étudié les propriétés mécaniques et thermiques et la morphologie du (poly-éthylène-téréphtalate) PET recyclé renforcé de fibres de feuilles de palmier dattier. Le niveau de propriétés mécaniques atteint, avec un potentiel d'utilisation dans plusieurs types d'applications. Le PET recyclé mélangé avec des fibres de palmier dattier semble d'être un bon alternative pour obtenir des produits respectueux à l'environnement.

D'autre part, le recyclage de ce type de composite (WPC) à la fin de sa vie utile pourrait apporter des avantages environnementaux supplémentaires (Lomelí-Ramírez et al. 2009). Par conséquent, le développement et la production de composites à partir de déchets agricoles et plastiques sont des solutions prometteuses pour le recyclage des déchets et leur utilisation en tant que sources renouvelables (Binhussain and El-Tonsy 2013).

4 Conclusion

Les résidus de palmiers dattiers sont l'une des sources intéressantes des fibres naturelles car elles sont renouvelables et abondamment disponibles. En fait, cette ressource naturelle n'est

pas suffisamment exploitée autant que beaucoup d'autres fibres naturelles telles que les fibres de jute, lin, ramie, etc. Malgré les multiples études sur son utilisation comme renforcement dans les composites, le palmier dattier n'est pas encore utilisé de manière adéquate dans l'industrie. La compétitivité des fibres de palmier dattiers dans la formation de composites naturels adaptés aux applications industrielles automobiles a été démontrée par plusieurs travaux cités dans le présent chapitre.

Il a été montré que les fibres de palmier dattiers ont des structures multicellulaires. Ces structures cellulaires sont entourées et cimentées avec de la lignine et de l'hémicellulose. La fibre de palmier dattier est constituée d'un assemblage de fibrilles. La partie centrale de chaque fibrille, appelée lumen, est creuse. Les fibres obtenues à partir des palmiers femelles ont plus de pores que les fibres de palmiers mâles. Le traitement des fibres avec le NaOH ou Alcalin réduit la teneur en vides et la surface des fibres devient rugueuse en raison de l'élimination de la lignine, de l'hémicellulose et des substances cireuses. Il a été montré que cette surface rugueuse contribue à l'amélioration de l'adhésion entre le renfort et la matrice dans les composites.

L'étude bibliographique a permis de montrer que la composition chimique de tous les types de fibres de palmier dattier est similaire par rapport au contenu de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine. Il a été établi que la cellulose est le premier constituant des fibres du palmier dattier qui est comparable à celui des fibres libériennes (lin, kéraf, jute) et les fibres de feuille (Abaca et Sisal). La lignine représente le deuxième constituant majoritaire dans les fibres de palmier dattier, qui n'est pas le cas dans les fibres des autres plantes. L'hémicellulose est trouvée comme troisième constituant des fibres du palmier dattier.

De point de vue densité, l'étude bibliographique présentée dans ce chapitre a montré que les fibres de palmier dattier ont des plus faibles densités qui les rendent très compétitives aux autres fibres naturelles notamment pour la fabrication des composites à faible densité. Les rachis et les grappes ont des valeurs de densité plus élevées par rapport aux autres types du palmier dattier. Il a été conclu que les rachis et les grappes peuvent être considérés comme du bois léger. Alors que le pétiole, le lif, la spathe, les palmes, les pédicelles et les épines, sont classés comme de bois très léger.

Malgré les avantages qu'on vient de citer, l'étude bibliographique a montré que ces renouvelables sources ont plusieurs inconvénients tels que ; la forte absorption d'humidité,

faible résistance microbienne, facilement périssable, faible mouillabilité et incompatibilité avec certaines matrices qui ont des effets inverses sur les propriétés de leurs composites.

De point de vue mécanique, il a été montré que la résistance à la traction des fibres de palmier dattier est comparable à celle des autres fibres naturelles. Part contre, le module de Young est inférieur à celui de certain fibres naturelles. La température de début de la dégradation thermique est d'environ 250°C qui correspond aux températures de dégradation thermique de d'autres types de fibres naturelles. Les composites obtenus à partir des fibres de palmiers dattier ont montrés des performances mécaniques et thermiques concourantes aux autres composites à base de fibre naturelles avec un potentiels d'utilisation dans plusieurs types d'applications. Les fibres de palmier dattier semblent être de bonnes alternatives pour obtenir des produits respectueux à l'environnement ce qu'on tentera de prouver dans les prochains chapitres.

Chapitre III

Matériaux et méthodes expérimentales.

Chapitre III : Matériaux et méthodes expérimentales

Le présent chapitre montre les détails du travail expérimental réalisé dans le cadre de la présente thèse. Ce dernier est réparti sur deux parties en l'occurrence les matériaux utilisés et les protocoles et méthodes expérimentales suivies.

Deux types de renforts, fibreux et particuliers, ont été étudiés en utilisant deux types de matrices, thermoplastique et thermodurcissable, pour l'élaboration de deux nouveaux matériaux composites. D'abord, une description des renforts et des matrices utilisés est donnée avec les détails des protocoles de mise en œuvre des nouveaux composites. Ensuite, les différents essais de caractérisations effectués sont détaillés pour chaque matériau composite développé.

Le premier nouveau matériau composite, à base des déchets de palmier dattier et de polystyrène, est caractérisé par des mesures de la densité, des essais de flexion trois points, de conductivité thermique et de caractérisation morphologique par MEB. Le deuxième nouveau composite, à base de particules de noyaux des dattes, est caractérisé notamment de point de vue mécanique.

1 Matériaux composite à base des déchets de palmier dattiers et de polystyrène expansé (LPC)

Le matériau composite est obtenu à partir des déchets naturels de palmier dattier, comme renfort, et des déchets industriels en polystyrène expansé destinés pour l'emballage, recyclé, utilisé comme matrice.

1.1 Le renfort

Les fibres des feuilletes utilisés comme renfort pour la préparation du composite sont obtenu des feuilles de palmiers dattier. Ces feuilles sont des résidus de taille des palmiers dattiers (*Phoenix Dactylifera*) de l'Oasis de Biskra, Algérie. Les feuilles de palmier dattier sont l'une des principales sources naturelles de fibres où les applications ont été étendues à presque tous les domaines (Agoudjil et al. 2011).

Ces feuilletes ont été récoltées à la main à partir des feuilles de palmier dattier, et séparées des rachis et du pétiole. Les feuillets ont été nettoyés à l'eau pour enlever la poussière et les impuretés, puis séchés naturellement pendant trois jours afin de réduire la teneur en eau (Almi et

al. 2015). Les feuilles ont été découpées en petits morceaux de 2 à 5 cm de longueur pour faciliter la procédure de broyage.

Le broyage des feuilles découpées est effectué à l'aide d'un broyeur domestique type SEB. Le tamisage du mélange obtenu a été effectué en utilisant 4 tamis métalliques de diamètres 0,1 - 0,315 - 0,5 et 1 mm pour obtenir 3 tailles granulométriques de fibres (Figure III.1). Chaque quantité de mélange a été tamisée manuellement durant 10 min afin d'avoir des fibres de dimensions similaires.

1.2 Matrice à base de déchets de polystyrène expansé

La matrice ou le liant organique est obtenu par recyclage de déchets de polystyrène expansé. Dans cette étude, le polystyrène expansé utilisé a une densité égale à 15 kg/m^3 . Le recyclage des déchets de polystyrène expansé se fait par sa dissolution dans l'essence. Le polystyrène expansé est mélangé avec l'essence pendant quelques minutes pour obtenir une pâte lisse (Figure III.2) avec un rapport massique obtenu après plusieurs essais est défini comme suit:

$$\frac{m_{\text{gasoline}}}{m_{\text{Polystyrene}}} = 3$$

Avec : m_{gasoline} est la masse de l'essence, $m_{\text{Polystyrene}}$ est la masse du polystyrène expansé.



Figure III. 1: Sizes of palm leaflet reinforcement.



Figure III. 2: Essence, déchets de polystyrène expansé et mélange polystyrène expansé/essence.

1.3 Protocole d'élaboration du matériau LPC

1.3.1 Préparations des moules

Pour le matériau composite à base de feuilletes de palmier dattier et de polystyrène expansé (Leaflet Polystyrene Composite, LPC), des essais de flexion en trois points et des mesures de conductivité thermique seront effectués. Pour la préparation des échantillons de flexion et de conductivité thermique, deux moules métalliques (Figure III.3) ont été fabriqués, le premier de dimension 240x110x40mm pour les échantillons de flexion et le deuxième de dimension 40x40x30mm pour les échantillons de conductivité thermique.

1.3.2 Préparation des échantillons

Pour la préparation du composite LPC, la matrice obtenue par le recyclage du polystyrène expansé est mélangée avec les fibres de feuilletes de palmier dattier cité précédemment. Ensuite, le mélange matrice/renfort est versé dans les deux moules avant compression. Il a été reporté dans la littérature que pour réduire l'air du composite, une pression avec un temps de maintien sont nécessaires (Wank et al. 1991; Lorenz and Wilka 2002; Vlasveld et al. 2005; Dhakal et al. 2007). Dans cette études, le composite est soumis à une pression de 10 bars maintenue durant 10 minutes. Après compression, on obtient des plaques et des parallélépipèdes de dimensions respectivement $240 \times 110 \times 10 \text{mm}^3$ et $40 \times 40 \times 30 \text{mm}^3$ (Figure III.4). Les plaques et les parallélépipèdes obtenus sont séchés à l'air pendant au moins 15 jours.

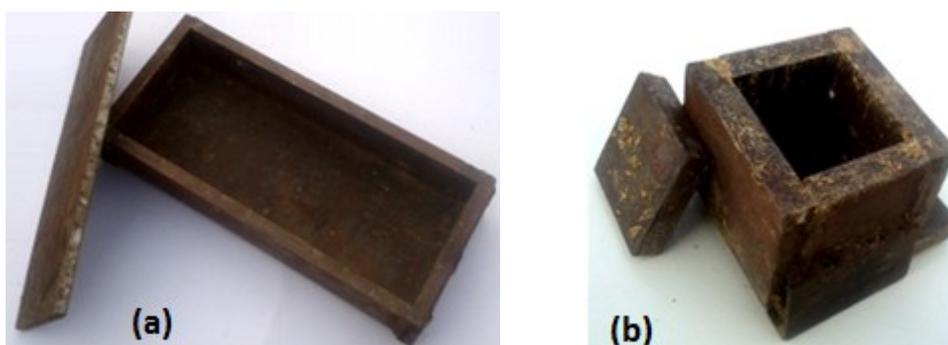


Figure III. 3: Moules métalliques pour la préparation des échantillons : (a) Essais de flexion trois points, (b) Conductivité thermique.

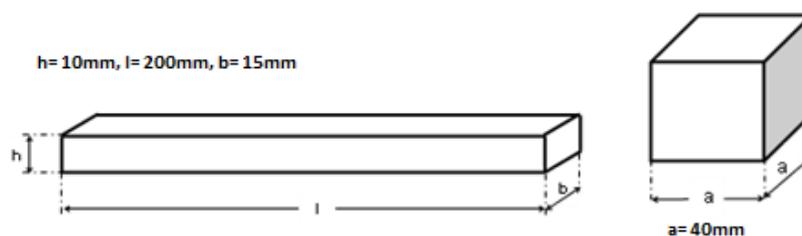


Figure III. 4: Dimensions des échantillons de flexion et de conductivité thermique.

1.3.2.1 Dimensions des éprouvettes de flexion et de conductivité thermique

Après séchage des plaques obtenues, et conformément à la norme EN ISO 14125 (ISO 14125 1998), les plaques sont découpées pour obtenir des éprouvettes de flexion trois points de dimensions $200 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$ et les parallélépipèdes de la conductivité thermique prend les dimensions du moule ($40 \times 40 \times 30 \text{ mm}^3$) (Figures III.5).

1.3.2.2 Les configurations étudiées.

Dans cette étude, neuf combinaisons de différentes proportions massiques (70, 75 et 80%) et différentes granulométries (0,1-0,315 mm, 0,315-0,5 mm et 0,5-1 mm) du matériau LPC ont été préparées (Tableau III.1).

Les choix des proportions de poids sont faits à partir des essais expérimentaux préliminaires. Lorsque le LPC est préparé avec des proportions de 10 et 15% de matrice, ces deux proportions donnent des propriétés mécaniques médiocres et provoquent la fragmentation du LPC due à l'insuffisance de la matrice qui entraîne une mauvaise cohésion entre l'interface fibre/matrice. Plus de 30% de matrice, la matrice est chassée en dehors du moule due à l'excès de la matrice par rapport à la pression appliquée.

Tableau III. 1: Divers échantillons testés.

Echantillons	Granulométries (mm)	Matrice (wt.%)	Renfort (wt.%)
A1	0.1-0.315	20	80
A2		25	75
A3		30	70
B1	0.315-0.5	20	80
B2		25	75
B3		30	70
C1	0.5-1.0	20	80
C2		25	75
C3		30	70



Figure III. 5: (a) Plaque composite, (b) éprouvettes de flexions, (c) Eprouvette de conductivité thermique, obtenus après compression.

Tableau III. 2: Composition du matériau LPC avec la présence de la lignine.

	Renfort	Matrice	lignine
LPC1	70 %	30 %	0 %
LPC2	70 %	28.5 %	1.5 %
LPC3	70 %	27 %	3 %
LPC4	70 %	25.5 %	4.5 %

Afin d'étudier l'effet de la taille du renfort sur les propriétés du matériau composite, de nombreux chercheurs ont utilisé différentes tailles de renforcement allant de 0,064 mm à 1 mm (Curvelo et al. 2001; Julson et al. 2004; Stark and Rowlands 2007; Cui et al. 2008; Migneault et al. 2008; Bouafif et al. 2009).

Dans ce travail, trois tailles sont choisies afin de réduire la présence de lignine lors de l'utilisation de la petite taille (<0.1mm) et pour éviter d'avoir des particules de bois lors de l'utilisation une grande taille (>1mm) de renfort.

1.4 Effet de la lignine sur les propriétés mécaniques du LPC

Ce paragraphe est consacré à l'étude de la présence de la lignine dans le matériau LPC sur ses propriétés mécaniques. La fraction massique choisi entre le renfort et la matrice est 70/30%. La quantité du renfort est fixé à 70% dans tous les cas étudiés, par contre le 30% resté contient des fractions massiques entre le polystyrène et la lignine. Le renfort utilisé a une granulométrie entre 0.315-0.5 mm. La lignine utilisée est obtenue à partir du broyage des feuillettes de palmiers dattiers où une granulométrie inférieur à 0.1 mm est utilisée.

Les éprouvettes d'essais de flexion sont préparées avec la même procédure précédente, une pression de 3,5 Bars est appliquée. Le tableau III.2 décrit les fractions massiques de chaque composant (renfort, matrice, lignine) du composite.

2 Matériaux à base de déchets de noyaux de dattes et d'une résine Epoxy (CPNDE)

Le matériau composite est obtenu à partir des déchets de fruits de palmier dattier (Les noyaux), comme renfort, mélanger avec une résine époxy thermodurcissable, utilisé comme matrice.

2.1 Le renfort

Les noyaux sont des déchets récoltés après la consommation des dattes. Le poids d'un noyau pourrait aller de moins de 0.5 g à environ 4 g, d'une longueur d'environ 12 à 36mm et d'une

largeur de 6 à 13mm (Zaid and Arias-Jimenez 1999). Le poids des noyaux de dattes est de 18.34 % des dattes frais (Nehdi et al. 2010), ce qui génère une masse importante de déchets en noyaux de dattes après leurs consommation.

Dans ce travail une valorisation de ces déchets a été effectuée afin d'obtenir un matériau composite qui répond aux besoins économique et environnemental. Les noyaux de dattes utilisées dans cette étude ont été extraits du fruit de palmier dattiers (*Phoenix Dactylifera*) de la région de Biskra (Algérie). Ces noyaux ont été nettoyés à l'eau pour éliminer la poussière et les impuretés, et séchées à l'air ambiant durant 72 heures, puis ils ont été séchés dans une étuve durant 24 heures à une température de 105°C pour minimiser la quantité d'eau, ce qui facilite leur broyage. Due à la grande dureté des noyaux de dattes, un vibro-broyeur est utilisé pour le broyage de ces noyaux pour obtenir des particules de noyaux de dattes.

Le tamisage des noyaux broyés à été effectué en utilisant 2 tamis métalliques de diamètres 0,2-0,4mm pour obtenir la taille granulométriques représenté dans la figure III.6. Chaque quantité de poudre à été tamisé manuellement durant 10 min afin d'avoir des particules de dimensions identiques.

2.2 La matrice époxy

La matrice utilisée dans la préparation du matériau à base de particules de noyaux de dattes est la matrice époxy thermodurcissable Sikadur destinée à la réparation du béton. La matrice a une excellente adhérence sur divers matériaux tels que le mortier, le fibrociment, la mousse de polyéthylène, la brique, le bois, les métaux, etc, et elle peut être utilisée sur des surfaces humides. La matrice poly-époxy a été obtenue par une réaction de polymérisation d'un pré-polymère époxy (deux tiers de volume) avec un agent de durcissement aminé (un tiers de volume). Le durcissement a été effectué à température ambiante pendant 72h.



Figure III. 6: (a) Noyaux de dattes (b) Particules des noyaux de dattes d'une granulométrie de 0.2-0.4mm.

2.3 Protocole d'élaboration du matériau CPNDE

2.3.1 Matériau 100% résine

2.3.1.1 Préparation des éprouvettes

Afin d'évaluer les propriétés mécaniques de la matrice utilisée dans la fabrication du Composite à base de Particules de Noyaux de Dattes et d'une résine Epoxy (CPNDE), des essais de traction et de flexion sont effectués sur un matériau constitué de 100% résine. Pour la préparation des éprouvettes d'essai de traction, la résine a été moulée sans pression dans un moule pour obtenir une plaque de dimensions 240x140x4mm. La plaque obtenue a été durcies à des conditions ambiantes pendant 72h.

Pour la préparation des éprouvettes de flexion, la résine a été versée dans un moule métallique (Figure III.7) sans aucune pression appliquée afin d'obtenir des éprouvettes de dimensions conforme à la norme EN ISO 14125 (ISO 14125 1998) (Figure III.8-b).

2.3.1.2 Dimensions des éprouvettes

Après le durcissement de la plaque (100% résine), la plaque à été usinée avec une machine de contrôle numérique par ordinateur afin d'obtenir des éprouvettes de dimensions conforme à la norme EN ISO 527-2 (ISO 1996) (Figure III.8-a). Les éprouvettes de flexion trois points ont été enlevées du moule après 72h.

Les dimensions des éprouvettes de traction sont montrées dans la figure III.9 et le tableau III.3. Les éprouvettes de flexions 100% résine ont les mêmes dimensions que les éprouvettes de flexion du matériau composite à base des déchets de palmier dattier et de polystyrène expansé cité précédemment.

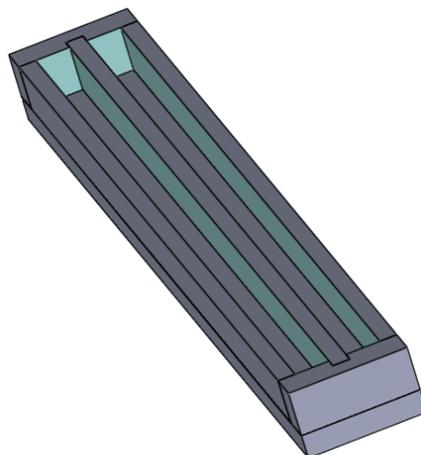


Figure III. 7: Moules métalliques pour la préparation des éprouvettes d'essais de flexion trois points.

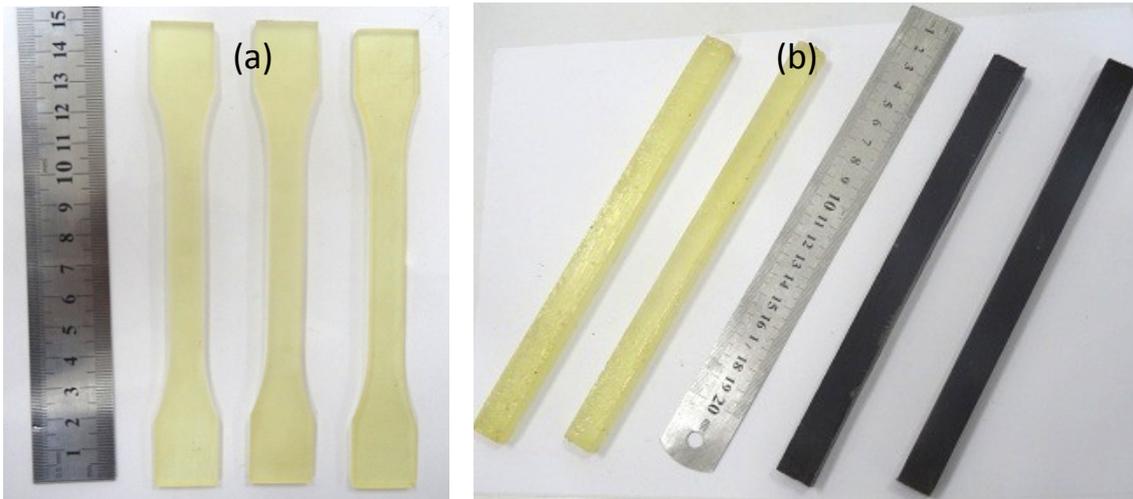


Figure III. 8: Echantillons d'essai normalisés: (a) Epruvette de traction, (b) épruvettes de flexion trois points.

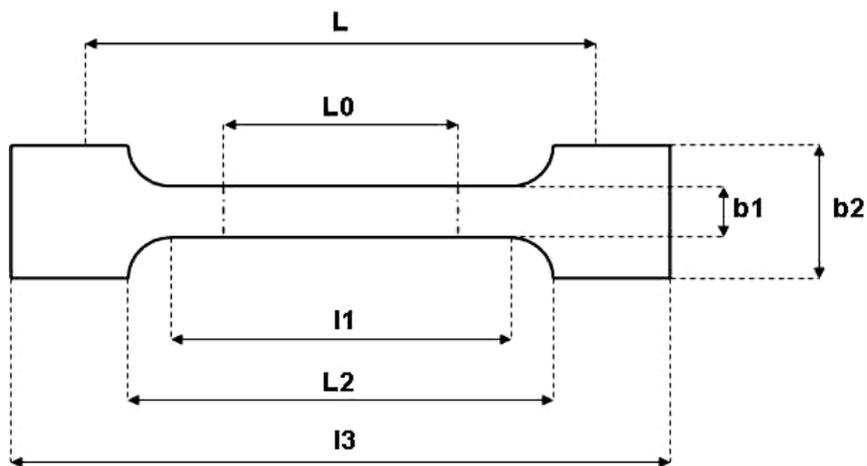


Figure III. 9: Géométrie d'une épruvette de traction normalisée.

Tableau III. 3: Dimensions normalisées de l'épruvette de traction.

Norme	Type d'éprouvette	l_3	l_1	b_2	b_1	h	L_0	L	Forme
ISO 527-2	1A	> 150	80 ± 4	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$	$50 \pm 0,5$	115	Haltère
L_0 : Longueur de référence				l_3 = Longueur totale					
L : Ecartement entre outillages				b_2 = Largeur dans la zone d'épaulement					
l_1 = Longueur de la partie calibrée étroite				b_1 = Largeur dans la zone de la longueur de référence					
L_2 = Ecartement entre les parties parallèles larges				h = épaisseur de l'éprouvette					

2.3.2 Matériau à base de Particules de Noyaux de Dattes et d'une résine Epoxy (CPNDE)

2.3.2.1 Préparation des épruvettes de flexion trois points

Pour le matériau CPNDE, seule l'essai de flexion est effectué. Les épruvettes de flexion sont obtenues par un processus de mélange de particule de noyaux de dattes d'une granulométrie de

0.2-0.4 mm avec une résine époxy déjà préparé. Le mélange obtenu est versé dans un moule métallique afin d'avoir les mêmes dimensions des éprouvettes du matériau 100% résine (200x10x15 mm). Les éprouvettes sont séchées dans le moule à des conditions ambiantes durant 72h (Figure III.10).



Figure III. 10: Eprouvettes de flexion trois points du matériau CPNDE.

Afin d'étudier l'effet de la proportion massique entre la matrice (Résine époxy) et le renfort (Particule de noyaux de dattes), quatre proportions massiques matrice/renfort ont été pris en considération (Tableau III.4).

Tableau III. 4: Différents échantillons étudiés.

Granulométrie 0,2-0,4 mm.	Echantillons	Matrice (wt %)	Renfort (wt %)
Éprouvettes essai de traction		100	0
Éprouvettes essai de flexion	B1	100	0
	B2	90	10
	B3	80	20
	B4	70	30
	B5	60	40

3 Méthodes de caractérisation expérimentale

3.1 Matériau LPC

3.1.1 Masse volumique

Les fibres végétale où ligno-cellulosique sont caractérisés par leur faible densité par rapport aux fibres minérales ou inorganiques. Cependant, la densité (ρ) est une propriété physique qui rend

l'utilisation des fibres végétales comme renfort dans les bio-composites surtout dans les industries où la légèreté est une propriété recherchée (Essabir 2015).

La densité du matériau LPC est mesurée selon la norme ISO 1183-1: 2012 (ISO 2012) par immersion dans l'eau en utilisant un pycnomètre. Afin de déterminer l'écart type de calcul, la densité de chaque cas du matériau LPC est mesurée trois fois en prenant trois échantillons de masses différentes. La densité est calculée à partir de la formule suivante :

$$\rho = \frac{m_1 \cdot \rho_{eau}}{m_0 - (m_2 - m_1)}$$

d'où : m_0 : masse de pycnomètre rempli d'eau, m_1 : masse de l'échantillon, m_2 : masse de pycnomètre rempli d'eau avec l'échantillon.

3.1.2 Essais de flexion trois points

Les propriétés de flexion trois points ont été déterminées à l'aide d'une machine d'essai universelle modèle Instron 5567 selon la norme EN ISO 14125 (ISO 14125 1998) avec des éprouvettes d'essai de dimensions suivantes: $l = 200_{+10}^0$ mm, $L=160\pm 1$ mm, $h=10\pm 0.2$ mm, et la largeur $b=15\pm 0.5$ mm (figure III.11).

