

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



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

**Développement et caractérisation de matériaux à base
du bois de palmier dattier adaptés aux applications de
développement durable en Algérie.**

Présentée par :
ALMI Kenza

Soutenue publiquement le 18 / 04 / 2018

Devant le jury composé de :

Mabrouk Hecini	professeur	Président	Université de Biskra
Adel Benchabane	professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Abdelouahed Kriker	professeur	CO-Rapporteur	Université d'Ouargla
Fouad Khaldi	professeur	Examineur	Université de Batna
Mounir Aksas	professeur	Examineur	Université de Batna
Lakhdar Sedira	Maître de conférences (A)	Examineur	Université de Biskra

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur **Mr. Benchabane Adel**, professeur au département de génie mécanique, Université de Biskra, pour son aide et ses orientations durant la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont aussi au co-encadreur de cette thèse ; **Mr. Kriker Abdelouahede**, professeur au département de génie civil, Université d'Ouargla, pour le soutien qu'il m'a apporté.

Je tiens à remercier **Mr. Mabrouk Hecini** Professeur au département de génie mécanique, Université de Biskra qui a accepté de présider ce jury. Mes remerciements vont également aux professeurs **Fouad Khaldi** et **Mounir Aksas** de l'Université de Batna et au professeur **Lakhdar Sedira** de Université de Biskra d'avoir accepté d'examiner ce travail.

J'adresse mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de proche ou de loin à la réussite de ce travail. Ils sont nombreux, mais par crainte d'oublier certains, j'ai préféré ne pas citer de noms.

Et en particulier, je remercie ma petite famille représentée par mon marie **Lakel Said** et mes enfants : **Med Amine**, **Ahmed Rafik**, **Ahmed Wassim** et ma princesse **Aya**. Sans oublier ma grande famille et plus précisément **ma mère**, mon frère **Almi Tarek** et ma sœur **Almi Nassima** .

Résumé

Face aux besoins de plus en plus importants aux panneaux de particules en Algérie et dans le monde entier, il est nécessaire d'exploiter des ressources naturelles disponibles et durables et les utilisées comme alternatives au bois. Il s'agit de la biomasse engendrée par les résidus de palmiers dattiers, la plantation intensive de ces derniers constitue une source de matières premières de plus en plus importante dans le pays. L'abandon de cette biomasse peut avoir un impact négatif sur l'environnement. Le développement de nouveaux matériaux composites à faible coût et à diverses applications à partir de cette ressource naturelle s'inscrit pleinement dans les perspectives de développement durable dans l'Algérie.

L'objectif de ce travail est de contribuer au développement des panneaux de particules en bois de palmier dattier pour une utilisation dans le domaine de bâtiment. À travers cette thèse, nous avons pu valoriser tout type de bois issu de déchet agricoles du palmier dattier par leur utilisation sous forme des particules associés avec deux types de liants disponibles à faible coût (la colle poly acétate de vinyle et la résine polyester insaturé) dans la préparation des panneaux de particules. La thèse comporte deux parties essentielles, le but de la première partie était la détermination des propriétés de tout type de bois rejeté du palmier dattier pour bien les identifier et faciliter leur incorporation dans une matrice. La deuxième partie avait comme but l'analyse de l'influence des paramètres d'élaboration des matériaux composites sur leurs propriétés mécaniques, physiques et thermiques afin d'optimiser la mise en œuvre de ces paramètres et déterminer un procédé de fabrication convenable à la production des panneaux avec des meilleurs propriétés.

Mots clés : les matériaux composites, les renforts naturels, le bois de palmier dattier, les méthodes de caractérisation, panneaux des particules de bois.

Abstract

The increasing demands for inexpensive panel products in Algeria and in the world require the use of further natural available resource as wood alternative. The intensive plantation of date palms provides an increasingly important source of raw material; it may have a negative impact on the environment if it is not appropriately exploited. The development of new composite materials by using date palm residues forms part of the global sustainable development strategy in Algeria.

The objective of this work is to contribute to the development of particleboard based on date palm wood for use in the building sector. Through this thesis, we were able to valorize all types of date palm waste wood by their use as particles with two types of binders available at low cost (polyvinyl acetate glue and the unsaturated polyester resin) in the preparation of the particle boards. The thesis has two essential parts, the purpose of the first part was the characterization of any type of date palm rejected wood in order to identify them and facilitate their incorporation into a matrix. The second part was aimed at analyzing the influence of composite material elaboration parameters on the mechanical, physical and thermal properties of these materials in order to optimize the implementation of these parameters and to determine the suitable protocol which lead to the better panel properties.

Keywords : Composite materials, natural reinforcements, date palm wood, characterization methods, wood particleboards.

المخلص :

لمواجهة الطلب المتزايد للألواح ذات الجزيئات الخشبية في الجزائر و في العالم بأسره, يستدعي استغلال الموارد الطبيعية الدائمة المتوفرة في البلاد و استعمالها كبديل للخشب. يتمثل هذا المورد الطبيعي في الخشب الناتج عن بقايا النخيل. إن زيادة توسع زراعة النخيل أصبح يشكل موردا لمادة أولية مهمة تتزايد باستمرار في البلاد. عدم استغلال هذه المادة بالشكل الأمثل قد يتسبب في أضرار هامة للمحيط. يعتبر إنتاج مواد مركبة جديدة انطلاقا من هذه المادة الأولية مطلقا من ضمن تطلعات التنمية المستدامة في الجزائر.

هدف هذا العمل هو المشاركة في تحقيق هذه التطلعات و ذلك بمحاولة إعداد ألواح ذات الجزيئات الخشبية من خشب بقايا النخيل توجه ضمن تطبيقات البناء و التأثيث. من خلال هذا العمل استطعنا تثمين كل أنواع خشب بقايا النخيل و ذلك باستخدام حبيباته مع نوعين من اللاصق متوفرة بأثمان معقولة (غراء البولي اسيتات الفينيلي و الراتنج بولي استر الغير مشبع) لإعداد ألواح حبيبية خشبية. المذكرة تحتوي على قسمين أساسيين, هدف القسم الأول هو تعيين خصائص كل أنواع الخشب الناتج عن بقايا النخيل و ذلك للتعريف به وتسهيل استخدامه كمدعم للمواد المركبة, أما القسم الثاني فيهدف لدراسة تأثير العوامل الفاعلة في إعداد الألواح ذات الجزيئات الخشبية على الخصائص الميكانيكية, الفيزيائية, والحرارية لكي يتسنى لنا الاختيار الأمثل لهذه العوامل و تعيين الطريقة المثلى المناسبة لإعداد ألواح خشبية من جزيئات خشب بقايا النخيل ذات خصائص ممتازة.

الكلمات المفتاحية : المواد المركبة، المدعمات الطبيعية، خشب النخيل، طرق تعيين الخصائص، الألواح المصنوعة من جزيئات الخشب.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	4

Chapitre I : Matériaux Composites

1. Définition d'un matériau composite.....	5
2. La matrice.....	5
2.1. Les composites à matrice métallique.....	6
2.2. Les composites à matrice céramique.....	6
2.3. Les composites à matrice organique.....	6
2.3.1. Les résines Thermoplastiques.....	7
2.3.2. Les résines thermodurcissables.....	8
2.3.3. La différence entre les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables.....	9
3. Le renfort.....	10
3.1. Les composites fibreux	10
3.2. Les fibres végétales	11
3.2.1. Classification des fibres végétales.....	11
3.2.2. Caractéristiques des fibres végétales.....	12
3.2.2.1. Morphologie de la fibre végétale.....	12
3.2.2.2. La composition chimique des fibres végétales.....	13
3.2.2.2.1. Cellulose.....	13
3.2.2.2.2. L'hémicellulose.....	15
3.2.2.2.3. La lignine.....	15
3.2.2.2.4. Les pectines.....	16
3.2.2.2.5. Extractifs.....	17

Table des matières

3.2.2.2.6. Les cires.....	17
3.2.2.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales.....	18
3.2.2.4. Caractéristiques thermiques et acoustiques des fibres végétales.....	19
4. Les composites fibres végétales – polymères.....	19
5. Les panneaux de bois.....	23
5.1. Classifications des panneaux de bois suivant la taille de renfort.....	23
5.1.1. Les panneaux de particules.....	23
5.1.2. Panneaux de copeaux ou d'agglomérés.....	24
5.1.3. Les panneaux de fibres.....	24
5.1.4. Les panneaux MDF (Medium Density Fiberboard).....	25
5.1.5. Panneau à lamelles orientées OSB (Oriented Strand Board)	25
5.1.6. Les contreplaqués.....	26
5.2. Procédés de fabrication des panneaux de particules	26
5.2.1. La préparation du matériel ligneux.....	27
5.2.2. L'imprégnation du matériel fibreux avec la résine ou encollage.....	27
5.2.3. La mise en forme ou formage.....	27
5.2.4. Le thermopressage.....	28
5.2.5. Le thermoformage.....	28
5.2.6. Le moulage.....	28
5.2.7. La finition.....	28
5.3. Les additifs dans les panneaux bois.....	29
5.4. Importance des panneaux de bois en Algérie	29
6. Synthèse bibliographique sur les panneaux à base des fibres végétales.....	29
7. Conclusion.....	33
Références.....	35

Chapitre II : Bois du palmier dattier

1. Histoire et origine du palmier.....	42
2. Répartition géographique du palmier dattier.....	43
2.1. Dans le monde.....	43
2.2. En Algérie.....	44
2.3. Dans la wilaya de Biskra.....	46

Table des matières

3. Palmier dattier du point de vu botanique.....	46
4. Cycle de vie des palmiers dattiers	46
5. Description morphologique du palmier dattier.....	48
5.1. Les Racines.....	48
5.2. Le Tronc.....	49
5.3. Fibrillium.....	49
5.4. La Couronne	50
5.5. La Palme.....	50
5.6. Le Pétiole	51
5.7. Le Rachis.....	52
5.8. Les Epines	52
5.9. Les Folioles	53
5.10 Les Spathes	53
5.11 Les Grappes	54
5.12 Les Pédicelles	54
6. Estimations mondiales et Algériennes du tonnage de bois de palmier dattiers	55
7. Propriétés du bois de palmier dattier.....	57
7.1. Propriétés Morphologiques.....	57
7.2. Propriétés chimiques.....	59
7.3. Propriétés mécaniques.....	60
7.4. Propriétés physiques.....	63
7.5. Propriétés thermiques et diélectriques.....	64
7.6. Le comportement thermique du bois de palmier dattier.....	65
8. L'incorporation du bois de palmier dattier dans une matrice polymère.....	66
8.1. L'incorporation dans des matrices polymères thermoplastiques.....	66
8.2. L'incorporation dans des matrices polymères thermodurcissables.....	67
8.3. L'incorporation dans d'autres polymères	71
9. Notre contribution.....	72
10. Conclusion.....	73
Référence.....	75

Chapitre III : Matériaux et Méthodes Expérimentales

1. Matériaux.....	80
-------------------	----

Table des matières

1.1. Bois de palmier dattier.....	80
1.2. Liants polymères.....	81
1.2.1. Résine polyester insaturée.....	81
1.2.2. Colle poly acétate de vinyle.....	81
2. Protocoles expérimentaux et appareils de caractérisation du bois de palmier dattier.....	82
2.1. Préparation des échantillons de bois.....	83
2.2. Caractérisation du bois de palmier dattier.....	84
2.2.1. Caractérisation morphologique	84
2.2.2. Caractérisation chimique.....	84
2.2.2.1. Analyse organique.....	84
2.2.2.1.1. Taux de cendres.....	84
2.2.2.1.2. Extraction à solvant neutre (éthanol- toluène).....	84
2.2.2.1.3. Extraction à l'eau chaude.....	85
2.2.2.1.4. Taux de lignine (méthode de Klason)	85
2.2.2.1.5. Extraction d'holocellulose	86
2.2.2.1.5.1. Extraction à la soude	86
2.2.2.1.5.2. Extraction au chlorite de sodium	86
2.2.2.1.6. Extraction de la cellulose	87
2.2.2.1.7. Extraction des hémicelluloses	87
2.2.2.1.8. Extraction de la cellulose brute.....	88
2.2.2.1.8.1. Attaque acide.....	88
2.2.2.1.8.2. Attaque alcaline.....	88
2.2.2.2. Analyse minérale	88
2.2.2.2.1. Préparation de l'extrait de cendre.....	90
2.2.3. Caractérisation physique	92
2.2.3.1. La densité apparente	92
2.2.3.2. La densité absolue	94
2.2.3.3. Le taux d'absorption.....	95
2.2.3.4. Le taux de porosité.....	95
2.2.4. Caractérisation mécanique.....	95
2.2.5. Analyse thermique	97
2.2.5.1. L'analyse thermogravimétrique (ATG).....	97
2.2.5.2. L'analyse thermique différentielle (ATD).....	97

Table des matières

3. Protocoles expérimentaux et appareils de caractérisation du bois de palmier dattier.....	98
3.1. Mise en forme du matériau composite.....	98
3.2. Caractérisation du matériau composite	98
3.2.1. Caractérisation physique.....	98
3.2.1.1. Masse volumique	98
3.2.1.2. Le taux du gonflement en épaisseur	98
3.2.2. Caractérisation mécanique.....	99
3.2.3. Caractérisation thermique.....	100
Références.....	102

Chapitre IV : Caractéristiques du bois de palmier dattier

1. Micro structure	103
2. Composition chimique.....	105
2.1. Composition organique.....	106
2.2. Composition minérale.....	108
3. Propriétés physiques.....	109
4. Propriétés mécaniques.....	110
5. Comportement thermique.....	113
Conclusion.....	117
Références.....	119

Chapitre V : Mise en forme et caractérisation du matériau composite à base des particules de bois de palmier dattier

1. Le renfort lignocellulosique.....	123
2. Préparation des particules de bois de palmier dattier.....	123
3. Les matrices polymères.....	125
3.1. La résine de polyester insaturé (UP)	125
3.2. La colle poly acétate de vinyle (PVA).....	125
4. La mise en forme du matériau composite.....	126
4.1. Préparation des plaques de particules de bois de palmier sans liant.....	126
4.2. Elaboration des composites à base des particules de bois et de liant.....	127
5. Description et codification des plaques composites préparées.....	128
5.1. Eprouvettes à base des particules de bois sans liant.....	129

Table des matières

5.2. Eprouvettes particules de bois/acétate de vinyle.....	130
5.3. Eprouvettes particules de bois/polyester insaturée.....	131
6. Caractérisation des plaques composites de particules de bois de palmier dattier.....	132
6.1. Caractérisation physique.....	132
6.2. Caractérisation mécanique.....	133
6.3. Caractérisation thermique.....	133
7. Résultats et discussion.....	133
7.1. Etude de l'effet des différents facteurs sur les propriétés physiques du plaques composite.....	135
7.1.1. L'effet de la température	135
7.1.2. L'effet du temps de pressage.....	138
7.1.3. L'effet du taux de liant.....	140
7.1.4. L'effet de la taille des particules de bois de palmier dattier.....	143
7.2. Etude de l'effet des différents facteurs sur les propriétés mécaniques des matériaux composites élaborés.....	145
7.2.1. L'effet de la température	145
7.2.2. L'effet du temps de thermopressage.....	147
7.2.3. L'effet du taux de liant.....	149
7.2.4. L'effet de taille des particules de bois de palmier dattier.....	150
7.2.5. La corrélation module d'élasticité en flexion / densité.....	155
7.3. Etude de l'effet des différents facteurs sur les propriétés thermiques des plaques composites élaborées.....	157
7.3.1. Effet de la température.....	158
7.3.2. Effet de taux de liant.....	160
7.3.3. Effet de taille de particules.....	161
7.3.4. La corrélation conductivité thermique/densité.....	162
8. procédé d'élaboration des plaques composites à base des particules de bois de palmier dattier.....	165
9. Conclusion.....	167
Référence.....	170
Conclusion générale.....	174

Liste des figures

Chapitre I : Matériaux Composites

Figure 1.1: Structures moléculaires : (a) d'un polymère thermoplastique, (b) d'un polymère thermodurcissable.....	9
Figure 1.2 : Structure chimique de la cellulose.....	13
Figure 1.3 : Molécule de cellulose (n répétitions du motif cellobiose).....	14
Figure 1.4 : Représentation des micro-fibrilles constituant les fibres de cellulose.....	14
Figure 1.5 : Formules chimiques des principaux monosaccharides des hémicelluloses.....	15
Figure 1.6 : Formules chimiques des principaux constituants de la lignine.....	16
Figure 1.7 : Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique.....	16
Figure 1.8 : Structure tridimensionnelle de la paroi primaire : (a) schéma tridimensionnelle, (b) photo MEB de la paroi végétale (biologie et multimédia).....	17
Figure 1.9 : panneaux de bois : (a) panneaux de particules, (b) panneaux de copeaux, (c) panneaux MDF, (d) panneaux OSB, (e) contreplaqué.....	26

Chapitre II : Bois du palmier dattier

Figure 2.1 : Répartition géographique du palmier dattier.....	43
Figure 2.2 : Aire de distribution du palmier dattier.....	44
Figure 2.3 : Localisation des oasis au Sahara algérien.....	45
Figure 2.4 : Cycle de vie du palmier dattier.....	48
Figure 2.5 : Les quatre zones des racines de palmier.....	49
Figure 2.6 : Le Fibrillum et son emplacement dans le palmier.....	50
Figure 2.7 : La couronne du palmier.....	50
Figure 2.8 : Schéma d'une palme.....	51
Figure 2.9 : Des pétioles secs.....	51
Figure 2.10 : Le Rachis	52
Figure 2.11 : Les Epines.....	52
Figure 2.12 : Les Folioles.....	53
Figure 2.13 : Les Spathes.....	54
Figure 2.14 : Les Grappes.....	54
Figure 2.15 : Les Pédicelles rejetées après la récolte des dattes.....	55
Figure 2.16 : Micrographie d'une coupe transversale du bois de différentes parties de palmier dattier : (a) foliole, (b) rachis, (c) fibrillum, (d) pétiole.....	58

Liste des figures

Figure 2.17 : Comparaison des paramètres structuraux des fibres de palmier dattier.....	59
Figure 2.18 : la valeur du module de Young des fibres de palmier dattier en fonction du diamètre de fibre.....	62
Figure 2.19 : L'effet du traitement par le NaOH sur (a) La résistance à la traction, (b) Le module de Young du bois de palmier dattier.....	62
Figure 2.20 : La conductivité thermique de différentes parties de palmier dattier.....	65

Chapitre III : Matériaux et Méthodes Expérimentales

Figure 3.1 : Les différents types de bois renouvelable du palmier dattier.....	80
Figure 3.2 : Les différents types de bois constituant le déchet du palmier dattier.....	80
Figure 3.3 : Broyat du bois de rachis.....	83
Figure 3.4 : Fibres extraites de bois de : (a) grappes, (b) fibrillum.....	83
Figure 3.5 : appareil de soxhlet pour l'extraction.....	85
Figure 3.6 : Pâte holocellulose du bois de rachis.....	87
Figure 3.7 : Appareil d'absorption atomique.....	89
Figure 3.8 : Spectrophotomètre à flamme.....	89
Figure 3.9 : Spectrophotomètre UV / Visible.....	89
Figure 3.10 : Principe de fonctionnement de spectrophotomètre à flamme.....	91
Figure 3.11 : Les solutions d'étalonnage.....	91
Figure 3.12 : Le principe d'un spectrophotomètre à double faisceau.....	92
Figure 3.13 : Immersion de l'échantillon dans la paraffine.....	93
Figure 3.14 : mesure du volume apparent.....	93
Figure 3.15 : le broyat fin de bois de Pétiole.....	94
Figure 3.16 : Principe de mesurer la densité absolue.....	95
Figure 3.17 : Machine de traction électromécanique universelle WDW.....	96
Figure 3.18 : Technique pour éviter le glissement de la fibre végétale.....	97
Figure 3.19: l'appareil ATG LINSEIS 2400.....	98
Figure 3.20 : Principe de l'appareillage de flexion.....	99
Figure 3.21 : Machine d'essais mécanique de flexion trois points.....	100
Figure 3.22 : l'appareil Hot Disk-Thermoconcept de caractérisation thermique.....	101
Figure 3.23 : Sonde en kapton.....	101

Chapitre IV : Caractéristiques du bois de palmier dattier

- Figure 4.1** : Observation sous MEB de bois de palmier dattier : (a) Fibrillium (b) Spathe (c) Rachis (d) Pétiole (e) Folioles (f) Grappe (j) Pédicelles (h) Epines, en utilisant deux échelles d'observation : 100 μm , 50 μm104
- Figure 4.2** : Coupe transversale du bois de pétiole.....105
- Figure 4.3** : Composition organique des différentes parties de bois de palmier dattier comparée à celle d'autres fibres naturelles.....107
- Figure 4.4** : Composition minérale des différents types de bois de palmier.....109
- Figure 4.5** : Comparaison des propriétés mécaniques du bois de palmier avec d'autres fibres végétales.....112
- Figure 4.6** : Module de Young spécifique du bois de palmier dattier comparé à celui de quelques fibres végétales.....112
- Figure 4.7** : L'analyse thermique du bois de palmier dattier: a) Pétiole, b) Epines, c) Pédicelles, d) Spathe, e) Fibrillium, f) Folioles, g) Rachis, h) Grappe.....115
- Figure 4.8** : Comparaison entre les courbes Thermogravimétriques du bois de palmier dattier: (DPP) Pétiole, (DPT) Epines, (DPD) Pédicelles, (DPS) Spathe, (DPF) Fibrillium, (DPL) Folioles, (DPR) Rachis, (DPB) Grappes.....116

Chapitre V : Mise en forme et caractérisation du matériau composite à base des particules de bois de palmier dattier

- Figure 5.1** : La distribution granulométrique des particules de bois : Taille 1 (a), Taille 2 (b), Taille 3 (c), Taille 4 (d).....124
- Figure 5.2** : Moule mis en œuvre pour la procédure de pressage.....127
- Figure 5.3** : Plaques obtenues après démoulage.....128
- Figure 5.4** : Echantillons préparés pour la caractérisation : a) mécanique, b) physique et thermique.....128
- Figure 5.5** : Codification des échantillons préparés.....129
- Figure 5.6** : Essais préliminaires : a) plaque en début de délamination (Taux de colle incorporé est 40%), b) plaque éclatée (Taux de colle incorporé est 50%).....130
- Figure 5.7** : Le gonflement d'épaisseur des plaques particule de bois/UP après le démoulage.....132
- Figure 5.8** : l'effet de la température de thermopressage sur la densité des plaques composites $G_1L_{30\%}T_2D_{300}$137

Liste des figures

Figure 5.9 : Dégradation de la résine UP dans une température supérieure à 180°C.....	137
Figure 5.10 : L'effet de la température sur le taux de gonflement des plaques élaborées....	138
Figure 5.11 : Influence du temps de pressage sur la densité des plaques $G_1C_{30}T_{80,120}D_K$...	139
Figure 5.12 : Influence du temps de pressage sur la densité des plaques $G_{1,4}C_{10,30}T_{80}D_K$...	139
Figure 5.13 : L'effet du temps de pressage sur le taux de gonflement des plaques composites.....	140
Figure 5.14 : Influence de taux de liant incorporé sur la densité des plaques composites $G_1LyT_{Am,80}D_{40}$	141
Figure 5.15 : L'effet du taux de liant sur le taux de gonflement des matériaux composites élaborés.....	142
Figure 5.16 : Influence de la taille des particules de bois de palmier dattier sur la densité des plaques composites $G_{XL10\%,30\%}T_{80}D_{40}$	144
Figure 5.17 : L'effet de la granulométrie sur le taux de gonflement des matériaux composites élaborés.....	145
Figure 5.18 : Le taux de gonflement en épaisseur : a) Résine UP (granulométrie 3), b) colle PVA (granulométrie 2), c) colle PVA (granulométrie 3).....	145
Figure 5.19 : L'évolution du module d'élasticité en flexion (MOE) des plaques composites élaborées en fonction de la température de thermopressage.....	147
Figure 5.20 : L'influence du temps de pressage sur le module d'élasticité en flexion (MOE) des plaques composites $G_{1,4}C_{10,30}T_{80}DK$	148
Figure 5.21 : L'effet du temps de pressage sur le module d'élasticité en flexion (MOE) des plaques composites $G_1C_{30}T_{120}D_K$	149
Figure 5.22 : L'effet du taux de liant incorporé sur le module d'élasticité en flexion (MOE) des plaques composites $G_1LyT_{Am,80}D_{40}$	150
Figure 5.23 : L'effet de la granulométrie sur le module d'élasticité en flexion (MOE) des plaques composites $G_{XL10\%,30\%}T_{80}D_{40}$	152
Figure 5.24 : L'effet de la granulométrie sur le module de rupture en flexion (MOR) des plaques composites $G_{XL10\%,30\%}T_{80}D_{40}$	153
Figure 5.25 : L'effet de la granulométrie sur le module d'élasticité en flexion (MOE) des plaques composites $G_{XL10\%,30\%}T_{80}D_{40}$	153
Figure 5.26 : L'évolution de MOE et MOR en fonction de la densité à différents taux du liant	156
Figure 5.27 : L'évolution de MOE et MOR en fonction de la densité à différentes granulométries et différents liants	157

Liste des figures

- Figure 5.28** : L'effet de la température de thermopressage sur la conductivité thermique des plaques de particules G₁L₃₀T_ZD₄₀195
- Figure 5.29** : L'effet de la température de thermopressage sur la diffusivité thermique des plaques de particules G₁L₃₀T_ZD₄₀.....195
- Figure 5.30** : L'effet du taux de liant sur la conductivité thermique des matériaux composites élaborés.....160
- Figure 5.31** : L'effet du taux de liant sur la diffusivité thermique des panneaux élaborés...161
- Figure 5.32** : L'effet de la taille des particules de bois sur la conductivité thermique des panneaux de particules élaborés.....162
- Figure 5.33** : L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la densité à des différents taux de liant.....163
- Figure 5.34** : L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la densité à des granulométries différentes : (a) les composites PVA, (b) les composites UP...164
- Figure 5.35** : Schéma du procédé d'élaboration des panneaux de particules de bois de palmier dattier.....166

Introduction générale

La forte dépendance aux hydrocarbures, comme une principale source de revenus, constitue une véritable menace pour l'économie d'un pays. Cette menace réside soit dans la baisse des prix du brut soit dans l'épuisement des réserves. La plupart des pays de monde vit de nos jours une crise économique et financière suite à la baisse régulière du prix du pétrole, l'Algérie est l'une de ces pays étant donné que ses exportations d'hydrocarbures représentent 94,05% de ses ventes extérieures (d'après le premier ministre). Bien que l'économie du pays ait subi des changements de stratégie au cours des dix dernières années en vue de s'adapter à une telle situation, les tentatives de diversification restent encore restreintes. Ce qui explique l'importation de tous les produits industriels et de consommation. La notable et régulière baisse des prix de pétrole, durant les sept premiers mois de 2015, a fait subir le pays une perte d'environ 42,08% des revenus provenant des exportations d'hydrocarbures, essentiellement pétrolières, ce chiffre est susceptible d'augmenter dans les prochains mois en mettant le pays dans une situation critique. Cette position actuelle aurait pu être consolidée si l'état a réalisé des progrès dans les projets à des objectifs de développement durable en exploitant et développant les ressources utiles et renouvelables qu'il possède afin de diversifier l'économie, produire la bioénergie et réduire la dépendance à l'égard des hydrocarbures.