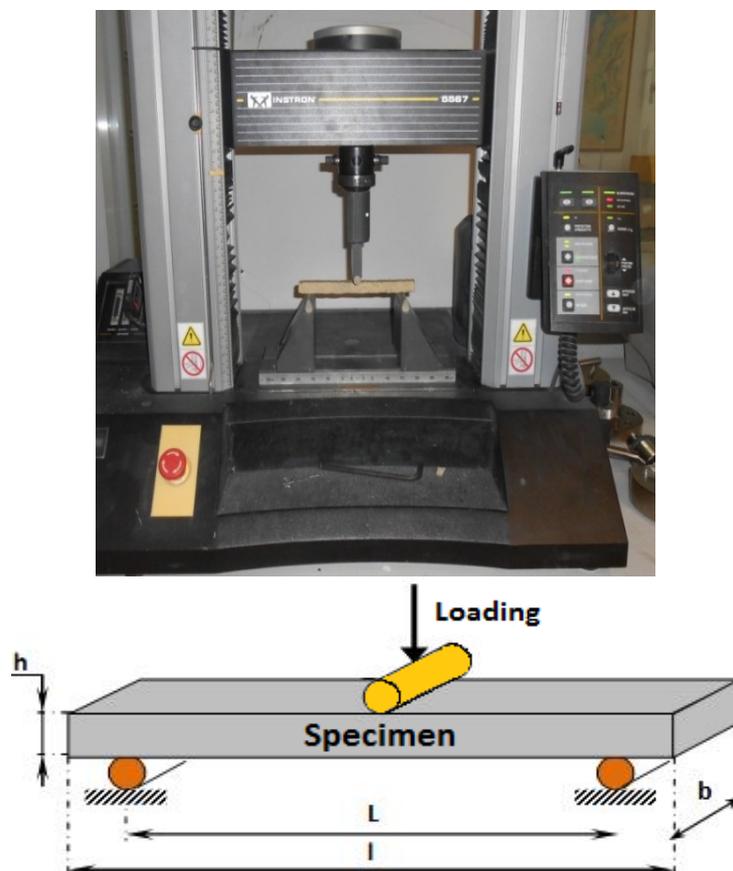


Figure III. 11: Essai de flexion trois points.

L'essai de flexion trois points permis de calculer la contrainte maximale (σ_{Max}) et le module de flexion (E_f) du matériau. La cellule de charge et la vitesse de chargement utilisée sont respectivement 10kN et 2 mm/min. Pour chaque cas, cinq éprouvettes du matériau LPC ont été testés pour obtenir la contrainte maximale et le module de flexion.

Pour tracer la courbe contrainte de flexion/déformation de flexion (σ/ε), la contrainte nominale dans la surface extérieure de l'éprouvette à mi-portée est calculée selon la norme EN ISO 14125 (ISO 14125 1998) par l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{3.F.L}{2.b.h^2}$$

Avec : σ : Contrainte de flexion, MPa.

F : Charge appliquée, N

L : Distance entre les portées, mm

b : Largeur de l'éprouvette, mm

h : Epaisseur de l'éprouvette, mm

La déformation en flexion est la variation fractionnelle nominale de la longueur d'un élément dans la surface externe de l'échantillon d'essai à mi-portée. La déformation ε est calculée par la relation suivante (ISO 14125 1998) :

$$\varepsilon = \frac{6.y.h}{L^2}$$

Avec : y : La flèche de l'éprouvette, mm.

La contrainte maximale (σ_{Max}) représente le point où la pente égale à 0 (Contrainte pente zéro). Elle est calculée par la relation suivante :

$$\sigma_{Max} = \frac{3.F_{Max}.L}{2.b.h^2}$$

Avec : F_{Max} : Charge maximale appliquée sur l'éprouvette, N.

Le module d'élasticité en flexion où module de flexion E_f , qui caractérise la rigidité du matériau est calculé selon la norme EN ISO 14125 (ISO 14125 1998). Ce module représente la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte/déformation. Le module de flexion est calculé dans la zone de

déformation comprise entre $\varepsilon_1 = 0,0005$ et $\varepsilon_2 = 0,0025$ selon l'équation suivante (ISO 14125 1998) :

$$E_f = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Avec : σ_1 : La contrainte qui correspond à la déformation ε_1 .

σ_2 : La contrainte qui correspond à la déformation ε_2 .

3.1.3 Conductivité thermique

La conductivité thermique a été mesurée à l'aide d'un analyseur de constantes thermiques à disque chaud de mesure HotDisc modèle TPS 1500 (Figure III.12). L'analyseur de constantes thermiques Hot Disk est une technologie émergente qui utilise la technique de la source plane transitoire pour mesurer la conductivité thermique dans le plan et hors plan d'un matériau anisotrope. Cette méthode est flexible et nécessite simplement de tester une ou deux pièces de l'échantillon, chacune ne comportant pas plus d'une surface plane sur laquelle le capteur peut être appliqué. Il n'y a pas besoin de géométries fixes, d'agents de contact ou de modifications de surface (Gustavsson et al. 1994; Disk 2006).

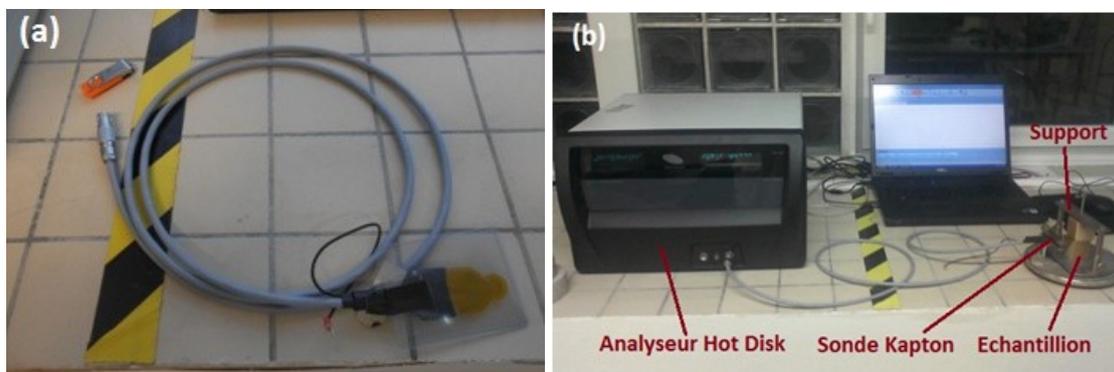


Figure III. 12: Essai de mesure de conductivité thermique.

Le Hot Disk TPS 1500 est un conductimètre thermique pour tester les matériaux de construction, les matériaux d'isolation ou tout autre type d'échantillons en vrac. Le Hot Disk TPS 1500 partage la qualité sterling, la robustesse et la simplicité opérationnelle avec une précision supérieure à 5% et est également conforme à la norme ISO 22007-2 (ISO 2008). Le capteur Kapton 4922 d'un diamètre de 19,8 mm est utilisé dans cette méthode d'essai (Figure III.12-a). Les dimensions des échantillons de la conductivité thermique doivent être plus grandes que le diamètre du capteur Kapton. Les conductivités thermiques ont été mesurées à 24°C. Pour chaque cas du matériau LPC, trois mesures ont été prises pour déterminer l'écart type des mesures obtenues.

3.1.4 Microscopie électronique à balayage (MEB).

La microscopie électronique à balayage (MEB ou SEM pour Scanning Electron Microscopy en anglais) est une technique de microscopie électronique basée sur le principe des interactions électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon (Sbiai 2011).

Des observations avec la microscopie électronique à balayage (MEB) de type ZEISS GeminiSEM 300 ont été réalisées sur le matériau LPC. L'objectif principal des observations par MEB est de caractériser l'état d'adhésion entre la fibre et la matrice du matériau LPC obtenus ainsi pour visualiser la distribution de la matrice et l'homogénéité du matériau. Les observations sont faites pour chaque configuration du matériau LPC sur des échantillons non déformés. Une tension d'accélération de 15 kV a été utilisée de façon à éviter la dégradation de l'échantillon qui aurait lieu si la vitesse d'impact des électrons incidents sur l'objet était trop grande (Sbiai 2011).

3.2 Matériau CPNDE

3.2.1 Essais de traction

L'essai de traction est effectué seulement sur le matériau 100% résine époxy. Les propriétés de traction de cette matrice, à savoir la résistance à la traction, le module de Young et le coefficient de Poisson ont été déterminées en utilisant une machine d'essai universelle Instron 5969. Une cellule de charge de 10kN est utilisée et une longueur de jauge de 50mm est considérée et une vitesse de chargement de 2 mm/min a été appliquée. Pour la détermination du coefficient de Poisson, un dispositif vidéo extensomètre avancé est placé sur la machine d'essai et calibré pour enregistrer les mesures des déformations transversales et axiales de l'échantillon. Pour les mesures des déformations transversales et longitudinales, des marques de jauge sur l'échantillon sont nécessaires pour définir la longueur de la jauge. Ceux-ci doivent être à peu près équidistants du point médian et la distance entre les marques doit être mesurée avec une précision de 1% ou mieux (Figure III.13). Les marques de jauge ne doivent pas être rayées, perforées ou imprimées sur l'échantillon d'essai d'une manière qui pourrait endommager le matériau testé. Il faut veiller à ce que le support de marquage n'ait pas d'effet néfaste sur le matériau soumis à l'essai et, dans le cas de lignes parallèles, soit aussi étroit que possible (ISO 1996).

Trois éprouvettes de traction ont été testées pour le calcul des propriétés mécaniques. Ces propriétés ont été calculées selon la norme EN ISO 527-1(ISO 1996). Le module de Young est

calculé dans la zone de déformation comprise entre $\varepsilon_1 = 0,0005$ et $\varepsilon_2 = 0,0025$ selon l'équation suivante (ISO 1996) :

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Avec : σ_1 : La contrainte qui correspond à la déformation ε_1 .

σ_2 : La contrainte qui correspond à la déformation ε_2 .

Le coefficient de Poisson ν est calculé selon l'équation suivante (ISO 1996) :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}$$

Avec : ε_T : Déformation transversale.

ε_L : Déformation longitudinale.

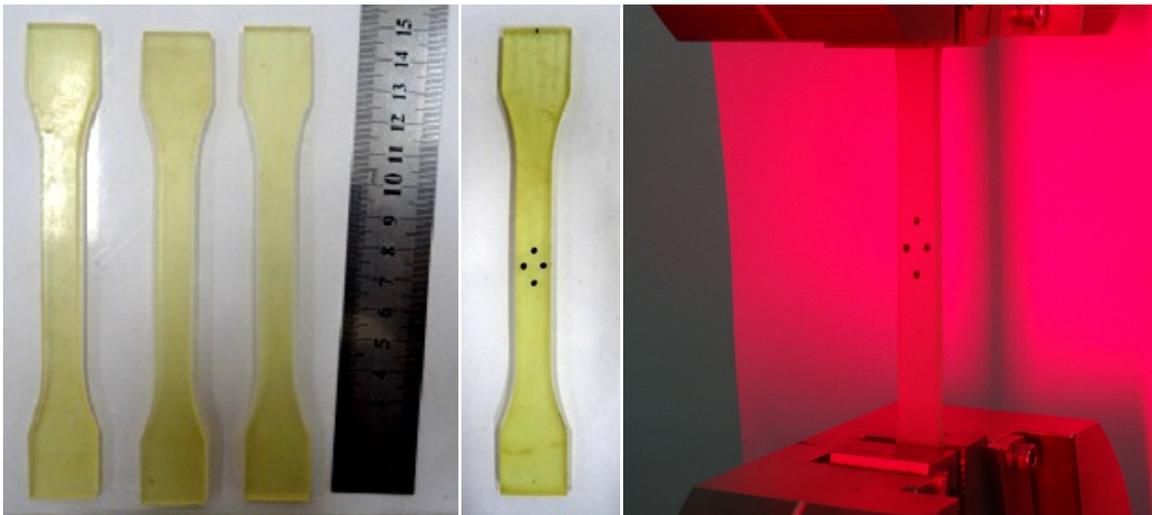


Figure III. 13: Essai de traction sur des éprouvettes marquées.

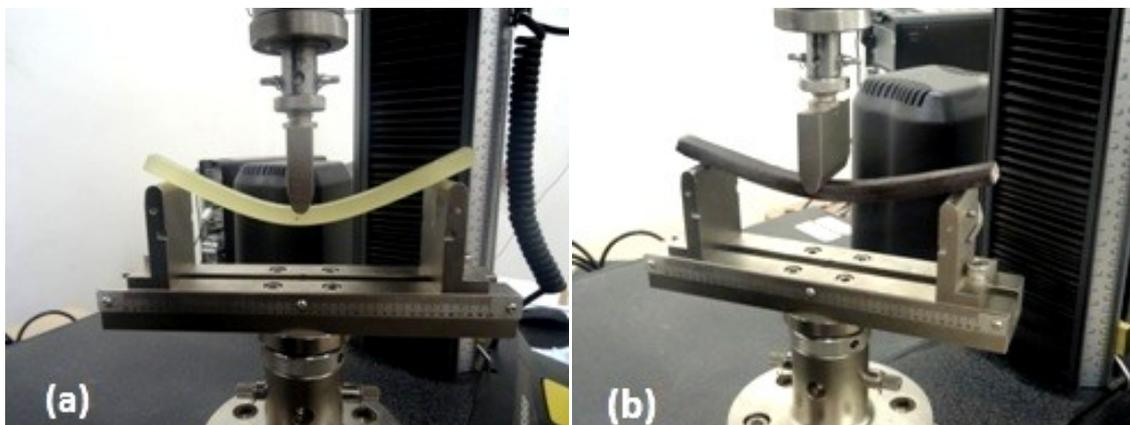


Figure III. 14: Essai de flexion : (a) Eprouvette 100% résine epoxy, (b) Matériau CPNDE.

3.2.2 Essai de flexion trois points

Les essais de flexion trois points sont effectués sur le matériau constitué seulement d'une résine époxy (100% résine) et sur le matériau CPDNE (Figure III.14). Les propriétés de flexion trois points ont été déterminées de la même manière que les propriétés de flexion du matériau LPC ont été déterminées. Pour chaque cas, deux éprouvettes du matériau LPC ont été testés pour obtenir la contrainte maximale et le module de flexion.

4 Conclusion

Le présent chapitre d'écrit la mise en œuvre des deux composites élaborés sur la base de déchets de palmier dattier en présentant les méthodes de caractérisations utilisées. Deux type de matrices ont été utilisées, thermoplastique et thermodurcissable, pour l'élaboration des deux nouveaux composites.

Le premier composite thermoplastique est élaboré à partir des déchets industriels d'emballage de polystyrène expansé et les feuillets de déchets de palmiers dattiers utilisés comme renfort (Leaflet Polystyrene Composite, LPC). La matrice utilisée dans l'élaboration du matériau LPC est obtenue en dissolvant les déchets de polystyrène expansé dans l'essence. Pour l'élaboration du matériau LPC, des moules métalliques ont été fabriqués pour la préparation des éprouvettes d'essai de flexion et pour les échantillons de conductivité thermique. Dans un premier lieu, plusieurs combinaisons entre la tailles du renfort (A: 0,1-0,315 mm, B: 0,315-0,5 mm et C: 0,5-1 mm) et les fractions massiques renfort/matrice (70/30, 75/25 et 80/20%) ont été considérés afin d'étudier l'effet de la taille du renfort et la fraction massique entre le renfort et la matrice sur les propriétés du matériau LPC. Dans un second lieu, et pour étudier l'effet de la lignine sur les propriétés mécanique, d'autres éprouvettes ont été préparées. Des essais physiques, mécaniques, thermiques et morphologiques ont été effectués pour caractériser le matériau LPC. Des mesures de densité avec pycnomètre, essais de flexion trois points et des mesures de conductivité thermique par l'appareil Hotdisc ont été effectués. De plus, une caractérisation par MEB a été réalisée pour observer l'état de l'adhérence entre les fibres et la matrice.

Le deuxième composite thermodurcissable est basé sur les déchets des fruits de palmiers dattiers (noyaux des dattes), utilisé sous forme de particules comme renfort et d'une résine époxy comme matrice (Composite à base de Particule de Noyaux de Dattes et une matrice Epoxy, CPNDE). Pour la caractérisation de la matrice utilisée, 100% résine époxy, des éprouvettes de traction et de

flexion trois points sont préparées. De même, pour le matériau CPNDE, où des éprouvettes de flexion trois points sont préparées en utilisant un moule métallique pour obtenir des dimensions normalisés. Une seule taille de particules de noyaux des dattes est utilisée avec différentes fractions massiques comprises entre zéro et 40% afin d'étudier l'effet de la fraction massique du renfort sur les propriétés mécanique du composite CPNDE. De point de vue cohésion matrice/renfort, le matériau obtenu est généralement très homogène. Le matériau 100% résine est caractérisé par des essais de traction et de flexion trois points. Par contre, le matériau CPND est seulement caractérisé en flexion trois points.

Chapitre IV

Caractérisation expérimentale des composites à base de déchets de palmier dattier.

Chapitre IV : Caractérisation expérimentale des composites à base de déchets de palmier dattier

Dans ce chapitre les résultats obtenus des essais de caractérisations expérimentales, effectués sur les deux nouveaux composites élaborés, sont présentés et discutés. On commence d'abord par la densité, le module et la résistance à flexion, la conductivité thermique ainsi la morphologie du matériau à base de feuillets de palmier dattier. En suite, une étude est présentée sur l'influence de quelques paramètres telle que la taille du renfort, la fraction massique entre le renfort et la matrice et l'effet de la lignine sur les propriétés des composites. Pour le deuxième matériau, à base de particules de noyaux de dattes, la discussion est conduite sur le module de Young, la résistance à la rupture, le coefficient de Poisson, le module de flexion de la matrice et le module de flexion, la contrainte maximale du composite développé. Les propriétés des composites ainsi obtenues sont comparées avec des propriétés d'autres matériaux conventionnels et similaires obtenus de la littérature.

1 Matériau LPC

1.1 Densité

Les résultats de la densité du matériau de divers échantillons de LPC sont montrés sur la figure IV.1. La densité du matériau LPC formulé change en fonction de la proportion entre la matrice et le renforcement ainsi que de la taille du renforcement. Il est montré à partir de la figure IV.1 que la densité du matériau LPC augmente avec la diminution de la quantité de la matrice, de sorte que le matériau est plus léger lorsque la taille du renfort est grande. Cette observation ne change pas même si les écarts-types des mesures de densité sont pris en compte. Ces écarts-types sont acceptables, allant d'un minimum de 1,86% (échantillon B2) à un maximum de 14,35 (échantillon C1) avec un écart type moyen de 7,5%.

1.2 Propriétés en flexion trois points du matériau LPC

Les essais de flexion ont permis d'extraire le module de flexion et la contrainte maximale. Les figures IV.2 montrent l'effet des rapports massiques matrice/renfort et la taille du renfort sur le comportement mécanique du matériau LPC. On observe que les valeurs des pentes de la courbe diminuent avec l'augmentation de la taille des fibres et que le matériau LPC devient plus élastique.

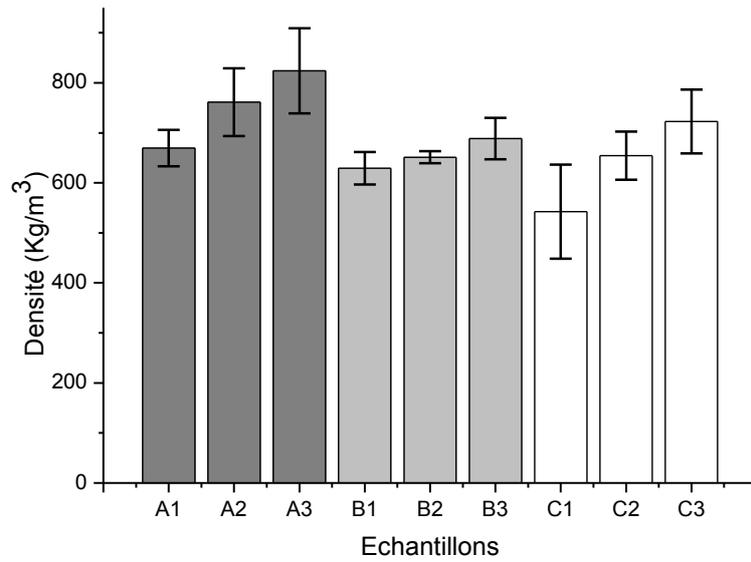


Figure IV. 1: Densité du matériau LPC.

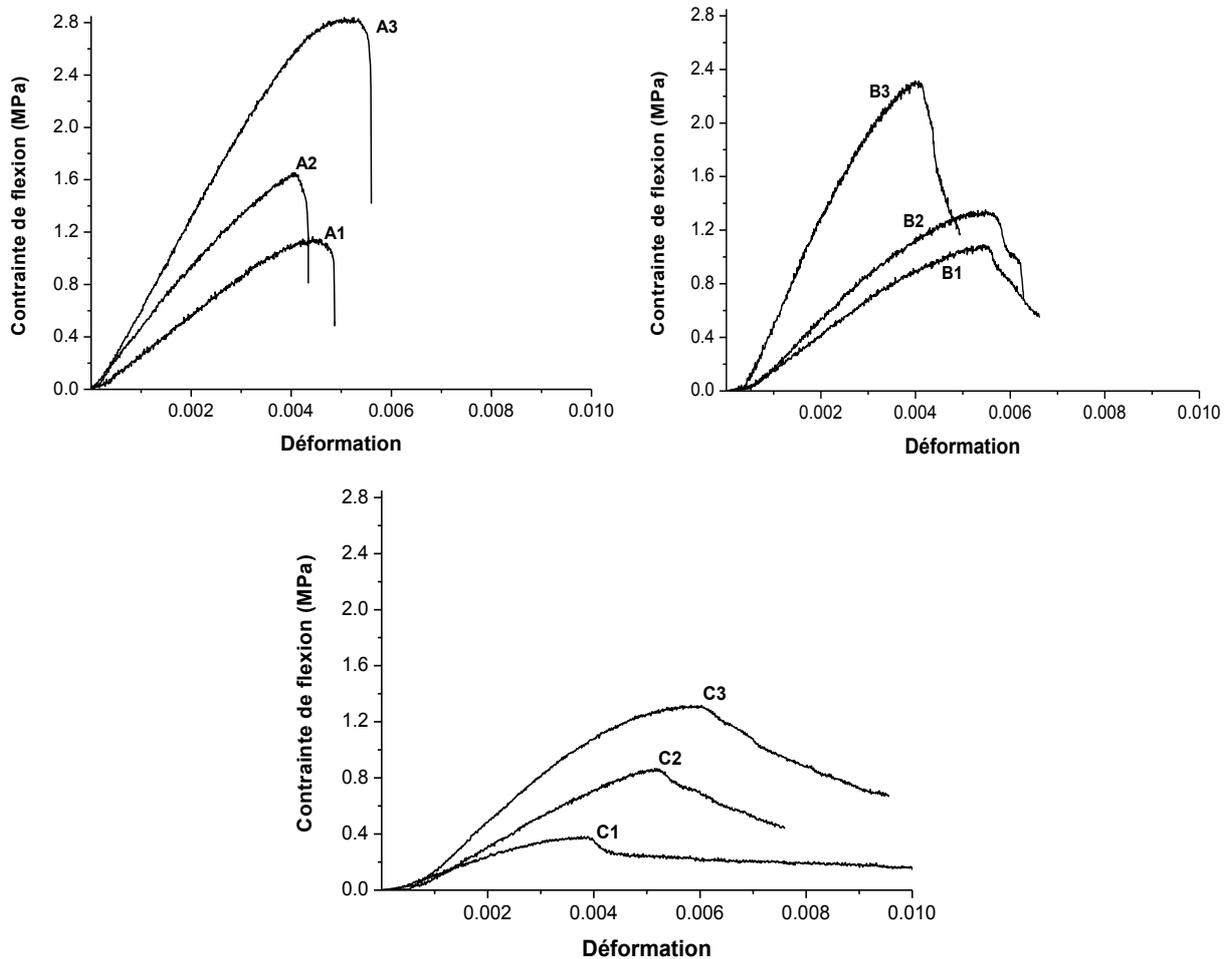


Figure IV. 2: Courbes types contrainte/déformation des essais de flexion du matériau LPC.

En même temps, le matériau se présente avec une rupture fragile avec les échantillons A, c'est-à-dire le matériau LPC avec une taille petit de fibre (0,1-0,315). En augmentant la taille de la fibre, les échantillons A à C, le mécanisme de rupture passe de fragile à ductile.

La fragilité des composites plastiques à faible granulométrie de renfort naturel est déjà observée dans la littérature (Yemele et al. 2010; Binhussain and El-Tonsy 2013). Dans cette étude, la fragilité des échantillons «A» peut s'expliquer par: (i) la fissure s'est produite et propagée directement dans la matrice en raison de la petite taille du renfort, et (ii) la nature de la matrice, obtenue par le recyclage des déchets EPS, connu comme un matériau fragile (Schmidt et al. 2011; Binhussain and El-Tonsy 2013). En augmentant la taille du renfort, les échantillons B à C, le matériau LPC acquérait une ductilité. Une même observation est rapportée par Yemele et al. (Yemele et al. 2010) où l'augmentation de la longueur de fibre améliore la résistance et l'élasticité. Dans ce cas, les granulométries moyennes et grandes du renfort supportent les contraintes transmises par la matrice et retardent la rupture du matériau. Les figures IV.3-a et b montrent respectivement le module de flexion et la contrainte maximale pour les différents échantillons considérés.