Le déchet des palmiers dattiers est une biomasse inépuisable disponible en Algérie et partout dans le monde où le palmier peut être cultivé. C'est une source organique naturelle qui peut être valorisée, d'autant plus que les autres ressources renouvelables ne sont exploitées qu'en partie dans le pays. Depuis ces dix dernières années et même bien avant, le secteur des palmiers dattiers a connu une progression significative grâce à l'application du programme national de développement Agricole PNDA. Actuellement l'Algérie dispose d'un potentiel énorme de palmiers dattiers, on compte plus de 18 millions de palmiers dattiers soit plus de 18% du patrimoine phoénicicol mondiale selon les dernières statistiques de Ministère de l'Agriculture (DSASI). Ce potentiel peut générer une quantité énorme et croissante de déchet lors de la récolte des dattes et de l'entretien annuelle des palmiers.

L'importance de cette biomasse organique réside dans son abondance et son faible coût. Cependant, l'exploitation de ce potentiel agricole en vue d'une valorisation pour des raisons économiques et écologique n'a pas bénéficié d'un grand intérêt à part dans quelques

Introduction générale

fabrications artisanales très rares des objets modestes non développés. Aujourd'hui, en chaque palmeraie, se trouve des regroupements des résidus des palmiers dattiers qui sont soit brûlés soit laissés s'accumuler en plein air, ce qui cause des sérieux problèmes environnementaux.

Le développement des matériaux composites renforcés par ce déchet agricole peut non seulement résorber son effet polluant pour la protection de l'environnement mais surtout avoir des intérêts économiques qui pourraient contribuer au développement durable du pays.

Le palmier dattier produit plusieurs types de bois il y en a qui sont disponibles d'une manière renouvelable durant sa vie tels que le bois de palme et de grappe, et d'autre qui ne sont disponible qu'après la mort du palmier tels que le bois du tronc et des racines. Chaque type de bois se prête à des utilisations variées selon ses propriétés mécaniques et physiques. La comparaison entre les différents types de bois de palmier dattier qu'appartiennent au même milieu nécessite la connaissance parfaite de leurs propriétés. Or malgré les différentes études effectuées en faveur de caractériser ce type de bois, la quantité d'informations apportées dans la littérature reste modeste en ce propos. Aucun travail n'est trouvé dans la littérature qui s'intéresse à l'étude caractéristique et à la mise en valeur de tout type de la partie renouvelable du bois de palmier dattier provenant du même environnement.

Dans ce contexte, nous nous proposons dans ce travail d'étudier la faisabilité d'obtenir un matériau de résistance mécanique et /ou thermique suffisante en utilisant des particules de bois issues du déchet de palmier dattier et un liant commercial disponible à faible coût. Nous avons tracé deux objectifs principaux pour cette étude. Le premier objectif vise la valorisation industrielle de toutes sortes de bois constituant le déchet de palmier dattier. Ainsi, nous pouvons d'une part éviter l'opération de triage qui est une perte de temps et d'argent, et d'autre part augmenter la quantité de bois utilisée comme matériau de renfort pour répondre en une partie à la demande industrielle croissant du bois en Algérie. Notre deuxième objectif est d'élaborer un matériau à diverse applications, notamment dans le secteur de bâtiment, à base des matériaux disponibles en abondance dans notre pays qui ont relativement faible coût.

Pour répondre à notre proposition et atteindre les objectifs scientifiques tracés dans cette thèse, nous avons adapté l'approche de travail qui consiste à caractériser les différents types de bois obtenus des déchets du palmier dattier et apporter les informations nécessaires à propos de leurs propriétés pour mieux adapter leur utilisation comme un matériau de renfort. Ensuite, étudier l'incorporation d'une variété de particules de bois dont nous avons déterminé les propriétés, dans une matrice polymère afin d'élaborer un matériau de structure composite

Introduction générale

ayant une bonne aptitude à la mise en forme et de bonnes performances. Cette approche inclut également la caractérisation des échantillons préparés dans différentes conditions pour évaluer l'influence des conditions d'élaboration sur les propriétés des matériaux élaborés et par la suite optimiser leur emploi.

Le manuscrit de thèse se décompose en deux parties :

La première partie est un bilan bibliographique résumant les notions essentielles ainsi que les travaux antérieurs relatives à notre étude. Elle se divise en deux chapitres. Dans le premier chapitre, nous parlerons du matériau composite où nous rappellerons sa définition, sa composition et ses différents types. Nous allons cibler et porter notre attention sur le type de composite qui nous intéresse dans cette étude, qui est le matériau composite à base d'une matrice polymère et renfort végétale. Nous terminerons ce chapitre par l'exposition des travaux réalisés sur ce type de matériau résultats essentiels apportés par la littérature concernant ce type de matériau et en particulier sur les panneaux ligno-cellulosiques. Le deuxième chapitre concerne le renfort végétal choisi dans notre étude qui est le bois de palmier dattier. Ce chapitre rapporte en premier lieu les informations nécessaires permettant d'identifier le palmier dattier et son déchet de bois, à savoir les conditions environnementales de culture, la situation géographique et la description botanique et morphologique du palmier. En second lieu il présente une synthèse bibliographique sur, tout d'abord, les principaux travaux réalisés pour déterminer les propriétés du bois de palmiers dattiers, puis sur les travaux qui ont incorporé des fibres ou des particules issues de ce type de bois dans des matrices polymères tout en concentrant sur les panneaux de particules.

La deuxième partie de ce manuscrit présente notre contribution expérimentale à la caractérisation de tout type de bois de déchet de palmier et à l'élaboration des plaques composite à partir des particules de ce bois et d'un polymère servant comme liant. Cette partie est illustrée par les chapitres trois, quatre, et cinq de la thèse. Dans le chapitre trois, les appareils et les différentes méthodes expérimentales de caractérisation seront exposés. Nous commençons d'abord par les protocoles de caractérisations morphologique, physicochimique, thermique et mécanique de la matière première utilisée. Puis par la présentation de la mise au point d'un procédé d'élaboration des plaques à base d'une variété des particules de bois de déchet de palmier, et en fin par les protocoles de caractérisation des échantillons préparés. Les chapitres quatre et cinq seront consacrés aux résultats obtenues et à leur discussion.

Introduction générale

Nous terminons notre manuscrit par une conclusion générale où nous synthétisons les principaux résultats obtenus dans les chapitres quatre et cinq, et nous ouvrons également quelques perspectives.

Chapitre I : Matériaux Composites

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans l'industrie. Aujourd'hui, ils occupent une place majeure parmi les matériaux car ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreux domaines tels que le domaine de transport, de sports et de loisirs, de bâtiment, ou encore de médecine. En chaque domaine d'application, les performances remarquables des matériaux composites sont à l'origine de solutions technologiques innovantes. [1]

1. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de plusieurs matériaux non miscibles de natures différentes, et dont les qualités complémentaires permettent des performances supérieures à celles de chacun de ses composants. Un matériau composite est alors un matériau généralement formé de deux composés principaux :

- La matrice, qui assure la liaison de l'ensemble, répartit les efforts.
- Le renfort, qui constitue l'ossature de la pièce, et supporte l'essentiel des contraintes

2. La matrice

La matrice est un liant qui maintient en place la dispersion des éléments de renfort, les protège physiquement et chimiquement et assure la liaison mécanique entre eux et, en plus, elle conditionne le choix du procédé de mise en forme. Pour ces raisons, les composites peuvent être classés suivant la nature de leurs matrices en trois groupes:

- Les composites à matrice métallique
- Les composites à matrice céramique
- Les composites à matrice organique

Chacun de ces groupes emploie différents types de renforts et possède des propriétés différentes.

2.1. Les composites à matrice métallique

Les composites à matrice métallique ont été élaborés dans le but d'améliorer les qualités des métaux en ce qui concerne la légèreté et les bonnes caractéristiques mécaniques propres aux structures composites. Plusieurs matériaux composites tels que ; l'Aluminium et ses alliages, Nickel, Titane, présentent une bonne conductibilité électrique et thermique, une bonne tenue à des températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques mais le coût de leur fabrication est très élevé. Ils sont réservés à des applications relativement exigeantes, dans divers domaines.

2.2. Les composites à matrice céramique

Ils sont employés dans les applications à très haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage. Ils présentent une très haute résistance à la température et bonne stabilité chimique mais ils sont moins répandus par rapport aux autres composites en raison du coût élevé [2].

2.3. Les composites à matrice organique

Les composites à matrice organique sont les plus répandus et constituent la partie la plus importante aujourd'hui à l'échelle industrielle grâce au coût suffisamment réduit, cette famille regroupe des gammes de prix et de performances très étendues dont on distingue généralement deux types [2]:

- Les composites à grande diffusion, peu coûteux et représentant près de 95% des composites à matrice organique fabriqués, utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées.
- Les composites à haute performance, plus coûteux mais présentant des qualités mécaniques supérieures, notamment employés dans l'aéronautique, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle.

Les composites à matrice organique sont généralement constitués d'une matrice de résine et d'un renfort de fibres. Les deux types de résines qui sont, actuellement, utilisées présentent des propriétés profondément différentes [2, 3]:

2.3.1. Les résines thermoplastiques

Les 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 (La transformation est réversible) [4] car, contrairement aux résines thermodurcissables, quasiment aucune modification chimique ne vient altérer les thermoplastiques. Il s'agit plutôt d'une modification de l'agencement intermoléculaire. Cette aptitude confère aux déchets thermoplastiques des propriétés de recyclage très intéressantes [5].

Les principales familles de thermoplastiques sont les polyoléfines (les polyéthylènes, les polypropylènes), les plastiques à base de polychlorure de vinyle, les acryliques et les polystyrènes. Certains polymères cellulosiques ayant fait l'objet de modification chimique se retrouvent parmi les thermoplastiques comme les acétates de cellulose. La chaîne élémentaire de l'essentiel des thermoplastiques vinyliques est constituée d'un axe carbone-carbone (polymère vinylique) dont les radicaux changent en fonction des différentes familles. Cette structure conduit à différentes propriétés notamment en ce qui concerne le polypropylène. Ce dernier est, de par sa composition et sa structure, chimiquement inerte, résistant à l'humidité (hydrophobe) et à la putréfaction. Il possède aussi une bonne résistance à la fissuration ou aux chocs. Sa plage de thermoformage, située entre 110-130°C [5, 6], est assez élevée pour une polyoléfine mais elle convient toutefois aux fibres cellulosiques qui se dégradent réellement à partir d'une température supérieure à 200°C [5]. Le tableau 1 représente quelques propriétés des polymères thermoplastiques.

Tableau 1.1 : Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées [5].

Polymère	T _g (°C)	T _f (°C)	Thermoformage (°C)	Densité	σ _t MPa	Module Elastique GPa	α _d à 20°C
PP	5	165	150-195	0.92	30	1.2	9
HDPE	-100	134	130-205	0.95	28	1.1	3.4-4.0
PVC	75-105	160-220	100-180	1.39	58	2.9	1.6-7.7
PS	90-100	-	130-155	1.05	55	3.2	1.8-2.4
PET	70	255-265	120-170	1.30	47	2.6	-
ABS	90-120	-	130-200	1.05	50	2.5	-
PMMA	100	-	150-190	1.18	72-80	3.3	1.6-2.8

PP : polypropylène, HDPE : polyéthylène à haute densité, PVC : polychlorure de vinyle, PS : polystyrène, PET : polyéthylène, ABS : acrylonitrile butadiène styrène, PMMA : poly méthacrylate de méthyle.

2.3.2. Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables représentent la grande majorité des résines adhésives. Elles sont largement utilisées pour le collage du bois ou dans les composites à base de bois [5]. La réticulation chimique permet la formation d'un réseau tridimensionnel amorphe irréversible par multiplication et fusion d'agrégats. L'essentiel des colles employées sont l'urée formaldéhyde (UF), les résines phénoliques (phénol formaldéhyde : PF) et les colles isocyanates. La nature de la distribution des résines thermodurcissables sur les fibres revêt différents aspects selon le type de colle utilisée et selon la nature des matériaux encollés. Les liens créés par l'UF montrent une tendance à la formation de zones de concentration de résine i.e. une distribution de petits paquets de colle dispersés sur les fibres (moins de 5% de recouvrement selon [7]). La résine PF se distribuerait de façon beaucoup plus uniforme sur des fibres similaires [8]. Parmi les autres résines les plus courantes, on peut citer les résines époxy (ou époxydes) [9], très employées dans les applications « hautes performances » et la résine polyester [10, 11], peu coûteuses et souvent utilisées dans les applications « grande diffusion ». Les propriétés mécaniques des principaux types de matrices thermodurcissables sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1.2 : Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables non renforcées [1, 5].

Résine	La densité ρ (kg /m ³)	Module d'Elasticité E (Gpa)	Résistance à la Traction σ (Mpa)	Module d'allongement Rupture (%)	ν_{poisson}	T_{max} (°C)	α_d (10 ⁻⁵ K ⁻¹)
UF	1.2-1.5	6-10	40-80	-	-	140	0.7-1.1
PF	1.1-1.3	3-4	35-60	-	0.36	80-300	-
Polyester	1.2	2.9- 4	50- 80	2- 3	0.4	60-200	0.4-1.6
Epoxyde	1.1- 1.4	3-4.5	50 -130	3- 8	0.4	90-200	0.3-1.6
Phénolique	1.3	3.8- 7	50-70	1 -1.5	0.4	120-200	1.0-2.3
Uréthane	1.1	0.7-7	30	-	-	100	-
Vinylester	1.1	3.4 -3.5	70 -85	2-5	-	100-140	-
Polyamide	1.1 -1.5	4- 20	30-40	<1	-	250-300	-

T_{max} : température maximale d'utilisation, α_d : coefficient de dilatation thermique

2.3.3. La différence entre les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables

La différence essentielle entre ces deux types de polymères est la nature des phénomènes physiques assurant leur cohésion. Les thermoplastiques sont constitués de longues molécules linéaires, maintenues entre elles par des liaisons physiques de faible énergie (liaisons hydrogène ou de Van der Waals, Figure 1.1); ces liaisons se cassent lorsque l'on chauffe le polymère et se rétablissent lorsqu'on le refroidit, de façon réversible. A l'inverse, les thermodurcissables sont des molécules en forme de réseaux tridimensionnels, maintenus par des liaisons chimiques de forte énergie (liaisons covalentes, Figure 1.1.b) établies de manière irréversible lors de la polymérisation.

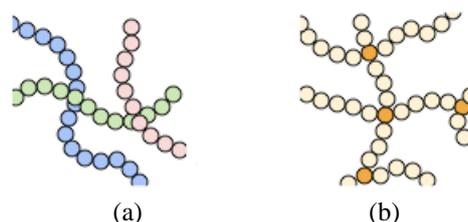


Figure 1.1: Structures moléculaires [2] (a) d'un polymère thermoplastique, (b) d'un polymère thermodurcissable.

Cette différence fondamentale est à l'origine de propriétés bien distinctes. Voici quelques différences [2] :

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

De manière générale, les matrices thermodurcissables sont plus fréquemment employées que les thermoplastiques en raison de leur plus grande facilité de mise en forme (il est plus facile d'imprégner des fibres avec un liquide qu'avec des granulés ramollis, et les températures à utiliser sont souvent plus raisonnables).

3. Le renfort

Le renfort est un matériau permettant d'améliorer les propriétés de la matrice dans le but d'assurer des meilleures propriétés du matériau composite à élaborer. Les composites sont souvent désignés selon la géométrie de renfort. Ainsi, il existe des composites à particules, des composites sandwichs, et des composites fibreux.

3.1. Les composites fibreux

Les renforts constitués de fibres servent au transfert des charges mécaniques, les fibres sont essentiellement courtes (discontinues) ou longues (continues). Elles peuvent se présenter sous forme linéique, surfacique, et multidirectionnelle [12]. Il existe deux catégories de fibres qui peuvent être utilisées comme renforcement [13] :

- La catégorie des fibres inorganiques : les fibres les plus courantes de cette catégorie sont les fibres d'aramides (kevlar) et les fibres de polyester.

- La catégorie des fibres organiques : cette catégorie englobe les fibres minérales (comme les fibres de verres, de carbones, de bores, et de céramiques); les fibres métalliques (comme les fibres d'acier et de fonte); les fibres naturelles qui se divisent en fibres animales (comme les fibres de poil, de laine, et de soie, etc.) et fibres végétales (comme les fibres de Jute, de sisal, de coir, de bois, de bambou, et de palmier)

3.2. Les fibres végétales

Les fibres végétales proviennent de différentes sources ; elles sont issues de déchets de bois, de déchets de palmiers, de résidus agricoles et de différentes parties des plantes à fibre : de tiges (kénaf, jute, lin, ramie, etc.), de feuilles (sisal, abaca, paille de graminées, etc.), de fruits (noix de coco) et de graines (coton, kapok, etc.) [14].

L'utilisation des fibres végétales comme renfort remonte à la période des briques renforcées par les pailles, Actuellement les fibres végétales sont en train de pénétrer le secteur industrielle pour fabriquer des composites plus performés et moins couteux grâce aux avantages présentés par ces fibres naturelles par rapport aux fibres traditionnellement utilisées dans les composites, parmi ces avantages on trouve la faible densité, le faible coût, la capacité acoustique, la faible conductivité thermique, les bonnes propriétés mécaniques spécifiques et surtout la disponibilité et le renouvellement. Il existe toutefois quelques inconvénients de renforcer avec les fibres naturelles [15]; en plus de leur capacité d'absorption d'eau et leur faible résistance au feu (200-230°C). L'inconvénient majeur des fibres végétales est leur faible stabilité dimensionnelle due principalement à leur caractère hydrophile. La biodégradabilité des fibres est un avantage mais également un inconvénient. C'est un avantage du point de vue de la recyclabilité, mais lorsque ces fibres sont introduites dans des matrices, elles peuvent être dégradées à long terme par les micro-organismes présents dans le milieu ou par la basicité de ce dernier [16].

3.2.1. Classification des fibres végétales

La classification des fibres végétales n'est pas aisée car il existe plusieurs critères de différenciation des fibres. Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (kénaf, jute, lin, ramie, etc.), de feuilles (sisal, abaca, paille de graminées, etc.), de fruits (noix de coco) et de graines (coton, kapok, etc.). Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicelluloses) et en lignine, on peut

distinguer les fibres ligneuses (dures et rigides provenant de matériels ligneux tels que bois d'œuvre, résidus d'industrie du bois, etc.), les plus utilisées pour la fabrication des panneaux de particules, et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que kénaf, chanvre, sisal, jute, lin, etc.).

De par leur longueur, les fibres végétales peuvent être sériées en deux catégories : les fibres longues et les fibres courtes. Les fibres longues, dites libériennes, provenant de tiges et d'écorces de tiges de plantes annuelles sont douces. Par contre, les fibres longues lignocellulosiques issues de feuilles, de tronc d'arbres, d'enveloppe de fruits, etc., sont plus dures et rigides du fait de leur richesse en lignines. Les fibres courtes ou étoupes sont des fibres lignocellulosiques qui sont associées aux fibres longues. Un cas particulier est celui des fibres longues des poils de la graine de coton qui sont monocellulaires et quasiment totalement cellulosiques [14].

3.2.2. Caractéristiques des fibres végétales

3.2.2.1. Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de leur origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'espèce et au sein de la même espèce, de l'organe de provenance (tableau 1.3), de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale [14].

La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire [14, 17] qui découle de celle de la porosité des fibrilles. La porosité des fibrilles (rapport du diamètre du lumen par le diamètre total de la fibre) déterminant du caractère hygrophile de la fibre végétale [14, 18] peut diverger dans de larges proportions [17]. Par exemple le lin a une porosité de $6,8 \% \pm 3,5 \%$, et la fibre de palmier, une porosité de 10% alors que celle du coton peut être supérieure à 90% [14, 19].

Tableau 1.3 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales [14]

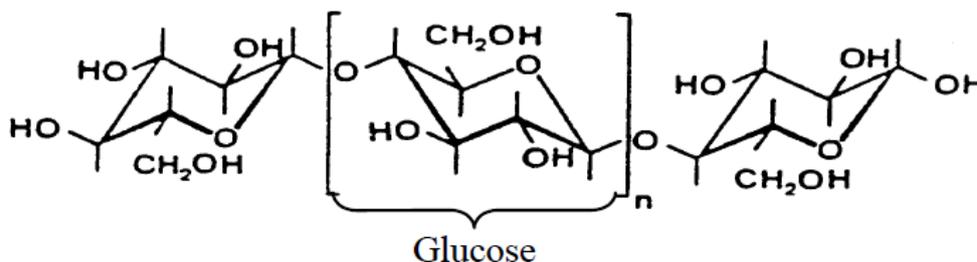
Nature des fibres	Longueur (mm)	Diamètre (μ m)	Angle microfibrillaire ($^{\circ}$)	Ratio L/D
Lin	4 - 77	5-76	10	1 687
Chanvre	5 - 55	10-51	6,2	960
Ramie	40 - 250	16-126	7,5	3500
Kénaf (filasse)	1,4 - 5	14- 23	-	124
Kénaf (bois)	0,4 - 1,1	18 - 37	-	20
Jute	-	25-200	8	110
Sisal	0,8- 8	7- 47	20	100
Noix de coco	0,3-1	12-24	45	35
Sapin	2,7-4,6	32-43	-	97
Tremble	0,7-1,6	20-30	-	48

3.2.2.2. La composition chimique des fibres végétales

Les fibres végétales sont des fibres ligno-cellulosiques composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine [20], et en proportions relativement faibles d'extractibles non azotés, de matière protéique brute, de lipide et de matière minérale [14, 21]. Les proportions de ces différents constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [14].

3.2.2.2.1. Cellulose

La cellulose est une macromolécule formée de longues chaînes de polymères linéaires non ramifiées dont le motif de base est le glucose $C_6H_{12}O_6$ (Figure 1.2). Le motif de répétition est le dimère cellobiose (Figure 1.3). Le nombre de motifs de répétition ou le degré de polymérisation varie suivant l'origine de la cellulose.

**Figure 1.2:** Structure chimique de la cellulose [22]

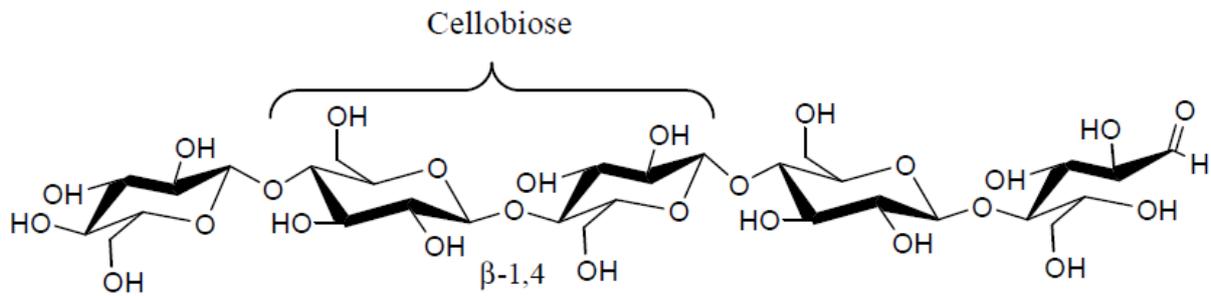


Figure 1.3 : Molécule de cellulose (n répétitions du motif cellobiose) [23]

La cellulose est un polymère qui possède une structure fibrillaire partiellement cristalline (Figure 1.4), les microfibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines ordonnées et de zones amorphes totalement désordonnées [23, 24]

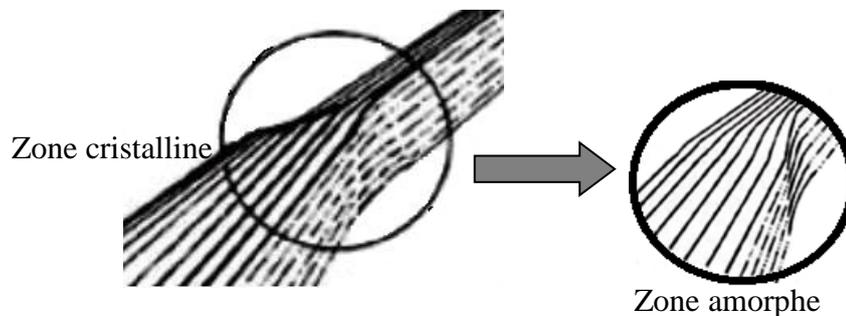


Figure 1.4 : Représentation des micro-fibrilles constituant les fibres de cellulose

Dans la zone cristalline, les chaînes cellulosiques sont disposées parallèlement les unes aux autres, liées par des liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogène qui se développent entre les chaînes, elle contribue à la force et à la rigidité de la fibre. Les interactions moléculaires sont fortes et assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs. Grâce à sa grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. La cellulose est de nature très hydrophile. Le remplacement d'une partie des interactions inter-chaînes par des liaisons hydrogènes entre la cellulose et l'eau provoque une plastification du matériau et donc une diminution de ses caractéristiques mécaniques. La cellulose contribue à la force et à la rigidité de la fibre grâce à ses chaînes fortement orientées [23]

3.2.2.2. L'hémicellulose

L'hémicellulose diffère de la cellulose dans la composition chimique, par son degré de polymérisation, ainsi que par la ramification des chaînes moléculaires. Elle est formée de monosaccharides et d'acides de sucre Figure 1.5 (les pentoses, les hexoses, les acides hexuroniques et les désoxy-hexoses). Son poids moléculaire est beaucoup inférieur à celui de la cellulose. L'hémicellulose constitue une classe de polymères très variés solubles dans l'eau et pouvant être extraits de la paroi des cellules végétales par des solutions alcalines. L'hémicellulose est hydrophilique et est attachée à la surface de cellulose via des liaisons hydrogènes. Elle a aussi des liaisons fortes avec la lignine. L'hémicellulose est responsable de la biodégradation, de l'absorption d'humidité, et de la dégradation thermique de la fibre [16, 25]

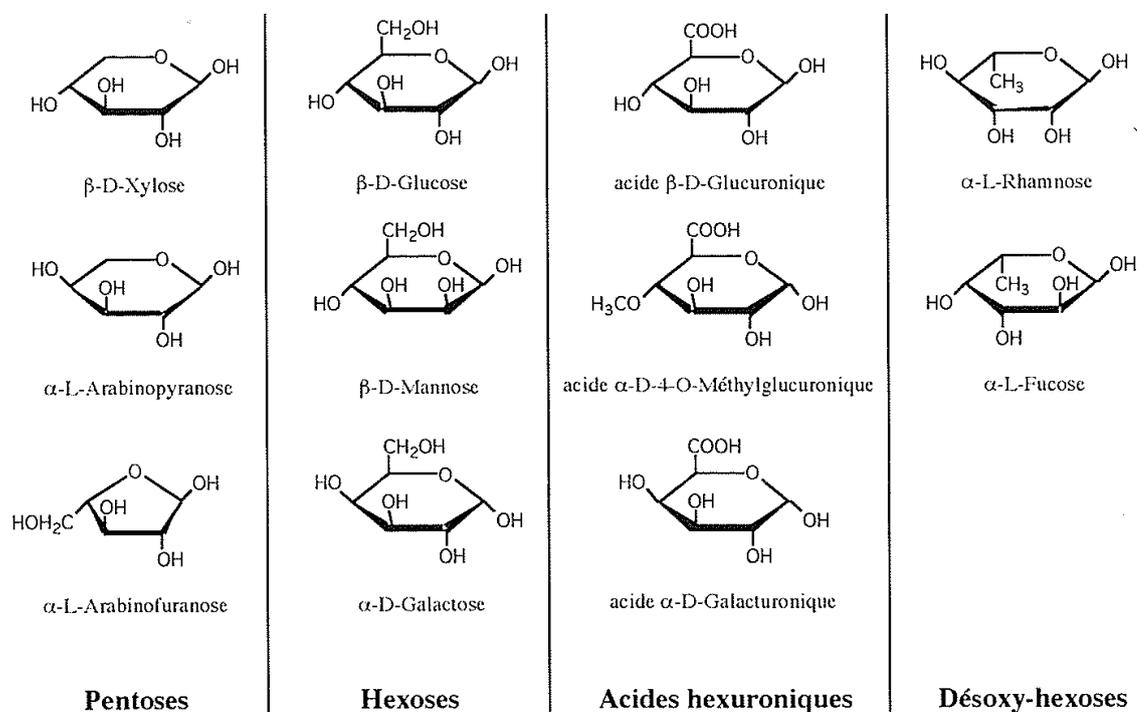


Figure 1.5 : Formules chimiques des principaux monosaccharides des hémicelluloses [25]

3.2.2.3. La lignine

La lignine est une molécule complexe tridimensionnelle, non aromatique cristalline, sa structure moléculaire n'est pas encore précisément connue. Cependant les précurseurs de la lignine, les alcools p-hydroxycinnamylique (p-coumarylique, conifrylique et sinapylique)

(Figure 1.6) sont très bien connus grâce à des études au ^{14}C [25]. Leurs proportions varient selon l'espèce végétale et la localisation au sein de la paroi [22]. En effet, la nature de la lignine dans les différentes parties d'une même plante peut être différente. La lignine est hydrophobique, elle entraîne une résistance à l'eau et fournit la dureté et la rigidité à la cellule de la fibre végétale [16, 25]. La Lignine est peu sensible à la dégradation biologique, elle crée une barrière morphologique à la pénétration et à la progression des agents pathogènes, et contribue à la protection naturelle des végétaux contre certaines attaques parasitaires [23].

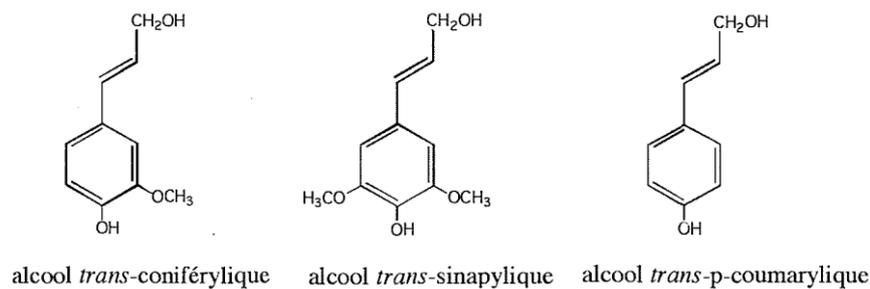


Figure 1.6 : Formules chimiques des principaux constituants de la lignine. [25]

3.2.2.2.4. Les pectines

Les pectines sont des polymères de polysaccharides acides, composées d'une chaîne principale d'acide uronique et qui consistent essentiellement en l'acide de polygalacturon. (Figure I.7)[22]. La pectine est soluble dans l'eau seulement après une neutralisation partielle par alkali ou hydroxyde ammonium [16].

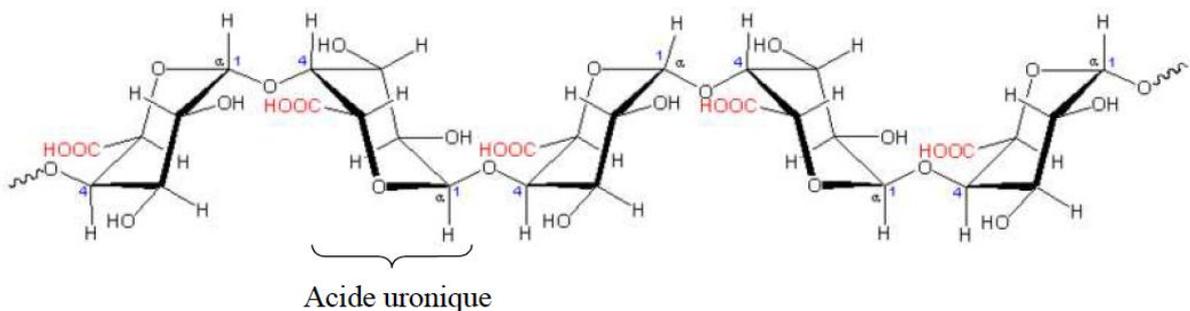


Figure 1.7 : Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique [22].

3.2.2.2.5. Extractifs

Les extractifs ne font pas partie intégrante de la paroi cellulaire de la fibre végétale, ils sont responsables de sa couleur et de son parfum. Les extractifs sont facilement éliminés par des solvants naturels. Ils comprennent plusieurs substances chimiques différentes comme certaines graisses, composés aromatiques, huiles volatiles, alcools à haut poids moléculaire et acides gras. Les extractifs ne contribuent pas aux propriétés mécaniques de fibre végétale mais ils lui augmentent sa résistance contre la dégradation et contre les attaques des insectes [25].

3.2.2.2.6. Les cires (waxes)

Les cires constituent une partie de la fibre qui peut être extraite avec les solutions organiques. Ces matériaux cireux sont composés de différents types d'alcools qui sont insolubles dans l'eau et aussi dans quelques acides [16].

Les fibres végétales sont elles-mêmes des matériaux composites renforcés par des fibres de cellulose dans une matrice amorphe d'hémicellulose et pectine qui est associée par liaisons hydrogène et covalentes à la lignine [14] Figure 1.8

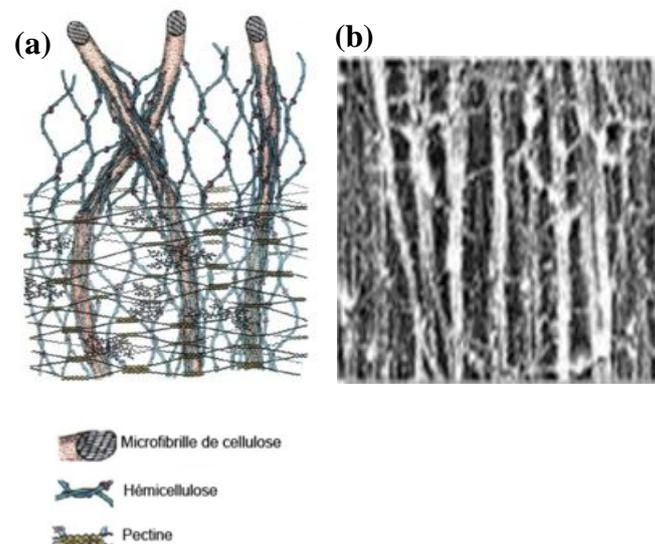


Figure 1.8 : Structure tridimensionnelle de la paroi primaire : (a) schéma tridimensionnelle [26], (b) photo MEB de la paroi végétale (biologie et multimédia)

Les proportions cellulose-hémicellulose-lignine des fibres végétales sont très variables d'une espèce à l'autre. Dans la même espèce, ces proportions dépendent de l'organe de provenance des fibres, de l'état de maturité et de l'environnement de croissance des plantes. La composition chimique moyenne de différentes fibres végétales est donnée dans le tableau 1.4

Tableau 1.4 : Composition chimique des fibres végétales [27]

Composition	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Pectine	Wax	Teneur d'humidité
Flax	71	18.6	2.2	2.3	1.7	10.0
Jute	61.0	20.4	13	0.2	0.5	12.6
Chanvre	74.4	17.9	3.7	0.9	0.8	10.8
Sisal	78.0	10.0	8.0	<1	2.0	11.0
Ramie	68.6	13.1	0.6	1.9	0.3	8.0
Coco	43	<1	45	4	-	8.0

3.2.2.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

La variabilité dans les proportions des constituants chimiques des fibres végétales implique une variabilité des propriétés physico-mécaniques des fibres végétales [21, 23]. Plusieurs travaux ont montré que les fibres végétales ont des propriétés mécaniques variées, à l'intérieur même d'une espèce donnée [14, 28]. Cette variation de propriétés représente un des inconvénients des fibres végétales en comparaison aux fibres synthétiques. Les propriétés mécaniques et la structure des fibres végétales sont influencées par quelques conditions de croissance et varient selon l'habitat, le climat et l'âge de la plante [20]. Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, son porosité, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau [16]. Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, à la rupture et par le module d'élasticité. Le tableau 1.5 montre la variation des propriétés physico- mécaniques de différentes espèces de la fibre végétale.

Tableau 1.5 : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales [16]

Fibre	Densité (g/cm ³)	Allongement (%)	Résistance en traction (Mpa)	Module d'élasticité (Gpa)
Cotton	1.5-1.6	7.0-8.0	287-597	5.5-126
Jute	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
Flax	1.5	2.7-3.2	345-1035	26.7
Chanvre	1.4	1.6	900-1080	10-25
Ramie	-	3.6-3.8	400-938	61.4-128
Sisal	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
coco	1.2	30.0	150-175	4.0-6.0

3.2.2.4. Caractéristiques thermiques et acoustiques des fibres végétales

Les propriétés thermiques des fibres végétales, sont très importantes. En effet, la dégradation thermique est un facteur limitant des procédés de fabrication à chaud des composites. La plupart des fibres végétales perdent de leur rigidité dès 160°C [14,16, 29] et on voit la lignine se dégrade aux alentours de 200°C. Néanmoins, la destruction de l'ordre cristallin n'apparaît qu'au-dessus de 320°C par agitation thermique des molécules [5 ,30].

La conductivité thermique des fibres végétales est faible [31], celles-ci possèdent les caractéristiques d'un bon isolant. La densité et la porosité sont les facteurs influençant de façon prédominante les transferts de chaleur, ceux-ci sont aussi influencés par la conduction via la paroi cellulaire et par la teneur en humidité de la fibre végétale.

Les capacités acoustiques font aussi partie des avantages de l'utilisation de fibres végétales comme renfort, elles leur donnent une bonne qualité pour le renforcement des composites à des applications qui nécessitent l'isolation phonique.

4. Les composites fibres végétales - polymères

Dans les sections précédentes, nous avons vu qu'il y a de nombreux polymères et nombreux types de bois qui peuvent constituer les composites fibres végétales-polymères. Chaque composite présente une constitution propre, et un objectif de performance propre. Cette diversité se retrouve aussi dans la littérature au niveau du choix de la fibre naturelle, de la matrice polymère, des caractéristiques mesurées et des méthodes employées. Parmi les

fibres les plus utilisées, on trouve les fibres de sisal, de jute, de lin, de ramie, de chanvre, d'abaca, de kénaf, de straw, de banana, de noix de coco, et les fibres de palmier (nous allons parler longuement sur ce type de fibre dans le chapitre suivant). La plupart des travaux se rapportent aux propriétés mécaniques dépendantes de la teneur de fibres, de l'effet des traitements divers des fibres, et de l'utilisation des agents de couplage [32, 33].

Plusieurs études ont été réalisées sur les composites à fibres de chanvre en utilisant des polymères thermodurcissables et aussi thermoplastiques [33, 34, 35]. Les résultats indiquent que les propriétés mécaniques (en traction et en choc) des composites à fibres de chanvre sont directement proportionnelles à la teneur de fibre. Sanadi et al. [36] ont trouvé qu'un composite unidirectionnel de chanvre-polyester ayant 40% de la fraction volume de fibre a un module spécifique plus élevé que celui d'un composite renforcé par 20% en fraction volume de fibres de verre. En outre, Les résultats des travaux de Bolton [37] révèlent que le renforcement de la matrice polymère thermodurcissable polyester et Epoxy par les fibres végétales de Jute, de coton et de Kénaf donne de bons résultats tant sur le plan économique que sur le plan mécanique. L'incorporation des fibres de ramie [38], et de banana [39] dans la matrice polyester a également montré un effet positif sur au moins une caractéristique mécanique du composite élaboré.

D'autres travaux ont été réalisées sur les propriétés mécaniques des composites à fibres de coco [40, 41]. Les composites à fibres de coco, qui sont riches en lignine, montre la meilleure résistance au climat en comparaison aux ceux à fibres riches en cellulose (sisal, bananes, chanvre). La lignine ayant une affinité inférieure pour l'humidité semble agir comme un protecteur des microfibrilles de cellulose contre l'absorption d'humidité.

Plusieurs autres études ont montré que l'incorporation du filler de fibres de sisal dans une matrice polymère (polyéthylène, caoutchouc naturel) améliore bien les propriétés mécaniques du composites grâce à leurs bonnes propriétés mécaniques [42, 43]. Par ailleurs, Garcia de Rodriguez et al. [44] ont mis en évidence le potentiel d'utiliser les nano fibres cellulosiques (CNF) de sisal comme renfort pour la stabilisation des polymères polaires tel que le poly acétate de vinyle (PVA) même dans des conditions d'humidité élevées. Le même travail a été repris par Gong et al. [45] dans l'objectif d'étudier l'influence du contenu des nano fibres cellulose sur la morphologie, la résistance à la traction et les propriétés viscoélastiques des nano composites élaborés. Les résultats rapportés montrent que le module de Young et la contrainte à la traction augmentent avec l'augmentation du contenu de la CNF.

En remplaçant la matrice précédente par le polymère polypropylène, Fung et al. [46] ont constaté que l'incorporation de seulement 10% en poids des fibres de sisal permet d'améliorer les propriétés mécaniques du composite polypropylène/fibres de sisal élaborés. Le module de Young s'est amélioré par 150% et la résistance à la traction s'est améliorée par 10%. Vilaseca et al. [47] ont utilisé la même matrice pour préparer des composites à base d'abaca, ils ont montré que la résistance à la traction et le module de Young du composite d'abaca-polypropylène augmentent avec l'augmentation du taux de fibres d'abaca incorporé. Par contre, l'élongation à la rupture diminue en augmentant le taux de fibres. Cinq autres types de fibres végétales (sisal, kenaf, chanvre, jute et coco) ont été testés avec la matrice thermoplastique de polypropylène, l'influence de leur incorporation sur les propriétés mécaniques du polypropylène a été étudiée par Wambua et al. [48]. Les résultats ont montré que le module de traction, la résistance aux chocs et la résistance à la traction des composite polypropylène-kenaf augmentent avec l'augmentation du taux en poids des fibres. Tandis que, les propriétés mécaniques des composites avec les fibres de coco sont les plus faibles, mais ils ont une résistance au choc plus élevée que celle des composites avec les fibres de jute et de kenaf. Dans la plupart des cas, les propriétés spécifiques des composites de cinq fibres naturelles se sont révélées favorables en les comparant à celles des composites des fibres de verre. En outre, les travaux de Jahangir et al. [49], Leao et al. [50] et Bledzki et al. [51] montrent qu'il est possible d'améliorer les propriétés mécaniques des produits polymères plastiques de polypropylène en les renforçant par des fibres végétales tels que les fibres végétales de lin, de ramie, et de jute. De même pour le renforcement du polypropylène par les fibres de coton [52], de jute [51, 53], de paille [54], de kénaf [55, 56], et d'abaca [51].

D'un autre côté, Salman et al. [57] ont constaté que la forme de dispersion (aléatoire ou unidirectionnelles) des fibres de kénaf dans la matrice époxy a un effet considérable sur les propriétés mécaniques du composite mis en forme. Les résultats rapportés indiquent des propriétés mécaniques optimales pour 35% de fibre de kénaf tissées dans l'orientation 0°/ 90°. En travaillant sur la même matrice, Biswas et al. [58] ont essayé d'améliorer les propriétés de la résine époxy en la renforçant par les fibres du bambou. La comparaison avec le composite époxy/fibres de verre révèle des propriétés mécaniques plus faibles, mais une résistance à l'usure meilleure quand les fibres de verres sont remplacées par des fibres de bambou. De leur côté, Jain et al. [59] ont montré que l'utilisation des fibres de bambou sous forme d'un filler améliore plus les propriétés mécaniques des composites que d'autres formes d'incorporation.

De nombreuses études concernant l'application des différents traitements sur les fibres végétales ou sur les matrices ont été également citées dans la littérature. L'influence des traitements de fibres de coco sur le comportement mécaniques des composites à base de la résine polyester insaturée a été rapportée dans plusieurs travaux [60, 61, 62]. Les résultats montrent que le traitement des fibres a bien amélioré les propriétés mécanique du composite. Même remarques ont été rapportées par Towo et al. [63], et par Mishra et al [64] concernant les composites Sisal/polyester insaturé en appliquant un traitement chimique sur les fibres de sisal et par Rong et al [65] mais cette fois ci pour les composites unidirectionnel fibres sisal traitées/époxy. Balnois et al. [66] ont rapporté l'effet positive du traitement chimique des fibres de lin sur la nature de l'adhésion au niveau de l'interface et les caractéristiques mécaniques du composites. Gassan et al. [67] montrent également que Le traitement chimique par un alcalin des fibres de jute entraine une meilleure adhésion avec la matrice époxy et par conséquence améliore les propriétés mécaniques du composite : fibres de jute-époxy. De leur côté, Panaitescu et al. [68] ont mis en évidence quelques aspects concernant l'amélioration de la compatibilité polymère/fibres naturelles et de la dispersion des fibres dans la matrice thermoplastique. Les auteurs ont réalisé des composites à base de polymère (Polypropylène, Polyéthylène, Poly chlorure de vinyle) et des fibres de chanvre, de sisal, et de lin. Ils ont travaillé sur l'amélioration de la compatibilité des fibres naturelles avec la matrice en utilisant le silane et l'acide anhydride. Le traitement combiné des fibres et de la matrice polymère a donné des résultats exceptionnels, en certains cas, ils ont observé un effet synergique. Ils ont obtenu des composites avec des caractéristiques optimisées en utilisant les fibres de sisal et de chanvre avec la matrice polypropylène.

Les fibres naturelles ont également été utilisées comme renfort pour les copolymères bio sourcés tel que L'acide poly lactique PLA pour en fabriquer des composites entièrement biodégradables. L'acide poly lactique PLA est un polymère thermoplastique fabriqué à partir d'acide lactique (source tige de maïs, canne de sucre) et il est principalement utilisé pour des produits biodégradables, tels que des sacs, des cuillères en plastique et des tasses de plantation. Oksman et al [69] ont étudié le renforcement de ce polymère par les fibres de lin. En raison de la nature fragile du PLA, la tri-acétine a été utilisée comme plastifiant pour les matériaux composites PLA et PLA/lin pour améliorer les propriétés d'impact. Les résultats préliminaires montrent que les propriétés mécaniques du composite sont améliorées. L'addition de plastifiant n'a présenté aucun effet positif sur la résistance aux chocs des composites. Les matériaux composites PLA/lin n'ont montré aucune difficultés dans les

procédés de moulage par extrusion et compression et ils peuvent être traités de manière similaire que les composites à base de polypropylène PP. En outre, Takagi et al [70] ont rapporté des propriétés thermiques bien meilleurs des composite à base de l'acide poly lactique (PLA) et les fibres de bambou par rapport à celle des composites traditionnelles à base des fibres de verre ou de carbone.

5. Les panneaux de bois

Ils peuvent se définir comme des bio-composites en plaque mono ou multi couches d'épaisseur variable fabriqués sous pression et chaleur, essentiellement à partir de particules constituées de copeaux de bois ou d'autres déchets ligneux provenant du façonnage du bois et/ou d'autres matières fibreuses lignocellulosiques avec ou sans apport de liant organique. Ils sont des composites à grande diffusion, à coût de production modéré et grande productivité. Ils sont utilisés dans les applications courantes et variées tels que l'emballage (palettes et conteneurs), l'habitat (installations fixes de magasin, lambris, portes, montants et pièces de menuiserie usinées, plans de travail, platelage des maisons préfabriquées, sous-couches de plancher, etc.), le mobilier (meubles résidentiels et de bureaux, armoires de cuisine, rayonnage, etc.), la construction automobile et maritime, les constructions industrielles, le génie civil, le sport, la décoration (bardage, boiserie extérieure, panneaux perforés, parement de porte, moulures ...) [14]

5.1. Classifications des panneaux de bois suivant la taille de renfort

Suivant la taille des particules, on distingue les panneaux de particules, les panneaux de copeaux, les panneaux de fibres, Les panneaux MDF, les panneaux de lamelles minces et longues et les contre plaqués (figure 1.9).

5.1.1. Les panneaux de particules

Les panneaux de particules sont fabriqués à partir de particules de bois provenant de l'industrie de la première transformation du bois (copeaux, sciures). Ces derniers sont séchés à l'air chaud, débarrassés des éventuels corps étrangers (particules métalliques ou minérales) avant d'être triés en deux catégories, les plus gros servent à composer l'âme du panneau et les plus fins sont destinés à composer les faces pour lui donner un aspect lisse. Les lamelles sont ensuite encollées avec des résines liquides, dont la composition varie en fonction de la classe du panneau souhaité.

Plusieurs types de conformations existent :

- Mono-couche homogène
- Trois couches
- Multicouches

Une fois pressés et collés, les panneaux sont découpés aux formats et poncés. Après quelques jours de stabilisation et de refroidissement, les panneaux sont acheminés vers les points de vente ou en usine pour y être transformés ou revêtus de mélamine de PVC ou de placage bois pour l'industrie du meuble. L'épaisseur des panneaux varie entre 3 et 70 millimètres.

5.1.2. Panneaux de copeaux ou d'agglomérés

Les panneaux de copeaux ou d'aggloméré sont fait avec des copeaux de bois, le tout pressé avec de la colle. Ils permettent d'utiliser les restes de bois qui ne peut pas être utilisé pour faire des planches, ou qui ne convient pas à la confection de contreplaqué. C'est une façon de minimiser l'impact des scieries sur l'environnement. Ils sont utilisés, en remplacement du contreplaqué, car ils sont plus économiques. Les panneaux de copeaux sont beaucoup utilisés comme recouvrement de toiture, des murs... qui seront recouverts d'un revêtement. Le bois de copeaux n'est pas résistant à l'eau.

5.1.3. Les panneaux de fibres

Les panneaux de fibres sont fabriqués par procédé "humide". Ce dernier permet, grâce aux propriétés adhésives naturelles des fibres de bois en présence d'eau, la cohésion sans colle des fibres. Les fibres de bois sont placées en solution dans de l'eau pour former une pâte. La pâte est disposée sur une toile métallique pour y être essorée et séchée par aspiration de l'eau. Les panneaux isolants (dits tendres) sont simplement séchés (environ 8 %) puis découpés. Les panneaux dits mi-durs et durs sont obtenus par un pressage à chaud qui polymérise la lignine du bois. Concernant les panneaux destinés à être en milieux humides, un additif asphalté (les fibres sont imprégnées de bitume) est ajouté à la composition des panneaux. Les panneaux de fibres durs se caractérisent par une masse volumique élevée, alors que les panneaux tendres sont très légers, ils sont principalement utilisés comme isolant.

5.1.4. Les panneaux MDF (Medium Density Fiberboard)

Contrairement aux panneaux de fibre, les panneaux MDF (Medium Density Fiberboard) sont fabriqués par procédé "à sec". Dans ce procédé, la cohésion du panneau est obtenue par collage des fibres avec des résines thermodurcissables. Les billons de bois sont écorcés puis fragmentés en plaquettes qui sont ensuite triées, dépoussiérées et lavées. Les plaquettes sont ensuite défibrées sous l'action conjuguée de la vapeur, qui ramollit le bois, et d'un passage entre deux disques en rotation et en pression, qui séparent les fibres du bois. L'encollage des fibres est effectué par pulvérisation de la colle sous haute pression. Les fibres saturées d'humidité et de colle passent ensuite à grande vitesse dans un long séchoir tubulaire pour ramener leur humidité à environ 10 %. La norme consiste à disposer les fibres sur un tapis pour former un matelas dont l'épaisseur est de 15 à 20 fois supérieure à celle du produit final. Tout comme les panneaux de fibre, la destination première des panneaux MDF est la fabrication de mobiliers d'intérieur. De plus, les panneaux MDF peuvent être utilisés comme revêtement de sols. Tout comme les panneaux de fibre, la destination première des panneaux MDF est la fabrication de mobiliers d'intérieur. De plus, les panneaux MDF peuvent être utilisés comme revêtement de sols.

5.1.5. Panneau à lamelles orientées OSB (Oriented Strand Board)

La fabrication de l'OSB utilise exclusivement du bois frais de coupe. Alors qu'en Amérique du Nord, c'est le Tremble ou Aspen (sorte de Peuplier) qui est utilisé le plus fréquemment, en Europe, ce sont les résineux qui sont le plus souvent employés. Les billes de bois sont le plus souvent découpées en billons de plus petites dimensions, qui sont écorcés avant d'être tranchés en fines lamelles de 0,6 à 0,8 mm d'épaisseur. Les lamelles sont ensuite séchées à l'air chaud puis triées en deux catégories : les plus fines servent à composer l'âme du panneau et lui donnent sa cohésion, tandis que les plus larges sont destinées à composer les faces pour lui donner ses caractéristiques mécaniques. Les lamelles sont ensuite encollées avec des résines liquides dont la composition varie en fonction de la classe du panneau souhaité. La création du panneau consiste à disposer les lamelles en trois couches croisées pour former un matelas qui est ensuite pressé à chaud. Les panneaux OSB ne peuvent être utilisés en milieu humide confiné ou en exposition directe aux intempéries. Pour certaines utilisations, les panneaux OSB peuvent subir un traitement pendant leur fabrication :

- Traitement fongicide, insecticide et anti-termite

- Ignifugation pour les utilisations en ERP (Etablissements Recevant du Public)

L'utilisation des panneaux OSB est variée. En effet, dans les milieux secs il est employé pour l'agencement d'intérieur (cloisons, planchers, étagères, meubles...). Dans les milieux humides il est employé comme support de couverture et sous une toiture. Ces panneaux ne doivent être en aucun cas exposés aux intempéries sous peine d'une détérioration rapide.