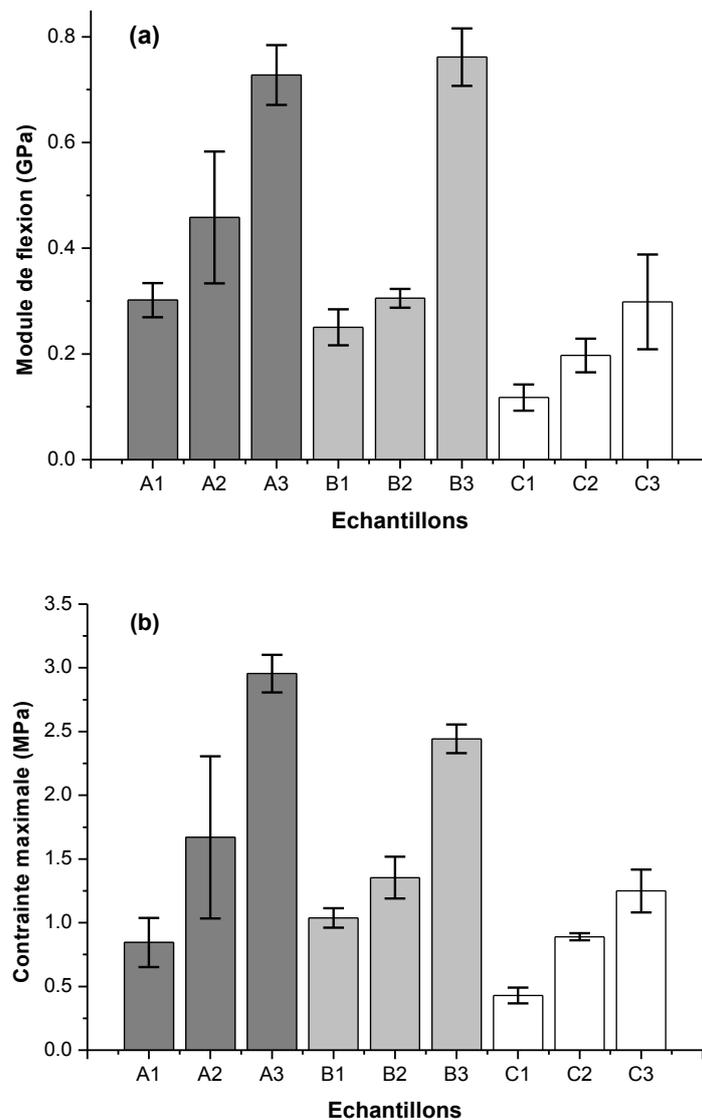


Figure IV. 3: Effet de la tailles du renfort et la proportion massique matrice/renfort sur: (a) le module de flexion et (b) la contrainte maximale.

On peut remarquer sur la figure IV.3-a que le module de flexion augmente généralement avec l'augmentation de la quantité de la matrice pour les trois types d'échantillons. La même observation a également été observée dans le cas de la contrainte maximale présentée dans la figure IV.3-b. Ces résultats montrent une moyenne acceptable des écarts-types concernant le module de flexion et les mesures de contraintes maximales avec des valeurs atteignant respectivement 15% et 13%. On observe également que le module de flexion et la contrainte maximale diminuent généralement en augmentant la taille du renfort, des échantillons A à C, et que le matériau LPC devient plus élastique.

1.3 Conductivité thermique du matériau LPC.

Les mesures de conductivité thermique des échantillons A, B et C sont respectivement obtenues dans les marges suivantes: 0,149-0,159, 0,128-0,147 et 0,112-0,137 W/m.K. En général, la conductivité thermique augmente légèrement en diminuant la quantité et la taille du renfort. Dans tous les cas, la variation de la valeur de conductivité thermique (de 0,11 à 0,16 W/m.K) reste très limitée et le matériau LPC présente un comportement isolant.

1.4 Récapitulation.

Le tableau IV.1 résume les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du LPC et des matériaux similaires rapportés dans la littérature (Khedari et al. 2004; Xu et al. 2004; Agoua et al. 2013; Binhussain and El-Tonsy 2013; Mirmehdi et al. 2014). On observe que la densité mesurée des échantillons LPC (A, B et C) varie de 542 à 824 kg/m³. Généralement, les matériaux LPC formulés ont une légèreté ou une densité proche de celles des matériaux présentés dans le tableau IV.1, à l'exception de celle des panneaux de particules KC obtenus par Xu et al. (Xu et al. 2004). Les matériaux LPC ont une densité proche de celle du bois, comme les bois naturels tendres et durs (Xu et al. 2004; Binhussain and El-Tonsy 2013), ce qui implique son utilisation potentielle comme matériau de substitution en particulier pour les pays avec peu de forêts et de nombreuses oasis de dattier. Les matériaux LPC ont également une densité proche de celle des matériaux composites classiques (490-890 kg/m³) comme le MDF, le contreplaqué, les panneaux de particules et les panneaux durs (Xu et al. 2004; Binhussain and El-Tonsy 2013). Comparée à des matériaux similaires, la densité du matériau LPC se situe dans la gamme des panneaux de particules DPCC (Khedari et al. 2004) (288-910 kg/m³) et est plus légère que les matériaux PC-mix, PVC-mix et PS-mix (Binhussain and El-Tonsy 2013). Cela montre que si les propriétés mécaniques

du LPC sont acceptables, on peut envisager une multitude d'applications potentielles en fonction de sa densité compétitive.

Tableau IV. 1: Propriétés mécaniques, physiques et thermiques du LPC et des matériaux similaires.

Echantillons LPC	ρ (kg/m ³)	E_f (GPa)	σ_{Max} (MPa)	λ (W/m.K)
A1	669.58±36.17	0.3018±0.03	0.8449±0.19	0.1488± 0.008
A2	761.36±67.53	0.4583±0.12	1.6703±0.64	0.1539±0.005
A3	824.05±85.09	0.7278±0.06	2.9550±0.15	0.1588±0.004
B1	629.01±32.52	0.2503±0.03	1.0379±0.08	0.1369±0.004
B2	651.33±12.11	0.3053±0.02	1.3538±0.16	0.1283±0.001
B3	688.42±41.35	0.7616±0.05	2.4423±0.11	0.1469±0.011
C1	654.39±93.88	0.1177±0.02	0.4290±0.06	0.1368±0.004
C2	542.41±48.22	0.1972±0.03	0.8892±0.03	0.1122±0.001
C3	722.68±63.81	0.2984±0.09	1.2496±0.16	0.1266±0.00008
A	700-824	0.30-0.73	0.84-2.96	0.149-0.159
B	629-688	0.25-0.76	1.04-2.44	0.128-0.147
C	542-723	0.12-0.30	0.43-1.25	0.112-0.137
LPC (A, B and C)	542 - 824	0.12 - 0.76	0.43 - 2.96	0.112-0.159
Wood (pine, lauan) (Xu et al. 2004)	450–630	/	/	0.151
Natural hard wood (Binhussain and El-Tonsy 2013)	660	/	/	0.12 - 0.29
Natural soft wood (Binhussain and El-Tonsy 2013)	470	/	/	0.12 - 0.29
MDF (Binhussain and El-Tonsy 2013)	650-790	1.35 - 2.5	9.5- 22	0.10 - 0.18
Plywood (Xu et al. 2004)	490	/	/	0.083
Particleboard (Xu et al. 2004)	690	/	/	0.097
Hardboard (Xu et al. 2004)	890	/	/	0.126
DPCC particleboards (Khedari et al. 2004)	288-910	0.084- 2,24	0.69-43.15	0.073-0.134
KC particleboards (Xu et al. 2004)	100-300	0.3 (mean value)	1.1 (mean value)	0.051-0.058
WW-EPS composite (Agoua et al. 2013)	/	/	/	0.196-0.274
PC-mix (Binhussain and El-Tonsy 2013)	1000	1.68	/	/
PVC-mix (Binhussain and El-Tonsy 2013)	1030	1.89	/	/
PS-mix (Binhussain and El-Tonsy 2013)	870	1.91	/	/
45%DPWF (Mirmehdi et al. 2014)	/	0.85-2.8	25.66-28.95	/
60%DPWF (Mirmehdi et al. 2014)	/	0.66-1.82	20.26-26.85	/
75%DPWF (Mirmehdi et al. 2014)	/	0.20-0.65	10.26-14.47	/

D'après le tableau IV.1, on peut voir que le module de flexion du matériau LPC, $E_f = 0,12$ à $0,76$ GPa, est plus petit que le matériau 45% DPWF (Mirmehdi et al. 2014), le MDF et le composite obtenu par Binhussain et al. (Binhussain and El-Tonsy 2013). Le module de flexion du matériau LPC formulé est similaire aux panneaux de particules KC (Xu et al. 2004) et au DPWF avec 60% et 75% de renforcement obtenus par Mirmehdi et al. (Mirmehdi et al. 2014).

De plus, le module de flexion du LPC est de l'ordre de celui des panneaux de particules DPCC (Khedari et al. 2004). Néanmoins, la contrainte maximale du matériau LPC ($0,43$ - $2,96$ MPa) reste faible par rapport à la majorité de celle obtenue dans la littérature (Khedari et al. 2004; Xu et al. 2004; Agoua et al. 2013; Binhussain and El-Tonsy 2013; Mirmehdi et al. 2014). Pour cette raison, on estime que les propriétés mécaniques du matériau LPC devraient être améliorées par l'amélioration du protocole de préparation. Ainsi, d'autres alternatives peuvent être envisagées comme le renforcement du LPC par un autre matériau pour construire un matériau multicouche ou un panneau sandwich (Dweib et al. 2004; Dweib et al. 2006; Du et al. 2012).

Comme mentionné précédemment, il est observé dans le tableau IV.1 que la conductivité thermique du matériau LPC est étroitement fonction de la teneur en fibres et de la taille du renfort. La conductivité thermique a une relation inverse avec la densité du matériau LPC. Une conclusion similaire a été rapportée dans la littérature par Khedari et al. (Khedari et al. 2001) sur le composite DPCC. De plus, la conductivité thermique des échantillons de LPC a été trouvée dans la gamme des matériaux comparés (Khedari et al. 2004; Xu et al. 2004; Binhussain and El-Tonsy 2013), en particulier avec ceux donnés par Khedari et al. (Khedari et al. 2004).

On estime que le matériau composite WW-EPS préparé par Agoua et al. (Agoua et al. 2013) est très similaire au matériau LPC car les deux composites ont la même matrice. La valeur minimale de la conductivité thermique LPC ($0,1122$ W/m.K) est faible par rapport à celle du matériau composite WW-EPS ($0,196$ W/m.K). Les mêmes résultats sont également vérifiés pour les valeurs moyennes de conductivité thermique trouvées $0,1403$ W/m.K et $0,253$ W/m.K, respectivement pour les matériaux composites LPC et WW-EPS. Ainsi, le renforcement basé sur les déchets de dattes a permis de préparer un matériau composite (LPC) 50% plus isolant que les déchets de bois utilisés par Agoua et al. (Agoua, Allognon-Houessou et al. 2013).

Comme les résultats de la densité LPC, le tableau IV.1 montre également une similitude dans la conductivité thermique du matériau LPC et les bois conventionnels, panneaux durs et le MDF.

Ainsi, le matériau LPC est considéré comme un matériau isolant dû notamment à la faible conductivité thermique du renfort (Agoudjil et al. 2011).

A partir du tableau IV.1 et selon les propriétés LPC (physique, mécanique et thermique), le matériau composite développé peut être utilisé dans le domaine de la construction comme matériau d'isolation thermique (murs de séparation, toit isolant, etc.) ou comme composant structurel dans des structures sandwich ou multicouches.

1.5 Caractérisation par microscopie électronique à balayage (MEB)

Les figures IV.4 montrent la visualisation par MEB de trois échantillons de LPC avec différentes tailles de renfort (A1, B1 et C1). Les figures donnent des informations utiles sur l'état d'adhérence de l'interface fibre-matrice du matériau LPC. Les figures montrent une répartition aléatoire des fibres dans la matrice pour tous les échantillons. Les fibres courtes (A1) sont complètement recouvertes par la matrice et forment un matériau homogène avec peu de défauts. Dans ce cas, une bonne interface fibre-matrice est obtenue. L'augmentation de la taille de la fibre (de B1 à C1) a un effet négatif sur l'homogénéité et sur l'état d'adhérence de l'interface fibre-matrice. Les figures IV.4 (B1 et C1) montrent que la matrice apparaît avec plus d'agrégation sur les surfaces de la fibre sans enduire les surfaces entières des fibres de taille moyennes et grande. Ceci peut être dû à la méthode de préparation des échantillons LPC obtenue en mélangeant la matrice EPS recyclée et le renfort. Dans ce cas, l'hétérogénéité de la morphologie de la fibre constitue la principale cause de l'hétérogénéité du matériau LPC. En effet, cette hétérogénéité rend l'opération de mélange plus difficile ce qui favorise la présence de défaut et de vide dans le produit final.

En conclusion, l'amélioration de l'état d'adhérence de l'interface fibre-matrice du matériau LPC est inversement proportionnelle à la taille du renfort. Ce résultat confirme les résultats de la caractérisation mécanique discutée ci-dessus.

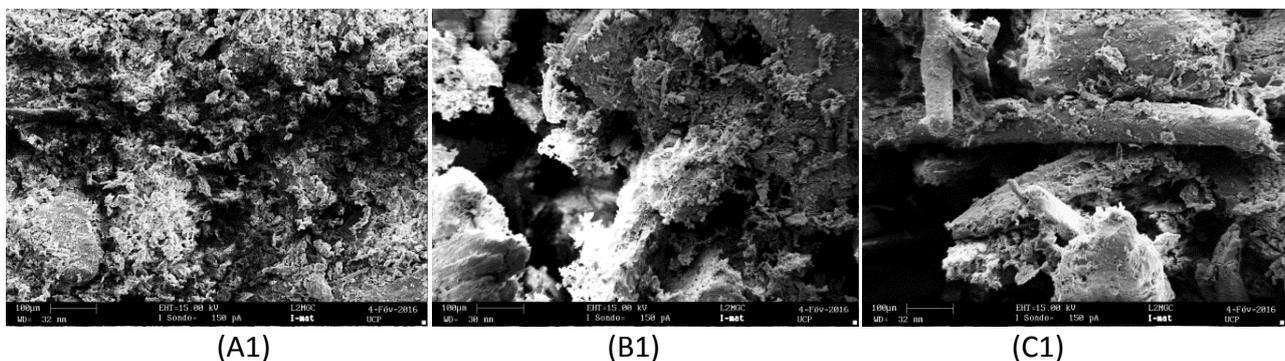


Figure IV. 4: Visualisation par MEB d'échantillons LPC avec différentes tailles de renfort (A1, B1 et C1).

Les figures IV.5 montrent la visualisation par MEB d'échantillons "A", avec 80, 75 et 70wt% de renforcement, qui ont la même taille du renfort (0,1-0,315 mm). Les figures IV.5 montrent clairement que les fibres sont bien enrobées dans tous les échantillons "A". On peut observer que la visualisation de l'échantillon A2 montre des fibres, réparties aléatoirement dans la matrice, enrobées par la matrice avec un bon état d'adhésion. En conclusion, les visualisations des figures IV.5 montrent un bon état d'adhésion des interfaces fibre-matrice pour tous les échantillons "A". L'état d'adhérence des interfaces fibre-matrice est amélioré en augmentant le taux de la matrice des échantillons "A". Cette amélioration de l'état d'adhésion explique et confirme les résultats des caractérisations mécaniques des échantillons "A" discutés ci-dessus qui augmentent avec l'augmentation du taux de la matrice.

La figure IV.6 montre la visualisation par MEB de l'échantillon C1, avec une quantité de matrice égale à 20 wt% et une taille de renfort de 0,5-1 mm. La figure illustre une fissure dans une grande fibre. On pense que la cause d'une telle fissure est due au processus de moulage du composite, où une pression de moulage élevée (10 bars) est appliquée. Dans ce type d'échantillon (C), l'application de haute pression dans un mélange avec la présence de nombreux défauts et vides favorise la création des fissures dans les fibres. Ceci explique les résultats des caractérisations mécaniques faibles des échantillons "C" discutés ci-dessus.

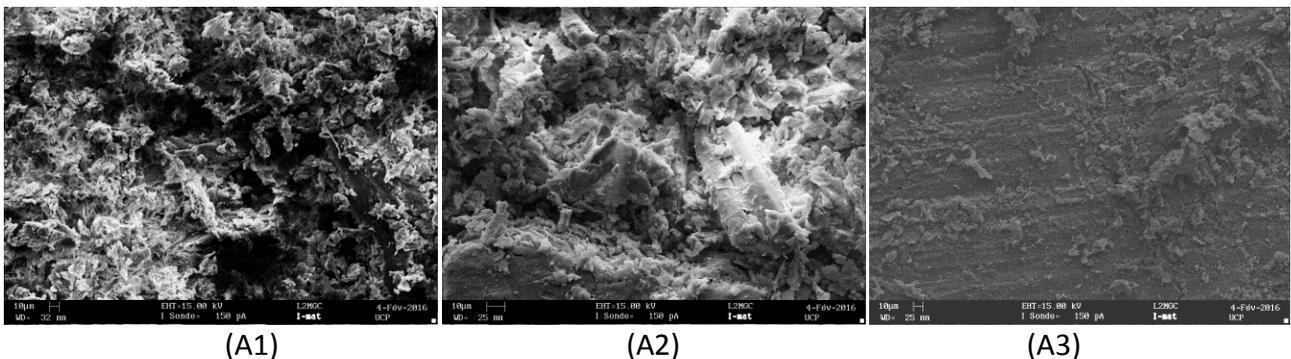


Figure IV. 5: Visualisation par MEB d'échantillons "A" avec 80, 75 et 70wt% de renforcement.

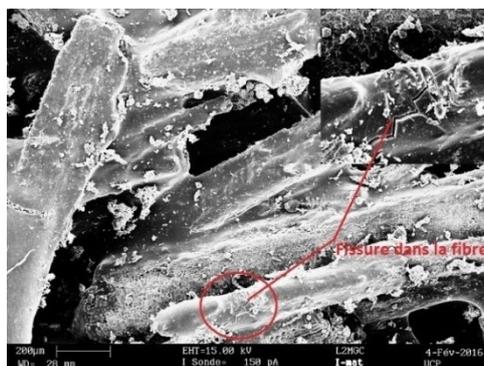


Figure IV. 6: Visualisation par MEB de l'échantillon C1: Illustration d'une fissure dans la fibre.

1.6 Effet de la lignine sur les propriétés mécaniques du LPC

Les figures IV.7 montrent l'effet de la lignine sur le comportement mécanique du matériau LPC. On observe que les valeurs des pentes de la courbe diminuent avec l'augmentation de la quantité de lignine et que le matériau LPC devient plus élastique. Le matériau présente une rupture fragile avec l'addition de 5% de lignine dans le matériau LPC. Au de là de cette valeur, le mécanisme de la rupture devient ductile.

Les figures IV.8-a, b montrent respectivement le module de flexion et la contrainte maximale pour les différents échantillons considérés. On peut remarquer sur la figure IV.8-a que le module de flexion diminue généralement avec l'augmentation de la quantité de lignine. La même observation a également été observée dans le cas de la contrainte maximale présentée dans la figure IV.8-b. Ces résultats montrent des écarts-types faibles concernant le module de flexion (5% à 12%) et des écarts-types acceptables pour les contraintes maximales (10% à 30%).

D'après cette étude, on constate l'addition de lignine dans le matériau LPC a un effet inverse sur les propriétés mécaniques du matériau. Même observation ont été signalé par plusieurs chercheurs (Alexy et al. 2000; Rozman et al. 2001; Thielemans et al. 2002). Pour cette raison les chercheurs ont recommandé le traitement des fibres afin de réduire la quantité de la lignine dans le composite.

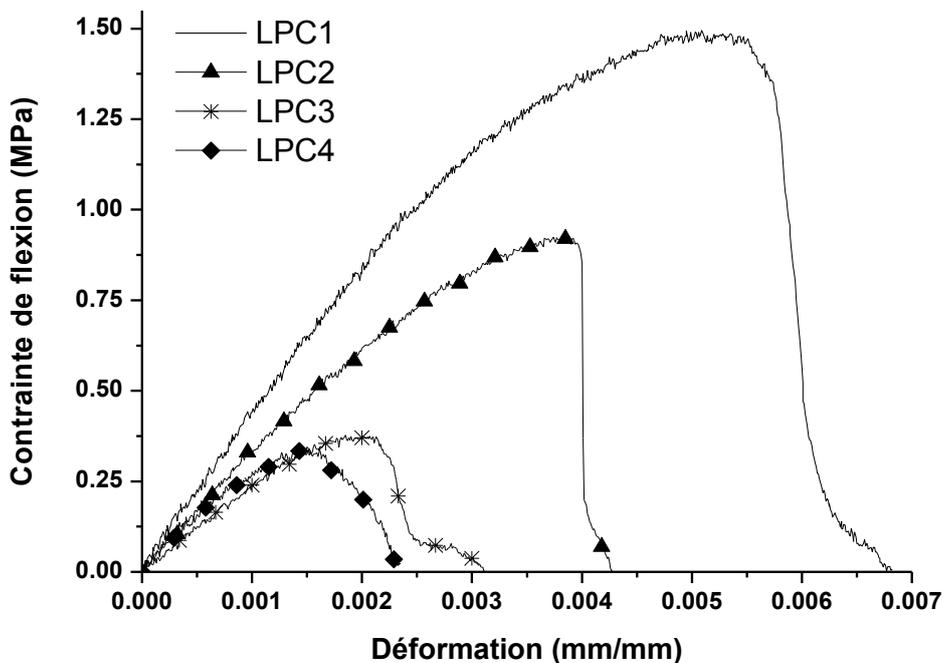


Figure IV. 7: Courbe contrainte/déformation du matériau LPC avec la présence la lignine.

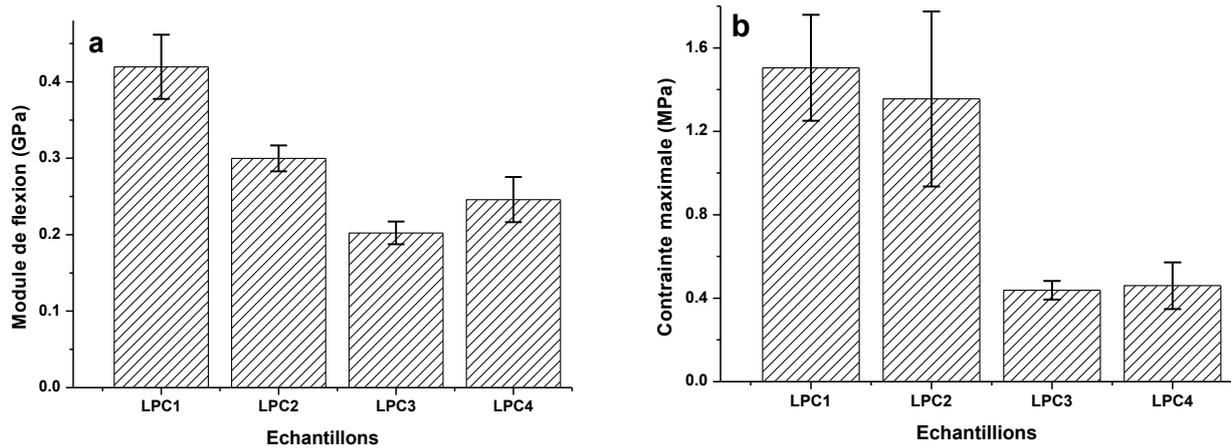


Figure IV. 8: Propriétés du LPC avec la présence de la lignine : (a) Module de flexion, (b) Contrainte maximale.

2 Matériau CPNDE

2.1 Propriétés de traction du matériau pure résine

Les résultats relatifs à l'essai de traction de contrainte/déformation effectué sur des échantillons d'époxy jusqu'à la rupture sont représentés sur la figure IV.9. Cette figure montre des courbes ascendantes similaires avec un accord sur la loi de Hooke pour les trois échantillons. Deux parties linéaires successives sont représentées et suivies d'une région à rendement discret (une seule courbe présente un point de pente nulle qui peut être considéré comme un point limite).

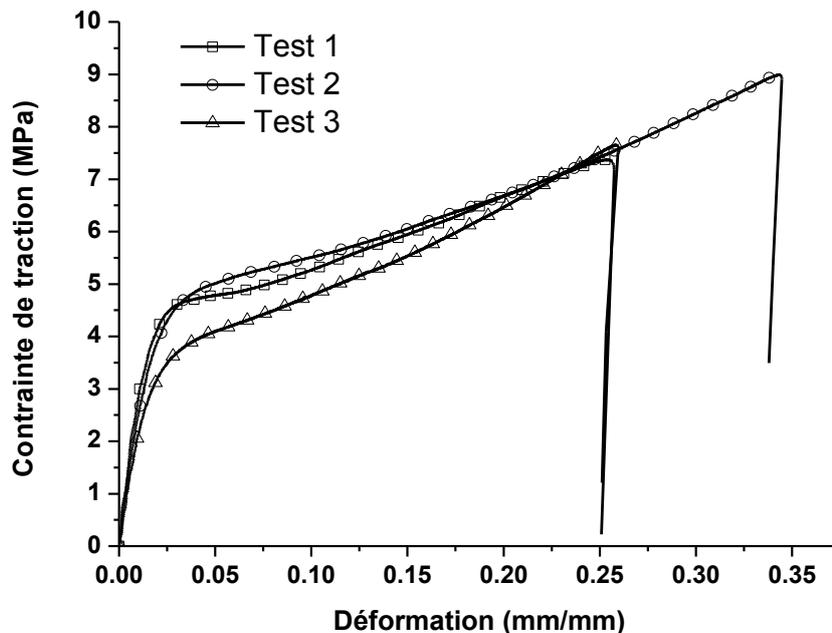


Figure IV. 9: Courbe contrainte/déformation d'essai de traction du matériau pure résine.

Tableau IV. 2: Propriétés mécaniques de la matrice époxy.

Test	1	2	3	Valeur moyenne	Ecart type	Erreur (%)
E	393	0321	254	323	0.699	21.68
ν	0.39	0.42	0.40	0.40	0.02	4.54
σ_{TM}	7.37	9.00	7.65	8.01	0.87	10.84

La région de rupture est également présentée par les mêmes points de rupture pour deux échantillons, où une déformation irréversible constante est obtenue. Bien que le test de traction ne soit pas suffisant pour définir toutes les propriétés mécaniques, la description précédente et les grandes réponses de temps et de déformation (entre 25 et 35%) révèlent un comportement mécanique élasto-viscoplastique avec une fracture fragile à une contrainte maximale de 8,01 MPa (avec une erreur de 10.84%). Le module d'élasticité a été mesuré comme la pente de la courbe de contrainte dans la région linéaire entre 0,05% et 0,25%. La valeur moyenne est de 322,62 MPa (avec une erreur de 21,68%). résultat qui est presque identique à celui obtenu par Ghazanfari et al. (Ghazanfari et al. 2008). D'autres détails sont résumés dans le tableau IV.2.