5.1.6. Les contreplaqués

Le contreplaqué est composé de feuilles de placage disposées en plis superposés et collés dont le sens du fil du bois est croisé. Les feuilles de bois sont obtenues par déroulage ou tranchage de billes de bois. L'épaisseur des feuilles de placage est généralement comprise entre 0,8 et 4 millimètres. Les plis sont systématiquement disposés de part et d'autre d'un pli central appelé âme. L'épaisseur d'un panneau est donc fonction du nombre de plis et de l'épaisseur des feuilles de placage qui le compose.



Figure 1.9 : panneaux de bois : (a) panneaux de particules, (b) panneaux de copeaux, (c) panneaux MDF, (d) panneaux OSB, (e) contreplaqué

5.2. Procédés de fabrication des panneaux de particules

Les panneaux de bois peuvent être fabriqués selon deux procédés :

- Procédé humide ou sous atmosphère humide : les fibres lignocellulosiques se lient entre elles par des liaisons naturelles de type pont hydrogène lors du rapprochement des fibres par séchage et par pression. Ce procédé suit les étapes suivantes : défibrage des morceaux de bois pour former des fibres, mélange des fibres avec de l'eau, formage, essorage, pressage et enfin mise à dimension.
- Procédé sec ou à sec : un liant est utilisé. Ce procédé se fait en 4 étapes principales : le fractionnement, l'imprégnation, le formage et la finition [14]

5.2.1. La préparation du matériel ligneux

La préparation du matériel fibreux se fait suivant le type et les caractéristiques des panneaux ciblés. Cette préparation peut donc consister en un simple fractionnement mécanique (simple découpe du matériau lignocellulosique en copeaux ou simple broyage dans le cas des panneaux de particules traditionnels) ou en un défibrage thermomécanique (dans le cas des panneaux de fibres). Ce dernier peut, dans certains cas, être précédé d'une attaque chimique ou enzymatique. Quel que soit le procédé de fractionnement utilisé, le matériel fibreux obtenu est séché et classé afin d'obtenir des fragments ou particules homogènes.

5.2.2. L'imprégnation du matériel fibreux avec la résine ou encollage

Cette étape consiste en un mélange du matériel fibreux avec la matrice liante. Elle est réalisée par pulvérisation de la résine en suspension colloïdale dans l'eau, dans un mélangeur contenant la matière fibreuse. La répartition de la résine est un facteur déterminant pour la qualité des panneaux. Signalons le cas particulier de la fabrication des panneaux de fibres pour lesquels les liants peuvent être injectés en sortie du raffineur thermomécanique sous pression, avant l'étape de séchage des fibres sous courant d'air chaud (flash-drying). Dans le cas des matrices thermoplastiques, le mélange peut être réalisé par incorporation des fibres dans le polymère en phase fondue (compoundage). Les particules ou fibres ainsi encollées sont alors distribuées pour former un matelas (ou MAT) d'épaisseur contrôlée, ou introduites dans un moule.

5.2.3. La mise en forme ou formage

Les techniques de mises en forme des panneaux de particules peuvent être classées en trois grandes catégories : le thermopressage, le thermoformage, et le moulage.

5.2.4. Le thermopressage

Le thermopressage consiste à la fabrication de panneaux de particules par compression de mat dans un moule avec application de la chaleur en présence d'un plastifiant éventuellement.

5.2.5. Le thermoformage

Le thermoformage est une méthode de production de panneaux de particules en deux phases qui consiste à faire acquérir, sous l'action de la chaleur et de la pression, une forme particulière à un matériau fibreux précédemment pressé en plaque. Le matériau de base est ramolli sous l'effet de la chaleur puis mis en forme sur un moule de forme simple. Le thermoformage de plaques lignocellulosiques pré-pressées peut se faire sous pression, par drapage, sous ventilation libre ou par simple collage de feuilles. Cette voie a été souvent utilisée pour la mise en forme des panneaux intérieurs des portières des automobiles [14, 71]

5.2.6. Le moulage

Le moulage est un procédé de mise en forme qui consiste à introduire dans un moule le mélange amorphe ou pulvérulent qui durcit ou se consolide en adoptant la forme de l'intérieur du moule. La consolidation se fait par simple séchage, par refroidissement (pour les matrices thermoplastiques) ou par apport de chaleur ou d'un précurseur physique ou chimique qui amorce la réticulation des matrices thermodurcissables. Le moulage par compression et le moulage par stratification sont les procédés les plus adaptés au moulage des particules.

5.2.7. La finition

La finition des panneaux de particules intervient après le démoulage. Elle concerne les opérations visant la stabilité dimensionnelle des panneaux (traitements contre la prise d'humidité), la mise au format par sciage, ponçage, découpe et conditionnement et les traitements post-formage tels que la peinture, l'enduction de vernis, de produit de protection contre les agressions biologiques, et le placage.

5.3. Les additifs dans les panneaux bois

Les additifs sont des substances minérales ou des réactifs chimiques qui sont introduits dans la formulation de panneaux pour améliorer leur présentation ou leurs propriétés physicochimiques ou pour augmenter la vitesse de prise des adhésifs. Ce sont des colorants (pigments minéraux, végétaux ou synthétiques), des tensioactifs, des dispersants (soude), des épaississants (bore, alginate, hydroxyéthyl-amylose, polyvinyl alcool, etc.), des plastifiants (eau, polyol, glycérine, etc.), des émulsifiants (acétate de polyvinyle), des agents de texture (sorbitol, talc, glycérine, cire, urée, etc.), des agents réticulants (acétone, formaldéhyde, etc.), des agents compatibilisant (isocyanates, phénol, soude, etc.), des agents antifongiques ou antimicrobiens (benomyl, formol, phénol, bentonites, tétrahydridoborate de sodium : NaBH_4 , etc.), etc [14].

5.4. Importance des panneaux de bois en Algérie

Les panneaux de particules en Algérie sont beaucoup plus importés que fabriqués dans le pays. Selon PDG de l'Entreprise nationale d'approvisionnement en bois (ENAB), Les besoins nationaux en panneaux MDF sont estimés entre 30 000 à 40 000 m³ annuellement. Le secteur a importé plus de 16 000 m³ de panneaux MDF en 2010 pour une valeur de 300 millions de DA, en 2011, les importations ont atteint 26 000 m³ de panneaux MDF pour une valeur de 500 millions de DA. Ces importations connaissent ces dernières années un essor considérable du fait d'une explosion des quantités de ce type de matériaux qui entrent dans le pays sous forme de meubles en panneaux de particules revêtus. En 2015, l'Algérie a importé des produits dérivés de bois pour une valeur de 88.736.016.512 de DA, 79% bois scié et 9% de panneaux c'est-à-dire 7986 millions de DA pour les panneaux densifiés et de particules. Le recours à la fabrication locale des panneaux de particules en utilisant autres matériaux locaux lignocellulosiques ne nécessite pas de grands moyens ni de techniques rares. C'est un investissement qui peut réduire l'imploration du bois, diminuer la facture des importations et diversifier les sources locales de bois.

6. Synthèse bibliographique sur les panneaux à base des fibres végétales

L'élaboration des plaques composites à base des fibres végétales et des polymères thermodurcissables ou thermoplastiques a déjà fait l'objet de nombreuses études de recherches [72-87]. La présentation de ces travaux sera faite en ayant le souci de regrouper les

résultats, selon l'influence que certains facteurs peuvent avoir sur la performance des panneaux à base des fibres végétales.

De nombreux travaux ont été effectués sur l'élaboration des panneaux de particules à base des particules de kénaf avec ou sans l'utilisation des liants comme les résines synthétiques du type urée-formaldéhyde, phénol formaldéhyde, etc. [14, 72-77]. Ces travaux ont étudiés l'effet de plusieurs paramètres à la fois sur les propriétés mécaniques, physiques, et thermiques des panneaux fabriqués. Nenonene [14]. a mis au point un nouveau procédé de fabrication de panneaux de particules de kénaf et la résine urée formaldéhyde. Il a étudié l'influence des différents paramètres d'élaboration sur les propriétés mécaniques et physiques du composite. Les caractéristiques optimales déterminées dans les meilleures conditions (10 % d'UF, 27 % d'humidité du MAT, 180 °C, 1 min à 1,6 MPa et 4 min à 2,7 MPa) sont : la densité = 540 kg.m⁻³, MOE = 450 MPa ; MOR = 4,2 MPa ; IB = 0,4 MPa et TS = 30 %). Elles sont satisfaisantes pour une utilisation comme panneaux de particules de faible densité, à applications générales en milieu sec. L'auteur a également testé l'emploi d'une colle d'origine animale, la colle d'os. Les caractéristiques mécaniques des panneaux de particules de tige de kénaf obtenus dans une large gamme de conditions opératoires (10 à 15 % de colle d'os, 5 minutes de thermopressage de 140 à 180 °C) sont supérieures à celles obtenus avec la résine UF (MOE = 530 MPa, MOR = 5 MPa, IB = 0,6 MPa), le taux de gonflement des composites varié de 35 à 40 %. De même, Soulama [76]. dans une partie de son travail de thèse a utilisé la colle d'os pour en développer des panneaux de particules en bois de tiges de cotonnier et de tiges de kénaf à des application dans le domaine de l'isolation thermique d'intérieur en remplacement des panneaux de particules élaborés avec la colle urée formaldéhyde. L'auteur a analysé l'influence des paramètres d'élaboration sur les panneaux préparés. Les propriétés déterminées (mécaniques, physiques, thermiques) indiquent que les panneaux respectent les exigences des normes des panneaux standards à l'exception du paramètre de gonflement à l'eau qui n'est pas satisfaisant car les valeurs obtenues (38,5% et 42%) sont largement supérieures à la valeur préconisée par les normes (8% après 2heures d'immersion d'eau). Par conséquent les panneaux ne pourront être utilisés que dans un environnement sec. D'un autre coté, les propriétés physiques et mécaniques des panneaux de fibres de kénaf, d'épaisseur 3.1 mm, traités à sec par l'acétylène ont été étudiées par Youngquist el al. [77]. Les résultats de caractérisation indiquent que la forme des fibres incorporées, du taux de la résine choisie, et de taux de cire utilisé affect considérablement les propriétés des panneaux de fibres de tige de kénaf élaborés par voie sec.

L'effet de type de renfort a été mis en évidence par Pavithran et al. [78]. La préparation des panneaux à base de la résine polyester insaturée et 0.5 en fraction de volume de différents types de fibres (sisal, ananas, banana et coco) a été effectuée. Les auteurs ont étudié la corrélation existante entre les propriétés des composites et celles des fibres constituantes. Ils ont trouvé que l'influence des propriétés des différentes fibres sur les composite est liée à l'angle microfibrillaire de type de fibre incorporée. Dans le même contexte, Satyanarayana [79] et al. ont rapporté dans leur travail, les résultats de la résistance à la traction, élongation à la rupture, module d'élasticité, résistivité électrique, diélectrique, et les propriétés physiques des panneaux constitués de la résine polyester et différentes types de fibres. Ils ont remarqué que les propriétés des panneaux de fibres de sisal, de coco, de banana, et de l'ananas non traités sont inférieures que celles de la résine et celles des fibres. Cependant, le traitement de surface en utilisant un revêtement en cuivre a amélioré les propriétés des fibres de coco et celles du composite : fibres de coco/polyester insaturé. L'effet de traitement des fibres a été également étudié par Oman [80]. La préparation des panneaux à partir d'un mélange de fibres de bois et des fibres de paille après avoir été traitées avec CaOH donne des propriétés mécanique telles que la rigidité et la résistance meilleurs que les panneaux de fibres non traitées surtout lorsqu'on ajoute l'extrait de traitement de fibres de paille par le CaOH dans le mélange. Güler [81] a également testé l'utilisation des résidus agricoles pour en fabriquer des panneaux de structures à base de la résine urée formaldéhyde. Les résultats révèlent des panneaux satisfaisant les normes standards minimales des panneaux commerciaux pour toutes les propriétés calculées, exception pour le gonflement en épaisseur. Ce qui exige un traitement hydrophobique.

Le taux de renfort et de la résine employés a un effet considérable sur les panneaux composite tant sur leurs propriétés mécanique que sur leurs propriétés physiques. White et al. [82] ont déterminé les propriétés des panneaux fabriqués à base de la résine polyester insaturée (unsaturated Strand Glass polyester Resin A) et des fibres de paille. Les panneaux sont préparés en mettant couche de fibres alternées par une couche de résine, en commençant et terminant par les couches de résine. Le pressage s'effectue à 5 MPa sous la température 80°C. Les résultats montrent que la fraction en volume optimale 61% (40% en poids) de fibres permet d'obtenir des panneaux avec un module d'élasticité en flexion de 7.3 GNm⁻² et une résistance à la flexion de 56 MNm⁻². Le module d'élasticité spécifique est 2.5 fois plus grand que celui de la résine et environ la moitié de celui du bois tendre, la résistance au choc

est presque la moitié de celle du bois tendre. Les auteurs suggèrent l'utilisation des panneaux de paille comme matériau cœur pour les panneaux structuraux et envisagent la substitution de la résine polyester par la résine phénolique pour améliorer mieux les propriétés mécaniques des panneaux. De leur côté, Pablo et al [83]. Ont investigué la fabrication des panneaux de particules à haute densités ($0.59 - 0.64 \text{ g/cm}^3$) et à faible densité ($0.67 - 0.72 \text{ g/cm}^3$) en utilisant différentes proportions de tiges de banana et de coupeaux de bois avec 10% d'urée formaldéhyde. Les résultats de la caractérisation montrent que les propriétés physiques et mécaniques des panneaux à haute densité sont supérieures à celles des panneaux à faible densité et que la résistance des panneaux augmente avec l'augmentation de la proportion des coupeaux de bois incorporée.

Par ailleurs, Gurjar [84] a rapporté dans son travail les résultats d'étude de l'effet de type de liant et de taux de liant incorporé sur les propriétés des panneaux réalisés. Deux types de liant ont été testés (la résine urée formaldéhyde, et phénol formaldéhyde), avec différents taux en association avec les fibres de coques de cotonnier. Les valeurs optimisées obtenues de liant et de taux d'usage sont 5% de phénol formaldéhyde. Fujimoto et al [85] ont testé le potentiel d'utiliser un mélange de latex SBR, antioxydant, sulfure, accélérateur volcanique, TiO_2 et MDI brut comme liant associé avec les fibres de cosses du riz pour élaborer des panneaux de particules en utilisant la méthode de thermopressage. Les résultats de caractérisation des panneaux obtenus révèlent des bonnes caractéristiques d'isolation phoniques. De son côté, Tobias [86] a mis en évidence l'utilisation d'un liant constitué de la combinaison : l'Araldite, Thiokol, et un durcisseur, pour fabriquer des panneaux composites à base de différents fraction en volumes de fibres courtes d'abaca. De plus, il a étudié l'influence de la taille des particules incorporées sur les propriétés mécaniques des plaques obtenues, Les résultats montrent qu'il y a une dépendance entre les propriétés mécaniques (le module de Young, la résistance à la traction, et la résistance au choc) et la longueur des fibres d'un côté et la fraction en volume des fibres de l'autre côté. Il a constaté que les composites, à base des fibres dont la longueur est supérieure à une longueur critique, se caractérisent par une forte adhésion à l'interface et possèdent une meilleure résistance à la traction. Tandis que les composites, à base des courtes fibres se caractérisent par une faible adhésion à l'interface et possèdent une meilleure résistance au choc.

Autres effets ont été introduits par la littérature concernant la durabilité et la protection des panneaux composites contre les agressions environnementales. Deppe et al. [87] ont testé une nouvelle méthode développée pour protéger des panneaux de particules à

base des fibres de lin et d'une résine phénolique avec et sans l'utilisation des protecteurs de bois. L'étude montre que les moisissures diminuent la valeur des propriétés mécaniques plus que la moitié. La protection par Xyligen 25°F n'a pas affecté la réticulation alcalin-durcissement de la résine phénolique.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les matériaux composites. Nous nous sommes concentrés sur les matériaux composites à base d'un polymère et un renfort naturel, en particulier le renfort végétal. Concernant ce dernier, nous avons effectué une synthèse bibliographique sur leurs caractéristiques et leurs emplois comme renfort dans une matrice polymère. Il apparaît que les propriétés des fibres végétales varient d'un type à l'autre et que leur structure et leur composition chimique influent de manière importante leurs propriétés macroscopiques. Par ailleurs, nous concluons à travers la revue de littérature, que l'utilisation de la matière végétale sous forme filler, particules, ou fibres dans le domaine des matériaux composites est très intéressante. En outre, l'utilisation des matériaux composites est limitée par leurs propriétés qui sont fortement dépendantes de celles des fibres végétales et de la matrice polymère. D'où la nécessité de prendre en compte les propriétés des fibres végétales avant de les incorporer dans une matrice. L'utilisation qui nous intéresse des matériaux composites à base de fibres végétales est celle des panneaux ligno-cellulosiques. Nous avons pu savoir à travers ce qui a été présenté comme travaux réalisés sur les panneaux ligno cellulosiques qu'il est possible d'utiliser des particules ou des fibres végétales en remplacement de bois pour réaliser des panneaux de particules ou de fibres à des propriétés acceptables voire excellentes pour certain type de fibres et certain type de liant. Nous pouvons constater également que les propriétés des panneaux réalisés dépendent de type de liant, des fibres incorporé, de leur forme, et de la technique suivie ainsi que des conditions d'élaboration. Les travaux passés sur les panneaux composites montrent que ces propriétés dépendent également de l'application ou non des traitements sur les fibres ou sur les panneaux, et l'ajout ou non des additifs au mélange. Ce qui donne une diversité des panneaux de fibres ou des particules tant au niveau de leur technique de conception que de leur type de fibres et de liant ou bien de leur usage.

Les panneaux composites que nous nous proposons d'étudier, sont les composite à base de bois d'une biomasse très abondantes dans notre pays, il s'agit de bois de palmier dattier dont nous allons consacrer un chapitre entier pour parler de tous ce qui concerne ce

type de bois. Nous allons utiliser deux types de liant un liant thermoplastique (le poly acétate de vinyle) et un autre thermodurcissable (polyester insaturé). La technique suivie sera la compression à chaud, Ce procédé est couramment employé par l'industrie du bois.

Références

- [1] **M. Laarej.** Etude par spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM. Thèse de PHD. l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, **2010**.
- [2] **H. H. Molinaro.** Matériaux composites et structures composites. ENS Paris-Saclay, **2015**.
- [3] **G. Tripathi, D. Srivastava.** Effect of Carboxyl-Terminated Poly (Butadiene-co-Acrylonitrile)(CTBN) Concentration on Thermal and Mechanical Properties of Binary Blends of Diglycidyl Ether of Bisphenol-A (DGEBA) Epoxy Resin. *Materials Science & Engineering A*, 443, **2007**, 262-269.
- [4] **I. R. Vijay, G. R. Palmese.** Influence of Tetra Hydrofuran on Epoxy–Amine Polymerization, *Macromolecules*. 38, **2005**, 6923-6930.
- [5] **F. Michaud.** Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : aptitude au postformage. Thèse doctorat, Université de Bordeaux I, Bordeaux, France **2003**.
- [6] **D. Osso, O. Tillement, P. Fleurentin, J-L. Guichard.** Physico-chimie de l'interface bois polymère. Rapport CST 99/001 *CAP Sciences & Techniques*, Dombasle, France, **1999**.
- [7] **C. Xing.** Characterization of urea-formaldehyde resin efficiency affected by four factors in the manufacture of medium density fibreboard. Thèse de doctorat, Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval, Québec, Canada, **2003**.
- [8] **L. A. Donaldson, T. D Lomax.** Adhesive/fiber interaction in medium density fiberboard. *Wood Sci. Tech.*, 23, 371-379, **1989**.
- [9] **L. S. Penn, H. Wang.** « Epoxy Resin », *Handbook of Composite*, Edited by S.T. Peters, Published in **1998** by Chapman & Hall, London, ISBN 0412 540207.
- [10] **L. Devi, S. Bhagawan, S. Thomas.** Mechanical properties of pineapple leaf fibre reinforced polyester composites, *Journal of Applied Polymer Science*, **1997**, 1379-1748.
- [11] **L. Mwaikambo, E. Bisanda.** The performance of cotton/kapok fabric-Polyester composites, *Polymer Testing*, **1999**, 181-198.
- [12] **S. Steven, V. A Guy, V. M. Bruno,** Reaction Kinetics Modeling and Thermal Properties of Epoxy-Amines as Measured by Modulated-Temperature DSC. I. Linear Step-Growth Polymerization of DGEBA + Aniline, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 91, **2004**, 2798-2813.

- [13] **L. Gornet.** Généralité sur les matériaux composites, ECN, Centre Nantes, **2011.**
- [14] **A.Y. Nenonene.** Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs a base de colle d'os, de tannin ou de mucilage. Thèse doctorat, Université de Toulouse, **2009.**
- [15] **A. Alawar, A. M. Hamed, K. Al-Kaabi.** Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Compos Part B*; 40, **2009**, 601–606.
- [16] **H. Thi, T. Nga.** Etude de L'influence de La Température et de L'humidité sur les Propriétés Mécaniques en Traction des Fibres de Chanvre et de Coco, PhD Thesis, Ecole De Technologie Supérieure, Université Du Québec, **2008.**
- [17] **C. Ververis, K. Georghiou, N. Christodoulakis, P. Santas, R. Santas.** Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. *Industrial Crops and Products* 19, **2004**, 245–254.
- [18] **J. A. Robertson, F. D. de Monredon, P. Dysseleer, F. Guillon, R. Amado, J. F. Thibault,** Hydration Properties of Dietary Fibre and Resistant Starch: a European Collaborative Study. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 33, **2000**, 72-79.
- [19] **K. Charlet, C. Morvan, J. Bréard, J-P. Jernot , M. Gomina.** Etude morphologique d'un composite naturel : la fibre de lin, *Revue des Composites et Matériaux Avancés* 3, **2006**, 309-344
- [20] **A. K. Bledzki, J. Gassan.** Composites reinforced with cellulose based fibres. *Prog. Polym. Sci.* 24, **1999**, 221-274.
- [21] **R. M Rowell, R. A. Young, J. K. Rowell.** Paper and composites from agro-based resources. Ed Rowell R.M, Lewis publishers, Boca Raton, USA, **1997.**
- [22] **D. Sedan,** Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite. Thèse doctorat, Université de Limoges, **2007.**
- [23] **M. Ragoubi,** Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne. Thèse de PhD, Université de Henri Poincaré Nancy 1, **2010.**
- [24] **G. B. Mitra, P. S. Mukherjee.** X-Ray diffraction study of fibrous polymers /Degree of paracrystallinity a new parameter for characterizing fibrous polymers, *Polymer*, 21, **1980**, 1403-1409.
- [25] **P. Navi, F. Heger.** comportement thermo-hydrromécanique du bois: application technologiques et dans les structures. Ed.1, Presses polytechniques et universitaire romandes, CH-1015 Lausanne ISBN 2-88074-620-5, **2005.**

- [26] **D. Sibih**, Matériaux composites a matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres. Thèse doctorat, INSA De Lyon, **2011**.
- [27] **A. K. Bledzki, S. Reihmane, J. Gassan**. Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 59, **1996**, 1329-1336.
- [28] **K. Almi, A. Benchabane, S. Lakel, A. Kriker**. Potential utilization of date palm wood as composite reinforcement, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **2015**.
- [29] **R. E. Herrera**. Panneaux en gypse et particules de bois renforcés avec du ciment portland, Thèse de doctorat, Université Laval, **2009**, 140.
- [30] **D.Y. Kim, Y. Nishiyama, M. Wada, S. Kuga, T. Okano**. Thermal decomposition of cellulose crystallites in wood. *Holzforschung*, 55(5), **2001**, 521-524.
- [31] **B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenec**. Renewable materials to reduce building heat loss: characterization of date palm wood. *Energy Build*, 43, **2011**, 491.
- [32] **K. Oksman**, "Mechanical properties of natural fiber mat reinforced thermoplastic" *Applied Composite Materials*, 7, **2000**, 403-414.
- [33] **D. Nabi Saheb, J. P. Jog**, Natural fiber polymer composites: A Review" *Advanced in Polymer Technology*, 18, **1999**, 351-363
- [34] **L. Y. Mwaikambo, M. P. Ansell**. Hemp fibre reinforced cashew nut shell liquid composites," *Composites Science and Technology*, 63, **2003**, 1297- 1305.
- [35] **D. G. Hepworth, R. N. Hobson**. The use of unretted hemp fibre in composite manufacture, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, **2000**, 1279-1283.
- [36] **A. R. Sanadi, S. V. Prasad, P. K. Rohatgi**. Sun hemp fiber-reinforced polyester, *Journal of materials science*, 21, **1986**, 4299-4304.
- [37] **A. J. Bolton**, Natural Fibers for Plastic Reinforcement. *Materials Technology*, 9 , **1994**, 1-2.
- [38] **C. Z. Paiva Junior, L. H. de Carvalho, V. M. Fonseca, S. N. Monteiro, J. R. M. d'Almeida**. Analysis of the tensile strength of polyester/hybrid ramie-cotton fabric composites. *Polym Testing*, 23(2) **2004**, 131–5.
- [39] **L. A. Pothan, S. Thomas, N. R. Neelakantan**. Short banana fiber reinforced polyester composites: Mechanical, failure and aging characteristics. *J Reinfor Plast Compos*; 16 (8), **1997**, 744–65.

- [40] **H. D. Rozman, K. W. Tan, and R. N. Kumar.** The effect of lignin as a compatibilizer on the physical properties of coconut fiber – polypropylene composites, *European Polymer Journal*, vol. 36, **2000**, 1483-1494.
- [41] **O. Owolabi, T. Czvikovszky, and I. Kovacs.** Coconut-fiber-reinforced thermosetting plastics," *Coconut-fiber-reinforced thermosetting plastics*, 30, **1985**, 1827-1836.
- [42] **K. Joseph, S. Thomas, C Pavithran, M Brahmakumar.** Tensile properties of short sisal fiber-reinforced polyethylene composites. *J Appl Polym Sci*, 47(1) **1993**, 1731–1739.
- [43] **S. Varghese, B. Kuriakose, S. Thomas.** Stress relaxation in short sisal fiber-reinforced natural rubber composites. *J Appl Polym Sci*, 53(8) **1994**, 1051–60.
- [44] **N. L. Garcia de Rodriguez, W. Thielemans, A. Dufresne.** Sisal cellulose whiskers reinforced polyvinyl acetate nanocomposites, *Cellulose*, 13, 3, **2006**, 261–270.
- [45] **G. Gong, J. Pyo, A. P. Mathew, K. Oksma.** Tensile behavior, morphology and viscoelastic analysis of cellulose nanofiber-reinforced (CNF) polyvinylacetate (PVAc) Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing, 42, 9, **2011**, 1275-1282.
- [46] **K. L. Fung, X. S. Xing, R. K. Y. Li, S. C. Tjong, Y. W. Mai.** An investigation on the processing of sisal fiber reinforced polypropylene composites. *Compos. Sci. Technol.* 63, **2003**, 1255–1258.
- [47] **F. Vilaseca, A.V. Gonzalez, P. J. H. Franco, M. A. Pèlach, J. P. Lopez, P. Muti,** Biocomposites from abaca strands and polypropylene, Part I: Evaluation of the tensile properties, *Bioresource Technology* 101, **2010**, 387–395.
- [48] **P. Wambua, J. Ivens, I. Verpoest.** Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics, *Composites Science and Technology*, 63, 9, **2003**, 1259-1264.
- [49] **A. K. Jahangir, A. K. Mubarak, I. A. G Rabiul.** Mechanical, Thermal and Interfacial Properties of Jute Fabric-Reinforced Polypropylene Composites: Effect of Potassium Dichromate *Materials Sciences and Applications*, 1, **2010**, 350-357.
- [50] **A. L. Leão, J. C. Caraschi, I. H. Tan.** Curaua Fiber—A Tropical Natural Fibers from Amazon Potential and Applications in Composites.
- [51] **A. K. Bledzki, A. A. Mamun, O. Faruk.** Abaca fiber reinforced PP composites and comparison with jute and flax fiber PP composites, *Express Polym. Lett.*1, **2007**, 755–762.
- [52] **J. M. Felix, P. Gatenholm.** Effect of transcrystalline morphology on interfacial adhesion in cellulose/polypropylene composites. *J Mater Sci*, 29(11) **1994**, 3043–3049.

- [53] **D. Basu, A. N. Banerjee, A. Misra.** Comparative rheological studies on jute-fiber- and glass-fiber-filled polypropylene composite melts. *J Appl Polym Sci*, 46 (11) **1992**, 1999–2009.
- [54] **M. Avella, E. Martuscelli, B. Pascucci, M. Raimo, B. Focher, A. Marzetti.** A new class of biodegradable materials: Poly-3-hydroxy-butyrate/steam exploded straw fiber composites. I. Thermal and impact behaviour. *J Appl Polym Sci*, 49(12) **1993**, 2091–103.
- [55] **A. R. Sanadi, R. Rowell, D. F. Caulfield.** Agro-based fiber/polymer composites, blends, and alloys. *Polymer News*; 21(1), **1996**, 7–17.
- [56] **M. Zampaloni, F. Pourboghrat, S. A. Yankovich, B.N. Rodgers, J. Moore, L.T. Drzal, A. K. Mohanty, M. Misra.** Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions, *Compos.: Part A* 38, **2007**, 1569–1580
- [57] **D. S. Suhad, J. S. Mohaiman, Z. Leman, M. T. H. Sultan, M. R. Ishak, F. Cardona.** Physical, Mechanical, and Morphological Properties of Woven Kenaf/Polymer Composites Produced Using a Vacuum Infusion Technique. *International Journal of Polymer Science*, **2015**.
- [58] **S. Biswas, A. Satapathy.** A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo–epoxy and glass–epoxy composites. *Materials and Design*, **2010**, 31, 1752-1767.
- [59] **S. Jain, R. Kumar, U. C. Jindal.** Mechanical behavior of bamboo and bamboo composite. *J Mater Sci*; 27 (17) **1992**, 4598–604.
- [60] **S. V. Prasad, C. Pavithran, and P. K. Rohatgi.** Alkali treatment of coir fibers for coir-polyester composites, *Journal of materials science*, 18, **1983**, 1443-1454.
- [61] **J. Rout, M. Misra, and S. S. Tripathy.** Influence of fibre treatment on the performance of coir-polyester composites. *Composites science and Technology*, 61, **2001**.
- [62] **V. G. Geethamma, R. Joseph, S. Thomas.** Short coir fiber-reinforced natural Rubber composites: Effects of fiber length, orientation and alkali treatment, *Journal of applied polymer science*, 55, **1995**.
- [63] **A. N. Towo, M. P. Ansell.** Fatigue of sisal fibers reinforced composites: Constant-life diagrams and hysteresis loop capture. *Composites Science and Technology*, 68, **2008**, 915-924.

- [64] **S. Mishra, M. Misra, S. S. Tripathy, S. K. Nayak, A. K. Mohanty.** The influence of chemical modification on the performance of sisal polyester biocomposites. *Polym Compos*; 23(2) **2002**, 164–70.
- [65] **M. Z. Rong, M. Q. Zhang, Y. Liu, G. C Yang, H. M Zeng.** The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisalreinforced epoxy composites. *Compos Sci Technol*, 61, **2001**, 1437–47.
- [66] **E. Balnois, F. Busnel, C. Baley, Y. Grohens.** An AFM study of the effect of chemical treatments on the surface microstructure and adhesion properties of flax fibers. *Composite Interfaces*, 14, **2007**, 7-9, 715-731.
- [67] **J. Gassan, A. K. Bledzki.** Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of fibres. *Compos Sci Technol*, 59, **1999**, 1303–1309.
- [68] **D. M. Panaitescu, A. M. Iorga, A. Z. Vuluga, A. D. Donescu, A. M. Dan, B. Serban, D. Florea.** Effect of interface in natural fiber–polymer composites, *Revue Roumaine De Chimie*, 52(4) **2007**, 409–414.
- [69] **K. Oksman, M. Skrifvars, J. F. Selin.** Natural fibers as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology*, 63, 9, **2003**, 1317-1324
- [70] **H. Takagi, S. Kako, K. Kusano, A. Ousaka.** Thermal conductivity of PLA-bamboo fiber composites, *Advanced Composite Materials*, 16, **2007**, 4.
- [71] **B. English, N. Starl, C. Clemons.** Weight Reduction: Wood versus Mineral Fillers in Polypropylene. *Proceeding of The Fourth International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, 12-14, **1997**, The Madison Concourse Hotel. P. 237-244.
- [72] **H. Kalaycioglu, G. Nemli.** Producing composite particleboard from kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) stalks. *Industrial Crops and Products*. 24(2), **2006**, 177 – 180.
- [73] **K. P. Nabédé,** Valorisation des plantes annuelles locales : culture du kénaf (*Hibiscus cannabinus*).et sa transformation en panneaux de fibres. *Lomé Mémoire de fin d'Etude Agronomique*, **2002**.
- [74] **J. Xu, G. Han, E. D. Wong, S. Kawai.** Development of binderless particleboard from kenaf core using steam-injection pressing. *J Wood Sci*, 49, **2003**, 327–332.
- [75] **J. Xu, R. Sugawara, R. Widyorini, G. Han, S. Kawai.** Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science* 50, **2004**, 62–67.
- [76] **S. Soulama,** Caractérisation mécanique et thermique de biocomposites à matrice Polystyrène recyclé renforcée par des coques de cotonnier (*Gossypium Hitsutum* L.)

- ou des particules de bois de Kéna (Hibiscus Cannabinus L.). Thèse de Doctorat de l'université de Technologie de Belfort – Montbéliard, **2014**.
- [77] **J. A. Youngquist, R. M. Rowell, N. Ross, P. Chow.** Dry-process hardboard made from pressurized refiner processed kenaf stalks. In: Proceedings of the 3d annual International Kenaf Association conference, 2, **1991** Tulsa, OK. p.25.
- [78] **C. Pavithran, P. S. Mukherjee, M. Brahmakumar, A. D. Damodaran.** Impact properties of natural fiber composites. Journal of Materials Science Letters. 6(8): **1987**, 882-884.
- [79] **K. G. Satyanarayana, A. G. Kulkarni, K. Sukumaran, S. K. G. Pillai, K. A. Cherian, P. K. Rohatgi.** On the possibility of using natural fiber composites. In: Marshall, I.H., ed. Proceedings of the 1st international conference on composite structures. London, England: Elsevier Applied Science Publications: **1981**, 618-632.
- [80] **E. Oman,** Manufacture of fiberboard. Patent, P.N: DE 934388, I.D: 550929, **1955**.
- [81] **C. Güler,** Research on the production of the composite panels from some agricultural residues. 11, 4, **2015**, 187-191 Online Issn 2069-7430 Issn-I 1841-4737.
- [82] **N. M. White, M. P. Ansell.** Straw-reinforced polyester composites. Journal of Materials Science. 18(5) **1983**, 1549-1556.
- [83] **A. A. Pablo, A. B. Ella, E. B. Perez, E. U. Casal.** The manufacture of particleboard using mixtures of banana stalk (saba: Musa compresso, Blanco) and Kaatoan bangkal (Anthocephalus chinensis, Rich. ex. Walp.) wood particles. Forpride Digest. 4: **1975**, 36-44.
- [84] **R. M. Gurjar,** Effect of different binders on properties of particle board from cotton seed hulls with emphasis on water repellency. Bioresource Technology. 43(2) **1993**, 177-178.
- [85] **M. Fujimoto, N. Taguchi, S. Hattori.** Manufacture of chaff boards. Assignee: Oshika Shinko KK. Patent, P.N. JP 63118203, I.D.: 880523. **1988**.
- [86] **B. C. Tobias,** Fabrication and performance of natural fiber-reinforced composite materials. International SAMPE Symposium and Exhibition. 35(1) **1990**, 970-978.
- [87] **H. J. Deppe, A. M. Stashevski.** Manufacture and testing of protected phenol-resin bonded flax particle boards. Holz als Roh- und Werkstoff. 32, **1974**, 411-413.

Chapitre II : Bois du palmier dattier

1. Histoire et origine du palmier:

Les premiers vestiges du palmier fossile ont été trouvés dans une roche qui remonte au Miocène inférieur, il fut décrit sous le nom de *Phoenicites pallavicinii*, Plusieurs fossiles, appartenant au genre *Phoenicites* ont été trouvés en France, en Suisse, en Italie du Nord, et ont été dénommés *phoenix dactylifera fossilis*. [1]. Cependant, aucun vestige de *phoenix* n'a été trouvé, jusqu'à présent, dans l'aire actuelle de culture du palmier dattier ; ce qui explique l'hypothèse de Drude qui considère l'Europe comme le centre d'origine du genre *phoenix* [2].

Le palmier dattier fut introduit sur les côtes orientales de l'Afrique par les Arabes, bien avant les premiers voyages des navigateurs européens de XV^{ème} siècle [3]. A partir de son aire d'origine, la culture du dattier s'est répandue dans l'ancien continent. Vers l'Est, la culture du palmier dattier progressa de la basse Mésopotamie vers l'Iran, 2500 ans avant J.C, puis en direction de la vallée de l'Indus [3]. Vers l'Ouest, Depuis l'Egypte, la culture du palmier dattier a gagné la Libye d'où elle progressa dans différentes directions : vers le Maghreb, elle se développa en Tunisie dans le Djerid ; en Algérie dans le Souf, Ouest Rhir, le Tidikel, la Saoura et les Zibans ; au Maroc dans le Tafilalet et la vallée du Drâa ; et enfin en Mauritanie, dans l'Adrar mauritanien. [2]. Actuellement la culture du dattier s'étend dans l'Hémisphère Nord préférentiellement dans les régions arides et semi-arides chaudes [4].

Le palmier dattier a été dénommé *Phoenix dactylifera* L. par Linne en 1734. *Phoenix* dérive de Phoinix, nom du dattier chez les Grecs de l'antiquité, qui le considéraient comme l'arbre des phoeniciens ; *dactylifera* vient du latin *dactylus* dérivant du grec *dactulos* signifiant doigt, en raison de la forme du fruit [3]. D'après [5], le genre *Phoenix* comporte douze espèces. L'espèce *dactylifera* L. se distingue des autres espèces du même genre par un tronc long et grêle et par des feuilles glauques [6]. Selon [3], le palmier dattier est classifié comme suit :

EmbranchementPhanérogames.
Sous-embranchement..... Angiospermes.
Classe..... Monocotylédones.

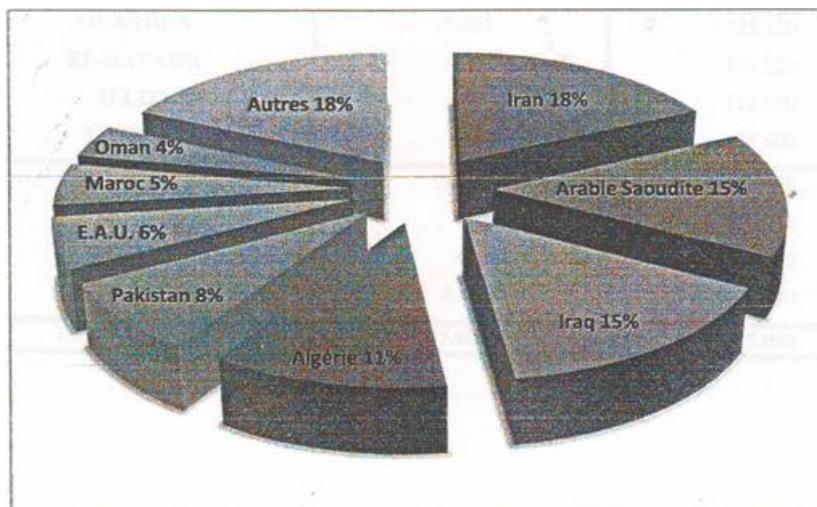


Figure 2.2 : Aire de distribution du palmier dattier [10]

2.2. En Algérie

Selon les statistiques les plus récentes (2015) du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR), le palmier dattier occupe en Algérie une superficie évaluée à 167.000 hectares, environ 2% pour un nombre de palmiers estimé à plus de 18,6 millions d'unités. La culture du palmier dattier occupe toutes les régions situées sous l'Atlas saharien (figure 2.3), commençant par les palmeraies de Biskra (Tolga) à l'Est, puis celles du M'Zab au centre et de Bni-Ounif à l'Ouest. A l'extrême Sud du Sahara, l'Oasis de Djanet constitue la limite méridionale de la palmeraie Algérienne. C'est dans le Nord-Est du Sahara qu'on trouve le 3/4 du patrimoine phoenicicole, à la région de Ziban, d'Oued-Righ et la cuvette d'Ouargla. On trouve également de petites palmeraies dans le sud des wilayas steppiques (Tbessa, Khenchla, Batna, Djelfa, Laghouat, Naâma, El Bayadh) [11]. La répartition des palmiers dattiers par wilaya se présente dans le tableau 2.1.

Selon l'institut international des recherches agricoles « Bioversity International », l'Algérie compte plus de 300 variétés de palmier dattier qui sont connus par des appellations traditionnelles selon les régions. Parmi les cultivars et les clones de palmier dattier on trouve : Deglet Nour, El Ghers, Mech degla, Tantboucht, Arechti, Safraya, Degla Beida / Kountichi, Litima, Hmraya, etc. la plupart de ces variétés proviennent de deux régions principales : la région de ziben (Biskra) et la région de Mzab. Plus de 50% des palmiers cultivés sont de la

Deglet Nour, bien qu'il existe entre les autres variétés des spécimens mieux adaptées, plus résistantes à la sécheresse et aux maladies et encore plus productives ou plus précoces.

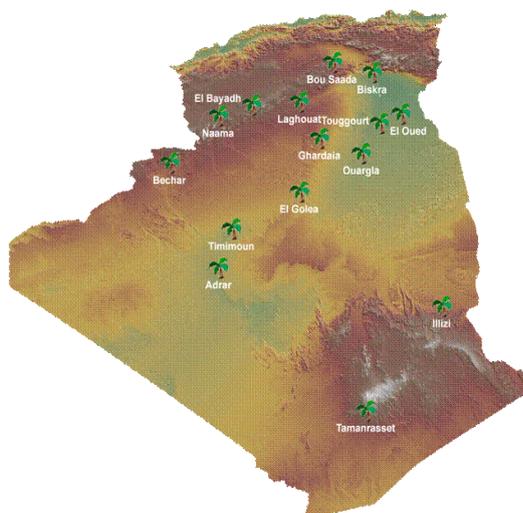


Figure 2.3 : Localisation des oasis au Sahara algérien [1]

Tableau 2.1 : Superficie et nombre de palmiers complantés sur le territoire national en 2015 (DSA : Direction des Services Agricoles, Biskra)

Wilaya	Production (qx)	Nombre de Palmier dattier	Superficie (hectares)
Biskra	4 077 900	4 315 100	42 910
El oued	2 474 000	3 788 500	36 680
Ouargla	1 296 300	2 576 600	21 980
Adrar	910 300	3 799 000	28 330
Ghardaïa	565 000	1 246 500	10 850
Béchar	300 500	1 639 800	14 120
Tamanrasset	109 400	688 900	7 000
Khenchela	68 200	124 400	770
Tébessa	20 500	61 800	820
Laghouat	16 200	37 300	320
Illizi	15 600	129 100	1 250
Batna	14 000	28 700	190
El Bayadh	10 300	63 900	640
Naama	10 200	50 600	510
Tindouf	8 400	45 200	430
Djelfa	6 800	10 100	100
M'Sila	0	0	0
Total :	9 903 600	18 605 100	166 900

2.3. Dans la wilaya de Biskra

La wilaya de Biskra et la première région phoénicicole avec 27,4 % de la superficie totale, compte un patrimoine phoénicicol de 4,31 millions de palmiers dattiers soit 23,19 % du patrimoine phoénicicol national, assurant la production de 4 077 900 qx des dattes (Ministère de l'Agriculture et de Développement Rural (MADR) 2015). Les palmeraies de la wilaya sont particulièrement concentrées dans les Zibans occidentales à Tolga, Foughala, Leghrous, Bordj Benazouz, Ourlal, Ouled Djellal et Sidi Khaled. Dans les Zibans orientales, la phoeniculture est pratiquée à un degré moindre à Djemora, Baranis, M'chounech, Loutaya et El-Kantara. La palmeraie de la wilaya est caractérisée au plan national par prédominance de la variété Deglet-Nour (soit 60% de palmiers dattiers [12]) connue par la performance de la qualité de ses dattes.

3. Le palmier dattier du point de vu botanique

Le palmier dattier est une monocotylédone, dioïque [13, 14] ; il existe des palmiers males qui sont «DOKKARS» et des palmiers femelles qui sont «NAKHIL » [1]. Le palmier n'est pas un arbre, mais une "herbe géante" (il ne possède pas de vrai bois au sens botanique). L'épaississement de son tronc résulte de l'addition répétée de faisceaux appelé "croissance secondaire ". Ce végétal mesure généralement entre 15 et 25 mètres et peut atteindre parfois les 30 mètres de haut, sa durée de vie peut dépasser 100 ans.

Le palmier dattier ne commence à produire ses fruits qu'à partir d'un âge moyen de cinq ans et continue sa production évaluée en moyenne de 400 à 600 Kg annuellement pendant 60 ans [11]. Il prospère dans les zones où la température est élevée plus de 20°C, l'humidité basse souvent inférieure à 40%.et la pluviosité presque nulle [1].

4. Cycle de vie des palmiers dattiers

Le genre *Phoenix* est unique dans sa morphologie mais aussi dans son développement, il est possible de distinguer aussi bien au niveau pratique que théorique cinq phases de développement dans la croissance des palmiers. Ces cinq phases ne sont pas définies strictement, elles sont décrites sur des critères morphologiques alors qu'elles correspondent en

réalité à des périodes physiologiques qui ne sont ni connues avec exactitude, ni bien comprises.

- **Stade 1 : La graine**

Elle possède un albumen (endosperme) dur et corné dont l'embryon dorsal est toujours très petit par rapport à l'albumen (2 à 3 mm).

- **Stade 2 : Phase germinative**

A ce stade, la plantule ou la germination vit sur les réserves de l'albumen. La première feuille est de forme linière et lancéolée, cette forme est une des caractéristiques du genre *Phoenix*.

- **Stade 3 : Construction de la plante**

Cette phase post germinative est la plus importante dans l'ontogénie des palmiers car elle aboutit à la constitution de l'axe primaire. La plante devient autotrophe et son système vasculaire doit se construire, durant cette phase appelée aussi "phase d'établissement" observe une série de feuilles à limbe para penné puis penné et qui ont une insertion spiralée caractéristique des genres *Phoenix*.

- **Stade 4 : la phase adulte végétative**

Le dattier va construire son tronc ou stipe et acquérir son « porte de palmier » par extension continue de l'axe végétatif. Cette phase où il produit essentiellement des feuilles et accumule des réserves peut durer de 3 à 8 ans. Le tronc couvert par la base des feuilles anciennes mortes et/ou coupées, peut atteindre 20 à 30 m de haut et environs 1 m de diamètre.

- **Stade 5 : La phase adulte reproductive**

Entre la 5^{ème} et la 8^{ème} année (pouvant aller jusqu'à 10 ans) le dattier commence à produire des inflorescences. Le dattier étant dioïque, ce n'est qu'à ce stade que l'on peut reconnaître son sexe (les quatre stades précédents apparaissent identiques chez les pieds mâles et femelles). Ce dioïque entraîne une allogamie obligatoire qui permet un brassage génétique mais aussi une hétérozygotie [1].

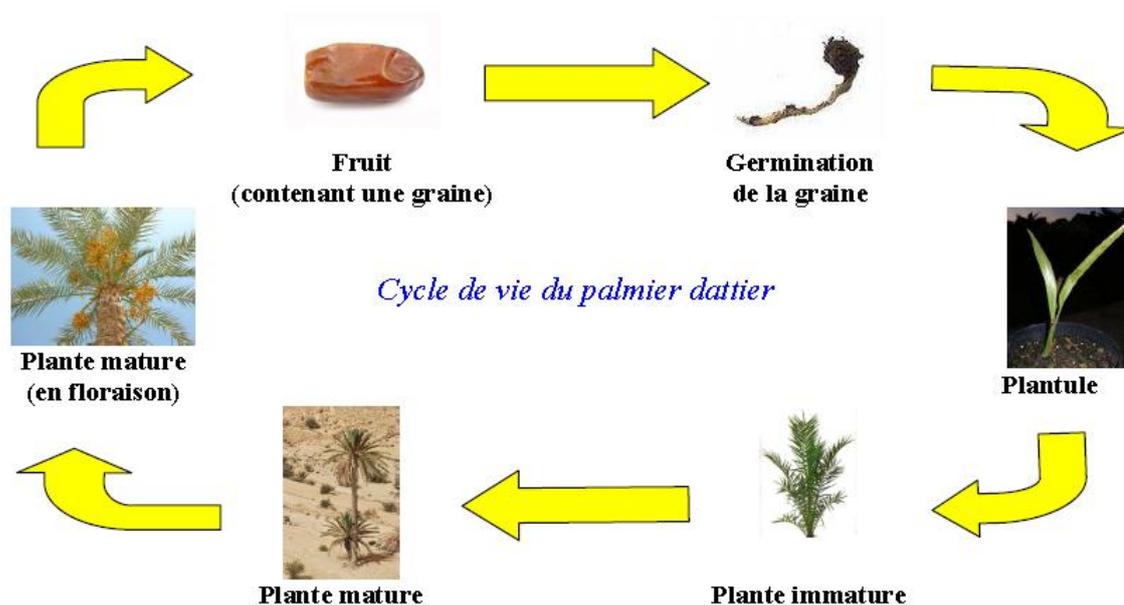


Figure 2.4 : Cycle de vie du palmier dattier

5. Description morphologique du palmier dattier

Le palmier dattier est aussi "*date palm*" en anglais, "*Nakhla*" en arabe, et "*Phoenix dactylifera*" L. en latin. Ce végétal est composé en générale d'un tronc unique non ramifié possédant au sommet une couronne de feuilles. En ce qui suit on va identifier les différents types de bois constituant le palmier dattier :

5.1. Les Racines :

Le système racinaire du palmier dattier est fasciculaire, les racines ne se ramifient pas et n'ont relativement que peu de racelles. Le bulbe ou plateau racinal est volumineux et émerge en partie au dessus du niveau du sol. Le système présent quatre zones d'enracinement [2, 3]:

- **Zone 1 :** Ce sont les racines respiratoires, localisées à moins de 0,25 m de profondeur qui peuvent émerger sur le sol.
- **Zone 2 :** Ce sont les racines de nutrition, allant de 0,30 à 0,40 m de profondeur.

- **Zone 3** : Ce sont les racines d'absorption qui peuvent rejoindre le niveau phréatique à une profondeur varie d'un mètre à 1,8 m.
- **Zone 4** : Ce sont les racines d'absorption de profondeur, elles sont caractérisées par un géotropisme positif très accentué. La profondeur des racines peut atteindre 20 m, (la figure 2.4).

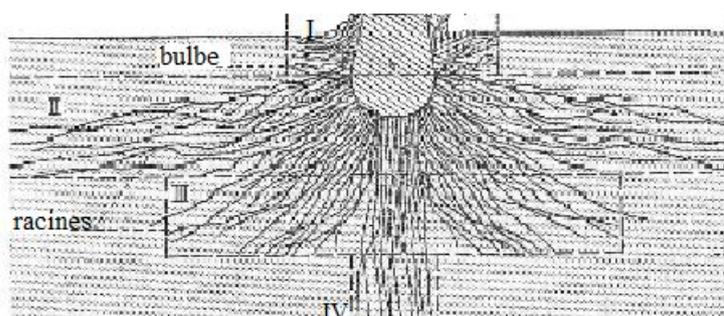


Figure 2.5 : Les quatre zones des racines de palmier

5.2. Le Tronc :

C'est aussi *"the Trunk"* ou *"the stem"* en anglais et *"Elgidhea"* en arabe. C'est un stipe généralement cylindrique, de 1 à 30m de hauteur, très garni en lifs. Son diamètre est de 45 à 55 cm, son élongation s'effectue dans sa partie coronaire par le bourgeon terminal ou phyllophore [3]. Il reste couvert pendant de nombreuses années des bases foliaires des anciennes feuilles desséchées qui finissent par tomber.

5.3. Fibrillum :

"Fibrillum" la même appellation est utilisé en Anglais, on l'appelle aussi fibres de surface de palmier dattier et *"Lif"* en Arabe. Le Fibrillum est la gaine de fibres qui entourent le stipe entre les bases des palmes. Il est constitué de la superposition de trois treillis, et a forme d'une plaque presque rectangulaire de longueur 300-500 mm et de largeur de 200-300 mm Le rôle écologique des fibres de surface de palmier est de renforcer le tronc et le protéger contre les chocs extérieurs et la chaleur du désert. Pendant l'entretien annuel des palmiers, chaque palmier peut se débarrasser d'environ 3kg de Fibrillum [15].