La pente entre les déformations axiales et transversales est présentée dans la figure IV.10. Les résultats obtenus montrent que la déformation latérale est linéaire par rapport à la déformation axiale tout au long de l'évolution du comportement (jusqu'au point de rupture). Par conséquent, un coefficient de Poisson de 0,4 est calculé selon la norme ISO 527 (ISO 2012) avec une bonne précision (erreur de 4,54% en utilisant la méthode des moindres carrés). Cela peut généralement être dû au calibrage élevé de la mesure de l'appareil vidéo.

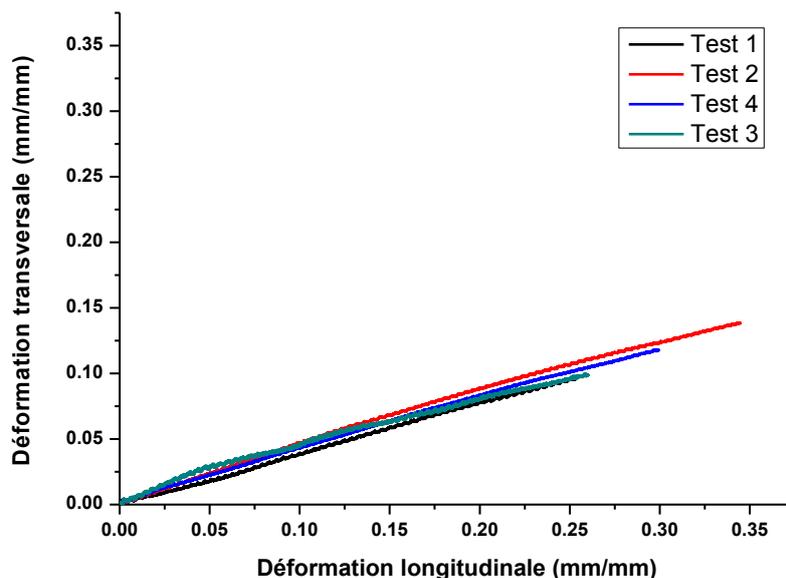


Figure IV. 10: Courbes de déformation transversale/longitudinale d'essai de traction du matériau pure résine.

2.2 Propriétés de flexion du matériau

Dans la présente section, l'effet de la teneur en fibres (% en poids) dans le matériau composite sur le comportement mécanique est étudié. Les résultats expérimentaux du test de flexion (module de flexion et contrainte de flexion maximale) sont présentés dans le tableau IV.3. Les propriétés mécaniques du matériau CPNDE sont comparées avec les propriétés mécaniques du matériau à de noyaux de dattes (Même renfort) et d'une résine polyéthylène haute densité obtenues par Ghazanfari et al. (Ghazanfari et al. 2008).

La figure IV.11 montre les types de courbes contrainte/déformation de tous les cas étudiés. Ces courbes montrent l'évolution du comportement mécanique de la matrice pure et celle des composites époxydes renforcés par des particules en noyaux des dattes.

Tableau IV. 3: Propriétés mécanique des matériaux.

Échantillons		E_f (MPa)	σ_{Max} (MPa)	E (MPa)
B1	Présent travail	961	28.94 (no break)	323
	(Ghazanfari et al. 2008)	487	25.031	339
B2	Présent travail	454	7.54 (no break)	--
	(Ghazanfari et al. 2008)	402	23.855	260
B3	Présent travail	330	4.08 (no break)	--
	(Ghazanfari et al. 2008)	404	21.118	282
B4	Présent travail	842	17.05	--
	(Ghazanfari et al. 2008)	398	16.910	319
B5	Présent travail	1380	23.57	--
	(Ghazanfari et al. 2008)	396	16.060	259

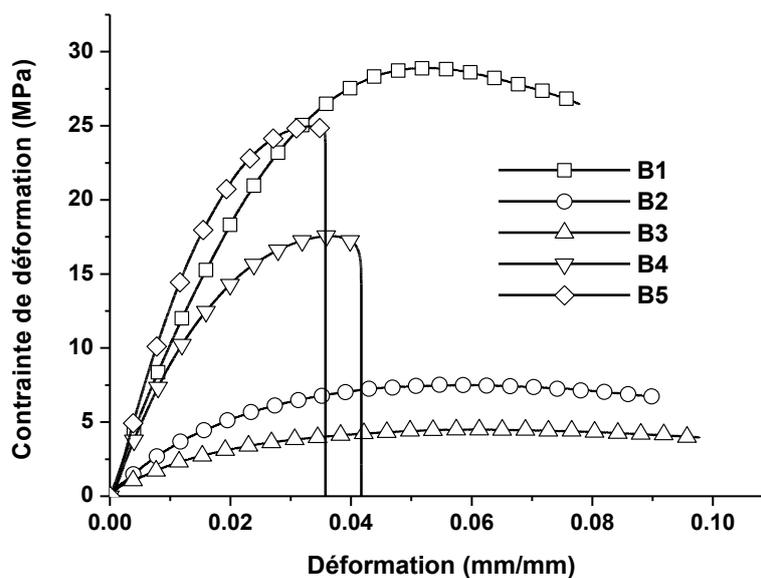


Figure IV. 11: Courbe contrainte/déformation de tous les cas étudiés.

2.2.1 Module de flexion

D'après le tableau IV.3 et la figure IV.12, d'une part, on observe qu'à une exception près, les modules de flexion obtenus de la matrice sont généralement plus élevés que ceux donnés par Ghazanfari et al. (Ghazanfari et al. 2008). Par ailleurs, l'ajout de 10 et 20% de renforcement (Cas B2 et B3) diminue le module de flexion du composite par rapport à l'échantillon B1 (100% Matrix). Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres chercheurs (Akgül and Tozluoğlu 2008; Raju et al. 2012; Hamma et al. 2013; Onyechi et al. 2015). D'autres auteurs expliquent ce comportement par le fait que lorsque la teneur en renfort augmente, plus de charge est transférée de la matrice au renfort. Comme il n'y a pas d'adhérence suffisante entre la charge et la matrice, il se produit un glissement entre le renfort et la matrice, ce qui diminue donc la rigidité du matériau (Bisht and Gope 2015). Akgül et al. (Akgül and Tozluoğlu 2008) ont expliqué ce comportement par la petite taille des particules dans la structure, ce qui a abouti à des rapports d'aspect inférieurs, conduisant finalement à un contact particule-particule faible.

Avec 40% de renforcement, le module de flexion augmente presque de 43,6%. Cette amélioration est également notable dans le même cas rapporté par Ghazanfari et al. (Ghazanfari et al. 2008) (1380 MPa contre 396 MPa) met en évidence la plus grande rigidité du renfort en particule de noyaux des dattes que la matrice (Raju et al. 2012).

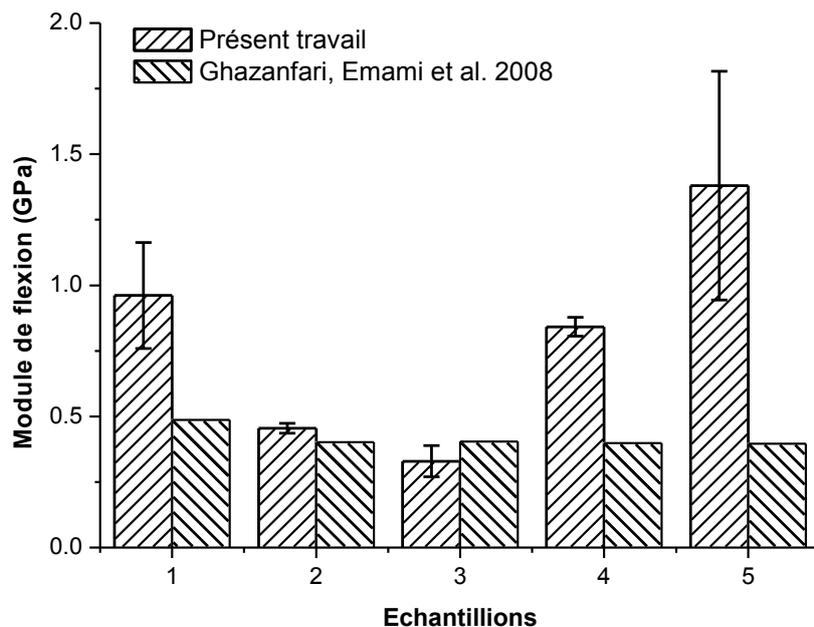


Figure IV. 12: Modules de flexion des cas étudiés.

2.2.2 Contrainte maximale

Le même comportement précédent pour la contrainte maximale est obtenu. La contrainte maximale de la résine pure (B1) reste la plus importante, même par rapport à celle de Ghazanfari et al. (Ghazanfari et al. 2008). D'autre part, la faible addition de renforcement (Cas B2 et B3) donne une faible contrainte (Figure IV.13). Par rapport aux résultats donnés par le même auteur, les contraintes maximales sont égales à 30% de renforcement et meilleures pour 40%.

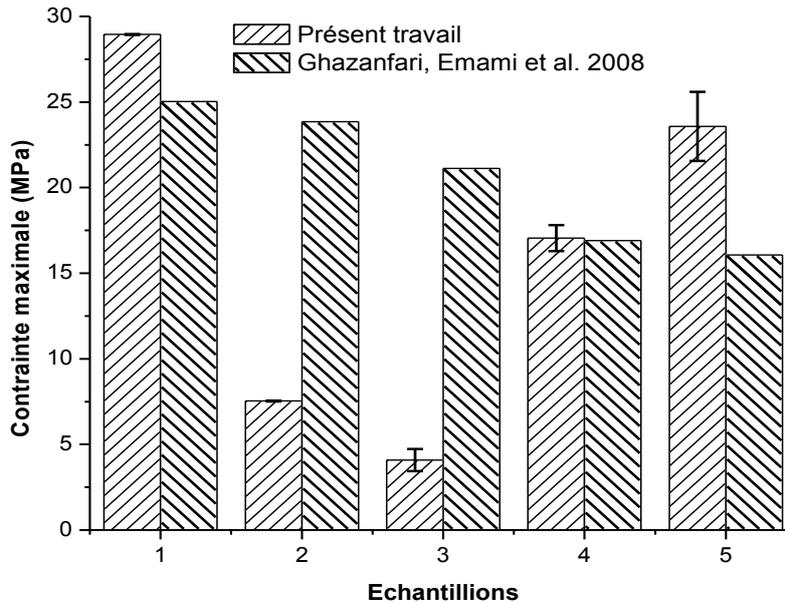


Figure IV. 13: Contrainte maximale de flexion des cas étudiés.

3 Conclusion

Dans ce chapitre, des caractérisations expérimentales des deux nouveaux matériaux, élaborés dans le cadre de la présente thèse, sont présentées et discutées.

Pour le matériau à base de feuillets de palmier dattier et de polystyrène (LPC), la densité, le module et la résistance à flexion, la conductivité thermique ainsi la morphologie du matériau ont été d'abord traités. Une étude est présentée sur l'influence des paramètres, taille du renfort, la fraction massique entre le renfort et la matrice et la lignine sur les propriétés des composites. Il a été établi que le LPC a une densité faible proche de celles des matériaux similaires de la littérature. En effet, le LPC a une densité ($542-824 \text{ kg/m}^3$) proche de celle des bois naturel tendre et dur et également des matériaux composites classiques comme le MDF, le contreplaqué, les panneaux de particules et les panneaux durs ($490-890 \text{ kg/m}^3$).

Généralement, les propriétés du matériau LPC obtenues restent faibles par rapport aux autres matériaux. Le module de flexion du LPC est de l'ordre de ceux de matériaux de comparaisons. Par contre, la contrainte maximale du matériau LPC reste faible par rapport à la majorité de celle obtenue dans la littérature. Ces propriétés sont affectées aussi par la présence de la lignine dans le matériau. Il a été conclu que cette dernière joue le rôle de réducteur des propriétés de flexion du matériau. Il a été conclu également que les propriétés mécaniques du LPC doivent être améliorées pour envisager une multitude d'applications potentielles notamment pour sa densité compétitive.

La conductivité thermique du matériau LPC est en fonction de la teneur en fibres et de la taille du renfort. La conductivité thermique a une relation inverse avec la densité du matériau LPC. La conductivité thermique du matériau LPC trouvée est dans la gamme des matériaux comparés obtenus de la littérature. Une similitude de la conductivité thermique du matériau LPC et les bois conventionnels, panneaux durs et le MDF a été trouvée. Ainsi, le matériau LPC est considéré comme un matériau isolant dû notamment à la faible conductivité thermique du renfort.

D'après l'étude morphologique, il a été constaté que l'augmentation de la taille de la fibre a un effet négatif sur l'homogénéité et sur l'état d'adhérence de l'interface fibre-matrice. Dans le cas des fibres courtes, le matériau obtenu est homogène avec peu de défauts et une bonne interface fibre-matrice est obtenue. Plus la taille du renfort est considérable, le matériau devient plus hétérogène ce qui favorise la présence de défaut et de vide dans le produit final. Dans ce cas, une diminution de l'état d'adhérence de l'interface fibre-matrice a été observée. Ainsi, l'étude morphologique a montré un bon état d'adhérence de l'interface fibre/matrice du matériau LPC. Selon les propriétés du matériau LPC obtenues, le matériau composite développé peut être utilisé dans le domaine de la construction comme matériau d'isolation thermique (murs de séparation, toit isolant, etc.) ou comme composant structurel dans des structures sandwich ou multicouches. De plus, le matériau LPC est obtenu à partir de déchets et peut être totalement recyclé à la fin de sa vie utile.

Pour le deuxième matériau, à base de particules de noyaux de dattes et de résine époxy (CPNDE), le module de Young, la résistance à la rupture, le coefficient de Poisson, le module de flexion de la matrice ainsi le module de flexion, la contrainte maximale du composite sont étudiés. L'effet de la fraction massique entre le renfort et la matrice sur les propriétés mécaniques est considéré en utilisant cinq fractions massiques comprises entre 0% et 40%. Les propriétés mécaniques de la matrice et des composites ont été déterminés à l'aide des essais de traction et de flexion en trois

points. Une étude comparative, entre les résultats obtenus et ceux disponibles dans la littérature sur un composite similaire, est présentée dans le chapitre. L'essai de traction effectué sur des échantillons pure époxy, montre une valeur moyenne du module de Young et du coefficient de Poisson de 322,62 MPa et 0,4 respectivement. La résine pure et le matériau composite de faible fraction massique en renfort (0, 10 et 20%) présentent une grande déformation en flexion. Pour une quantité de renfort supérieure ou égale à 30%, les résultats ont montré un module de flexion et une résistance à la flexion améliorés. A partir de ce niveau de renforcement, le matériau composite devient de plus en plus fragile. Avec 40% de renforcement, le module de flexion augmente de près de 44% par rapport au module de flexion de du matériau pure époxy. Le matériau CPNDE a montré que la matrice époxy utilisée est un bon choix car elle permet l'augmentation des propriétés mécaniques par rapport aux propriétés des matériaux similaires de la littérature. L'utilisation des déchets de palmiers dattiers comme renfort de composites peut être concourante pour l'utilisation d'autres renforts naturels.

Conclusion générale

Conclusion générale

Afin de promouvoir l'utilisation des déchets dans la construction civile et mécanique, deux nouveaux matériaux composites bois-plastique à base de déchets de composantes végétaux sont développés et étudiés. Le premier composite thermoplastique est élaboré à partir des déchets industriels d'emballage de polystyrène expansé et de déchets de palmiers dattiers utilisé comme renfort. La matrice est obtenue en dissolvant le polystyrène expansé dans l'essence. La composition de ce matériau innovant a été brevetée au niveau de l'INAPI en 2016. Le deuxième composite thermodurcissable est basé sur les déchets des fruits de palmiers dattiers (noyaux des dattes), utilisé sous forme de particules comme renfort et de la résine époxy comme matrice.

Le premier composite, à base des déchets de palmier dattier et du polystyrène expansé, utilise les fibres des feuillettes de palmier dattier comme renfort. Des essais physiques, mécaniques, thermiques et morphologiques ont été effectués pour caractériser ce composite (Leaflet Polystyrene Composite, LPC). Plusieurs combinaisons entre la tailles du renfort (A: 0,1-0,315 mm, B: 0,315-0,5 mm et C: 0,5-1 mm) et les fractions massiques renfort/matrice (70/30, 75/25 et 80/20%) ont été étudiées.

Les mesures ont montré que la densité du matériau LPC est proche de celle des bois, ce qui implique son utilisation potentielle en tant que matériau de substitution en particulier pour les pays ayant peu de forêts et de nombreuses oasis de palmiers dattiers. Le matériau LPC a également une densité proche de celle des matériaux composites classiques tels que le MDF, le contreplaqué, les panneaux de particules. On peut envisager une multitude d'applications potentielles du LPC vu sa densité notamment si les propriétés mécaniques sont acceptables.

Les résultats des essais de flexion montrent que le module de flexion du LPC est plus petit que le MDF et certains composites obtenus à partir de la littérature. Ce module est dans la plage de beaucoup de matériaux de la littérature. Néanmoins, la contrainte maximale du matériau LPC reste relativement faible. Pour cette raison, on recommande d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau LPC par l'amélioration du protocole de préparation. En outre, d'autres alternatives peuvent être envisagées telles que le renforcement du LPC par un autre matériau pour obtenir un matériau, hybride, multicouche ou un panneau sandwich. Les mesures de conductivité thermique montrent que la conductivité thermique du matériau LPC est étroitement liée à la teneur en fibres et à la taille du renforcement et qu'elle est inversement

proportionnelle à la densité du matériau LPC formulé. Une similarité de la conductivité thermique du matériau LPC et des bois conventionnels, des panneaux durs et du MDF a été trouvée. On peut conclure que le renforcement par les déchets de palmiers dattiers (feuilletés) a permis la formulation d'un matériau composite (LPC) 50% plus isolant que le composite similaire à base de déchets de bois et de PSE trouvé dans la littérature.

D'autre part, les résultats obtenus par SEM ont montré l'influence de la taille de la fibre et de la quantité de la matrice sur l'état d'adhérence de l'interface fibre-matrice du matériau LPC. Il a été trouvé qu'une bonne adhérence peut être obtenue en utilisant de petites fibres. De plus, afin de préserver une bonne morphologie des fibres et d'assurer une bonne interface fibre-matrice, le processus de préparation du composite doit être amélioré. Il est important de noter que le premier matériau (LPC) est un matériau isolant, renouvelable, obtenu à partir de déchets, et il peut être totalement recyclé et réutilisé.

Cette étude est suivie d'une étude sur l'effet de la présence de la lignine sur les propriétés mécaniques de flexion du matériau LPC. Il a été conclu que la lignine a un effet inverse sur les propriétés citées. Même observation a été signalée dans la littérature où la présence de la lignine réduit l'état d'adhésion entre la fibre et la matrice ce qui provoque la dégradation des propriétés mécaniques du composite. En conclusion, les déchets de palmiers dattiers sont bien adaptés à la formulation des matériaux innovants, efficaces et concurrents aux matériaux conventionnels et composites à renforts naturels.

Dans le deuxième composite (particules de noyaux des dattes et époxy), les particules sont mélangées avec différentes fractions massiques comprises entre zéro et 40% afin d'étudier l'effet de la fraction massique du renfort sur les propriétés mécaniques du composite. De point de vue cohésion matrice/renfort, le matériau obtenu est généralement très homogène. Des essais de traction et de flexion trois points sont effectués afin d'analyser le comportement mécanique à la fois de la matrice pure et le composite. Les résultats obtenus par essai de traction montrent que les propriétés mécaniques de l'époxy préparé dans le présent travail sont équivalentes à celles similaires trouvées dans la littérature. Cependant, les résultats obtenus ont montré une amélioration du module de flexion et de la résistance à la flexion pour une quantité supérieure ou égale à 30% de renfort. A partir de ce niveau de renforcement, le matériau composite devient de plus en plus fragile.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Agoua, E., E. Allognon-Houessou, E. Adjovi and B. Togbedji (2013). Thermal conductivity of composites made of wastes of wood and expanded polystyrene. *Construction and building materials*, 41, 557-562.
- Agoudjil, B., A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos and M. Fois (2011). Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and buildings*, 43(2), 491-497.
- Akgül, M. and A. Tozluoğlu (2008). Utilizing peanut husk (*Arachis hypogaea* L.) in the manufacture of medium-density fiberboards. *Bioresource Technology*, 99(13), 5590-5594.
- Akin, D. E. (2010). Chemistry of plant fibres. *Industrial Applications of Natural Fibres, Structure, Properties and Technical Application*, 13-22.
- Al-Juruf, R., F. Ahmed, I. Alam and H. Abdel-Rahman (1988). Development of heat insulating materials using date palm leaves. *Journal of Building Physics*, 11(3), 158-164.
- Al-Khayri, J. M., S. M. Jain and D. V. Johnson (2015). *Date Palm Genetic Resource and Utilization*, Springer.
- AL-Oqla, F. M., O. Y. Allothman, M. Jawaid, S. Sapuan and M. Es-Saheb (2014). Processing and properties of date palm fibers and its composites. *Biomass and Bioenergy*, Springer: 1-25.
- Al-Oqla, F. M. and S. Sapuan (2014). Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, 66, 347-354.
- Al-Khanbashi, A., K. Al-Kaabi and A. Hammami (2005). Date palm fibers as polymeric matrix reinforcement: fiber characterization. *Polymer composites*, 26(4), 486-497.
- Al-Sulaiman, F. A. (2003). Date palm fibre reinforced composite as a new insulating material. *International Journal of Energy Research*, 27(14), 1293-1297.
- Alawar, A., A. M. Hamed and K. Al-Kaabi (2009). Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 601-606.
- Alexy, P., B. Košíková and G. Podstránska (2000). The effect of blending lignin with polyethylene and polypropylene on physical properties. *Polymer*, 41(13), 4901-4908.
- AlMaadeed, M., R. Kahraman, P. N. Khanam and S. Al-Maadeed (2013). Characterization of untreated and treated male and female date palm leaves. *Materials & Design*, 43, 526-531.
- AlMaadeed, M. A., R. Kahraman, P. N. Khanam and N. Madi (2012). Date palm wood flour/glass fibre reinforced hybrid composites of recycled polypropylene: Mechanical and thermal properties. *Materials & Design*, 42, 289-294.
- Almi, K. (2018). Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux application de développement durable en Algérie. , Université Mohamed Khider. Biskra. Algeria.
- Almi, K., A. Benchabane, S. Lakel and A. Kriker (2015). Potential utilization of date palm wood as composite reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(15), 1231-1240.
- Almi, K., S. Lakel, A. Benchabane and A. Kriker (2016). Characterization of date palm wood used as composites reinforcement.
- Alsaeed, T., B. Yousif and H. Ku (2013). The potential of using date palm fibres as reinforcement for polymeric composites. *Materials & Design*, 43, 177-184.

- Asdrubali, F., F. D'Alessandro and S. Schiavoni (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1-17.
- Ashori, A. (2008). Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries! *Bioresource Technology*, 99(11), 4661-4667.
- Augier, L. (2007). Etude de l'élaboration de matériaux composites PVC/bois à partir de déchets de menuiserie: formulation, caractérisation, durabilité et recyclabilité, INPT.
- Ayse, K. and K. Filiz (2016). Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Construction and building materials*, 105, 572-578.
- Azizi Samir, M. A. S., F. Alloin and A. Dufresne (2005). Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. *Biomacromolecules*, 6(2), 612-626.
- Azwa, Z., B. Yousif, A. Manalo and W. Karunasena (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design*, 47, 424-442.
- Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(7), 939-948.
- Barreveld, W. (1993). Date palm products.
- Bhutta, M. A. R., Y. Ohama and K. Tsuruta (2011). Strength properties of polymer mortar panels using methyl methacrylate solution of waste expanded polystyrene as binder. *Construction and building materials*, 25(2), 779-784.
- Biagiotti, J., D. Puglia and J. M. Kenny (2004). A review on natural fibre-based composites-part I: structure, processing and properties of vegetable fibres. *Journal of Natural Fibers*, 1(2), 37-68.
- Binhussain, M. A. and M. M. El-Tonsy (2013). Palm leave and plastic waste wood composite for out-door structures. *Construction and Building Materials*, 47, 1431-1435.
- Bisht, N. and P. C. Gope (2015). Mechanical properties of rice husk flour reinforced epoxy bio-composite. *Int Journal of Engineering Research and Applications*, 5, 123128.
- Bismarck, A., S. Mishra and T. Lampke (2005). Plant fibers as reinforcement for green composites. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites, CRC Press.
- Bledzki, A. and J. Gassan (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in polymer science*, 24(2), 221-274.
- Bledzki, A. K., V. Sperber and O. Faruk (2002). Natural and wood fibre reinforcement in polymers, iSmithers Rapra Publishing.
- Bogoeva-Gaceva, G., M. Avella, M. Malinconico, A. Buzarovska, A. Grozdanov, G. Gentile and M. Errico (2007). Natural fiber eco-composites. *Polymer composites*, 28(1), 98-107.
- Bolton, A. (1994). Natural fibers for plastic reinforcement. *Materials Technology*, 9(1-2), 12-20.
- Bongarde, U. and V. Shinde (2014). Review on natural fiber reinforcement polymer composites. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 3(2), 431-436.
- Bouafif, H., A. Koubaa, P. Perré and A. Cloutier (2009). Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 40(12), 1975-1981.
- Bouguedoura, N., M. Bennaceur and A. Benkhalifa (2010). Le palmier dattier en Algérie: Situation, contraintes et apports de la recherche. *Biotechnologie du palmier dattier*. Ed IRD, Montpellier, France, 15-22.
- Campilho, R. D. (2015). Natural fiber composites, CRC Press.