Figure 2.6 : Le Fibrillium et son emplacement dans le palmier

5.4. La Couronne

L'ensemble des palmes vertes forment la couronne ou la frondaison du palmier dattier. On dénombre de 50 à 200 palmes chez un palmier dattier adulte [16]. Elles sont émises par le bourgeon terminal ou « phyllophore », pour cela, on distingue : la couronne basale formée par les palmes âgées, la couronne centrale formée par les palmes adultes et les palmes du cœur qui sont les palmes non ouvertes et les palmes n'ayant pas encore leurs tailles définitives [1].



Figure 2.7 : La couronne du palmier

5.5. La Palme

La palme ou "*Palm* " en Anglais, "*Djérida* " en Arabe est une feuille pennée garnies des folioles régulièrement disposées en position oblique le long de la partie supérieure du rachis. Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues. Le nombre des palmes varie entre 30 et 150 palmes, disposées en spirale d'une longueur qui atteint 350 à 450 mm. Le palmier produit de 10 à 20 palmes par an selon

les variétés et le mode de culture. Ces dernières vivent et demeurent vertes de 3 à 7 ans avant qu'elles deviennent sèches et inclinées puis elles seraient ôtées par taillage [1, 15, 17].

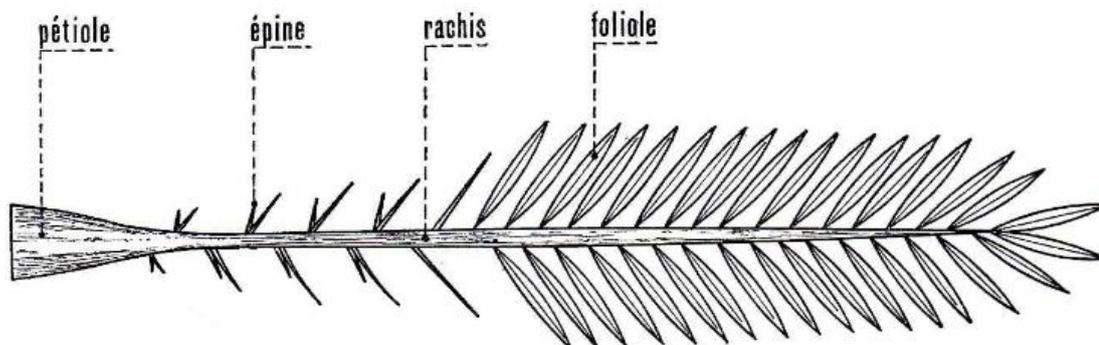


Figure 2.8 : Schéma d'une palme [3]

5.6. Le Pétiole :

Le pétiole ou " *Petiole* " en Anglais et " *Cornaf* " en Arabe. C'est la partie de la palme enfuie dans le Fibrillium, il est généralement large, son diamètre longitudinal atteint 30 cm, et sa longueur varie entre 25 et 50 cm selon l'espèce de palmier. Le pétiole contribue avec le Fibrillium dans le renforcement et la protection du tronc contre l'endommagement causés par les animaux, les chocs extérieurs, et contre le climat difficile [17].



Figure 2.9 : Des pétioles secs

5.7. Le Rachis :

Le Rachis est "*Rachis* " en Anglais et "*Nasle* " en Arabe. C'est le bois de la partie épineux de la palme, il se situe entre la partie de foliole et la partie de pétiole. C'est un bois dur et dense par rapport au bois des autres deux parties. Il a une forme semi-cylindrique d'un diamètre qui peut atteindre 7 cm et une longueur varié dans les palmes adultes entre 90 et 135 cm.



Figure 2.10 : Le Rachis

5.8. Les Epines

Les épines ou "*Thorns* " en Anglais et "*Chouques* " ou encore "*Sreb* " en Arabe. Les épines poussent sur les deux côtés du Rachis pour se déchirent par la suite en folioles, elles occupent d'environ 28% de longueur totale de la palme. La longueur des épines peut atteindre une valeur maximale de 24 cm par contre leur épaisseur ne dépasse pas 1cm. On nombre de 10 à 60 épines dans la palme distribuées individuellement ou dans des groupes de deux ou trois épines [17].



Figure 2.11 : Les Epines

5.9. Les Folioles :

Les Folioles ou " *Leaflets* " en Anglais et " *Saâf* " en Arabe. Les folioles sont les petites feuilles dispersées sur les deux côtés de palme. Elles ont un épiderme recouvert d'un enduit cireux et une forme pointue aux extrémités. L'adhérence avec la palme se fait sous différentes angles selon la variété du palmier. La partie occupée par les folioles représente 65% de longueur totale de la palme, elle contient des folioles individuelles et des folioles regroupés en deux, trois, quatre ou en cinq. La longueur des folioles et leur largeur dépendent de la variété du palmier et de l'entretien qu'il a subi et des conditions environnementale. Les folioles peuvent avoir une longueur qui variée entre 15 et 85 cm et sa largeur entre 1et 6 cm. Par contre le nombre de folioles dans une palme varie entre 120 et 240 selon la taille et la maturité de la palme [1, 17].



Figure 2.12 : Les Folioles

5.10. Les Spathes :

La Spathe ou " *Spathe* " en Anglais et " *Eldjof* " en Arabe. C'est une enveloppe qui recouvre une inflorescence avant son développement et qui se déchire automatiquement pendant la maturation. La spathe est de forme lenticulaire aplatie aux extrémités. Sa surface extérieure est brune, ferme et polie, et celle de l'intérieure est jaune et très lisse. La spathe femelle diffère de la spathe male; elle est plus longue et plus large que celui du male. Donc, on trouve des spathes mesurant de 25 à 100 cm de longueur. Généralement, le palmier male " *Dokkar* " produit des spathes plus que le palmier femelle " *Nakhla* ", il donne de 10 à 30 spathes par ans par contre la femelle ne donne que 6 à 18 spathes par ans et parfois elle ne donne rien durant l'année [1,15, 16]. .



Figure 2.13 : Les Spathes

5.11. Les Grappes :

La Grappe ou le Régime est "*Bunch*" en Anglais et "*Ardjoune*" ou "*Adhak*" en Arabe. Il est constitué par une tige principale qui se ramifie en pédicelles. Sur le même régime, la maturation des fruits est échelonnée. Le palmier émet 6 à 20 grappes mesurant de 25 à 200 cm de longueur et 4 à 8 cm de largeur. Le nombre de fleurs est de 20 à 60 par épillet donnant par la suite 20 à 60 fruits [15, 16].



Figure 2.14 : Les Grappes

5.12. Les Pédicelles :

Les Pédicelles sont "*Pedicles*" en Anglais et "*Chamarikh*" en Arabe. Ils sont un ensemble des pédicules provenant du même régime, ils sont constitués de deux parties ; une partie supérieure lisse et droite et une partie inférieure sinueuse sur laquelle les dattes sont alignées. Chaque grappe donne de 20 à 150 pédicelles mesurant de 10 à 100 cm [15, 16].



Figure 2.15 : Les Pédicelles rejetées après la récolte des dattes

6. Estimations mondiales et Algériennes du tonnage de bois de palmier dattiers

Outre sa production de dattes, le palmier dattier est une source de matière première d'une grande diversité. Son bois fait partie de celle-ci, il provient de déchet de palmier dattier récoltés chaque année après les travaux de son entretien. On peut distinguer huit types du bois renouvelable qui sont : le bois de fibrillium, de pétiole, de rachis, des épines, des folioles, de grappe, des pédicelles, de spathe. Ils constituent la matière première que nous tentons de valoriser dans la présente étude.

Notre estimation du tonnage du bois de déchet de palmier dattier se base sur les statistiques faites par le centre de recherche agricole des régions aride et semi aride de Biskra à propos de ce que fournis le palmier chaque année de déchets dans une palmeraie dans la province de la willaya de Biskra d'où on a extrait nos échantillons (Le Tableau 2.2). D'après cette estimation, le déchet annuel du palmier contient 27% de rachis, 24% de pétioles, 28,7% folioles, 6,3% fibrillium, 5% spathes, 4,9% grappes, 3,3% pédicelles, et 0,8% d'épines.

En tenant compte des dernières statistiques (2015) de MADR, l'Algérie compte 18 605 100 palmiers et la willaya de Biskra compte 4315100 palmiers. Selon la référence [9], le monde entier compte 120 millions palmiers. L'estimation de tonnage annuel de bois de palmier dattier dans le monde, dans l'Algérie et dans la willaya de Biskra sera comme présentée dans le tableau 2.3.

Tableau 2.2 : Estimation annuelle par palmier du bois de palmier dattier

Type de bois	Quantité / palmier /an	Poids en kg / palmier/an
Fibrillium	24	3
Palmes	24	30
Pétioles	24	11,37
Rachis	24	16,15
Epines	360	0,385
Folioles	3696	13,67
Grappes	7	2,34
Pédicelles	350	1,57
Spathes	7	2,38

Tableau 2.3 : Tonnage annuel du bois de palmier dattier calculé en 2015

Type de bois	Wilaya de Biskra	L'Algérie	Le monde
Fibrillium	12 945, 3	55 815, 300	360 000
Palmes	129 453	558 153, 000	3 600 000
Pétioles	49 062, 687	211 539, 987	1 364 400
Rachis	69 688, 865	300 472, 365	1 938 000
Epines	1 661, 313	7 162, 963	46 200
Folioles	58 987, 417	254 331, 717	1 640 400
Grappes	10 097, 334	43 535, 934	280 800
Pédicelles	6 774, 707	29 210, 007	188 400
Spathes	10 269, 938	44 280, 138	285 600
Total	348 940, 561	1 504 501, 411	9 703 800

7. Propriétés du bois de palmier dattier

7.1. Propriétés Morphologiques

Les coupes transversales du bois de différentes parties de palmier dattier rapportées dans la littérature [18-22] montrent qu'il y a une différence entre les diamètres de lumen des parties de bois étudiées (figure 2.16). Néanmoins, elles représentent la même texture et la même structure interne. En effet, la structure est poreuse formant des vaisseaux conducteurs de l'eau et d'autres liquides [22,23]. Ce sont de longs tubes, dont la paroi intérieure présente des épaissements qui vont entraîner la formation des disques ou des rainures de dispositions variées (figure 2.16 (a)). Ces tubes sont supposés être responsables du pouvoir hydrophile des fibres végétales [23]

La morphologie des fibres de fibrillium a été étudiée par plusieurs auteurs [21-23]. Sa longueur variée entre 100 et 500 mm tandis que son diamètre varié entre 0,1 et 1 mm ce sont des fibres larges par rapport aux autres fibres végétales. Elles sont constituées de plusieurs fibres multicellulaires, chaque fibre multicellulaire contient un lumen central de diamètre 2-5 μm [22]. Ceci justifié le rôle important joué par ce type de fibre pour protéger le tronc de la chaleur extérieure [15, 17]. En comparant la longueur moyenne des fibres du tronc, du rachis et de pétiole (figure 2.17), les fibres de tronc sont les plus longues et les fibres de pétiole sont les plus courtes [24]. De même, le diamètre des fibres du tronc est plus large que celui des fibres de pétiole (quatre fois plus large) [20, 24]. Dans un autre lieu, lorsqu'on le compare avec le diamètre des fibres de folioles, on trouve qu'il est plus de 4 fois plus large [19, 24, 25]. Cette différence en taille revient certainement à la nature de fonction de chaque organe dans le palmier dattier.

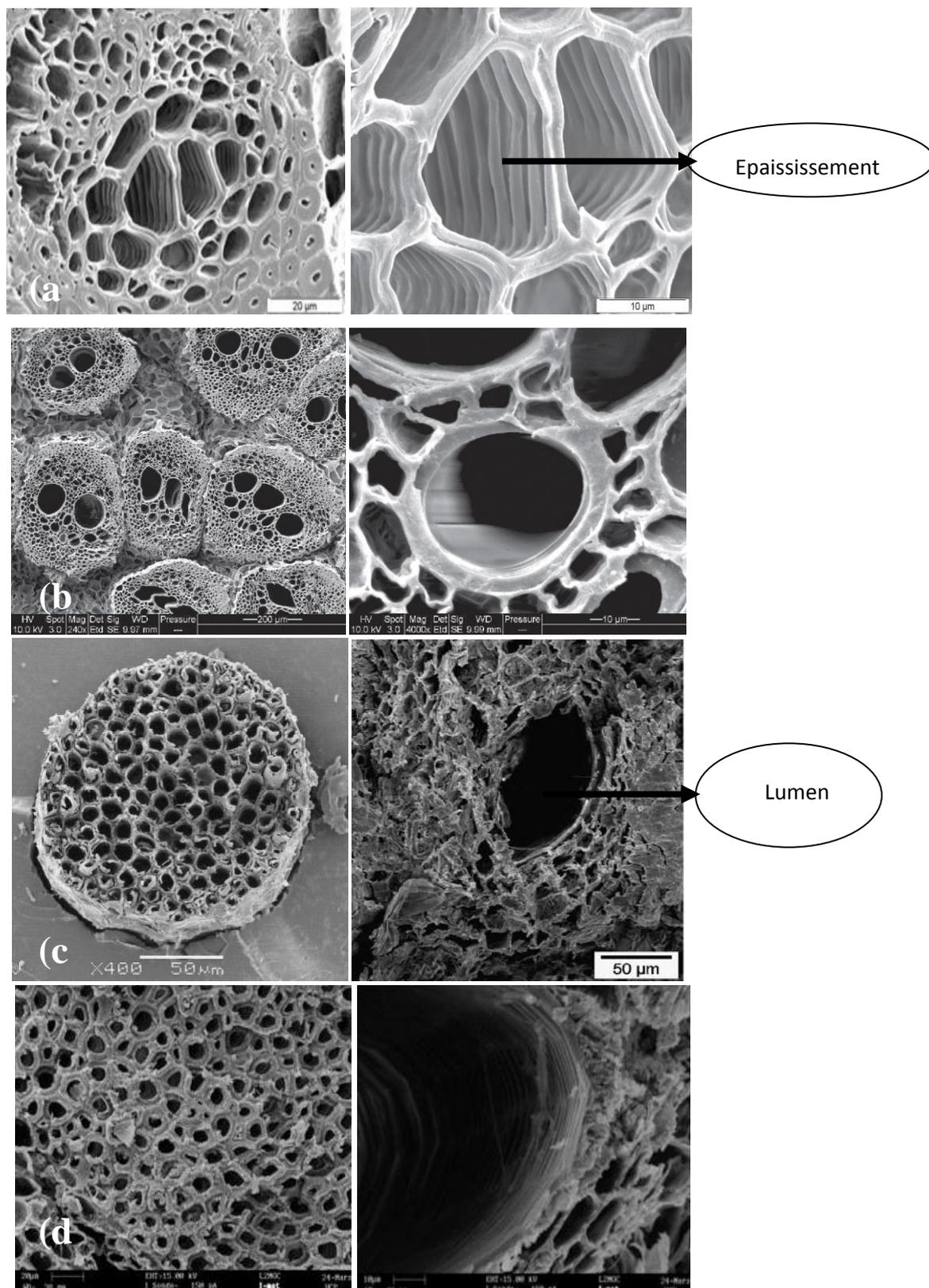


Figure 2.16 : Micrographie d'une coupe transversale du bois de différentes parties de palmier dattier :
 (a) bois de foliole [19], (b) bois de rachis [25], (c) fibrillum [21], (d) bois de pétiole [18]

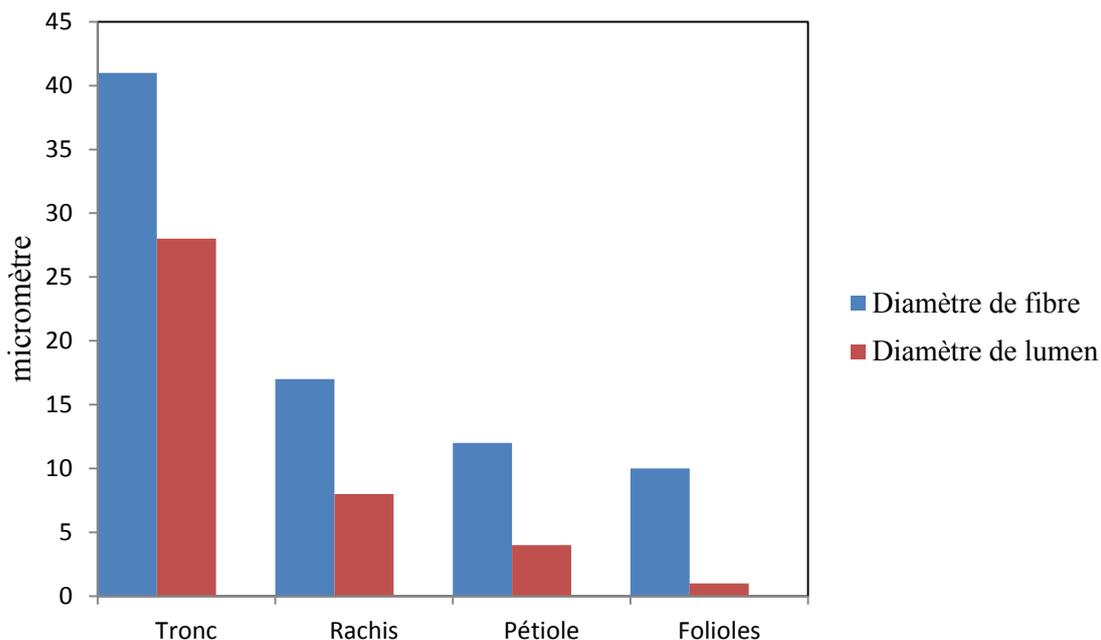


Figure 2.17 : Comparaison des paramètres structuraux des fibres de palmier dattier

7.2. Propriétés chimiques

Le bois de palmier dattier comme les autres fibres végétales est constituées de trois composants majoritaires : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Le reste de la composition comprend les extractibles, les hydrosolubles et les cendres (matière minérale) [19, 22, 26-33]. Les teneurs en cellulose, hémicellulose et en lignine du bois de palmier dattier varient d'une variété à l'autre et dans la même variété elles dépendent de l'organe, de l'âge et de l'environnement de croissance du palmier dattier [26, 28, 32, 33]. Toutefois, les proportions de chaque constituant rapportées dans la plus part des études concernant le même organe ne sont pas trop différentes. Le bois de palmier est très riche en lignine. Le taux moyen est de l'ordre de 27%, celui de cellulose est de l'ordre de 37% et celui de l'hémicellulose est de l'ordre de 28% [26, 28, 32-34]. La composition chimique moyenne de quelques types de fibres de palmier dattier est donnée dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Composition chimique de quelques types de bois de palmier dattier

Type de bois de palmier dattier	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Autres (%)
Folioles [19]	35	28	27	10
Folioles [32]	30,3	Nd	31,2	Nd
Folioles [25]	33,5	26	27	13,5
Rachis [26]	41,2	28,5	27,3	3
Rachis [28]	45	29,8	27,2	5
Rachis [35]	44	28	14	2,5
Rachis [32]	43,1	Nd	23,8	5,6
Fibrillum [36]	43	8	35	14
Fibrillum [22]	46	18	20	16
Pétiole [27]	75,6		16,8	7,6
Tronc [37]	45	23	Nd	Nd

7.3. Propriétés mécaniques

Le comportement mécaniques du bois de palmiers dattiers et généralement celui des fibres végétales est fortement dépendant de plusieurs paramètres à savoir les constituants microstructurales, les conditions de croissance, l'âge de la plante, la longueur et le diamètre de l'échantillon, les conditions de test comme la température, l'humidité de milieu, le temps de l'expérience, et la vitesse de test [38, 39]. En fait, cette corrélation est certainement l'origine de la variation et de la dispersion des données expérimentales des propriétés mécaniques du bois de palmier dattier rapportées dans la littérature pour le même type de bois. Probablement c'est la raison pour laquelle il n'y a pas suffisamment de données expérimentales dans la littérature concernant le comportement mécanique de ce type de bois. Néanmoins, d'après ce qui est disponible comme résultats dans la littérature [21, 22, 40-42],

les propriétés mécaniques du bois du palmier apparaissent faibles devant celles des fibres conventionnelles comme les fibres de verre et de carbone et celles de la plus part des fibres végétales usuelles, mais elles sont comparables à celles des fibres de coco (tableau 2.5).

En outre, L'étude expérimentale réalisée sur les fibres de fibrillium [21, 36] montre que l'humidité augmente légèrement la résistance et l'allongement à la rupture des fibres de palmier dattier. Par contre, elle diminue la valeur du module d'élasticité par rapport à son état sec. Cette étude montre également que la résistance à la traction et l'allongement à la rupture de ces fibres dépendent sensiblement de leur longueur, les fibres longues diminuent la résistance à la traction mais augmente le module d'Young. Cela pourrait être dû à l'homogénéité ou à la déféctuosité de la fibre. Par ailleurs, l'étude faite sur le même type de fibre [22] à propos de l'influence du diamètre de la fibre sur le comportement mécanique de celle-ci, indique une diminution du module de Young en fonction de l'augmentation du diamètre (figure 2.18). Ceci étant dû à l'augmentation de la surface du lumen de la fibre. Même résultats ont été illustrés dans d'autres travaux concernant les fibres naturelles de lin et d'abaca [43, 44].

D'un autre coté, le travail effectué sur le bois de rachis déterminant ses propriétés mécaniques [45], montre qu'il ya une différence notable entre les propriétés mécaniques des fibres de la paroi du bois et celles du cœur. Il a trouvé que la résistance à la traction des fibres extraites de la surface du bois variée entre 116 à 208 N/mm². Tandis que celle extraites de l'intérieur du bois est près de moitié de celle de surface, le module d'élasticité du bois se trouve entre 10 et 30 KN/mm².

Par ailleurs, Les auteurs de la référence [42] ont montré que les propriétés mécaniques de bois de palmier dattier peuvent s'améliorer en effectuant un traitement chimique sur le bois. Les résultats des propriétés mécaniques du bois de fibrillium avant et après le traitement chimique avec différentes concentrations de NaOH sont présentés dans la figure 2.19. L'amélioration de la résistance à la traction du bois du palmier dattier a été observée lorsque le traitement chimique a été appliqué. La résistance maximale a été observée à la valeur 1% de NaOH, elle diminue par la suite avec l'augmentation de la concentration de NaOH.

De même les résultats rapportés dans la référence [46] montrent que le traitement chimique par NaOH de concentration 1 et 2% pendant des durées d’immersions de 48 et 72 h améliore les propriétés mécaniques du bois de grappe. Les valeurs optimisées ont été identifiées par 2% de concentration de NaOH pendant 48h d’immersion.

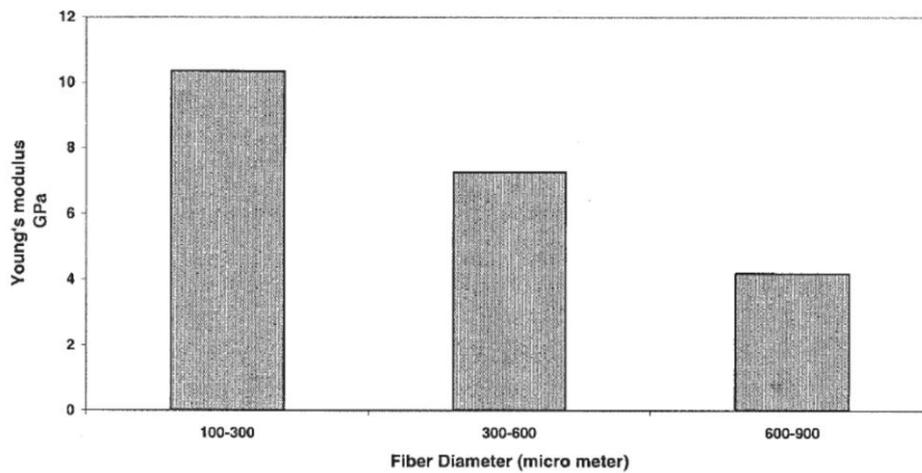


Figure 2.18: la valeur du module de Young des fibres de palmier dattier en fonction du diamètre de fibre

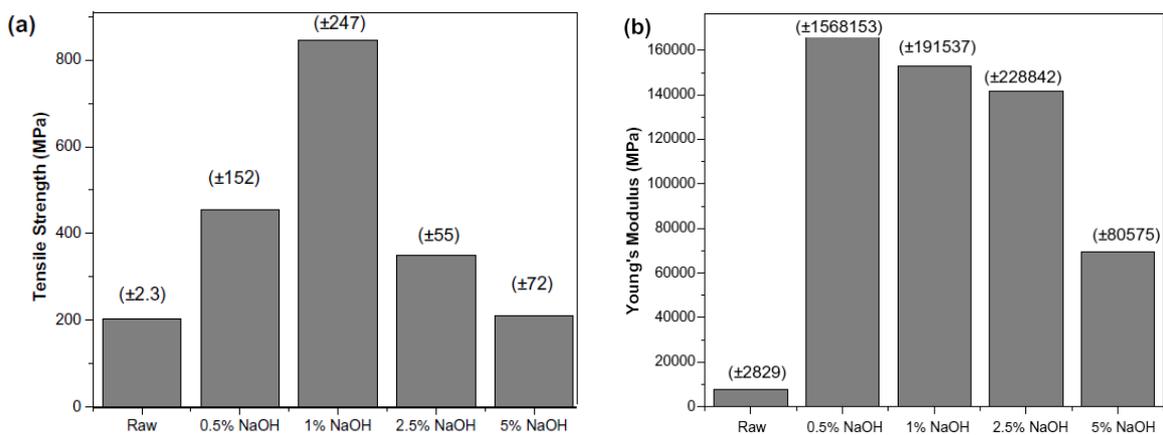


Figure 2.19: L’effet du traitement par le NaOH sur (a) La résistance à la traction, (b) Le module de Young du bois de palmier dattier

Tableau 2.5 : Propriétés mécaniques en traction du bois de palmier dattier en comparaison aux autres fibres naturelles et aux fibres de renfort conventionnelles [38].