- Céline, A., S. Fréour, F. Jacquemin and P. Casari (2013). The hygroscopic behavior of plant fibers: A review. *Frontiers in chemistry*, 1.
- Chaharmahali, M., J. Mirbagheri, M. Tajvidi, S. K. Najafi and Y. Mirbagheri (2010). Mechanical and physical properties of wood-plastic composite panels. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(2), 310-319.
- Chandramohan, D. and K. Marimuthu (2011). A review on natural fibers. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 8(2), 194-206.
- Chandrasekaran, M. and A. H. Bahkali (2013). Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera*) fruit processing by-products and wastes using bioprocess technology—Review. *Saudi journal of biological sciences*, 20(2), 105-120.
- Chao, C. T. and R. R. Krueger (2007). The date palm (*Phoenix dactylifera* L.): overview of biology, uses, and cultivation. *HortScience*, 42(5), 1077-1082.
- Charlet, K. (2008). Contribution à l'étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin: relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques, Université de Caen/Basse-Normandie.
- Chen, B. and J. Liu (2007). Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads. *Construction and building materials*, 21(1), 7-11.
- Cheung, H.-y., M.-p. Ho, K.-t. Lau, F. Cardona and D. Hui (2009). Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 655-663.
- Cook, J. G. (1984). Handbook of textile fibres: man-made fibres, Elsevier.
- Cui, Y., S. Lee, B. Noruziaan, M. Cheung and J. Tao (2008). Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 39(4), 655-661.
- Curvelo, A., A. De Carvalho and J. Agnelli (2001). Thermoplastic starch–cellulosic fibers composites: preliminary results. *Carbohydrate Polymers*, 45(2), 183-188.
- Davis, G. and J. Song (2006). Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management. *Industrial Crops and Products*, 23(2), 147-161.
- Dehghani, A., S. M. Ardekani, M. A. Al-Maadeed, A. Hassan and M. U. Wahit (2013). Mechanical and thermal properties of date palm leaf fiber reinforced recycled poly (ethylene terephthalate) composites. *Materials & Design*, 52, 841-848.
- Dhakal, H., Z. Zhang and M. Richardson (2007). Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, 67(7), 1674-1683.
- Disk, T. P. S.-G. H. (2006). *Technique, Standards for Contact Transient Measurements of Thermal Properties*, National Physical Laboratory, United Kingdom.
- Do Thi, V. V. (2011). Matériaux composites à fibres naturelles/polymère biodégradables ou non, Université de Grenoble.
- Du, Y., N. Yan and M. T. Kortschot (2012). Light-weight honeycomb core sandwich panels containing biofiber-reinforced thermoset polymer composite skins: fabrication and evaluation. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2875-2882.
- Dweib, M., B. Hu, A. O'donnell, H. Shenton and R. Wool (2004). All natural composite sandwich beams for structural applications. *Composite structures*, 63(2), 147-157.

- Dweib, M., B. Hu, H. Shenton and R. Wool (2006). Bio-based composite roof structure: manufacturing and processing issues. *Composite structures*, 74(4), 379-388.
- El-Juhany, L. I. (2010). Degradation of date palm trees and date production in Arab countries: causes and potential rehabilitation. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(8), 3998-4010.
- El Hadrami, I., M. El Bellaj, A. El Idrissi, F. J'Aiti, S. El Jaafari and F. Daayf (1998). Biotechnologies végétales et amélioration du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.), pivot de l'agriculture oasisienne marocaine. *Cahiers Agricultures*, 7(6), 463-468 (461).
- El Hadrami, I. and A. El Hadrami (2009). Breeding date palm. Breeding plantation tree crops: Tropical species, Springer: 191-216.
- Essabir, H. (2015). Bio-composites à base de coque de noix d'arganier : Mise en œuvre, caractérisation et modélisation du comportement mécanique., Université Ibn Zohr.
- Fangueiro, R. and S. Rana (2016). *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*. Edited) Springer.
- Faruk, O., A. K. Bledzki, H.-P. Fink and M. Sain (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science*, 37(11), 1552-1596.
- Faruk, O., A. K. Bledzki, H. P. Fink and M. Sain (2014). Progress report on natural fiber reinforced composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(1), 9-26.
- Faruk, O. and L. M. Matuana (2008). Nanoclay reinforced HDPE as a matrix for wood-plastic composites. *Composites Science and technology*, 68(9), 2073-2077.
- Félix, J. S., C. Domeño and C. Nerín (2013). Characterization of wood plastic composites made from landfill-derived plastic and sawdust: Volatile compounds and olfactometric analysis. *Waste management*, 33(3), 645-655.
- Franck, R. R. (2005). Bast and other plant fibres, Crc Press.
- Fuqua, M. A., S. Huo and C. A. Ulven (2012). Natural fiber reinforced composites. *Polymer Reviews*, 52(3), 259-320.
- George, J., M. Sreekala and S. Thomas (2001). A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering & Science*, 41(9), 1471-1485.
- Ghazanfari, A., S. Emami, S. Panigrahi and L. Tabil (2008). Thermal and mechanical properties of blends and composites from HDPE and date pits particles. *Journal of composite materials*, 42(1), 77-89.
- Gustavsson, M., E. Karawacki and S. E. Gustafsson (1994). Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensors. *Review of Scientific Instruments*, 65(12), 3856-3859.
- Hamma, A., M. Kaci and A. Pegoretti (2013). Polypropylene/date stone flour composites: Effects of filler contents and EBAGMA compatibilizer on morphology, thermal, and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(6), 4314-4321.
- Herakovich, C. T. (2012). Mechanics of composites: a historical review. *Mechanics Research Communications*, 41, 1-20.
- Holbery, J. and D. Houston (2006). Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications. *Jom*, 58(11), 80-86.
- ISO 14125 , E. (1998). *Composites plastiques renforcés de fibres-Détermination des propriétés de flexion*.
- ISO, E. (1996). 527-1.(1996).“Plastics—Determination of tensile properties—Part 1: General principles,”. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO, E. (1996). 527-2. *Plastics—Determination of tensile properties—Part, 2*.

- ISO, S. (2008). 22007-2: 2008. Plastics-Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity-Part, 2.
- ISO, S. (2012). 527-1. Plastics. Determination of tensile properties. Part, 1.
- ISO, S. (2012). 1183-1. Plastics-Methods for determining the density of noncellular plastics-Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method, Helsinki.
- Jacob, M., S. Thomas and K. T. Varughese (2004). Mechanical properties of sisal/oil palm hybrid fiber reinforced natural rubber composites. *Composites Science and technology*, 64(7), 955-965.
- John, M. J. and S. Thomas (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 71(3), 343-364.
- John, M. J. and S. Thomas (2012). Natural Polymers: Composites, Royal Society of Chemistry.
- Julson, J. L., G. Subbarao, D. Stokke, H. H. Gieselman and K. Muthukumarappan (2004). Mechanical properties of biorenewable fiber/plastic composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 93(5), 2484-2493.
- Kalia, S., B. Kaith and I. Kaur (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—a review. *Polymer Engineering & Science*, 49(7), 1253-1272.
- Kalia, S., B. Kaith and I. Kaur (2011). Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites: green chemistry and technology, Springer Science & Business Media.
- Kaw, A. K. (2005). Mechanics of composite materials, CRC press.
- Khedari, J., N. Nankongnab, J. Hirunlabh and S. Teekasap (2004). New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and environment*, 39(1), 59-65.
- Khedari, J., B. Suttisonk, N. Pratinthong and J. Hirunlabh (2001). New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 23(1), 65-70.
- Korjenic, A., J. Zach and J. Hroudová (2016). The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions. *Energy and buildings*, 116, 45-58.
- Kozłowski, R. M. (2012). Handbook of natural fibres: Types, properties and factors affecting breeding and cultivation, Elsevier.
- Ku, H., H. Wang, N. Pattarachaiyakoop and M. Trada (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 856-873.
- Laborel-Préneron, A., J. Aubert, C. Magniont, C. Tribout and A. Bertron (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and building materials*, 111, 719-734.
- Li, X., L. G. Tabil and S. Panigrahi (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), 25-33.
- Lichtenegger, H., A. Reiterer, S. Stanzl-Tschegg and P. Fratzl (1999). Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods—a possible strategy of mechanical optimization. *Journal of structural biology*, 128(3), 257-269.
- Ljungberg, L. Y. (2007). Materials selection and design for development of sustainable products. *Materials & Design*, 28(2), 466-479.
- Lomelí-Ramírez, M., H. Ochoa-Ruiz, F. Fuentes-Talavera, S. García-Enriquez, M. Cerpa-Gallegos and J. Silva-Guzmán (2009). Evaluation of accelerated decay of wood plastic composites by *Xylophagus* fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(8), 1030-1035.
- Lorenz, J. and E. Wilka (2002). Thermoplastic composite material, Google Patents.
- Macdonald, E. and J. Hubert (2002). A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry*, 75(2), 107-138.

- Madurwar, M. V., R. V. Ralegaonkar and S. A. Mandavgane (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and building materials*, 38, 872-878.
- Magniont, C. (2010). Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Maldas, D., B. Kokta and C. Daneault (1989). Influence of coupling agents and treatments on the mechanical properties of cellulose fiber–polystyrene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 37(3), 751-775.
- Malkapuram, R., V. Kumar and Y. S. Negi (2009). Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(10), 1169-1189.
- Martins, G., F. Antunes, A. Mateus and C. Malça (2017). Optimization of a Wood Plastic Composite for Architectural Applications. *Procedia Manufacturing*, 12, 203-220.
- Melià, P., G. Ruggieri, S. Sabbadini and G. Dotelli (2014). Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. *Journal of Cleaner Production*, 80, 179-186.
- Meradi, S., N. Dakhia and M. Aouachria (2016). Déchets de palmeraie: alternative alimentaire du cheptel prometteuse en régions arides Algérie.
- Michaud, F. (2003). Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique: aptitude au postformage. faculté de foresterie et de géomatique université laval québec, canada.
- Migneault, S., A. Koubaa, F. Erchiqui, A. Chaala, K. Englund, C. Krause and M. Wolcott (2008). Effect of fiber length on processing and properties of extruded wood-fiber/HDPE composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 110(2), 1085-1092.
- Mirmehdi, S. M., F. Zeinaly and F. Dabbagh (2014). Date palm wood flour as filler of linear low-density polyethylene. *Composites Part B: Engineering*, 56, 137-141.
- Mitra, B., R. Basak and M. Sarkar (1998). Studies on jute-reinforced composites, its limitations, and some solutions through chemical modifications of fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 67(6), 1093-1100.
- Mohammed, L., M. N. Ansari, G. Pua, M. Jawaid and M. S. Islam (2015). A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science*, 2015.
- Mohanty, A. K., M. Misra and L. T. Drzal (2005). Natural fibers, biopolymers, and biocomposites, CRC press.
- Monteiro, S. N., F. P. D. Lopes, A. P. Barbosa, A. B. Bevitori, I. L. A. Da Silva and L. L. Da Costa (2011). Natural lignocellulosic fibers as engineering materials—an overview. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 42(10), 2963.
- Mukherjee, T. and N. Kao (2011). PLA based biopolymer reinforced with natural fibre: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(3), 714.
- Nair, K., S. Diwan and S. Thomas (1996). Tensile properties of short sisal fiber reinforced polystyrene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 60(9), 1483-1497.
- Najafi, S. K. (2013). Use of recycled plastics in wood plastic composites—A review. *Waste management*, 33(9), 1898-1905.
- Nehdi, I., S. Omri, M. Khalil and S. Al-Resayes (2010). Characteristics and chemical composition of date palm (*Phoenix canariensis*) seeds and seed oil. *Industrial Crops and Products*, 32(3), 360-365.
- Nenonene, A. (2009). 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, INPT.
- Nguong, C., S. Lee and D. Sujan (2013). A review on natural fibre reinforced polymer composites. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 73, 1123-1130.

- Nixon, R. W. (1951). The date palm—“Tree of Life” in the subtropical deserts. *Economic Botany*, 5(3), 274-301.
- Nkwachukwu, O. I., C. H. Chima, A. O. Ikenna and L. Albert (2013). Focus on potential environmental issues on plastic world towards a sustainable plastic recycling in developing countries. *International Journal of Industrial Chemistry*, 4(1), 34.
- Nörnberg, B., E. Borchardt, G. A. Luinstra and J. Fromm (2014). Wood plastic composites from poly (propylene carbonate) and poplar wood flour—Mechanical, thermal and morphological properties. *European Polymer Journal*, 51, 167-176.
- Nourbakhsh, A. and A. Ashori (2010). Wood plastic composites from agro-waste materials: Analysis of mechanical properties. *Bioresource Technology*, 101(7), 2525-2528.
- Onyechi, P., K. Asiegbu, C. Igwegbe and M. Nwosu (2015). Effect of volume fraction on the mechanical properties of Periwinkle Shell Reinforced Polyester Composite (PRPC). *American Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2(1), 1-15.
- Pacheco-Torgal, F. and S. Jalali (2011). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *Construction and building materials*, 25(2), 575-581.
- Panthapulakkal, S., A. Zereskian and M. Sain (2006). Preparation and characterization of wheat straw fibers for reinforcing application in injection molded thermoplastic composites. *Bioresource Technology*, 97(2), 265-272.
- Pickering, K. e. (2008). Properties and performance of natural-fibre composites, Elsevier.
- Poletto, M., J. Dettenborn, M. Zeni and A. J. Zattera (2011). Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. *Waste Management*, 31(4), 779-784.
- Qaiss, A., R. Bouhfid and H. Essabir (2014). *Biomass and Bioenergy Processing and Properties*. Switzerland: Springer International Publishing, 225-244.
- Raju, G., S. Kumarappa and V. Gaitonde (2012). Mechanical and physical characterization of agricultural waste reinforced polymer composites. *J. Mater. Environ. Sci*, 3(5), 907-916.
- Ramamoorthy, S. K., M. Skrifvars and A. Persson (2015). A review of natural fibers used in biocomposites: plant, animal and regenerated cellulose fibers. *Polymer Reviews*, 55(1), 107-162.
- Rana, S. and R. Figueiro (2016). *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications*. Textile science and clothing technology (
- Ravindrarajah, R. S. and A. Tuck (1994). Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads. *Cement and Concrete Composites*, 16(4), 273-277.
- Reddy, N. and Y. Yang (2005). Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. *TRENDS in Biotechnology*, 23(1), 22-27.
- Roth, I. and H. Lindorf (2013). South American medicinal plants: botany, remedial properties and general use, Springer Science & Business Media.
- Rozman, H., K. Tan, R. Kumar and A. Abubakar (2001). Preliminary studies on the use of modified ALCELL lignin as a coupling agent in the biofiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 81(6), 1333-1340.
- Saad, H. (2013). Développement de bio-composites à base de fibres végétales et de colles écologiques, Pau.
- Saadaoui, N., A. Rouilly, K. Fares and L. Rigal (2013). Characterization of date palm lignocellulosic by-products and self-bonded composite materials obtained thereof. *Materials & Design*, 50, 302-308.
- Saheb, D. N. and J. P. Jog (1999). Natural fiber polymer composites: a review. *Advances in polymer technology*, 18(4), 351-363.

- Samui, A. B., S. Sundararajan, V. Kumar and P. S. Kulkarni (2015). Cellulose modification for imparting smartness: thermoregulation, self-cleaning, solar cell and electroactuation. Cellulose and Cellulose Composites: Modification, Characterization and Applications. M. D. Ibrahim and I. H. Mondal. New York Nova Science Publishers, Inc. : 3-33.
- Sarbu, A., S.-O. Dima, T. Dobre, I. Udrea, C. Bradu, S. Avramescu, N. Mihalache, A.-L. Radu, T.-V. Nicolescu and A. Lungu (2009). Polystyrene wastes recycling by lightweight concrete production. *Revista de chimie*, 60, 1350-1356.
- Satyanarayana, K., J. Guimarães and F. Wypych (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(7), 1694-1709.
- Satyanarayana, K., K. Sukumaran, P. Mukherjee and S. Pillai (1986). Materials science of some lignocellulosic fibers. *Metallography*, 19(4), 389-400.
- Sbiai, A. (2011). Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier: effet de l'oxydation au tempo sur les fibres, Lyon, INSA.
- Sbiai, A., A. Maazouz, E. Fleury, H. Souterneau and H. Kaddami (2010). Short date palm tree fibers/polyepoxy composites prepared using RTM process: effect of tempo mediated oxidation of the fibers. *BioResources*, 5(2), 672-689.
- Schmidt, P., M. Cioffi, H. J. C. Voorwald and J. Silveira (2011). Flexural test on recycled polystyrene. *Procedia Engineering*, 10, 930-935.
- Senft, J. F. and B. A. Bendtsen (2007). Measuring microfibrillar angles using light microscopy. *Wood and Fiber science*, 17(4), 564-567.
- Sharuddin, S. D. A., F. Abnisa, W. M. A. W. Daud and M. K. Aroua (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy conversion and management*, 115, 308-326.
- Shin, C. (2006). Filtration application from recycled expanded polystyrene. *Journal of Colloid and Interface Science*, 302(1), 267-271.
- Shinoj, S., R. Visvanathan, S. Panigrahi and M. Kochubabu (2011). Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 7-22.
- Siqueira, G., J. Bras and A. Dufresne (2010). *Luffa cylindrica* as a lignocellulosic source of fiber, microfibrillated cellulose and cellulose nanocrystals. *BioResources*, 5(2), 727-740.
- Sreekala, M., M. Kumaran and S. Thomas (1997). Oil palm fibers: Morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 66(5), 821-835.
- Stark, N. M. and R. E. Rowlands (2007). Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and fiber science*, 35(2), 167-174.
- Stokke, D. D., Q. Wu and G. Han (2013). Introduction to wood and natural fiber composites, John Wiley & Sons.
- Summerscales, J., N. Dissanayake, A. Virk and W. Hall (2010). A review of bast fibres and their composites. Part 2—Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1336-1344.
- Summerscales, J., N. P. Dissanayake, A. S. Virk and W. Hall (2010). A review of bast fibres and their composites. Part 1—Fibres as reinforcements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1329-1335.
- Tengberg, M., V. Battesti and C. Newton (2014). *Le Palmier dattier: Origine et culture en Égypte et au Moyen-Orient*, Muséum national d'histoire naturelle.
- Thakur, V. K. (2013). Green composites from natural resources, CRC Press.

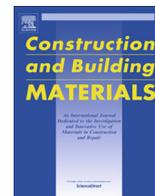
- Thielemans, W., E. Can, S. Morye and R. Wool (2002). Novel applications of lignin in composite materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(2), 323-331.
- Thiruchitrabalam, M., A. Athijayamani, S. Sathiyamurthy and A. S. A. Thaheer (2010). A review on the natural fiber-reinforced polymer composites for the development of roselle fiber-reinforced polyester composite. *Journal of Natural Fibers*, 7(4), 307-323.
- Tlijani, M. (2016). Contribution à la caractérisation thermophysique de matériaux bio-isolants: valorisation des déchets de bois de palmier, Paris Est.
- Touloum, F., Y. Akli, K. Abdelhak and A. Benchabane (2016). Formulation of a composite of date palm wood-cement. *Journal of Applied Engineering Science & Technology*, 2(2), 57-63.
- Turku, I. and T. Kärki (2014). Research progress in wood-plastic nanocomposites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27(2), 180-204.
- Vlasveld, D., H. Bersee and S. Picken (2005). Nanocomposite matrix for increased fibre composite strength. *Polymer*, 46(23), 10269-10278.
- Wallenberger, F. T. and N. Weston (2003). Natural fibers, plastics and composites, Springer Science & Business Media.
- Wambua, P., J. Ivens and I. Verpoest (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and technology*, 63(9), 1259-1264.
- Wank, J., W. Uerdingen, L. Schrader and W. Waldenrath (1991). Multilayer composite material, Google Patents.
- Westman, M. P., L. S. Fifield, K. L. Simmons, S. Laddha and T. A. Kafentzis (2010). Natural fiber composites: a review. Pacific Northwest National Laboratory.
- Xie, Y., C. A. Hill, Z. Xiao, H. Militz and C. Mai (2010). Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(7), 806-819.
- Xu, J., R. Sugawara, R. Widyorini, G. Han and S. Kawai (2004). Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science*, 50(1), 62-67.
- Yemele, M. C. N., A. Koubaa, A. Cloutier, P. Soulounganga and M. Wolcott (2010). Effect of bark fiber content and size on the mechanical properties of bark/HDPE composites. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 41(1), 131-137.
- Yilmaz, N. D. (2014). Agro-Residual Fibers as Potential Reinforcement Elements for Biocomposites. *Lignocellulosic Polymer Composites: Processing, Characterization, and Properties*, 231-270.
- Zaid, A. and E. Arias-Jimenez (1999). Date palm cultivation.
- Zaid, A. and P. De Wet (1999). Chapter I botanical and systematic description of date palm. *FAO plant production and protection papers*, 1-28.
- Zhang, M. Q., M. Z. Rong and X. Lu (2005). Fully biodegradable natural fiber composites from renewable resources: all-plant fiber composites. *Composites Science and technology*, 65(15), 2514-2525.
- Zini, E. and M. Scandola (2011). Green composites: an overview. *Polymer composites*, 32(12), 1905-1915.

Annexes



Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes



Tahar Masri ^a, Houdayfa Ounis ^b, Lakhdar Sedira ^c, Abdelhak Kaci ^d, Adel Benchabane ^{a,*}

^aLaboratoire de Génie Énergétique et Matériaux, LGEM, Université de Biskra, B.P. 145, 07000 Biskra, Algeria

^bCentre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 16340 Algiers, Algeria

^cLaboratoire de Génie Mécanique (LGM), Université de Biskra, B.P. 145, 07000 Biskra, Algeria

^dLaboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC), University of Cergy Pontoise, F95000 Cergy Pontoise, France

H I G H L I G H T S

- Date palm Leaflets-Polystyrene Composite, LPC, is formulated and characterized.
- LPC is a new insulating material based on palm leaflets and polystyrene wastes.
- Physical, mechanical, thermal and morphological LPC properties are investigated.
- LPC properties are discussed and compared with those of conventional materials.
- LPC is a renewable material; it can be totally recycled at the end of its life.

A R T I C L E I N F O

Article history:

Received 12 July 2017

Received in revised form 6 December 2017

Accepted 27 December 2017

Keywords:

Date palm waste

Expanded polystyrene waste

Leaflets-Polystyrene Composite

Recycling

Mechanical properties

Thermal conductivity

A B S T R A C T

In the aim of environmental protection and valorization of vegetal resource, an experimental study on an innovative Wood-Plastic Composite material (WPC) based on Date Palm and expanded Polystyrene, EPS, Wastes is performed. Date palm leaflets waste are used as the reinforcement and EPS waste dissolved in gasoline is used as a matrix. Several combinations of reinforcement sizes (0.1–0.315 mm, 0.315–0.5 mm and 0.5–1 mm) and fiber-to-matrix weight ratios (70, 75 and 80 wt%) were considered to investigate the properties of the Leaflets-Polystyrene Composite (LPC). In this study, physical, mechanical, thermal and morphological characterizations were carried out in order to determine: the bulk density, the flexural modulus, the maximum stress and the thermal conductivity of LPC. Therefore, Pycnometer density measurement, three-point bending test were performed and transient plane heat source (hotdisc) method was used. Furthermore, a characterization by scanning electron microscopy (SEM) was realized to observe the fibers/matrix bond. The LPC showed good adhesion state of the fiber–matrix interface and acceptable mechanical properties with a flexural modulus and a maximum stress that can achieve 0.78 GPa and 2.84 MPa, respectively. The LPC has a density between 542 and 824 kg/m³ which are comparable to those of usual materials like hard-and-soft wood, MDF and other WPC found in the literature. The thermal characterization tests of the LPC have shown also an average thermal conductivity within the range of 0.11 and 0.16 W/m·K. The LPC can be used in the field of building construction as a good thermal insulation as well as a structural component in sandwich structures. Moreover, LPC material is obtained from wastes and can be totally recycled at the end of its useful life.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The reduction of energy consumptions is one of the most important challenges of future buildings [1,2]. According to

Asdrubali, D'Alessandro and Schiavoni [2], the buildings consume about 40% of the world global energy, 25% of the global water, 40% of the global resources. Furthermore, buildings are also responsible of about 1/3 of greenhouse gas emissions of the whole globe [2].

Today's buildings are the cause of several environmental problems due to the production of conventional materials they use such as cement, bricks and steel. Indeed, these kind of materials consumes a lot of thermal and electrical energy which invoke air, water and land pollution [3]. Thereby, a new look should be

* Corresponding author at: Laboratoire de Génie Énergétique et Matériaux (LGEM), Université de Biskra, B.P. 145, 07000 Biskra, Algeria.

E-mail addresses: tahar.masri@univ-biskra.dz (T. Masri), h.ounis@cder.dz (H. Ounis), l.sedira@univ-biskra.dz (L. Sedira), abdelhak.kaci@u-cergy.fr (A. Kaci), a.benchabane@univ-biskra.dz (A. Benchabane).

Nomenclature

A	Small particle size of the reinforcement, 0.1–0.315 mm
b	Width of specimen, mm
B	Medium particle size of the reinforcement, 0.315–0.5 mm
C	Large particle size of the reinforcement, 0.5–1.0 mm
E_f	Flexural modulus, GPa
F	Applied load, N
h	Thickness of the test specimen, mm
l	Length of specimen, mm
L	Support span length, mm
$m_{gasoline}$	Mass of gasoline, g
$m_{polystyrene}$	Mass of expanded polystyrene, g
wt%	Weight proportions
y	Deflection, mm

Greek symbols

σ_{Max}	Maximum stress, MPa
ρ	Density, kg/m ³

λ	Thermal conductivity, W/m-K
-----------	-----------------------------

Abbreviations

DPCC	Durian Peel and Coconut Coir
DPWF	Date Palm Wood Four
EPS	Expanded Polystyrene
KC	Kenaf Core
LPC	Leaflets-Polystyrene Composite
MDF	Medium Density Fiberboard
mix	Mixture of palm leaves and plastic waste (PC, PS and PVC)
PC	Poly-Carbonate
PS	Polystyrene
PVC	Poly-Vinyl Chloride
SEM	Scanning Electron Microscopy
WPC	Wood-Plastic Composite material
WW	Wastes of Wood

addressed to the buildings materials where the renewable and the recyclable aspects must be one of the main selection criteria. One of the technological advances of nowadays that can easily meet the requirements imposed by the aforementioned challenges are the composite materials [4–6]. Indeed, the last decades have witnessed a considerable increasing in the use of composite materials in virtually all the industrial domains such as aeronautic, automotive and civil engineering [7,8].

Research is actually focused on incorporation of natural resources as constituent in composite materials [6]. In fact, the use of natural resource in the formulation of materials is not a new concept; our ancestors used straw to strengthen bricks made from mud for house building [9]. Today, the choice of natural resources is inevitable and it is mainly due to the low cost, renewable nature, good biodegradability, and significant thermal and mechanical properties added to the final product [10,11]. However, wood is considered as an excellent construction organic material and can be used as reinforcement with different forms and dimensions to increase the thermo-mechanical properties of construction materials. In the same context, the plastic is also considered as a key of innovation of many products in various sectors such as construction, health care, electronic, automotive, packaging and others. According to PlasticsEurope [12], The global production of plastic has reached about 322 million tons in 2015 and has increased by almost 4% over 2014. This indicate the important percentage of plastic waste ended up in the landfill and it is well known that plastics may take up to billions of years to naturally degrade [13].

Considering the complementary performances of the previous materials, a new concept was born in the 1970s, known as Wood-Plastic Composites (WPC). These new materials have close mechanical and physical properties to solid wood [14], with improved hygrometric properties, in almost cases. The term WPC refers to any composites that contain plant-derived reinforcement (wood and non-wood fibers) and thermosets or thermoplastics matrices [15,16]. According to Mohamed et al. [17], the worldwide industry sector of natural fiber reinforced polymer composites reached US\$2.1 billion in 2010. For this purpose, several investigations have been conducted in this research area in order to highlight the properties and mechanical behavior of WPC material based on natural fiber of different plants. Wambua et al. [18], among others, have studied the mechanical properties of polypropylene composites reinforced by different natural fibers

(sisal, kenaf, hemp, jute and coir). The authors found that, in most cases, the specific properties of natural fiber composites compare favorably with those of glass. Chikhi et al. [19] have experimentally studied the effect of date palm fibers on thermal conductivity, water absorption and mechanical properties of gypsum-based materials. This biocomposite exhibits good thermal and mechanical performances which enable it to be used as thermal insulation materials.

Nowadays, solid wastes generated from agricultural and industrial production activity remain also one of the most solicited renewable resources in the formulation of composite materials [3]. Indeed, the past few years were marked by a dramatic increase in the use of agricultural waste from natural fibers such as leaves from flax, jute, hemp, pineapple, sisal and date palm for making a new type of environmentally-friendly composites [6,20,21]. Algeria (In north of Africa) has a great resource collected from the agricultural waste of date palm (Phoenix Dactylifera L.) [20,22]. Every year, an average of fourteen new leaves and eight bunches per palm can be retained [23]. Agoudjil et al. [23] reported that some farmers use partially this palm wood but the bulk of the material is discarded as waste. Indeed, the formulation of a reinforced composite materials based on this kind of waste can be an excellent solution from an environmental point of view. According to AL-Oqla, Allothman, Jawaid, Sapuan and Es-Saheb [24], the use of date palm fibers, with different types of polymer, can improve the mechanical, thermal and acoustical properties.

Al-Sulaiman et al. [25] fabricated panels of date palm leave reinforced composites, were two types of matrix were selected. The authors have found that all panels exhibit a very low thermal conductivity. Al-Juruf et al. [26] used dry leaves of date palm fronds and suitable binders (Portland cement, gypsum and mixture of Hydraulic cement et gypsum) to obtain thermal insulating material for buildings. They concluded that the palm leave panels are well appropriate for the development of efficient and safe insulating materials. Dehghani et al. [27] have studied the mechanical, thermal and morphological properties of date palm leaf fiber reinforced with recycled poly-ethylene-terephthalate. The authors showed that the addition of date palm leaf fibers enhance the mechanical proprieties. However, the incorporation of the date palm leaf fibers affected the thermal stability of the composite by lowering it. Finally, the authors concluded that the recycled poly-ethylene-terephthalate/date palm leaf fiber composite appears to be a good alternative to obtain environmentally friendly products.

Beside the natural fibers, the plastic wastes also represent a promising source of raw material for the development of thermoplastic composites. This is mainly due to the abundant quantity and low cost of this material [28,29]. Compared to the inorganic filler reinforced thermoplastic polymer composites, thermoplastic composites based on plastic wastes offer several advantages, including low cost, density, manufacturing energy as well as renewability and a high level of biodegradability [29]. The present study is interested to the exploitation of expanded polystyrene (EPS), as plastic waste, usually used for insulation and packaging materials [29]. Many industries use the EPS for its versatility, dimensional stability, clean nature and low cost [30]. indeed, polystyrene (PS) and EPS represent 72% of plastic demand [31]. This extraordinary demand engender important quantities of non biodegradable PS/EPS wastes, which most of the time ends up in landfills or incinerated, causing serious environmental issues [29,32].

The idea of recycling of the EPS wastes from industrial with forest wood to create composites materials can be an alternative solution from environmental and economic standpoint. It appears in the literature that many authors proposed several solution using polystyrene wastes [1,32–38]. These wastes was included in concrete and mortar [1,33–36] or used as a matrix reinforced with wood or cellulosic fibers [32,37,38] to obtain composite with similar properties to conventional materials. In this context, the present work aims to study the possibility to obtain an innovative composite material based on date palm leaflets, as the reinforcement, and EPS waste dissolved in gasoline as a matrix. This research aims to serve and protect the environment by the use of these wastes. The formulation of the innovative Leaflets-Polystyrene Composite (LPC) was patented recently by Masri et al. [39] in Algerian National Institute of Industrial Property. In this work, different size and weight ratio of reinforcement of date palm waste are investigated. In order to fulfill the effects of each previous parameter, physical, mechanical and morphological characterizations were carried out on the formulated LPC material.

2. Materials and methods

2.1. Materials

2.1.1. Preparation of leaflets

Date palm leaves are one of an important natural source of fibers where the applications has been extended to almost all fields [23]. The natural fibers of leave used in this study are pruning residues of date palm trees from Biskra Oasis in Algeria. The leaflets, obtained from leaves, chosen as reinforcement were cleaned with water to remove dust and impurities and then naturally dried during three days in order to reduce water content [40]. After drying, date palm leaflets are ground and sieved.

In order to reduce the presence of lignin in the LPC, especially for the small reinforcement sizes, and to avoid having large particle sizes, it is necessary to stay in the range of the reinforcement sizes, 0.064–1 mm, used in the literature [41–46]. Three sizes (A, B and C) are used respectively in this study as follows: 0.1–0.315 mm, 0.315–0.5 mm, and 0.5–1 mm (Fig. 1).

2.1.2. Preparation of matrix

The matrix is an organic binder obtained by recycling EPS waste, with a density of 15 kg/m³, through its dissolution in gasoline. The dissolved EPS is blended with gasoline for a few minutes to obtain a smooth paste (Fig. 2) with a mass ratio defined as follows:

$$\frac{m_{\text{gasoline}}}{m_{\text{polystyrene}}} = 3 \quad (1)$$

where m_{gasoline} is the mass of gasoline and $m_{\text{polystyrene}}$ is the mass of the EPS.

2.1.3. Preparation of LPC test specimens

In this study, three point bending test and thermal conductivity measurements are made. For the preparation of bending and thermal conductivity LPC test specimens, two metallic molds have been manufactured, a 240 × 110 × 40 mm³ dimension for bending specimens and a 40 × 40 × 30 mm³ dimension for thermal conductivity samples (Fig. 3).



Fig. 1. Sizes of palm leaflet reinforcement.

To choose the weight proportions of the matrix and the reinforcement in the composite material, preliminary LPC preparations are made. First, LPC is prepared with matrix weight proportions of 10 and 15 wt%. It was found that, these two proportions give poor mechanical properties and make the LPC material easy to break or crumble. This behavior is due to the poor cohesion between the fiber–matrix interfaces caused by the low weight content of the matrix. Thereafter, with matrix weight proportions between 20 and 30 wt% the leaflet–polystyrene mixture becomes more coherent and the formulated LPC material presents a resistance to breaking and crumbling. For more than 30 wt% of matrix content in the mixture, it has been observed that a significant amount of the matrix is chased outside the mold. This is due to the overestimation of the amount of the matrix relative to the applied pressure. In this study, nine combinations of weight proportions of the Matrix/reinforcement (30/70, 25/75 and 20/80 wt%) with three different particle sizes of reinforcement (A, B and C) have been prepared to obtain the LPC materials (Table 1).

The preparation method of LPC test specimens are obtained by mixing the recycling EPS matrix and the reinforcement. Then, the mixture is poured into the two molds before compression. As indicated in the literature [47–50], a hold pressure of 10 bars is applied in this study during 10 min for the good distribution of the mixture and to reduce the existing air from the formulated LPC. After compression, the obtained plate and parallelepiped are dried at air under ambient conditions for least 15 days. After drying, the plates are cut up to obtain specimens of 200 × 10 × 15 mm³ dimensions according to EN ISO 14125 [51] (Fig. 4).

It should be noted that the LPC material, obtained from wastes, is easy to recycle totally at the end of its useful life. The recycling operation consists in grinding the material before adding gasoline and eventually a portion of EPS to form the same material again.

2.2. LPC characterizations

The bulk density of the composite material is measured with a pycnometer according to ISO 1183-1: 2012 standard [52].

The three-point bending properties were determined using an universal testing machine Instron 5567 model with test specimen dimensions (Fig. 5) taken according to standard EN ISO 14125 [51] ($l = 200_{-10}^0$ mm, $L = 160 \pm 1$ mm, $h = 10 \pm 0.2$ mm, and width $b = 15 \pm 0.5$ mm). The loading speed used was 2 mm/min. In each case, five specimens were used in the three point bending test. These tests allowed us to calculate the maximum stress (σ_{Max}) and the flexural modulus (E_f) of the LPC materials.

The thermal conductivity was measured, at 24 °C, using the HotDisc TPS 1500 Model. The HotDisc Thermal Constants Analyzer is a technology that uses the transient plane source technique to measure the in-plane and out of plane thermal conductivity of an anisotropic material in the same test [53,54]. The TPS 1500 shares the sterling quality, robustness and operative simplicity with an accuracy better than 5% and also meets ISO Standard 22007-2 [55]. The Kapton sensor with a diameter 19.8 mm is used in this test method. As recommended by the manufacturer, the sizes of thermal conductivity samples, cited above, were greater than the used Kapton sensor diameter.

Morphological analysis was carried out by using a Scanning Electron Microscope (SEM). The cross-sections of the samples were analyzed to examine the cohesion between the fiber and the matrix of all samples.

3. Results and discussion

3.1. Density

The results of the material's density of various LPC samples are shown in Fig. 6. The density of the formulated LPC material changes as a function of the proportion between the matrix and



Fig. 2. Gasoline, EPS waste and the gasoline- EPS mixture.



Fig. 3. Metallic molds for three point bending test and thermal conductivity measurements.

Table 1
Various LPC tested samples.

LPC Samples	Size of the reinforcement (mm)	Matrix (wt%)	Reinforcement (wt%)
A1	0.1–0.315	20	80
A2		25	75
A3		30	70
B1	0.315–0.5	20	80
B2		25	75
B3		30	70
C1	0.5–1.0	20	80
C2		25	75
C3		30	70

the reinforcement and also to the size of the reinforcement. It is showed from the Fig. 6 that the density of the LPC material increases with decreasing of the amount of the matrix, so the material is lighter when the size of the reinforcement is large. This observation does not change even if the standard deviations of

density measurements are considered. These standard deviations are acceptable, ranging from a minimum of 1.86% (Sample B2) to a maximum of 14.35% (Sample C1) with an average standard deviation of 7.5%.

3.2. Flexural bending results

The three-point bending tests allowed extracting the flexural modulus and the maximum stress. Fig. 7 show the effect of the matrix/reinforcement weight ratios and sizes of the reinforcement on the mechanical behavior of the LPC material. It is observed that the values of the curve slopes decrease with increasing the particle size of the reinforcement and the LPC material becomes more elastic. At the same time, the material has a brittle fracture with the A samples, i.e. LPC material with the small particle size of the reinforcement (0.1–0.315). By increasing the size of the reinforcement, from A to C samples, the fracture mechanism changes from fragile to a ductile.



Fig. 4. The plate, specimens and the parallelepipeds composites obtained after compression.

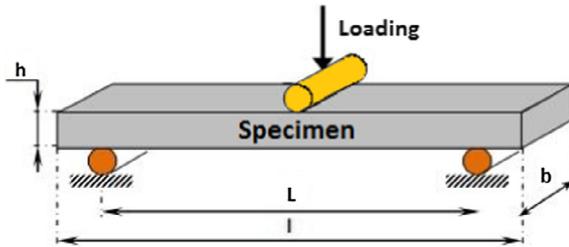


Fig. 5. Three point bending test schema.

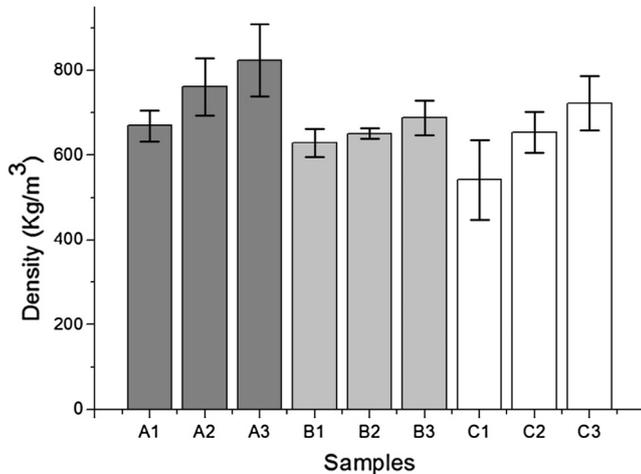


Fig. 6. Density vs. reinforcement sizes and fiber-to-matrix weight.

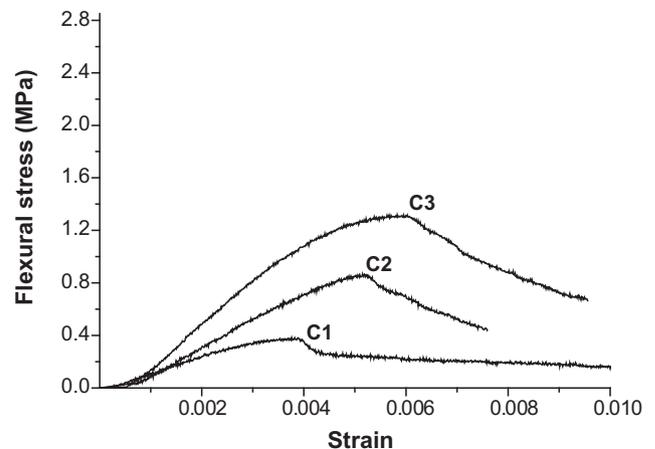
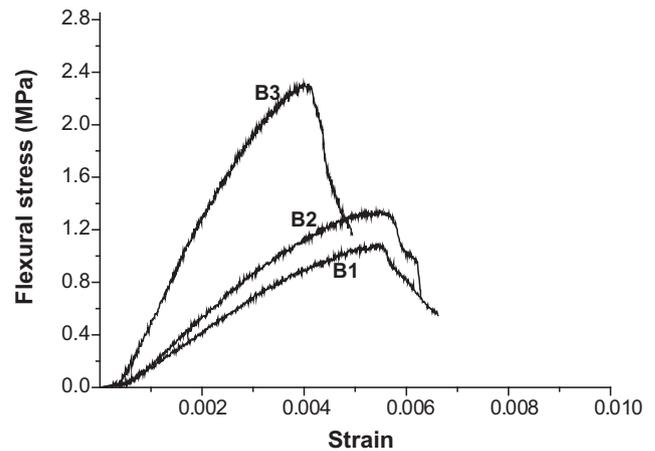
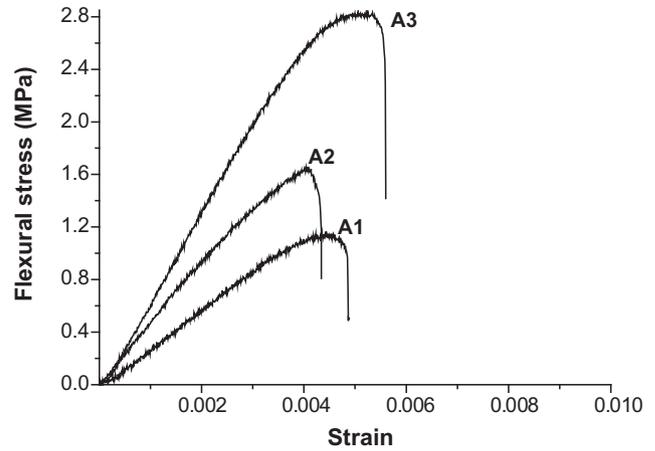


Fig. 7. The stress–strain type curves of the bending tests of the LPC material.

The fragility of plastic composites with small particle size of natural reinforcement is already observed in the literature [56,57]. In this study, the fragility of ‘A samples’ can be explained by: (i) the crack occurred and propagated directly in the matrix due to the small size of the reinforcement, and (ii) the nature of the matrix, obtained by recycling EPS waste, which is known as a fragile material [56,58]. By increasing the particle size of reinforcement, from B to C samples, the LPC material acquires ductility. A same observation is reported by Yemele et al. [57] where the increasing of fiber length improves strength and elasticity. In this case, the medium and large particle sizes of the reinforcement support the stresses transmitted by the matrix and delay the fracture of the material.

Fig. 8a, b show respectively the flexural modulus and the maximum stress for the different considered samples. It can be noticed from Fig. 8a that the flexural modulus generally increases with the increasing of the amount of the matrix for the three kinds of samples. The same observation was also noticed in the case of the maximum stress presented in Fig. 8b. These results show an acceptable average of the standard deviations concerning the flexural modulus and the maximum stress measurements with values reaching 15% and 13%, respectively. It is also observed that the flexural modulus and the maximum stress decrease generally with increasing the particle size of the reinforcement, from A to C samples, and the LPC material becomes more elastic.

3.3. Thermal conductivity of the LPC

The thermal conductivity measurements of A, B and C samples are respectively obtained in the following margins: 0.149–0.159, 0.128–0.147 and 0.112–0.137 W/m·K. In general, the thermal conductivity increases slightly by decreasing the quantity and the size of the reinforcement. In all cases, the variation of thermal

conductivity value (from 0.11 to 0.16 W/m·K) remains very limited and the LPC material presents an insulating behavior.

3.4. Recapitulation

Table 2 summarizes the physical, mechanical and thermal properties of LPC and similar materials reported in the literature [32,56,59–61]. It is observed that the measured density of LPC samples (A, B and C) varies from 542 to 824 kg/m³. Generally, the formulated LPC materials have a lower or a close density compared to those of the materials presented in the Table 2, except to that of the KC particleboards obtained by Xu et al. [60]. The LPC materials have a close density to that of the wood, as the natural

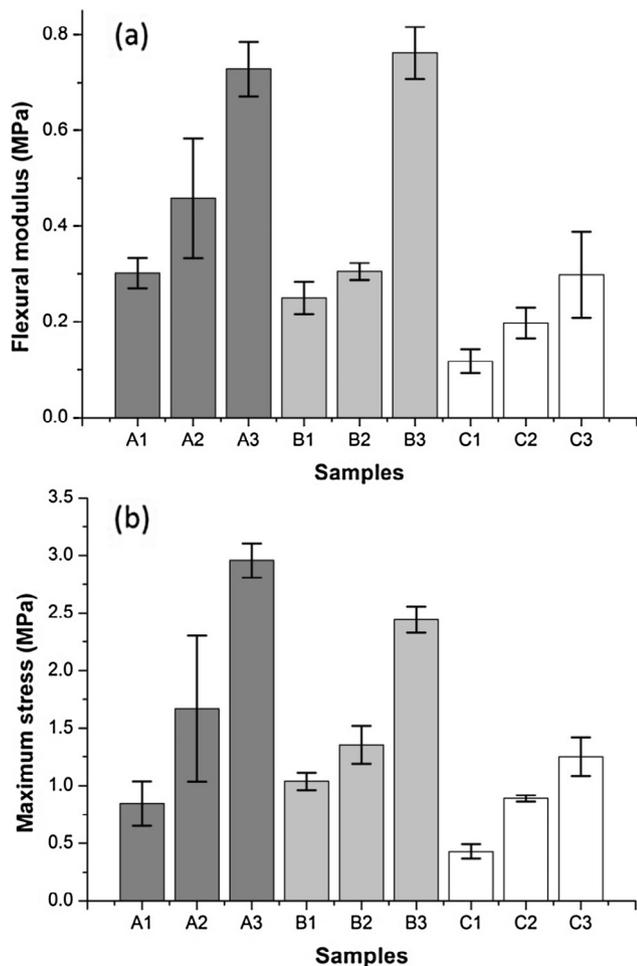


Fig. 8. Effect of the reinforcement sizes and fiber-to-matrix weight on: (a) the flexural modulus and, (b) the maximum stress.

soft and hard woods [56,60], which implies its potential use as a substitute material especially for countries with few forests and many oases of date palms. The LPC materials have also a close densities to that of the conventional composite materials (490–890 kg/m³) as the MDF, the plywood, the particleboards and the hardboard [56,60]. Compared to similar materials, the density of the LPC material is in the range of the DPCC particleboards [59] (288–910 kg/m³) and lighter than the PC-mix, PVC-mix and PS-mix materials [56]. This shows that if the mechanical properties of the LPC are acceptable, we can consider a multitude of potential applications based on its competitive density.

From Table 2, it can be seen that the LPC flexural modulus, $E_f = 0.12$ to 0.76 GPa, is smaller than the 45%DPWF [61], the MDF and the composite obtained by Binhussain et al. [56]. The formulated LPC flexural modulus is similar to the KC particleboards [60] and to the DPWF with 60% and 75% of reinforcement obtained by Mirmehdi et al. [61]. Moreover, the LPC flexural modulus is in the range of that of the DPCC particleboards [59]. Nevertheless, the maximum stress of LPC (0.43–2.96 MPa) remains low compared to the majority of that obtained from the literature [32,56,59–61]. For this reason, the present authors believe that the mechanical properties of the LPC material should be improved by the improvement of the preparation protocol. Thus, other alternatives can be considered such as the reinforcement of the LPC by another material to construct a multilayer material or sandwich panel [62–64].

As mentioned previously, it is observed in Table 2 that the thermal conductivity of the LPC material is a close function of the fiber

content and the size of reinforcement. The thermal conductivity has an inverse relationship with the density of the LPC material. Similar conclusion was reported in the literature by Khedari et al. [65] on the DPCC composite. In addition, the thermal conductivity of LPC samples was found in the range of the compared materials [56,59,60], especially with those given by Khedari et al. [59].

The present authors believe that the WW-EPS composite material prepared by Agoua et al. [32] is very similar to the LPC material because both composites have the same matrix. The minimum value of the LPC thermal conductivity (0.1122 W/m-K) is low than that of the WW-EPS composite material (0.196 W/m-K). The same results is also verified for the average values of thermal conductivity founded 0.1403 W/m-K and 0.253 W/m-K, respectively for the LPC and the WW-EPS composite materials. Thus, the reinforcement based on the date palm wastes has allowed to prepare a composite material (LPC) 50% more insulating than the wood wastes used by Agoua et al. [32].

As the results of the LPC density, Table 2 shows also a similarity in the thermal conductivity of the LPC material and the conventional woods, hardboard and the MDF. Thus, the LPC material is considered as an insulation material due especially to the low thermal conductivity of the reinforcement [23].

From Table 2 and according to the LPC properties (physical, mechanical and thermal), the developed composite material can be used in the field of building construction as a thermal insulation material (in separation walls, insulation roof, etc.) or as structural component in sandwich or multilayer structures.

3.5. Scanning electron microscopy (SEM) characterization

Fig. 9 show the SEM visualization of three LPC samples with different reinforcement sizes (A1, B1 and C1). Figures give useful information about the adhesion state of the fiber–matrix interface of the LPC material. The figures show a random distribution of fibers in the matrix for all samples. The short fibers (A1) are completely coated by the matrix and form a homogenous material with little defects. In this case a good fiber–matrix interface is obtained.

Increasing the size of the fiber (from B1 to C1) has an adverse effect on the homogeneity and on the adhesion state of the fiber–matrix interface. Fig. 9 (B1 and C1) show that the matrix appears with more aggregation on the fiber surfaces without coating the entire surfaces of the medium and the large fibers. This may be due to the preparation method of the LPC samples which obtained by mixing the recycled EPS matrix and the reinforcement. In this case, the heterogeneity of the fiber morphology presents the main cause of the heterogeneity of the LPC material. Indeed, this heterogeneity makes the mixing operation more difficult which favors the presence of defect and void in the final product.

In conclusion, the improvement of the adhesion state, of the fiber–matrix interface of the LPC material, is inversely related to the reinforcement size. This result confirms the results of the mechanical characterization discussed above.

Fig. 10 show the SEM visualization of 'A' samples, with 80, 75 and 70 wt% of reinforcement, which have a same size of the reinforcement (0.1–0.315 mm). Fig. 10 clearly show that the fibers are well coated in all 'A' samples. We can observe that the A2 sample visualization shows fibers, distributed randomly in the matrix, coated by the matrix with a good adhesion state. As a conclusion, the visualizations of Fig. 10 show a good adhesion state of the fiber–matrix interfaces for all 'A' samples. The adhesion state of the fiber–matrix interfaces is improved with increasing the matrix rate of 'A' samples. This improvement of the adhesion state explains and confirms the results of the mechanical characterizations of 'A' samples discussed above which increase with the matrix rate.

Table 2
Mechanical, physical and thermal properties of LPC and similar materials.