Matière végétale	Densité (g/cm³)	Allongement (%)	Résistance en traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Cotton	1.5-1.6	7.0-8.0	287-597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
Flax	1.5	2.7-3.2	345-1035	26.7
Chanvre	1.4	1.6	900-1080	10-25
Ramie	-	3.6-3.8	400-938	61.4- 128
Sisal	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
Coco	1.2	30.0	150-175	4.0-6.0
E-verre	2.5	2.5	2000-3500	70.0
Carbone	1.4	1.4-1.8	4000	230.0-240.0
Fibrillium [21]	1.3–1.45	16	170	4.74
Fibrillium [22]	0.9 –1.5	5-10	170–275	5-12
Fibrillium [42]	-	5–10	58–203	2–7.5
Pétiole [41]	-	3.39	0.73	0.23
Pétiole [27]	-	3.25	50	3
Folioles [40]	0.91	4-5	210	5.2

7.4. Propriétés physiques

Les propriétés physiques du bois de palmier dattier ne se diffèrent pas trop lorsqu'elles sont déterminées dans des variétés différentes [20, 21, 23] ou à l'intérieur de la même variété [21, 24]. Les résultats expérimentaux des masses volumiques mesurés pour quelques types de bois de palmier dattier à savoir : le bois de grappe, de tronc et de pétiole provenant de différentes variétés (la variété de Deglet-Noor, la variété de Mech-deglet et la variété d'Elghers), ont montré que le bois de pétiole présente la masse volumique la plus faible parmi

les fibres des autres parties pour toutes les variétés étudiées. En revanche, La masse volumique de tronc de variété Deglet-Nour est la plus élevée. Ils ont montré également que la masse volumique de la grappe est proche de celle du tronc pour les variétés Ftimi et Rtoub et elle est d'environ une fois et demie plus importante que celle de pétiole [20].

Dans un autre lieu. Les résultats obtenus pour le bois de fibrillium extrait des quatre variétés de palmiers dattier (la variété de Dokar, de L'Elgars, de Deglet-Noor, et de Deglet-Bida) [20, 21] ont montré des propriétés physiques très voisines quelle que soit la variété étudiée. La masse volumique variée entre $512,21 \text{ kg/m}^3$ et $1088,81 \text{ kg/m}^3$ et la porosité et de l'ordre de 35%. Bien qu'il ait été noté que le taux d'absorption du bois de Dokar et d'Elgars est relativement supérieur à celui du bois de Deglet-Noor, et de Deglet-Bida, le taux d'absorption à la saturation des quatre types du bois est de l'ordre de 132,5%, il se situe entre le taux des fibres de sisal (230%) et celui des fibres de coco (100%).

7.5. Propriétés thermiques et diélectriques

La conductivité thermique du bois de palmier dattier a été mesurée pour la première fois en 1988 pour le bois folioles [47], les résultats ont révélé des valeurs de conductivité faibles comprises entre 0,122 et 0,210 W/m°C. Les valeurs sont très proches de la conductivité thermique du bois (0,12 - 0,16 W/mC) [48] ce qui fait de ce type de bois un candidat prometteur dans la production des matériaux isolants. Les propriétés thermiques, et diélectriques du bois de pétiole, de grappe, et de tronc issus de différentes variétés de palmier dattier ont été également étudiées par la suite [20]. Les résultats expérimentaux indiquent qu'il n'y a pas une différence entre la conductivité thermique mesurée dans le sens horizontal et celle mesurée dans le sens vertical aux fibres du bois de pétiole de la variété Deglet-nour. Cette dernière qui vaut environ $0.08 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ est supérieure à celle de grappe et de pétiole des autres variétés, mais elle est inférieure à celle du tronc quelque soit la variété du palmier dattier étudiée (figure 2.20). En outre, les résultats ont montré que la permittivité diélectrique, des parties de palmier cités au-dessus variée légèrement d'une partie à l'autre et d'une variété à l'autre de palmier dattier, bien qu'il est claire que la permittivité de pétiole provenant de la variété Mech-deglet est relativement supérieure. Ceci revient à la différence de taux d'humidité dans les différents matériaux étudiés.

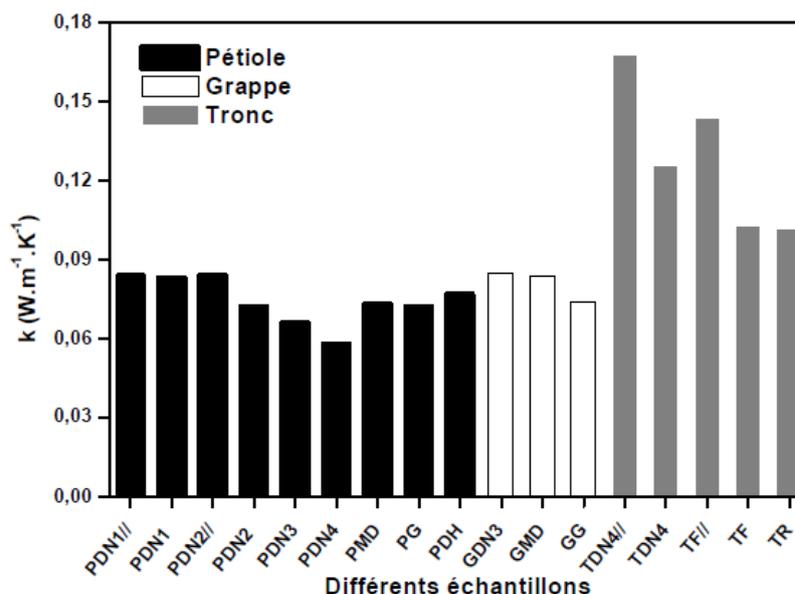


Figure 2.20 : La conductivité thermique de différentes parties de palmier dattier.

7.6. Le comportement thermique du bois de palmier dattier

L'analyse de la dégradation thermique du bois de palmier dattier a été rapportée dans la littérature [22, 42, 49]. L'étude faite sur le comportement thermique du bois de fibrillium montre que la pyrolyse de ce dernier passe par une légère diminution du poids jusqu'à la température 100°C puis une stabilisation jusqu'à la température 250°C. Au-delà de la température 250°C, commence la dégradation thermique de la matière fibreuse. Un comportement thermique similaire a été illustré dans l'étude [42] qui porte sur l'analyse thermogravimétrique des bois de folioles, de rachis, de grappe, et de tronc de palmier dattier. Les résultats rapportés montrent que l'évolution de la décomposition thermique sous air et sous atmosphère inerte est presque similaire pour les quatre types de bois, elle suit le même comportement de dégradation des autres fibres lignocellulosiques. La légère différence entre les profils de perte de masse des quatre types de fibres étudiées a été attribuée à la différence des taux d'humidité et des taux de composants volatiles dans chaque type du bois ainsi qu'à la différence en teneurs des constituants microstructurales de ce dernier. En outre, les résultats rapportés dans [49] ont montré que le traitement thermique par la soude peut améliorer la résistance du bois de palmier dattier à la dégradation thermique.

8. L'incorporation du bois de palmier dattier dans une matrice polymère

Le bois de palmier dattier a fait l'objet de nombreuses études [9, 19, 24, 25, 37, 29, 35, 47, 50-67] relatives à la faisabilité de l'utiliser avec une matrice polymère pour élaborer des nouveaux matériaux composites avec des applications utiles ou alternatifs aux matériaux conventionnels. Le bois de palmier dattier a été incorporé aussi bien dans des matrices thermodurcissables que thermoplastiques mais rarement dans des matrices synthétiques (des matrices dont la composition est la synthèse de quelque type de plante) ou naturelles.

8.1. L'incorporation dans des matrices polymère thermoplastiques

La littérature montre que les matrices thermoplastiques les plus couramment utilisées avec le bois de palmier dattier sont le polypropylène (PP) et polyéthylène (PE) tandis que le type de bois le plus choisi pour renforcer ce type de matrice est celui de foliole et de rachis.

Abu-Sharkh et H. Hamid [50] ont investigué l'incorporation des particules larges du bois de foliole dans une matrice plastique de polypropylène (PP) avec la présence des UV stabilisateurs (Irgastab and Tinuvin) pour déterminer l'influence de cette matière cellulosique ainsi que celle des stabilisateurs utilisés sur la stabilité du matériau composite élaboré dans des conditions climatiques naturelles et accélérées de l'Arabie saoudite. L'étude a montré que le composite élaboré est plus stable que le polymère (PP) seul sous des conditions climatiques rigoureuses. En outre, l'ajout d'un réactif compatibilisateur (Epolene E-43) dans le composite améliore l'adhésion des coupeaux avec la matrice (PP) au niveau de l'interface et par conséquence améliore la stabilité du matériau et ses propriétés mécaniques dans des conditions climatiques difficiles par rapport aux composites non compatibilisés.

De son côté, Mahmoudi [51] s'est intéressé aux propriétés mécaniques d'une matrice plastique de polypropylène PP modifiée lorsqu'elle est renforcée par des fibres issues du bois de rachis de palmier dattier. L'étude montre que l'incorporation des fibres non modifiées dans la matrice PP n'améliore pas la valeur de la résistance à la traction de la matrice. Par contre, l'addition d'un agent de couplage (compatibilisateur) comme le copolymère d'anhydride maléique avec le renfort a amélioré notablement les caractéristiques mécaniques du composite dont le taux en poids du renfort dépasse 25%.

Par ailleurs, Noorunnisa Khanam et al. [52] ont également testé l'effet de l'ajout de 1% et 2% en poids du compatibilisateur anhydride maléique sur les caractéristiques d'un

matériau composite à base de 20% en poids de copeaux de bois de foliole de palmier dattier non traités et le mélange de trois polymères recyclés : polyéthylène faible densité recyclé (RLDPE), polyéthylène haute densité recyclé (RHDPE), et polypropylène recyclé (RPP). Les résultats montrent que la présence des copeaux de foliole dans le mélange de polymères a un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques et thermiques mais un effet négatif sur le taux d'absorption du composite. Toutefois, l'effet est plus bénéfique lorsque 1% en poids d'anhydride maléique est ajouté au mélange, les caractéristiques mécaniques sont augmentées, la stabilité thermique est améliorée et le taux d'absorption du composite est diminué. La même matrice ternaire constituée de polypropylène (PP), polyéthylène faible densité (LDPE), et polyéthylène haute densité (HDPE), renforcée par les fibres de bois de foliole a été étudiée par Zadeh et al. [53]. L'introduction des fibres de palmier indique des bonnes propriétés mécaniques du composite. Le retardateur de flamme, hydroxyde de magnésium, a réduit un peu les propriétés mécaniques du composite, mais a amélioré sa résistance à la dégradation thermique. Cette dernière augmente au fur et à mesure que la concentration des particules $Mg(OH)_2$ augmente dans le composite. L'étude montre également que l'ajout d'un compatibilisateur dans le mélange améliore bien les propriétés mécaniques, les valeurs optimales de ces propriétés et de la stabilité thermique sont obtenues pour un taux de 10% des fibres de foliole et 1% d'agent de couplage (MAPE).

En plus du bois de rachis, Mahdavi [24] a étudié l'incorporation des fibres issues du bois du tronc, et de pétiole dans une matrice plastique de polyéthylène haute densité HDPE. L'observation de MEB a montré qu'il n'y a pas un détachement des fibres de la matrice, ce qui implique une bonne adhésion au niveau de l'interface, et par conséquent des bonnes propriétés mécaniques du composite HDPE/fibres de palmier, elles sont meilleures que celles de la matrice HDPE non renforcée. Selon cette étude, les composites à base des fibres de pétiole révèlent une résistance à la traction meilleure que celles des autres composites. Cependant, le faible taux en lignine qui caractérise les fibres de pétiole incorporées augmentent la sensibilité de ces composites à l'eau.

8.2. L'incorporation dans des matrices polymères thermodurcissables

Le renforcement des matrices thermodurcissables par le bois de palmier dattier afin d'élaborer des composites à diverses applications a été largement abordé par la littérature. Les

matrices les plus investiguées sont la résine polyester insaturé, la résine époxy, le phénol et l'urée formaldéhyde.

L'utilisation de la résine polyester insaturé avec les fibres de bois de folioles et de rachis a été rapportée dans le travail d'El Wazzan [54]. IL a investigué l'élaboration des panneaux en utilisant la méthode de moulage par injection basse pression de la résine polyester insaturé sur le Mat de fibres. L'influence de la distribution des fibres de palmier dattier et de leur taux en volume sur les propriétés mécaniques et morphologiques du composite a été étudiée. Les résultats montrent que la valeur moyenne de la résistance à la traction calculée variée entre 55,2 et 86,1 MPa pour les fibres longues unidirectionnelles et atteint 76.9 MPa pour les fibres tissées de palmier dattier. Les résultats montrent également que l'incorporation du taux 60% en volume des fibres de palmier diminue la rigidité de la matrice polyester non renforcée de 10%. Tandis que l'observation au MEB montre que les mauvaises caractéristiques du nouveau matériau élaboré reviennent au détachement des fibres de la matrice, au défaut inter laminaire, et au délamination du matériau.

De leur coté Kaddami et al. [29] ont employé la même matrice et celle d'époxy pour élaborer deux types de matériaux composites à base de bois de foliole sous forme filler. Les propriétés morphologiques et mécaniques des matériaux élaborés ont été caractérisées. Les résultats de la caractérisation ont montré que l'adhésion au niveau de l'interface est bien meilleure dans le cas des composites à base de la résine époxy que celle de la résine polyester. De plus, l'étude montre que l'estérification du filler dans un milieu alcalin en utilisant des anhydrides acétique et maléique a réussi d'améliorer les propriétés mécaniques du composite époxy/fibres lignocellulosique de bois de folioles de palmier dattier. La résine de polyester insaturée a été également utilisée par Sihama Salih [27] pour élaborer un matériau composite à base des fibres extraites du bois de pétiole de palmier dattier. L'auteur a étudié l'influence du traitement chimique et mécanique par différentes charges des fibres de pétiole sur les propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques du composite élaboré. Les résultats indiquent que l'augmentation de la charge de la pression appliquée sur les fibres engendre une amélioration dans les propriétés d'isolation thermique et acoustique ainsi que une amélioration dans les propriétés mécaniques du composite préparé à différents taux volumiques de fibres. Les valeurs maximales atteintes par la résistance à la traction et par la dureté sont respectivement 133 et 106 MPa, elles correspondent aux valeurs optimisées de la pré-déformation 6 MPa et du taux de fibres incorporé 40%.

Par ailleurs, Sibih [19] a rapporté dans son travail les résultats de l'introduction des fibres lignocellulosiques issues du bois de foliole de palmier dattier, traitées et non traitées par oxydation au radical TEMPO, comme renfort fibreux dans la préparation des biocomposites à matrice poly époxyde (DGEBA/IPD). L'analyse chimique a montré que la répartition des constituants de la fibre après modification par oxydation au TEMPO est fortement modifiée, comparativement à la répartition des constituants de la fibre vierge non oxydée. Ceci résulte de la forte dégradation de la lignine dans le milieu d'oxydation fortement alcalin et d'une légère diminution du taux d'hémicelluloses. Cependant, la cristallinité de la fibre n'a pas été altérée. La caractérisation mécanique a révélé une augmentation des modules caoutchoutiques et vitreux des composites époxydes quand les fibres de palmier sont rajoutées, et quand le taux de fibres augmente. Cette augmentation est plus importante dans le cas des fibres modifiées pour les modules à l'état vitreux. Par contre, les résultats de choc Charpy ont montré que la résilience surfacique au choc diminue fortement en présence de fibres même modifiées. De plus, le processus de RTM (moulage par transfert de résine) a montré un effet positif de l'oxydation sur le déroulement de l'injection.

La fabrication des panneaux de particules est parmi les applications les plus importantes des matériaux composites visée par les chercheurs en utilisant les matrices therm durcissables avec le bois de palmier dattier. Les matrices les plus investiguées dans ce domaine sont l'urée formaldéhyde et le phénol formaldéhyde. El Morsy [35], dans son travail a étudié l'utilisation du bois de rachis avec la résine Phénol-formaldéhyde pour élaborer des panneaux à haute densité en utilisant la procédure de thermopressage. Le prétraitement des fibres de bois de rachis avec un alcalin, a participé en l'amélioration des propriétés des panneaux fabriqués.

La résine phénol formaldéhyde a été également utilisée avec le bois de folioles de palmier dattier dans le travail d'Al-Sulaiman [55]. Le comportement de la conductivité thermique des panneaux a été étudié en fonction de quatre paramètres à savoir : le type de résine (phénol formaldéhyde, bisphénol à deux composants), le processus d'élaboration (presse sous vide, autoclave), le taux du liant (35% de phénol-F, 25% de bisphénol), et enfin la distribution (unidirectionnelle ou dispersée) et la dimension (3, 300 mm) des coupeaux de folioles. Les résultats ont montré que les facteurs principaux qui affectent la conductivité thermique des panneaux élaborées sont le type de la résine, le taux de résine, et la pression effectuée, la distribution et la dimension des coupeaux de folioles n'ont aucun effet. La

conductivité thermique mesurée variée entre 0.17 et $0.24 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour les panneaux de la résine phénol-formaldéhyde et entre 0.16 et $0.20 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour les panneaux de bisphénol. Ces valeurs de conductivité thermique affirment une fois encore que le bois de foliole est convenable à la fabrication des matériaux isolants pour des applications diverses dans le domaine de construction.

D'un autre coté, El-Mousely [56] a étudié l'élaboration des panneaux de particules monocouches de bois de folioles avec la résine Urée formaldéhyde, pour évaluer leurs caractéristiques en les comparant avec des panneaux de lin élaborés dans les mêmes conditions. L'utilisation des conditions d'élaboration : 8% en poids sec de résine, pressage à chaud à 25Kg/cm^2 et à 150°C pendant 11 min a permis d'obtenir des panneaux à des caractéristiques mécaniques (rigidité et liaison interne) comparables à celles des panneaux de lin. Cependant, La résistance à la flexion est relativement plus faible et le taux d'absorption est plus grand que celui des panneaux de lin.

l'Iskanderani [57] a investigué le potentiel d'élaborer des panneaux agglomérés à base des copeaux de bois de rachis et la résine urée formaldéhyde. Les propriétés physiques de ces panneaux agglomérés rapportées dans cette étude révèlent des propriétés physiques excellentes pour les panneaux agglomérés monocouches qui peuvent être industrialisés à condition de bien gérer les conditions d'élaboration. Le même auteur dans un autre travail a étudié la faisabilité d'élaborer des panneaux de particules de bois de rachis et la résine urée formaldéhyde [58]. L'influence de plusieurs paramètres d'élaboration sur les propriétés mécaniques des panneaux de particules monocouches a été également illustrée dans cette étude. Les valeurs optimisées de la pression, la température, et la durée de pressage, obtenues pour les particules de grande taille qui sont respectivement 3.25N/mm^2 , 180°C , 5min, ont permis d'obtenir une valeur maximale de la résistance à la flexion qui est égale à 5.5N/mm^2 .

Les panneaux de particules de l'Hegazy et al. [59] constitués du bois de foliole et de même type de résine (urée formaldéhyde) ont également révélé des caractéristiques mécaniques et physiques satisfaisantes. En outre, ces mêmes auteurs [9] ont refait le travail en testant cette fois-ci le bois de rachis de trois variétés de palmier dattier (Bahi, Saqui, Sukkari). L'étude est étendue pour inclure l'effet de taille de particules, l'effet de densité, et l'effet de traitement par l'eau. Les résultats montrent que les panneaux de haute densité préparés à partir des particules fines du bois de rachis de la variété Saqui sont ceux qui ont les meilleures

caractéristiques mécaniques. Le traitement par eau chaude des particules de bois de rachis a un effet négatif sur les propriétés mécaniques et physiques des panneaux élaborés. En utilisant la même matière première végétale des trois variétés précédentes de palmier dattier et la même résine, Hegazy et al. [60] ont investigué la confection des panneaux à lamelles orientées (OSB). La cohésion interne des panneaux mesurée indique des valeurs satisfaisantes. Par contre, le traitement à eau chaude des lamelles de bois de rachis révèle des effets négatifs sur les caractéristiques mécaniques et physiques des panneaux OSB élaborés.

De leur côté, Saadaou et al [61] ont étudié le potentiel des quatre types de bois à savoir le bois de rachis, de foliole, de fibrillium et de pétiole pour élaborer des panneaux de particules sans ajouter du liant en se basant sur leur liant naturel qui est représenté par la teneur en lignine de chaque type de bois. Selon l'étude, le fibrillium est le bois le plus convenable pour l'élaboration d'un tel panneau parmi les types de bois étudiés. Les panneaux de particules du bois de fibrillium montrent des propriétés mécaniques acceptables, MOR = 12.9 MPa, MOE = 1257 MPa. Ces valeurs correspondent aux conditions d'élaborations suivantes : La pression effectuée est 10 MPa, la température de pressage est 180°C et le temps de termopressage est 2 min. Cependant ils révèlent des mauvaises propriétés physiques notamment le taux de gonflement qui dépasse le 100%.

8.3. L'incorporation dans d'autres polymères

L'utilisation d'autres types de polymères que les thermoplastiques et les thermodurcissables avec le bois de palmier dattier ont été également rapportée dans la littérature. El juruf et al. [47] ont étudié la faisabilité d'utiliser le bois de folioles avec plusieurs types de matrice (organique et non organique) afin de produire des plaques isolant thermique. La conductivité thermique mesurée (0.227- 0.353 watt/m°C) des différentes plaques obtenues a confirmé la convenance de ce type de bois à la fabrication des matériaux isolants destinés à la construction. Les mêmes chercheurs [62, 63] ont élaboré des composites en utilisant le bois de foliole et celui de rachis avec un liant synthétique. Les folioles ont été divisées en des rubans avant d'être enrobées par le liant puis elles sont comprimées pour obtenir des plaques non renforcées à faible et à haute densité dépendant du taux de liant et de la valeur de pression. D'autres plaques plus dures ont été fabriquées en se basant sur les matelas de foliole renforcées par une couche ou plus des packs du bois de rachis enrobés eux aussi par le liant synthétique puis comprimés. L'étude a montré qu'il est possible de fabriquer

des matériaux isolants thermiques et acoustiques de différentes formes destinés à la construction.

Par ailleurs, Bendahou et al [25] ont utilisé le bois de rachis et de foliole pour préparer des couches nanocomposites en utilisant la résine de caoutchouc naturel comme matrice. Ces couches sont obtenues par la méthode coulage en évaporation. Les auteurs ont observé une interaction favorable des nanoparticules de palmier dattier avec la matrice caoutchouc. La caractérisation thermique et mécanique de ces nanocomposites montre une augmentation de la rigidité du caoutchouc naturel au dessus de la température vitreuse. Dernièrement, Belakroum et al. [64] ont rapporté dans leur étude les résultats de la caractérisation acoustique et physique d'un biomatériau constitué de fibres de bois de fibrillium ou de pétiole avec un polymère naturel, en l'occurrence l'amidon des maïs comparés à ceux obtenus pour un composite à base d'une matrice inorganique (la chaux) en utilisant le même type de fibres de palmier. Les résultats montrent que la valeur mesurée du coefficient d'absorption acoustique du composite dépend du type de liant et du taux de fibres utilisé. Cette valeur indique une bonne capacité d'absorber le son, particulièrement dans le cas des fréquences moyennes et élevées. La meilleure valeur enregistrée s'était 0.7, obtenue par le composite à 20% de fibres de fibrillium et 80% d'amidon. Pour la propriété d'absorption d'humidité (Moisture Buffer Value (MBV)), le composite : amidon/fibres de fibrillium enregistre des valeurs acceptables pour seulement 20% de fibres. Au vu de leurs résultats, les auteurs de ce travail considèrent l'utilisation des fibres de palmier dattier un excellent choix pour fabriquer des matériaux composites destinés à des applications hygroacoustique dans le domaine de construction.

De sa part AL-Oqla et al [65], a effectué une étude analytique à propos de la faisabilité d'introduire les fibres de palmier dattier dans les fibres naturelles renforçant les composites polymères (NFC), à travers l'identification des critères relatifs à l'industrie de l'automobile. Selon l'analyse des critères techniques et de performance, des critères environnementaux, économiques et sociétaux, les fibres de palmier dattier sont convenables à l'industrie de l'automobile. Elles sont meilleurs que les autres fibres naturelles en particulier envers le critère des propriétés mécaniques spécifiques et le critère du coût.

9. Notre contribution

Comme le montre l'étude bibliographique, le développement d'un matériau composite notamment les panneaux composites à base d'un polymère et des particules de bois de

palmier dattier n'est pas un nouveau concept, les chercheurs ont déjà travaillé sur ce concept. Cependant, la plus part des travaux concernant les panneaux de particules utilisent comme matrice des résines thermodurcissables à base de formaldéhyde tels l'urée formaldéhyde et le phénol formaldéhyde. Hors ces matériaux en plus de leur coût relativement élevé, génèrent dans leur mise en œuvre et tout au long de leur vie du formaldéhyde qui est un produit volatil toxique, son utilisation est limitée de préférence à 5%. En outre, l'exploitation d'un type ou deux de bois de palmier dattier ne fait pas résoudre le problème de la protection environnementale car la quantité de déchet engendrée annuellement est énorme, plus de 1.5 millions tonnes (tableau 2.5). À l'heure actuelle à notre connaissance, il n'y a pas un travail trouvé dans la littérature qui s'intéresse à l'incorporation d'une mixture de bois de tout le déchet engendré par le palmier dattier (fibres ou particules) dans une matrice polymère.

L'hypothèse de notre travail est d'étudier la faisabilité d'élaborer un matériau composite avec des caractéristiques comparables à celles des autres matériaux commerciaux en liant des particules de bois de palmier dattier avec une colle commerciale sans ou à faible émission de formaldéhyde ou une autre matière toxique. Notre choix tombe sur la colle polyacétate de vinyle et pour faire des comparaisons, nous avons choisi la résine polyester insaturé. En plus de leurs propriétés reconnues convenables par la littérature, ces deux types de liants se caractérisent par un coût relativement très faible par rapport aux liants utilisés actuellement dans l'industrie des panneaux de bois. La mise en œuvre des panneaux se fait à travers le pressage à chaud, c'est un procédé simple adapté au niveau technologique des pays en voie de développement pour l'élaboration des panneaux de bois.

10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique concernant le bois de palmier dattier choisi comme renfort dans notre étude. Nous avons commencé par l'identification du palmier dattier et de son bois. Ainsi, les conditions environnementales de culture, les multiples variétés, la situation géographique et la description botanique et morphologique du palmier et de son bois ont été abordées. Ensuite, nous avons présenté une bref synthèse bibliographique sur, tout d'abord, les principaux travaux réalisés pour déterminer les propriétés du bois de palmiers dattiers, puis sur les travaux qui ont incorporé les fibres ou les particules issues de ce bois dans une matrice polymère pour élaborer des matériaux composites à des usages utiles.

A la lumière de cette revue bibliographique, nous constatons que le bois issu de déchet de palmier dattier est une source d'une matière première lignocellulosique abondante et peu valorisée dans notre pays et dans le monde entier. En effet, l'entretien annuelle du palmier dattier génère une quantité énorme de déchet constitué de huit types de bois à savoir : le bois de fibrillium, de pétiole, des épines, de rachis, des folioles, de grappe, des pédicelles, et de spathe. Il n'y a que le bois de fibrillium, de pétiole, de rachis et de foliole et rarement le bois de grappe qui ont intéressé les chercheurs pour en utiliser comme renfort. Les propriétés morphologiques, chimiques, mécaniques, physiques, et thermiques de ces types de bois ont été étudiées. Selon ce qui a été rapporté dans la littérature, le bois de palmier se caractérise par des propriétés mécaniques et thermiques significatif et sont peu variées d'un type de bois à un autre et d'une variété à une autre de palmier. En plus, il a une structure poreuse qui est capable d'absorber une grande quantité d'eau. L'incorporation des fibres, des particules, des lamelles, ou des coupeaux de ce bois dans des matrices polymères peut améliorer les propriétés mécaniques et thermiques du matériau composite.