LPC Samples	ρ (kg/m ³)	E_f (GPa)	σ_{Max} (MPa)	λ (W/m-K)
A1	669.58 ± 36.17	0.3018 ± 0.03	0.8449 ± 0.19	0.1488 ± 0.008
A2	761.36 ± 67.53	0.4583 ± 0.12	1.6703 ± 0.64	0.1539 ± 0.005
A3	824.05 ± 85.09	0.7278 ± 0.06	2.9550 ± 0.15	0.1588 ± 0.004
B1	629.01 ± 32.52	0.2503 ± 0.03	1.0379 ± 0.08	0.1369 ± 0.004
B2	651.33 ± 12.11	0.3053 ± 0.02	1.3538 ± 0.16	0.1283 ± 0.001
B3	688.42 ± 41.35	0.7616 ± 0.05	2.4423 ± 0.11	0.1469 ± 0.011
C1	654.39 ± 93.88	0.1177 ± 0.02	0.4290 ± 0.06	0.1368 ± 0.004
C2	542.41 ± 48.22	0.1972 ± 0.03	0.8892 ± 0.03	0.1122 ± 0.001
C3	722.68 ± 63.81	0.2984 ± 0.09	1.2496 ± 0.16	0.1266 ± 0.00008
A	700–824	0.30–0.73	0.84–2.96	0.149–0.159
B	629–688	0.25–0.76	1.04–2.44	0.128–0.147
C	542–723	0.12–0.30	0.43–1.25	0.112–0.137
LPC (A, B and C)	542–824	0.12–0.76	0.43–2.96	0.112–0.159
Wood (pine, lauan) [60]	450–630	/	/	0.151
Natural hard wood [56]	660	/	/	0.12–0.29
Natural soft wood [56]	470	/	/	0.12–0.29
MDF [56]	650–790	1.35–2.5	9.5–22	0.10–0.18
Plywood [60]	490	/	/	0.083
Particleboard [60]	690	/	/	0.097
Hardboard [60]	890	/	/	0.126
DPCC particleboards [59]	288–910	0.084–2.24	0.69–43.15	0.073–0.134
KC particleboards [60]	100–300	0.3 (mean value)	1.1 (mean value)	0.051–0.058
WW-EPS composite [32]	/	/	/	0.196–0.274
PC-mix [56]	1000	1.68	/	/
PVC-mix [56]	1030	1.89	/	/
PS-mix [56]	870	1.91	/	/
45%DPWF [61]	/	0.85–2.8	25.66–28.95	/
60%DPWF [61]	/	0.66–1.82	20.26–26.85	/
75%DPWF [61]	/	0.20–0.65	10.26–14.47	/

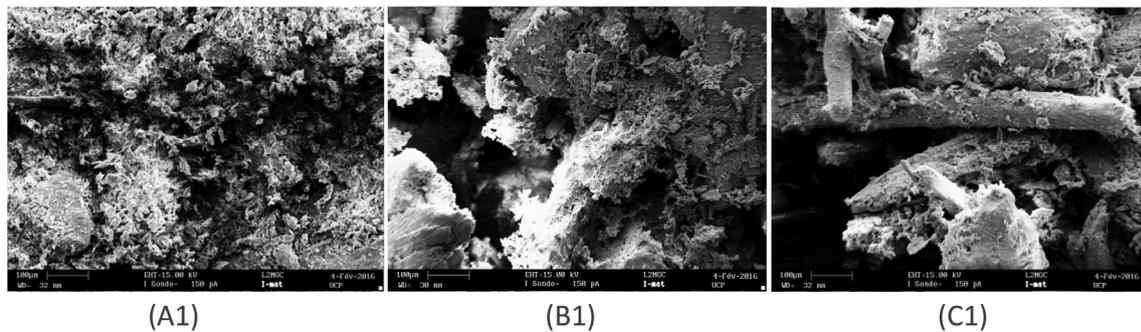


Fig. 9. SEM visualization of LPC samples with different reinforcement sizes (A1, B1 and C1).

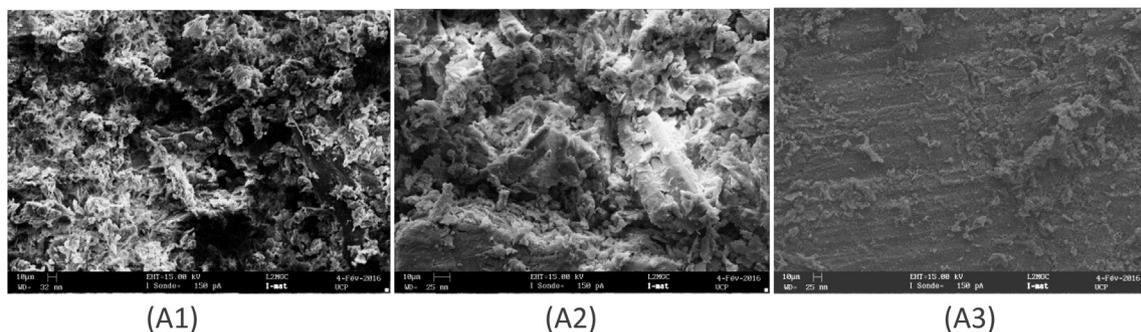


Fig. 10. SEM visualization of 'A' samples with 80, 75 and 70 wt% of reinforcement.

Fig. 11 show the SEM visualization of C1 sample, with 20 wt% of matrix and 0.5–1 mm of size of reinforcement. The figure illustrates a fracture in a large fiber. The present authors think that

the cause of such fracture is due to the composite forming process, where a high molding pressure (10 bar) is used. In this kind of sample (C), the application of high pressure in a mixture with



Fig. 11. SEM visualization of C1 sample: Illustration of a fiber fracture.

the presence of many defects and voids favors the creation of fiber fractures. This explains the results of the low mechanical characterizations of 'C' samples discussed above.

4. Conclusions

In order to promote the use of waste plant in thermal insulation of civil and mechanical construction, new Wood-Plastic composite material based on waste of plant and synthetic components is developed. In this study, date palm leaflets waste are used as the reinforcement and EPS waste, dissolved in gasoline, is used as a matrix. In this study, physical, mechanical, thermal and morphological measurements were performed to characterize the Leaflets-Polystyrene Composite (LPC). Therefore, several combinations of reinforcement sizes (A: 0.1–0.315 mm, B: 0.315–0.5 mm and C: 0.5–1 mm) and fiber-to-matrix weight ratios (70, 75 and 80 wt%) were considered.

The results of the density measurements showed that the formulated LPC materials have a close density to that of the woods which implies its potential use as a substitute material especially for countries with few forests and many oases of date palms. The LPC materials have also close density to that of the conventional composite materials as the MDF, the plywood, the particleboards and the hardboard. This conclusion shows that if the mechanical properties of the LPC material are acceptable, we can consider a multitude of potential applications based on its competitive density.

The results of the bending test measurements show that the LPC flexural modulus is smaller than the MDF and some composites obtained from the literature. Thus, the modulus is in the range to the majority of the compared materials. Nevertheless, the maximum stress of LPC material remains low compared to those of the materials presented in the literature. For this reason, the present authors believe that the mechanical properties of the LPC material should be improved by the improvement of the preparation protocol. Furthermore, other alternatives can be considered such as the reinforcement of the LPC by another material to obtain a multilayer material or sandwich panel.

The thermal conductivity measurements show that the thermal conductivity of LPC material is a close function of the fiber content and the size of reinforcement and has an inverse relationship with the density of the formulated LPC material. A similarity in the thermal conductivity of the LPC material and the conventional woods, hardboard and the MDF was found. It can be concluded that the reinforcement based on the date palm wastes has allowed the

formulation of a composite material (LPC) 50% more insulating than the similar composite based on wood wastes and EPS found in the literature.

On the other hand, the results obtained by SEM have shown the influence of the fiber size and the amount of the matrix material on the adhesion state of the LPC fiber–matrix interface. It has been found that a good adhesion state interface can be obtained by using small fibers. Additionally, to preserve a good morphology of fibers and to ensure a good fiber–matrix interface, the modeling process should be improved with adequate pressure and the use of the smaller size of the reinforcement.

In conclusion, the date palm waste is well appropriate for the formulation of efficient and safe insulating materials when compared to the other natural materials. Also, it is important to note that the LPC material is a renewable material, obtained from wastes, because it can be totally recycled at the end of its useful life.

References

- [1] A. Sarbu, S.-O. Dima, T. Dobre, I. Udrea, C. Bradu, S. Avramescu, N. Mihalache, A.-L. Radu, T.-V. Nicolescu, A. Lungu, Polystyrene wastes recycling by lightweight concrete production, *Revista de chimie* 60 (2009) 1350–1356.
- [2] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, S. Schiavoni, A review of unconventional sustainable building insulation materials, *Sustainable Mater. Technol.* 4 (2015) 1–17.
- [3] M.V. Madurwar, R.V. Ralegaonkar, S.A. Mandavgane, Application of agro-waste for sustainable construction materials: a review, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 872–878.
- [4] L.Y. Ljungberg, Materials selection and design for development of sustainable products, *Mater. Des.* 28 (2) (2007) 466–479.
- [5] M.Q. Zhang, M.Z. Rong, X. Lu, Fully biodegradable natural fiber composites from renewable resources: all-plant fiber composites, *Compos. Sci. Technol.* 65 (15–16) (2005) 2514–2525.
- [6] H.-Y. Cheung, M.-P. Ho, K.-T. Lau, F. Cardona, D. Hui, Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications, *Compos. B Eng.* 40 (7) (2009) 655–663.
- [7] A.K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, CRC press, 2005.
- [8] W. Zhou, C. Wang, T. Ai, K. Wu, F. Zhao, H. Gu, A novel fiber-reinforced polyethylene composite with added silicon nitride particles for enhanced thermal conductivity, *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 40 (6) (2009) 830–836.
- [9] C.T. Herakovich, *Mechanics of composites: a historical review*, *Mech. Res. Commun.* 41 (2012) 1–20.
- [10] B.C. Mitra, R.K. Basak, M. Sarkar, Studies on jute-reinforced composites, its limitations, and some solutions through chemical modifications of fibers, *J. Appl. Polym. Sci.* 67 (6) (1998) 1093–1100.
- [11] L.F. Cabeza, C. Barreneche, L. Miró, J.M. Morera, E. Bartolí, A.I. Fernández, Low carbon and low embodied energy materials in buildings: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 23 (2013) 536–542.
- [12] *Plastics - PlasticsEurope, The Facts, An analysis of European plastics production, demand and waste data*, PlasticsEurope, Belgium 2016 (2016) 38.
- [13] S.D.A. Sharuddin, F. Abnisa, W.M.A.W. Daud, M.K. Aroua, A review on pyrolysis of plastic wastes, *Energy Convers. Manage.* 115 (2016) 308–326.
- [14] A. Ashori, Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!, *Bioresour. Technol.* 99 (11) (2008) 4661–4667.
- [15] A. Nourbakhsh, A. Ashori, Wood plastic composites from agro-waste materials: analysis of mechanical properties, *Bioresour. Technol.* 101 (7) (2010) 2525–2528.
- [16] M.G. Lomelí-Ramírez, H.G. Ochoa-Ruiz, F.J. Fuentes-Talavera, S. García-Enriquez, M.A. Cerpa-Gallegos, J.A. Silva-Guzmán, Evaluation of accelerated decay of wood plastic composites by *Xylophagus* fungi, *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 63 (8) (2009) 1030–1035.
- [17] L. Mohammed, M.N.M. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, M.S. Islam, A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications, *Int. J. Polym. Sci.* 2015 (2015) 15.
- [18] P. Wambua, J. Ivens, I. Verpoest, Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?, *Compos. Sci. Technol.* 63 (9) (2003) 1259–1264.
- [19] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. Boudenne, A. Gherabli, Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation, *Energy Build.* 66 (2013) 267–273.
- [20] K. Almi, A. Benchabane, S. Lakel, A. Kriker, Potential utilization of date palm wood as composite reinforcement, *J. Reinf. Plast. Compos.* 34 (15) (2015) 1231–1240.
- [21] A. Korjenic, J. Zach, J. Hroudová, The use of insulating materials based on natural fibers in combination with plant facades in building constructions, *Energy Build.* 116 (2016) 45–58.
- [22] F. Touloum, A. Younsi, K. Abdelhak, A. Benchabane, Formulation of a composite of date palm wood-cement, *J. Appl. Eng. Sci. Technol.* 2 (2) (2016) 57–63.

- [23] 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 (2–3) (2011) 491–497.
- [24] F.M. AL-Oqla, O.Y. Alothman, M. Jawaid, S. Sapuan, M. Es-Saheb, Processing and properties of date palm fibers and its composites, *Biomass and bioenergy*, Springer 2014, pp. 1–25.
- [25] F.A. Al-Sulaiman, Date palm fibre reinforced composite as a new insulating material, *Int. J. Energy Res.* 27 (14) (2003) 1293–1297.
- [26] R. Al-Juruf, F. Ahmed, I. Alam, H. Abdel-Rahman, Development of heat insulating materials using date palm leaves, *J. Therm. Insul.* 11 (3) (1988) 158–164.
- [27] 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.* 52 (2013) 841–848.
- [28] K.B. Adhikary, S. Pang, M.P. Staiger, Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE), *Compos. B Eng.* 39 (5) (2008) 807–815.
- [29] M. Poletto, J. Dettenborn, M. Zeni, A.J. Zattera, Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour, *Waste Manage. (Oxford)* 31 (4) (2011) 779–784.
- [30] C. Shin, Filtration application from recycled expanded polystyrene, *J. Colloid Interface Sci.* 302 (1) (2006) 267–271.
- [31] O.I. Nkwachukwu, C.H. Chima, A.O. Ikenna, L. Albert, Focus on potential environmental issues on plastic world towards a sustainable plastic recycling in developing countries, *Int. J. Ind. Chem.* 4 (1) (2013) 34.
- [32] E. Agoua, E. Allognon-Houessou, E. Adjovi, B. Togbedji, Thermal conductivity of composites made of wastes of wood and expanded polystyrene, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 557–562.
- [33] K. Ayse, K. Filiz, Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin, *Constr. Build. Mater.* 105 (2016) 572–578.
- [34] R.S. Ravindrarajah, A. Tuck, Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads, *Cem. Concr. Compos.* 16 (4) (1994) 273–277.
- [35] B. Chen, J. Liu, Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads, *Constr. Build. Mater.* 21 (1) (2007) 7–11.
- [36] M.A.R. Bhutta, Y. Ohama, K. Tsuruta, Strength properties of polymer mortar panels using methyl methacrylate solution of waste expanded polystyrene as binder, *Constr. Build. Mater.* 25 (2) (2011) 779–784.
- [37] D. Maldas, B. Kokta, C. Daneault, Influence of coupling agents and treatments on the mechanical properties of cellulose fiber–polystyrene composites, *J. Appl. Polym. Sci.* 37 (3) (1989) 751–775.
- [38] K. Nair, S. Diwan, S. Thomas, Tensile properties of short sisal fiber reinforced polystyrene composites, *J. Appl. Polym. Sci.* 60 (9) (1996) 1483–1497.
- [39] T. Masri, A. Benchabane, H. Ounis, Matériaux à base des déchets de palmier dattier (*Phoenix Dactylifera*) et de polystyrène, DZ patent, App. 160159, 10-04-2016, Algeria.
- [40] K. Almi, S. Lakel, A. Benchabane, A. Kriker, Characterization of date palm wood used as composites reinforcement, *Acta Phys. Pol. A* 127 (4) (2015) 1072–1074.
- [41] N.M. Stark, R.E. Rowlands, Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites, *Wood Fiber Sci.* 35 (2) (2007) 167–174.
- [42] Y. Cui, S. Lee, B. Noruziaan, M. Cheung, J. Tao, Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* 39 (4) (2008) 655–661.
- [43] A. Curvelo, A. De Carvalho, J. Agnelli, Thermoplastic starch–cellulosic fibers composites: preliminary results, *Carbohydr. Polym.* 45 (2) (2001) 183–188.
- [44] H. Bouafif, A. Koubaa, P. Perré, A. Cloutier, Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 40 (12) (2009) 1975–1981.
- [45] S. Migneault, A. Koubaa, F. Erchiqui, A. Chaala, K. Englund, C. Krause, M. Wolcott, Effect of fiber length on processing and properties of extruded wood-fiber/HDPE composites, *J. Appl. Polym. Sci.* 110 (2) (2008) 1085–1092.
- [46] J.L. Julson, G. Subbarao, D. Stokke, H.H. Gieselmann, K. Muthukumarappan, Mechanical properties of biorenewable fiber/plastic composites, *J. Appl. Polym. Sci.* 93 (5) (2004) 2484–2493.
- [47] J. Wank, W. Uerdingen, L. Schrader, W. Waldenrath, Multilayer composite material, Google Patents, 1991.
- [48] H. Dhakal, Z. Zhang, M. Richardson, Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites, *Compos. Sci. Technol.* 67 (7) (2007) 1674–1683.
- [49] D. Vlasveld, H. Bersee, S. Picken, Nanocomposite matrix for increased fibre composite strength, *Polymer* 46 (23) (2005) 10269–10278.
- [50] J. Lorenz, E. Wilka, Thermoplastic composite material, Google Patents, 2002.
- [51] E. ISO 14125 Composites plastiques renforcés de fibres-Détermination des propriétés de flexion, 1998.
- [52] S. ISO, 1183-1. Plastics-Methods for determining the density of noncellular plastics-Part 1: immersion method, liquid pycnometer method and titration method, Helsinki, 2012.
- [53] T.P.S.-G.H. Disk, Technique, Standards for Contact Transient Measurements of Thermal Properties, National Physical Laboratory, United Kingdom, 2006.
- [54] M. Gustavsson, E. Karawacki, S.E. Gustafsson, Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensors, *Rev. Sci. Instrum.* 65 (12) (1994) 3856–3859.
- [55] S. ISO, 22007-2: 2008, Plastics-Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity-Part 2 (2008).
- [56] M.A. Binhussein, M.M. El-Tonsy, Palm leave and plastic waste wood composite for out-door structures, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 1431–1435.
- [57] M.C.N. Yemele, A. Koubaa, A. Cloutier, P. Soulounganga, M. Wolcott, Effect of bark fiber content and size on the mechanical properties of bark/HDPE composites, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 41 (1) (2010) 131–137.
- [58] P.N.S. Schmidt, M.O.H. Gioffi, H.J.C. Voorwald, J.L. Silveira, Flexural Test On Recycled Polystyrene, *Procedia Eng.* 10 (2011) 930–935.
- [59] J. Khedari, N. Nankongnab, J. Hirunlabh, S. Teekasap, New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir, *Build. Environ.* 39 (1) (2004) 59–65.
- [60] J. Xu, R. Sugawara, R. Widyorini, G. Han, S. Kawai, Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core, *J. Wood Sci.* 50 (1) (2004) 62–67.
- [61] S.M. Mirmehdi, F. Zeinaly, F. Dabbagh, Date palm wood flour as filler of linear low-density polyethylene, *Compos. B Eng.* 56 (2014) 137–141.
- [62] M.A. Dweib, B. Hu, A. O'Donnell, H.W. Shenton, R.P. Wool, All natural composite sandwich beams for structural applications, *Compos. Struct.* 63 (2) (2004) 147–157.
- [63] M.A. Dweib, B. Hu, H.W. Shenton, R.P. Wool, Bio-based composite roof structure: manufacturing and processing issues, *Compos. Struct.* 74 (4) (2006) 379–388.
- [64] Y. Du, N. Yan, M.T. Kortschot, Light-weight honeycomb core sandwich panels containing biofiber-reinforced thermoset polymer composite skins: fabrication and evaluation, *Compos. B Eng.* 43 (7) (2012) 2875–2882.
- [65] J. Khedari, B. Suttisonk, N. Pratinthong, J. Hirunlabh, New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity, *Cem. Concr. Compos.* 23 (1) (2001) 65–70.

BREVET D'INVENTION

**Déposant : Laboratoire de Génie Energétique et Matériaux, LGEM
Université de Biskra, B.P. 145, R.P. 07000, Biskra, Algérie**

**Titre de l'invention : « Matériau à base des déchets de palmier dattier
(Phoenix Dactylifera) et de polystyrène »**

MEMOIRE DESCRIPTIF

Nature de la demande de protection *

Brevet d'invention

Extension de la demande
internationale selon le PCT

Certificat d'addition

[71] - DEPOSANT[S] : Nom, Prénom, [dénomination], et Adresse complète

Laboratoire de Génie Energétique et Matériaux, LGEM, Université de Biskra, B.P. 145, R.P. 07000, Biskra, Algeria

Nationalité du ou des déposants Algérienne

[72] - INVENTEUR[S] : Nom, Prénom, Adresse

- MASRI, Tahar, Laboratoire de Génie Energétique et Matériaux, LGEM, Université de Biskra, B.P. 145, 07000, Biskra, Algeria
- BENCHABANE, Adel, Laboratoire de Génie Energétique et Matériaux, LGEM, Université de Biskra, B.P. 145, 07000, Biskra, Algeria
- OUNIS, Houdayfa, Laboratoire de Génie Energétique et Matériaux, LGEM, Université de Biskra, B.P. 145, 07000, Biskra, Algeria

[54] - TITRE DE L'INVENTION :

Matériau à base des déchets de palmier dattier (Phoenix Dactylifera) et de polystyrène

[30] - REVENDICATION DE PRIORITE (S)

[31] - N°[s] de dépôt	[32] - date[s] :	[33] - pays d'origine	Nature de la demande

Numéro de dépôt	Date de dépôt	Heure
160159	10 AVR. 2016	13h49.

N° de la demande internationale et date internationale de dépôt

Visa
<p>ZENAD Youcef Chef de Département Brevets et Marques Régionales et Internationales</p>



SYSTEME DE MANAGEMENT DE LA QUALITE

Code: **R2-FO-07**

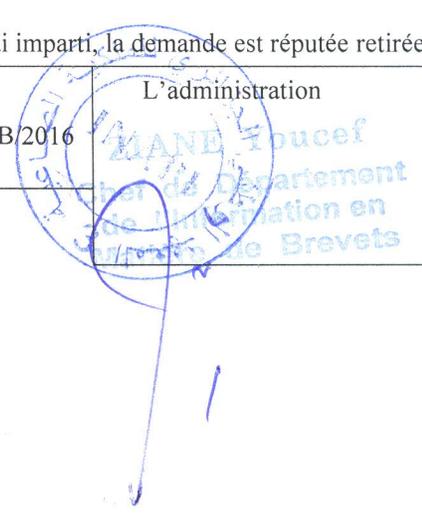
RAPPORT EXAMEN DE RECEVABILITE

Edition
1

Page:
1/1

Numéro de dépôt international	Date de dépôt international
N° d'entrée en phase nationale DZ/P/ 2016/159	Date d'entrée en phase nationale 10/04/2016
Déposant : Laboratoire de Génie Energétique et Matériaux, LGEM, Université de Biskra Adresse : B.P. 145, R.P. 07000, Biskra, Aigeria , Biskra, DZ	
Mandataire : Adresse :	
L'examen de recevabilité de la demande susmentionnée révèle ce qui suit :	
- Absence la page de garde du mémoire descriptif en langue française. - en double exemplaire.	
En vertu de l'article 27 de l'ordonnance n°03-07 du 19 juillet 2003 relative à la protection des inventions, nous vous prions de régulariser la demande suscitée dans un délai de deux (02) mois. Ce délais peut être augmenté sur requête du demandeur ou de son mandataire. Dans le cas ou le dossier n'est pas régularisé dans le délai imparti, la demande est réputée retirée.	
Fait à Alger, le N/Réf/AIT ALI /	L'administration /DB/2016

11. 11 AVR. 2016
972



Abrégé descriptif

Matériau à base des déchets de palmier dattier (*Phoenix Dactylifera*) et de polystyrène

La présente invention vise l'utilisation des déchets industriels comme matrice et des déchets végétaux comme renfort pour la fabrication d'un nouveau matériau composite. Nous proposons la composition d'un matériau qui prend en compte les contraintes économiques et écologiques liées à la fabrication et à l'utilisation des matériaux composites en se basant sur : (i) les déchets industriels, particulièrement les déchets en polystyrène, préférentiellement les déchets d'emballage en polystyrène pour la fabrication de la matrice (ii) et les déchets végétaux, particulièrement les déchets des palmiers (tronc, palmes, pétioles, rachis, épines, feuillettes, grille fibreuse, grappes, fruits, noix), préférentiellement les déchets renouvelables des palmiers dattiers de type *Phoenix Dactylifera* (palmes, pétioles, rachis, épines, feuillettes, grille fibreuse), comme renfort. Le but de ce mélange est d'obtenir un matériau composite avec des caractéristiques (mécanique, thermique, écologique et économique) acceptables et concurrente aux matériaux de même usage.

1 Titre de l'invention

Matériau à base des déchets de palmier dattier (*Phoenix Dactylifera*) et de polystyrène

2 Domaine technique auquel se rapporte l'invention

5 La présente invention se rapporte au domaine des matériaux composites à base de déchets végétaux et industriels. Les domaines d'application de l'invention sont, notamment mais non exclusivement, liés aux domaines des matériaux de construction et d'isolation acoustique et thermique. La présente invention peut être utilisée dans le secteur du bâtiment : Fabrication des supports d'isolation telle que les toitures
10 d'isolation, les murs de séparation, panneaux de construction,...

La présente invention ne se limite pas uniquement dans le secteur du bâtiment, mais elle peut être aussi appliquée dans les domaines de la mécanique en générale et de l'ameublement.

3 Etat de la technique antérieure

15 Selon la norme ASTM D3878, les composites sont des matériaux structuraux qui se composent de deux ou plusieurs constituants non miscibles combinés au niveau macroscopique. Le but de tel composite est d'avoir un matériau dont les performances sont meilleures que celles de ces composants pris séparément. L'un des constituants est appelé *phase de renfort* et celui qui l'enveloppe est appelé *matrice*. La phase de
20 renfort fourni la majorité de la résistance et de la rigidité du composite. La matrice représente, en général, la matière de liaison, qui soutient et protège la phase de renfort.

Généralement, les matrices utilisées sont des matrices minérales ou organiques. Les matrices minérales sont de type céramique ou métallique. Pour ce qui est des matrices organiques, qui sont généralement sous forme de résines, elles se scindent en deux
25 grandes familles de résines : les thermodurcissables et les thermoplastiques.

Les renforts peuvent être en forme de fibres, de particules ou d'écailles. Dans la classification des renforts, il existe deux types de renforts : inorganiques et organiques. Parmi les renforts inorganiques les plus employés, on trouve ceux à base de polyester et d'aramide. Pour les renforts organiques, on trouve : (i) Les renforts organiques

minéraux tel que les fibres de bore, métallique et de carbone ; (ii) Les renforts organiques végétaux qui sont généralement à base de coton, lin, chanvre, jute, alfa...

De nos jours, l'utilisation des matériaux composites prends de l'ampleur vis-à-vis des matériaux traditionnels (acier, aluminium, bois, ...) dans pratiquement tous les secteurs industriels. Cette réalité est due aux avantages remarquables que présentes les matériaux composites par rapport à leurs homologues traditionnels. Cependant, les matériaux composites présentent une contrainte économique importante au constructeur industriel du fait du coût élevé de la matière première et des procédés de fabrications. De plus de la contrainte économique, le recyclage de beaucoup de matériaux composites reste immaitrisable et couteux.

Dans la présente invention, nous proposons la composition d'un matériau composite qui prend en compte les contraintes économiques et écologiques précédemment discutées. Ainsi, nous proposons d'exploiter des déchets industriels pour la composition de la matrice et des déchets végétaux comme renfort du matériau composite.

15 **4 But de l'invention**

De point de vue économique et environnemental, l'utilisation des déchets du palmier dattier (*Phoenix Dactylifera*) comme renfort dans les matériaux composites est un projet prometteur. Plus de 210 000 tonnes de pétioles, 73 000 tonnes de feuilles et 52 000 tonnes de grappes de palmier dattier sont produites par an en Algérie seul.

20 Dans la présente invention, nous proposons une composition d'un nouveau matériau composite qui prend en compte les contraintes économiques et écologiques liées à la fabrication et à l'utilisation des composites en se basant sur : (i) les déchets industriels, particulièrement les déchets en polystyrène, préférentiellement les déchets d'emballage en polystyrène pour la fabrication de la matrice et (ii) les déchets végétaux, particulièrement les déchets des palmiers, préférentiellement les déchets des palmiers dattiers de type *Phoenix Dactylifera* (feuillettes, rachis,...), comme renfort. Le but de ce mélange est d'obtenir un matériau composite avec des caractéristiques (mécanique, thermique, acoustique, écologique et faible coût) acceptables et concurrente aux matériaux du même usage.

5 Présentation de l'essence (la substance) de l'invention

La présente invention concerne la composition d'un nouveau matériau à base de déchets végétaux, préférablement des déchets du palmier dattier (*Phoenix Dactylifera*), particulièrement des feuilles de palme, et de déchets industriels, préférablement de déchets en polystyrène, préférentiellement le polystyrène expansé. Cette invention concerne également le procédé de fabrication de cette composition ainsi que ses utilisations. Les déchets végétaux du palmier dattier et les déchets industriels en polystyrène sont, respectivement, à la base du renfort et de la matrice du matériau de la présente composition.

10 Les déchets du palmier dattier peuvent être obtenus des palmiers (male ou femelle) de Daglette Nour, de Mech Dagla, d'Elgherss ou d'un autre type de cette plante. Les parties de cette dernière concernées par la présente composition sont : tronc, palmes, pétioles, rachis, épines, feuillettes, grille fibreuse (lifs), grappes, fruits, noix. On peut également mélanger deux types, ou plus, des déchets de la plante.

15 Le renfort de la présente composition est issu des déchets du palmier dattier cités précédemment. Le renfort peut être obtenu d'une seule partie ou d'un mélange d'au moins deux parties du palmier dattier. La présente invention propose l'utilisation préférentielle des parties renouvelables de la plante comme les feuillettes que nous prenons comme exemple dans ce qui suit.

20 Selon l'invention, l'air comprimé est utilisé pour le nettoyage des déchets végétaux (des feuillettes par exemple). On peut utiliser également l'eau (ou l'eau distillée) directement, ou après le nettoyage à l'aide de l'air comprimé, par tout moyen de rinçage (jet d'eau, bac, ...).

25 Selon l'invention, le séchage des déchets végétaux (des feuillettes par exemple) peut être réalisé par tout moyen : Par exemple le séchage à l'air libre ou dans une étuve à température inférieure à la température de carbonisation des feuillettes.

30 Selon l'invention, une étape de préparation des déchets végétaux (des feuillettes par exemple) est prévue selon le broyeur utilisé. Ce dernier permet d'obtenir plusieurs formes de déchets broyés, par exemple : des parties de feuillettes, une poudre de feuillettes de différentes tailles granulométriques ou d'un mélange des deux.

Selon l'invention, une étape de tamisage des déchets broyés est prévue pour obtenir la gamme granulométrique souhaitée pour la composition du renfort.

Selon la présente composition, la matrice utilisée peut être faite d'une résine, une colle, un autre type de liant ou un matériau produit par le mélange des deux éléments
5 suivants : (i) des déchets industriels en polystyrène, préférentiellement des déchets d'emballage en polystyrène expansé, (ii) et d'un additif, qui réagit avec le polystyrène, comme l'acétone ou préférentiellement l'essence. Ce dernier est un liquide inflammable issu de la distillation du pétrole, commercialisé comme carburant pour les moteurs à combustion interne.

10 Selon l'invention, un mélangeur, ou tout moyen permettant d'avoir un mélange homogène (manuellement ou par machine), est utilisé pour le malaxage du polystyrène avec l'essence afin d'obtenir la matrice. De la même manière, un malaxage de l'ensemble "matrice-renfort" permet d'avoir une bonne répartition du renfort dans la matrice du matériau composite.

15 Selon l'invention, le matériau composite peut être obtenu par les procédés de mise en forme habituels (par moulage, par extrusion, ...), préférentiellement par moulage de l'ensemble matrice-renfort.

Selon l'invention, la solidification du mélange peut être réalisée avec tout moyen de solidification (par exemple à l'air libre ou dans un four), préférentiellement avec
20 compactage.

6 Mode de réalisation de l'invention

Nous donnons ci-dessous un exemple type illustrant la présente composition avec un renfort préparé sur la base de feuilles de palmier dattier.

Les déchets de feuilles de palmier dattier sont nettoyés à l'aide de l'eau et séchés à
25 l'air libre durant sept jours. Après le séchage, les feuilles sont broyées avec un moulin à café et tamisées afin d'avoir une granulométrie de l'ordre de 0,315 mm à 0,5 mm pour l'utiliser comme renfort.

Le polystyrène expansé est mélangé avec l'essence durant quelques minutes (près de cinq minutes) pour obtenir la matrice. Le rapport massique essence / polystyrène expansé est égal à trois.

5 La matrice est mélangée avec le renfort jusqu'à homogénéisation. Le rapport massique matrice / renfort est égal à 1/3 (25% matrice et 75% renfort).

Une pression de dix bars est appliquée sur l'ensemble matrice-renfort pour réduire les bulles d'air. Le matériau composite obtenu est séché à l'air libre jusqu'à solidification (durant une dizaine de jours).

10 La composition obtenue manifeste une rupture ductile avec un module de flexion $E_f = 870$ MPa, une résistance à la flexion $\sigma_{FM} = 2.6$ MPa et un module d'élasticité $E = 950$ MPa. D'autre part, la composition obtenue possède une masse volumique $\rho = 650$ kg / m³ et une conductivité thermique $\lambda = 0.12$ W / m. K.

7 Manière dont l'invention est susceptible d'application

15 La présente composition peut être utilisée telle quelle est ou comme un élément de structures (cœur dans les structures sandwich par exemple).

20 La présente composition peut être appliquée comme une solution alternative à l'utilisation de plusieurs matériaux de construction, particulièrement le bois. A titre d'exemple le présent matériau composite peut être utilisé comme panneau d'isolation, tôle de toiture, mur de séparation, porte ou comme parquet. D'autre part la présente composition peut être appliquée aussi dans la fabrication de meubles tels que les tables, tableau, bureau, ...

8 Revendications

1. La composition est un nouveau matériau composite à base de (i) déchets végétaux, préférablement des déchets du palmier dattier (*Phoenix Dactylifera*), particulièrement des feuilles de palme, (ii) et de déchets industriels,
5 préférablement de déchets en polystyrène, préférentiellement le polystyrène expansé. Les déchets végétaux du palmier dattier et les déchets industriels en polystyrène sont, respectivement, à la base du renfort et de la matrice de la présente composition.
- 10 2. Selon la revendication 1, les déchets végétaux peuvent être obtenus des palmiers dattiers (male ou femelle) de Daglette Nour, de Mech Dagla, d'Elgherss ou d'un autre type de cette plante.
3. Selon les revendications 1 et 2, les parties du palmier dattier formants le renfort de la présente composition sont comme suit : tronc, palmes, pétioles, rachis,
15 épines, feuillettes, grille fibreuse (lifs), grappes, fruits, noix. On peut également mélanger deux types, ou plus, des déchets de la plante, préférentiellement les parties renouvelables pour former le renfort.
4. Selon les revendications 1 à 3, le renfort est obtenu (avec ou sans traitement
20 chimique) après les étapes de préparations suivantes : nettoyage et/ou traitement, séchage, broyage et tamisage.
5. Selon la revendication 4, le tamisage permet d'obtenir plusieurs formes de déchets broyés. Ces derniers peuvent être utilisés sous formes de fibres, de
25 particules de bois ou d'un mélange de différentes formes et tailles pour la composition du renfort.
6. Selon la revendication 1, la matrice utilisée peut être faite d'une résine, d'une colle, d'un autre type de liant ou d'un matériau produit par le mélange des deux
30 éléments suivants : (i) des déchets industriels en polystyrène, préférentiellement des déchets d'emballage en polystyrène expansé, (ii) et d'un additif, qui réagit avec le polystyrène, comme l'acétone ou préférentiellement l'essence.

7. Selon la revendication 6, la matrice est obtenue par malaxage (manuellement ou par machine) du polystyrène avec l'additif.
- 5 8. Selon les revendications 1 à 7, l'ensemble "matrice-renfort" est malaxé (manuellement ou par machine) pour avoir une bonne répartition du renfort dans la matrice de la composition.
- 10 9. Selon la revendication 8, le matériau composite est obtenu par les procédés de mise en forme habituels (par moulage, par extrusion, ...), préférentiellement par moulage de l'ensemble matrice-renfort.
- 15 10. Selon la revendication 9, la solidification de la composition peut être réalisée avec tout moyen de solidification (à l'air libre, dans un four, ...) préférentiellement avec compactage.
11. Selon les revendications 1 à 10, le renfort de la présente composition peut être mélangé avec d'autres renforts (particules d'argile, fibres de verre, ...) pour former un matériau composite à renfort hybride.

الملخص الوصفي

مادة مركبة من مخلفات نخيل التمر و نفايات البوليسترين.

الهدف من هذا الاختراع هو استعمال النفايات الصناعية كمصفوفة و المخلفات النباتية كمادة تعزيز في تكوين مادة مركبة جديدة. نقترح بتكبيبة مادة تأخذ بعين الاعتبار الرهانات الاقتصادية والبيئية المتعلقة بإنتاج واستخدام المواد المركبة الصناعية وذلك بالاعتماد على: (1) النفايات الصناعية، وخاصة نفايات البوليسترين مع بفضري نفايات البوليسترين الخاصة بالتغليف، للحصول على المصفوفة، (2) والمخلفات النباتية، وخاصة مخلفات النخيل (الجدع، أعراق الجريد، سيقان الجريد، السعف، الليف، العرجون، الفاكهة، نواة الفاكهة) مع بفضري المخلفات المتجددة لنخيل التمر (أعراق الجريد، سيقان الجريد، السعف، الليف)، للحصول على مادة التعزيز. والغرض من هذا الخليط هو الحصول على مادة مركبة ذات خصائص (ميكانيكية، حرارية، بيئية واقتصادية) مقبولة مقارنة مع مواد تستخدم لنفس الغرض.

1. عنوان الاختراع

مادة مركبة من مخلفات نخيل التمر و نفايات البوليسترين.

2. المجال التقني الذي يتعلق به الاختراع

5 يتعلق هذا الاختراع بمجال المواد المركبة المكونة من النفايات النباتية و النفايات الصناعية. مجالات تطبيق متعلقة بمجالات مواد البناء والعزل الصوتي والحراري، على سبيل الذكر لا الحصر. استخدام هذا الاختراع في قطاع البناء يلتمن في تصنيع المواد العازلة مثل الأسقف العازلة، جدران الفصل، ألواح البناء ... لا تقتصر استخدامات هذا الاختراع على قطاع البناء، بل يمكن أن يطبق أيضا في مجالات الميكانيكا بشكل عام وكذلك في صناعة الأثاث.

10

3. حالة التقنيات السابقة

المواد المركبة هي المواد الإنشائية التي تتكون من عنصرين أو أكثر قابلة للمزج و التجميع على المستوى المجهر (ASTM D3878). والغرض من هذه التوقيف هو الحصول على مادة يكون أداؤها أفضل من أداء مكوناتها باعتبار كل منها على افراد. و تتكون هذه التوقيف من عنصرين أساسيين و هما مادة التعزيز و المصفوفة حيث أن مادة التعزيز تعزز قوة وصلابة المادة المركبة. تمثل المصفوفة، بشكل عام، المادة الرابطة التي تدعم وتحمي مادة التعزيز.

15

تنقسم المصفوفات المستخدمة حاليا إلى نوعين وهي المصفوفات العضوية و المعدنية. المصفوفات المعدنية تكون إما من السيراميك أو من المعادن. أما المصفوفات العضوية، والتي عادة ما تكون على شكل راتنجات، فتقسم إلى عائلتين كبيرتين و هي الراتنجات المتصلبة حراريا و من اللدائن الحرارية.

20

تكون مواد التعزيز على شكل ألياف، جسيمات أو رقائق جزيئية. و تقسم مواد التعزيز إلى نوعين: عضوية و غير عضوية. فمواد التعزيز غير العضوية الأكثر استعمالا هي تلك التي تصنع من البوليستر والأراميد. أما مواد التعزيز العضوية فهي: (1) تعزيزات معدنية عضوية مثل ألياف البورون و ألياف المعادن والكربون، (2) تعزيزات عضوية نباتية وهي التي تصنع من القطن، الكتان، القنب، الجوت، الحلفاء...

من يوم لآخر، تستخدم المواد المركبة أكثر فأكثر لتعويض المواد التقليدية (حديد الصلب، الألومنيوم، الخشب، ...) في جميع القطاعات الصناعية. يرجع ذلك إلى المزايا و الخصائص الاستثنائية الخاصة بالمواد المركبة مقارنة مع نظائرها التقليدية. بالرغم من ذلك، فإن الشركات الصناعية ما تزال تتحفظ في تصنيع بعض المواد المركبة لأسباب اقتصادية متعلقة بارتفاع تكلفة المواد الخام وكذلك عمليات التصنيع. بالإضافة إلى ذلك، لا يزال التحكم في إعادة تدوير عديد المواد المركبة غير ممكن و باهظ الثمن.

25

نقدم في هذا الاختراع تحضير مادة مركبة تأخذ بعين الاعتبار الرهانات الاقتصادية والبيئية السالفة الذكر. إذ نقتراح بذلك استخدام النفايات الصناعية في تكوين المصفوفة والنفايات النباتية لمادة تعزيز للمادة المركبة.

4. الهدف من الاختراع

5 يعتبر استخدام مخلفات نخيل التمر لمادة تعزيز في صناعة المواد المركبة مشروعاً واعداداً من الناحية الاقتصادية والبيئية. فمثلاً تحصي الجزائر وحدها أكثر من 210000 طن من أعناق الجريد ، 73000 طن من الجريد و 52000 طن من خشب العرجون سنوياً.

10 نقدم في هذا الاختراع تركيبة جديدة لمادة مركبة تأخذ بعين الاعتبار الرهانات الاقتصادية و البيئية المتعلقة بتصنيع واستخدام المواد المركبة وذلك بالاعتماد على: (1) النفايات الصناعية، وخاصة نفايات البوليسترين مع تفضيل نفايات البوليسترين الخاصة بالتغليف، للحصول على المصفوفة (2) والمخلفات النباتية، وخاصة مخلفات النخيل (الجدع، أعناق الجريد، سيقان الجريد، السعف، الليف، العرجون، الفاكهة، نواة الفاكهة) مع تفضيل المخلفات المتجددة لنخيل التمر (أعناق الجريد، سيقان الجريد، السعف، الليف)، للحصول على مادة التعزيز. والغرض من هذا الخليط هو الحصول على مادة مركبة ذات خصائص ميكانيكية، حرارية، بيئية واقتصادية مقبولة مقارنة مع مواد منافسة تستخدم لنفس الغرض.

5. عرض مضمون (جوهر) الاختراع

يتعلق هذا الاختراع بتركيبة مادة جديدة تصنع من مخلفات النباتات مع تفضيل مخلفات نخيل التمر و لاسيما سعف النخيل، والنفايات الصناعية مع تفضيل نفايات البوليسترين لاسيما البوليسترين الممدد. كما يتعلق هذا الاختراع بتوضيح طريقة تصنيع المادة المركبة واستخداماتها. فيما يخص المخلفات النباتية من نخيل التمر و النفايات الصناعية من البوليسترين فهي تشكل، على التوالي، مادة التعزيز ومصفوفة المادة المركبة.

20 يمكن الحصول على مخلفات نخيل التمر (ذكر أو أنثى) من نخيل دقلة نور، مش دقلة أو الغرس أو أي نوع آخر من النخيل. أجزاء النخيل المعنية بهذا الاختراع هي: الجذع، أعناق الجريد، سيقان الجريد، السعف، الليف، العرجون، الفاكهة، نواة الفاكهة. كما يمكننا أيضاً مزج جزئين أو أكثر من هذه المخلفات.

مواد التعزيز الخاصة بالتركيبة الحالية هي من مخلفات نخيل التمر المذكورة أعلاه و التي يمكن الحصول عليها من جزء واحد أو على الأقل من خليط مكون من جزئين مختلفين. كما يفضل في هذا الاختراع استخدام الأجزاء المتجددة من النخيل مثل السعف على سبيل المثال.

وقال لهذا الاختراع، يتم استخدام الهواء المضغوط لتنظيف المخلفات النباتية (سعف النخيل على سبيل المثال). ويمكن أيضاً استخدام الماء (أو الماء المقطر) مباشرة، أو بعد التنظيف بالهواء المضغوط، بأي وسيلة تنظيف (حوض مائي، نفث الماء...).

وفقا لهذا الاختراع، تجفيف المخلفات النباتية (سعف النخيل على سبيل المثال) يمكن أن يتم بأي وسيلة، على سبيل المثال التجفيف في الهواء الطلق أو في الفرن على درجة حرارة أقل من درجة حرارة احتراق المخلفات النباتية.

5 وفقا لهذا الاختراع، نقوم بمرحلة تحضر من خلالها المخلفات النباتية (سعف النخيل على سبيل المثال) وذلك حسب نوع الطاحونة المستخدمة. هذه الأخيرة تسمح بالحصول على عدة أشكال مطحونة، على سبيل المثال: قطع من سعف النخيل، ومسحوق سعف النخيل الذي يحتوي على جسيمات ذات أحجام مختلفة أو مزيج منهما.

وفقا لهذا الاختراع، نقوم بمرحلة غربلة للمخلفات المطحونة للحصول على جسيمات بالأحجام المطلوبة في تكوين مادة التعزيز للمادة المركبة.

10 وفقا للتركيبية الحالية، المصفوفة المستخدمة تكون إما من الراتنج، من مادة لاصقة، من نوع آخر من الروابط أو لمادة ناتجة من خلط العنصرين التاليين: (1) بوليسترين النفايات الصناعية مع نفضلي نفايات بوليسترين (التغليف، 2) مادة مضافة تملك قابلية التفاعل مع البوليسترين مثل الأسيون مع تفضيل للينزين.

وفقا لهذا الاختراع، نقوم بمرحلة مزج البوليسترين مع البنزين (يدويا أو بواسطة آلة) للحصول على المصفوفة. وكذلك نقوم بعملية مزج المصفوفة و مادة التعزيز للحصول على توزيع جيد لهذه الأخيرة في المصفوفة. 15

وفقا لهذا الاختراع، يمكننا الحصول على المادة المركبة عن طريق عمليات التشكيل التقليدية (الصب، البثق، ...) ويفضل أن يكون عن طريق صب الخليط المكون من المصفوفة و مادة التعزيز.

وفقا لهذا الاختراع، يمكن تصليد الخليط المكون من المصفوفة و مادة التعزيز بلي وسرلة تصليد (على سبيل المثال في الهواء الطلق أو في الفرن)، ويفضل أن يكون مع الضغط.

20

6 نمط تجسيد الاختراع

نقدم فيما يلي مثال نموذجي يوضح التركيبية الحالية مع مادة التعزيز المعدة أساسا من سعف مخلفات النخيل.

تم خلط البوليسترين مع البنزين لبضع دقائق (حوالي خمس دقائق) للحصول على المصفوفة. النسبة الكتلية بين البنزين/ البوليسترين تساوي ثلاثة.

25 تم تنظيف سعف مخلفات النخيل بالماء المقطر وجففت في الهواء الطلق لمدة سبعة أيام. و للحصول على مادة التعزيز، طحنت مخلفات سعف النخيل بطاحونة قهوة و غربلت بغرابيل ذات قياس 0.315 ملم و 0.5 ملم.

تم مزج المصفوفة مع مادة التعزيز للحصول على خليط متجانس. النسبة الكتلية بين المصفوفة و مادة التعزيز تساوي 3/1 (25% مصفوفة و 75% مادة التعزيز).

تم تطبيق ضغط 10 بار على المزيج للحد من ظاهرة فقاعات الهواء. المادة المركبة المتحصل عليها تم تجفيفها في الهواء الطلق حتى التصلب (مدة عشرة أيام).

تم تسجيل سلوك انكسار مرن للتركيبية المتحصل عليها بمعامل انحناء يساوي 870 ميغا باسكال، مقاومة انحناء تساوي 2.6 ميغا باسكال، معامل مرونة يقدر بـ 950 ميغا باسكال. من جهة أخرى، المادة المركبة المتحصل عليها لديها كثافة تقدر بـ 650 كغ/م³ و ناقلية حرارية تقدر بـ 0.12 واط/م. كلفن. 5

7. كيفية تطبيق الاختراع

يمكن استخدام التركيبة الحالية كما هي أو كعنصر من عناصر الهياكل (لتقلب في هياكل السندويشات ، على سبيل المثال). التركيبة الحالية يمكن تطبيقها كحل بديل لاستخدام العديد من مواد البناء، وخصوصا الخشب. على سبيل المثال يمكن أن تستخدم التركيبة الحالية في تصنيع الألواح العازلة، صفائح التسقيف، جدران الفصل، الأبواب و الأرضيات. وعلاوة على ذلك، يمكن للتركيبية الحالية أن تطبق أيضا في صناعة الأثاث مثل الطاولات، السبورات، المكاتب، ... 10

8. المطالب

1. التركيبية هي مادة جديدة تصنع من 1) مخلفات النباتات مع تفضيل مخلفات نخيل التمر و لاسيما سعف النخيل، 2) و النفايات الصناعية مع تفضيل نفايات البوليسترين لاسيما البوليسترين الممدد. المخلفات النباتية من نخيل التمر و النفايات الصناعية من البوليسترين تشكل، على التوالي، مادة التعزيز ومصفوفة المادة المركبة. 5
2. وفقا للمطلب 1، يمكن الحصول على مخلفات نخيل التمر (ذكر أو أنثى) من نخيل دقلة نور، مش دقلة أو الغرس أو أي نوع آخر من النخيل.
3. وفقا للمطالب 1 و 2، أجزاء النخيل المعنية بكونين مادة التعزيز هي كما يلي: الجذع، أعناق الجريد، سيقان الجريد، السعف، الليف، العرجون، الفاكهة، نواة الفاكهة. كما يمكننا أيضا مزج جزئين أو أكثر من هذه المخلفات و يفضل استعمال الأجزاء المتجددة من النخيل لتشكيل مادة التعزيز. 10
4. وفقا للمطالب من 1 إلى 3، يتم الحصول على مادة التعزيز (مع أو بدون مغلجة كيميائية) بعد خطوات التحضير التالية: التنظيف و/ أو المغلجة، التجفيف، الطحن والغربلة.
5. ووفقا للمطلب 4، تسمح الغربلة بالحصول على عدة أشكال من المخلفات المطحونة. تستخدم هذه الأخيرة على شكل ألياف، جزيئات من الخشب أو خليط من أشكال وأحجام مختلفة لتشكيل مادة التعزيز. 15
6. وفقا للمطلب 1، المصفوفة المستخدمة تكون إما من الراتنج، من مادة لاصقة، من نوع آخر من الروابط أو لمادة ناتجة عن خلط العنصرين التاليين: 1) النفايات الصناعية من البوليسترين مع بفضلي نفايات بوليسترين التغليف لاسيما البوليسترين الممدد 2) مادة مضافة تملك قابلية التفاعل مع البوليسترين مثل الأسيتون مع تفضيل للينزين.
7. وفقا للمطلب 6، يتم الحصول على المصفوفة عن طريق خلط (يدويا أو بواسطة آلة) للبوليسترين مع المادة المضافة. 20
8. وفقا للمطالب من 1 إلى 7، يتم خلط المزيج المكون من المصفوفة و مادة التعزيز (يدويا أو بواسطة آلة) للحصول على توزيع جيد لمادة التعزيز في المصفوفة.
9. وفقا للمطلب 8، يتم الحصول على المادة المركبة عن طريق عمليات التشكيل التقليدية (الصب، البثق، ...) و يفضل أن يكون عن طريق صب الخليط المكون من المصفوفة و مادة التعزيز. 25
10. وفقا للمطلب 9، يتم تصليد الخليط المكون من المصفوفة و مادة التعزيز بلبي وسريلة تصليد (على سبيل المثال في الهواء الطلق أو في الفرن)، وفضل أن يكون مع الضغط.
11. ووفقا للمطالب من 1 إلى 10، مادة التعزيز الخاصة بالتركيبية الحالية يمكن أن تخلط مع مواد تعزيز أخرى (جزيئات الطين، الألياف الزجاجية، ...) لتشكيل مادة مركبة ذات مواد تعزيز هجينة.