En se basant sur les études de la littérature présentées à propos de la valorisation de la matière première du bois de palmier dattier et de la fabrication de nouveaux matériaux à des applications utiles et à faible coût, nous avons proposé notre contribution et expliqué l'approche suivie dans le présent travail afin de réaliser notre objectifs.

Références

- [1] **M. Walid Azier.** Etude comparative de trois pieds mâles de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) et l'impact de leurs pollens sur quelques caractéristiques physico-chimiques des dattes, dans la région d'El Maleh (Biskra). mémoire d'ingénieur d'état en Agronomie à l'université de Biskra, **2007**.
- [2] **M. Djerbi.** le précis de la phéniciculture. F. A. O., Tunis, 192p, **1995**.
- [3] **P. Munier.** Le palmier dattier. G. P. Maisonneuve et Larose, Paris, 221 p, **1973**.
- [4] **M. Ouinten.** le palmier dattier dans le système oasien. **1995**.
- [5] **A. Chevaliert.** Revue internationale de botanique appliquée et d'agriculture tropicale. 32, **1952**, 355, 205-236.
- [6] **M. Djerbi.** les maladies du palmier dattier. Projet regional de lutte contre le bayoud. F.A.O, (Rab/84/058) Alger, 125 p, **1998**.
- [7] **N. Ayachi.** contribution à l'étude de quelques caractéristiques morphologiques et biochimiques de huit cultivars de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) dans la région d'Ouled Djellal (Biskra). Thèse d'ingénieur d'état en Agronomie à l'université de Batna, **2002**.
- [8] **L. Boughediri.** Le pollen de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) approche multidisciplinaire et modélisation des différents paramètres en vue de créer une banque de pollens. Thèse de doctorat de l'université Paris VI, 158p, **1994**.
- [9] **S. S. Hegazy, A. Khaled.** Effect of date palm cultivar, Particle Size, Panel Density and Hot Water Extraction on Particleboards Manufactured from Date Palm Fronds. Agriculture, 5, **2015**, 267-285.
- [10] **A. Zaid.** Date palm cultivation. F.A.O. Rome, Italie, 292 p, **2002**.
- [11] **M. Buelguedj.** Evaluation du sous-secteur des dattes en Algérie., INRAA El-Harrach, **2007**.
- [12] Direction régionale de l'agriculture, Biskra
- [13] **D. L. Jones.** Palms throughout the world. Reed Book; **1995**.
- [14] **J. Delenze.** Palmier pour le climat méditerranéen. Champ flour; **1995**.
- [15] **F.H. Ahmed Ali.** Palmier dattier: arbre de la vie entre le passé, le présent et le futur. Partie 1, **2005**, Ed, Dare el arabia, Kairo, Egypt,14519/ ISBN977-258-197-3
- [16] **G. Peyron.** Cultivar le palmier dattier.C.I.R.A.D, Montpellier, France,110p, **2000**

- [17] **F H. Ahmed Ali.** Palmier dattier : arbre de la vie entre le passé, le présent et le futur. Partie 2, **2005**, Ed,Dare el arabia, Kairo, Egypt 14517/ ISBN977-258-196-5.
- [18] **V. Medoc, R. Pereira.** Valorisation des particules de bois issues d'un palmier dans une matrice cimentaire. Projet de fin d'études, Université de Cergy Pontoise, **2011**.
- [19] **D. Sibih,** Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres. Thèse doctorat, INSA De Lyon **2011**.
- [20] **B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenec.** Renewable materials to reduce building heat loss: characterization of date palm wood. *Energy Build* **2011**.43: 491.
- [21] **A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M. Khenfer, M. Chabannet.** Mechanical properties of date palm fibers and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate, *Cement and Concrete Composites* 27 (5), **2005**, 554–564.
- [22] **A. Al-Khanbashi, K. Al-Kaabi, A. Hammami,** Date palm fibers as polymeric matrix reinforcement: fiber characterization, *Polymer Composites* 26 (4), **2005**, 486–497.
- [23] **A. Kriker, A. Bali, G. Debicki, M. Bouziane, M. Chabannet.** Durability of date palm fibers and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cement & Concrete Composites* 30 (7), **2008**, 639–648.
- [24] **S. Mahdavi, H. Kermanian and A.Varshoei.** Comparison of mechanical properties of date palm fiber-polyethylene composite. *Bioresources.* (5), **2010**, pp.2391-2404.
- [25] **A. Bendahou, Y. Habibi, H. Kaddami, A. Dufresne.** Physico-Chemical Characterization of Palm from Phoenix Dactylifera–L, Preparation of Cellulose Whiskers and Natural Rubber–Based Nanocomposites. *J. Biobased Materials and Bioenergy.* 3, **2009**, p.1-10.
- [26] **H. Ammar, M. Abid, S. Abid.** Cellulose fibers obtained by organosolv process from date palm rachis (Phoenix dactylifera L.). *Mater Sci Eng;* 11, **2012**: 012002.
- [27] **S. I. Salih.** Acoustic and Mechanical Properties of Polymer Composites Reinforced by Pre-Deformed Palm Fiber. *Eng. & Tech. Journal,* 31, **2013**, No.3.
- [28] **R. Khiari, M.F. Mhenni, M. N. Belgacem.** Chemical composition and pulping of date palm rachis and Posidonia oceanica – a comparison with other wood and non- wood fiber sources. *Bioresour Technol;* 101, **2010**, 775–780.
- [29] **H. Kaddami, A. Dufresne, B. Khelifi, A. Bendahou, M. Taourirte, M. Raihane, N. Issartel, H. Sautereau, J. F. Gérard, N. Sami.** Short palm tree fibers–Thermoset matrices composites," *Composites: Part A,* 37, **2006**, 1413-1422.

- [30] **A. Chehma, H. Longo.** Valorisation des Sous-Produits du Palmier Dattier en Vue de leur Utilisation en Alimentation du Bétail. *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation Biomasse*, **2001**, 59-64.
- [31] **R. A. Nasser, H. A. Al-Mefarrej.** Midribs of Date Palm as a Raw Material for Wood-Cement Composite Industry in Saudi Arabia. *World Applied Sciences Journal* 15 (12), **2011**, 1651-1658,
- [32] **P. Khristova, O. Kordsachia, T. Khider.** Alkaline pulping with additives of date palm rachis and leaves from Sudan. *Bioresource Technology* 96, **2005**, 79–85.
- [33] **A. Bendahou, A. Dufresne, H. Kaddamai, Y. Habibi.** Isolation and structural characterization of hemicelluloses from palm of *Phoenix dactylifera* L. *Carbohydrate Polymers* 68, **2007**, 601–608.
- [34] **S. Ezzat.** Leaves of date palm tree (*Phoenix dactylifera*) as a technical feasible source of raw material for paper production. *Cellulose Chemistry and Technology* 8, **1974**, 627–634.
- [35] **M.M.S. El Morsy.** Studies on the rachis of Egyptian date palm leaves for hardboard production. *Fiber Science and Technology* 13 (4), **1980**, 317–321.
- [36] **A. Kriker.** Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec. PhD Thesis, Ecole Nationale polytechnique, Alger, **2005**
- [37] **F.F. Bassat.** Fabrication des produits dérivés de palmier dattier. Ed, El Adib El Baghdadia. Baghdad, Iraq.
- [38] **A. K. Bledzki, J. Gassan.** Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer science*, 24, **1999**, 221-274.
- [39] **H. Thi, T. Nga.** Etude de L'influence de La Température et de L'humidité sur les Propriétés Mécaniques en Traction des Fibres de Chanvre et de Coco. PhD Thesis, Ecole De Technologie Supérieure, Université Du Québec, **2008**.
- [40] **F. A. Al-Sulaiman.** Mechanical properties of date palm leaves. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 19(17), **2000**, 1379–1388.
- [41] **M. Tlijania, A. Gouadriab, R. Benyounesc, J. F. Durastantid, A. Mazioude.** Study and Optimization of Palm Wood Mechanical Properties by Alkalization of the Natural Fiber. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 11, **2013**, 1, 30- 38.
- [42] **A. Alawar, A. M. Hamed, K. Al-Kaabi.** Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Compos Part B*; 40, **2009**, 601–606.

- [43] **C. Baley**. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites: Part A*, 33, **2002**, 939.
- [44] **A.K. Mohanty, M. Misra, and G. Hinrichsen**. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromol. Mater. Eng.*, 1, **2000**, 276–277.
- [45] **R. A. J. H.H. Abdel-Rahman, F. Ahmad, I. Alam**. Physical, mechanical and durability characteristics of date palm frond stalks as reinforcement in structural concrete, *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 10, **1988**, 175-181.
- [46] **A. Bezazi, S. Amroune, F. Scarpa**. Analyse statistique et effet des traitements chimiques sur le comportement physico-mécanique des fibres des bras de grappe des palmiers dattier. *Technol., Synthèse*: 31, **2015**, 108 -120.
- [47] **R. S. Al-Jurf, F. A. Ahmed, I. A. Allam, H. H. Abdel-Rehman**. Development of heat insulation material using date palm leaves. *Journal of Thermal Insulation* 11, **1988**, 158–164.
- [48] **J. Besset**, Bois Et Matériaux Dérivés. Direction Du Centre Technique Du Bois Et De L'ameublement.
- [49] **Y. El may, M. Jeguirim, S. Dorge, G. Trouvé, Said S**. Study on the thermal behavior of different date palm residues: Characterization and de volatilization kinetics under inert and oxidative atmospheres, *Energy, Journal of energy*, doi:10, **2012**, 1016.
- [50] **B. F. Abu-Sharkh, H. Hamid**. Degradation study of date palm fibre/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis. *Polymer Degradation and Stability* 85, **2004**, 967-973.
- [51] **N. Mahmoudi**. Use of date palm fibers as reinforcement for thermoplastic-based composites, *Mechanics & Industry*, 14 1, **2013**, 71-77.
- [52] **P. N. Khanam**, Improvement of ternary recycled polymer blend reinforced with date palm fibre, *Materials& Design*, 60, **2014**, 532-539.
- [53] **K. M. Zadeh, D. Ponnamma, M. Al Ali Al-Maadeed**. Date palm fibre filled recycled ternary polymer blend composites with enhanced flame retardancy, *Polymer Testing*, 61, **2017**, 341–348.
- [54] **A.A. Wazzan**. Effect of fiber orientation on the mechanical properties and fracture characteristics of date palm fiber reinforced composites. *Int. J. Polym. Mater.*, 54, **2005**, 213–225.

- [55] **F. A. Al-Sulaiman.** Date palm fiber reinforced composite as a new insulating material. *Int. J. Energy Res.*, 27, **2003**, 1293–1297.
- [56] **H. El-Mousely, M. M. El-Morshedy, M. M. Megahed, Y. Abd El-Hai.** Evaluation of particleboard made of palm leaves midribs as compared with flaxboard. In *Proceedings of the 4th International Conference on Production Engineering and Design for Development*, Cairo, Egypt, **1993**, 27–29.
- [57] **F. I. Iskanderani.** Physical Properties of Particleboard Panels Manufactured from Phoenix Dactylifera-L (Date Palm) Mid-rib Chips using Ureaformaldehyde Binder . *Int. J. Polym. Mat.*, 57, **2008**, 979–995
- [58] **F.I. Iskanderani.** Influence of process variables on the bending strength of particleboard produced from Arabian date palm mid-rib chips. *Int. J. Polym. Mat.*, 58, **2009**, 49–60.
- [59] **S. Hegazy, I. Aref.** Suitability of some fast growing trees and date palm fronds for particleboard production. *For. Prod. J.*, 60, **2010**, 599–604.
- [60] **S. Hegazy, K. Ahmed, S.Hiziroglu.** Oriented strand board production from water - treated date palm fronds. *Bioresources*, 10, **2015**, 448–456.
- [61] **N. Saadaou, A.Rouilly, K. Fares, L. Rigal.** Characterization of date palm lignocellulosics by products and self-bond composite material obtained thereof. *Mater. Des.* 50, **2013**, 302–308.
- [62] **F. A. Ahmed, R. S. AL-Juruf, H. H. A-Rehman, I. A. Alam.** A Homogeneous Building Material from Date Palm Fronds. *Building and Environment*, 25, 2, **1990**, 183-187.
- [63] **R. S. Al-Jurf, F. A. Ahmed, I. A. Allam, H. H. Abdel-Rehman,** Development of new building material using date palm fronds; Final Report ARP-6-141; KACST: Riyadh, Saudi Arabia, **1998**.
- [64] **R. Belakroum**, A. Gherfi, K. Bouchema, A. Gharbi, Y. Kerboua, M. Kadja, C. Maalouf, T.H. Mai, N. El Wakil, M. Lachi, Hygric buffer and acoustic absorption of new building insulation materials based on date palm fibers, *Journal of Building Engineering*, 12, **2017**, 132–139.
- [65] **F. M. AL-Oqla**, S.M. Sapuan, Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry, *Journal of Cleaner Production*, 66, **2014**, 347-354.

Chapitre III : Matériaux et Méthodes Expérimentales

1. Matériaux

1.1. Bois de palmier dattier

La matière ligno cellulosique utilisée comme renfort dans notre étude provient du bois de déchet de la partie renouvelable des palmiers âgés de 40 ans de la variété Deglet-Noor. Ces derniers appartiennent à une palmeraie de la province de Biskra en Algérie. la variété Deglet-Noor constitue 61.45% du nombre total des palmiers en Algérie. Donc c'est la variété qui génère plus de déchets, c'est la raison pour laquelle on a choisi cette variété de palmier pour le prélèvement de nos échantillons. La figure 3.1 est une photo du palmier dattier sur laquelle sont indiquées les différentes parties renouvelables qui constituent la source de nos particules, à savoir le Fibrillium, le Pétiolés, le Rachis, les Folioles, les Epines, la Grappe, les Pédicelles, et la Spathe.

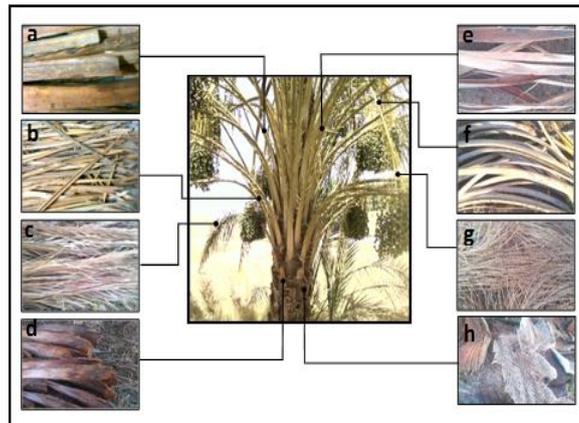


Figure 3.1 : Les différents types de bois renouvelable du palmier dattier



Figure 3.2 : Les différents types de bois constituant le déchet du palmier dattier

1.2. Liants polymères

1.2.1. Résine polyester insaturée

Le polyester insaturé (UP) est la résine la plus répandue dans la fabrication de pièces en matériaux composites. Le terme insaturé vient du fait de son état liquide au moment de sa livraison. Il s'agit d'une résine thermodurcissable liquide, à laquelle on ajoute un durcisseur en faible proportion. Le polyester insaturé se prépare d'abord par estérification-condensation de diols ou d'époxydes pour obtenir un polyester, ce dernier est dilué dans un monomère, par exemple le styrène ; on se trouve alors en possession d'une résine de polyester insaturé [1]. L'utilisation finale de la résine s'effectue par polymérisation, formation d'un réseau tridimensionnel (réticulation). La résine, pure ou formulée par addition de charges ou de fibres, sera polymérisée catalytiquement, thermiquement, ou par irradiation.

Tableau 3.1. Quelques propriétés de la résine polyester insaturé [2, 3, 4]

Propriétés	UP
La Densité (gm/cm ³)	1,4
T° d'utilisation (°C)	70-80
Elongation à la rupture (25°C)	1,5 – 2 %
T° de stabilité (°C)	220
Taux de Poisson (ν)	0,37- 0,39
Module de Young (GPa)	2 - 4,5
Température max (°C)	60-200
Module d'élasticité en flexion (GPa)	3, 670 ± 80
Module de rupture en flexion (MPa)	113 ± 11
Déformation à la rupture en flexion (%)	3,8 ± 0,6

1.2.2. Colle poly acétate de vinyle

Les colles vinyliques sont des colles blanches constituées de poly acétate de vinyle en solution aqueuse. Elles sont destinées à coller les matériaux hydrophiles, en particulier le bois et tous ses dérivés. Elles peuvent servir aussi à réunir des matériaux tels que le papier, le

carton, et le tissu. Elles conviennent aux travaux de menuiserie intérieure et à la réparation d'objets non soumis à l'humidité. Après séchage, le film de colle devient transparent et pratiquement invisible. Le tableau suivant résume quelques propriétés de la colle poly acétate de vinyle

Tableau 3.2. Quelques propriétés de la colle vinylique [2, 5]

Propriétés	PVA
Densité (g/cm ³)	1,19 ± 0,03
Viscosité (Poiseuille)	160 ± 40
Ph	3.0 ± 1.0
T° transition vitreuse à 22°C (°C)	30
T° d'utilisation (°C)	10 – 35
Paramètre de solubilité δ (J ^{1/2} ·cm ^{-3/2})	19,1-22,6
Constante diélectrique (Farad m ⁻¹)	3,5
Indice de réfraction	1,46–1,47
Point d'ébullition (°C)	112
E _f (MPa) à 22°C	1300-2300
Conductivité thermique (w/m°C)	0.16

2. Protocoles expérimentaux et appareils de caractérisation du bois de palmier dattier :

Pour incorporer les particules de bois de palmier dattier dans un nouveau matériau il faut avoir une bonne connaissance de ses propriétés, cette section vient pour présenter les protocoles suivis pour caractériser le bois de palmier dattier utilisés dans notre étude. Les résultats seront discutés dans le chapitre suivant.

2.1. Préparation des échantillons de bois

Les échantillons ont été pris du déchet de bois qui a été récoltés depuis plus qu'un an et a été laissés séchés en plein air. D'abord, chaque type de bois est séparé des autres types afin de regrouper une quantité suffisante des échantillons en chaque type pour l'utiliser plus tard dans la caractérisation. Ainsi les Pétioles, Les folioles et les épines ont été séparés des rachis et les pédicelles ont été séparés des grappes. Le bois à grande longueur tels que le rachis, la grappe, les pédicelles, la spathe ont été découpés plusieurs fois pour obtenir des morceaux de moins de 30 cm. La surface de bois obtenu est essuyée avec un chiffon mouillé pour éliminer la poussière et les impuretés, ensuite le bois est séché à l'air pendant 48h puis à l'étuve à 45°C pendant 4h. Deux divisions ont été prises de chaque type de bois. La première division est utilisée pour préparer des échantillons sous forme des morceaux de bois de longueur d'environ 5 cm qui sont destinés à la caractérisation physique, et des échantillons sous forme de poudre ($d < 0,5$ mm) qui sont destinés à la caractérisation chimique (analytique, organique) et thermogravimétrique (figure 3.3).

La deuxième division de bois a été plongée dans l'eau pendant plus de 48h pour faciliter l'extraction des fibres. Ensuite défibrée à l'aide d'un couteau et laissée sécher à l'aire libre pendant une semaine puis à l'étuve à 45°C pendant 4 heures. En fin les fibres sont coupées aux longueurs voulues pour la caractérisation mécanique (figure 3.4).



Figure 3.3 : Broyat du bois de rachis

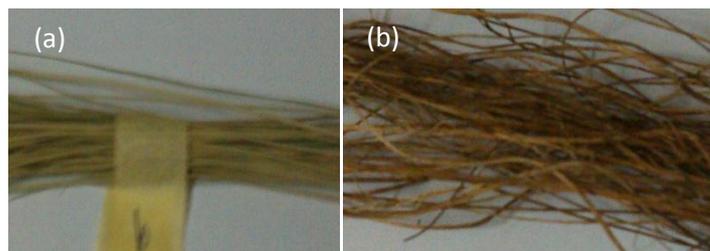


Figure 3.4 : Fibres extraites de bois de : (a) grappes, (b) fibrillium

2.2. Caractérisation du bois de palmier dattier

2.2.1. Caractérisation morphologique

L'examen de la morphologie des surfaces des échantillons a été réalisé en utilisant le microscope électronique à balayage JEOL/EO JSM-6390L. Pour observer la texture de la coupe interne des différents échantillons, une portion de dimension de 4x4x1mm de bois a été prise et collés sur le porte échantillon du MEB. Les images ont été obtenues à une tension d'accélération de 15 kV et en utilisant deux mesures d'agrandissement :100 avec une résolution de 100 μm et 300 avec une résolution de 50 μm . l'analyse EDS (Energy dispersive spectroscopy) nous a permet d'obtenir la teneur en C, O, et en H dans les échantillons examinés.

2.2.2. Caractérisation chimique

2.2.2.1. Analyse organique

Nous présentons dans cette partie les protocoles expérimentaux permettant la détermination de la composition organique du bois de palmier dattier suivant la norme française T 12 011 [6].

2.2.2.1.1. Taux de cendres

Les échantillons broyés sont séchés à 105°C dans une étuve pendant 4 heures, placés dans des creusets en céramique, puis calcinés à 600°C pendant une nuit. Après cette pyrolyse, le taux de cendres est obtenu par pesée quand l'échantillon revient à la température ambiante dans un dessiccateur.

2.2.2.1.2. Extraction à solvant neutre (éthanol- toluène)

Ce traitement sert à retirer les matériaux qui ne font partie du bois tels que les graisses et les cires [article extraction [7]. Le pourcentage de l'extrait est déterminé après extractions successives par 100 ml de mélange éthanol-toluène en proportion volumique 1:2. 2g d'échantillon sont soumis à une extraction en continu pendant 24 h dans un soxhlet (figure 3.5), la solution extraite devra être claire et exempte de fibres. La masse de la matière extraite est déterminée par pesée après évaporation du solvant.



Figure 3.5 : appareil de soxhlet pour l'extraction

2.2.2.1.3. Extraction à l'eau chaude

L'extraction à l'eau est très importante car elle permet d'éliminer la pectine et quelques autres substances inorganiques tels que les sels minéraux. 2g de fibres séchées sont traitées deux fois par 100 ml d'eau à reflux à 85°C pendant 3h. Puis, le résidu est filtré et lavé à l'eau, séché dans un dessiccateur à 100°C. Après séchage, le résidu est pesé pour déterminer la variation du poids de la matière ligno cellulosique.

2.2.2.1.4. Taux de lignine (méthode de Klason)

Le taux de lignine est déterminé par la méthode de Klason [6] selon le protocole suivant :

L'échantillon sec de fibres broyées (1g) est mis en suspension dans l'acide sulfurique à 72% (15 ml) pendant 2h à température ambiante. L'hydrolyse est poursuivie après dilution à 3% et on maintient la solution à reflux pendant 6 heures. Après cette hydrolyse, on laisse déposer la solution pendant une nuit avant de filtrer le précipité sur un creuset filtrant n°4 préalablement séché et taré. Le précipité est lavé abondamment à l'eau chaude afin d'éliminer toute trace d'acide puis placé dans une étuve à 105°C jusqu'à stabilisation de son poids. Le taux de lignine est alors déterminé par gravimétrie.

2.2.2.1.5. Extraction d'holocellulose :

2.2.2.1.5.1. Extraction à la soude

L'extraction à la soude génère des réactions de dégradation des composés pectiques. Les chaînes d'acide polygalacturonique et les pectines ramifiées ainsi que les arabinanes et les galactanes sont solubilisées. L'échantillon préalablement extrait à l'eau est mis dans un ballon de 2l contenant 1l d'une solution de soude à 2% dans un bain marie chauffé à 80°C pendant 2h. L'ensemble prend très rapidement une teinte marron foncé. Après deux heures de traitement, les pulpes sont filtrées sur une toile de 100 µm et lavées abondamment à l'eau jusqu'à la neutralité du milieu. Au dernier rinçage la suspension est laissée sécher pendant 24h (normalement la suspension est tirée sous vide pour essorer). Cette opération a été répétée une deuxième fois dans les mêmes conditions.

2.2.2.1.5.2. Extraction au chlorite de sodium

La pâte obtenue après extraction à la soude a une couleur marron, d'où la nécessité d'effectuer un blanchiment du résidu. La couleur est due à la présence des groupes chromophores (liaisons insaturées ou conjuguées). Au cours du blanchiment, les protéines et les molécules phénoliques sont oxydées, solubilisées et éliminées par filtration. Les agents de blanchiment utilisés sont les agents chlorés tels que le chlorite de sodium. Ce traitement a été réalisé en milieu tamponné à 70°C afin d'éviter une dégradation importante de la cellulose.

Nous avons utilisé une solution de chlorite de sodium (NaClO_2) à 1,7 % w/v et une solution de tampon acétique (27 g de NaOH dans 500 ml de H_2O distillée, addition de 75 ml d'acide acétique complété à 1l avec H_2O distillée). Le mélange utilisé pour l'extraction est NaClO_2 /tampon acétique/ H_2O (1v :1v :3v). Le traitement est réalisé dans un bain marie à 70 °C pendant 2 h. Après deux heures de traitement, la pâte est filtrée sur une toile de 100 µm et lavée abondamment à l'eau jusqu'à la neutralisation du milieu. A la fin, la pâte est laissée sécher pendant 24h ou bien on tire sous vide pour essorer. Cette opération est répétée une deuxième fois dans les mêmes conditions. Une pâte blanche appelée holocellulose est récupérée à la fin du traitement (figure 3.6).

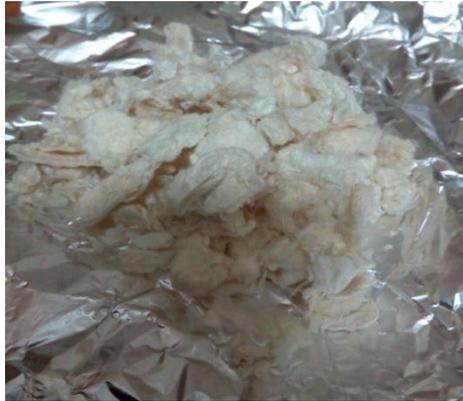


Figure 3.6 : Pâte holocellulose du bois de rachis

2.2.2.1.6. Extraction de la cellulose

La méthode utilisée pour la purification de la cellulose est basée sur la différence de solubilité entre les hémicelluloses et la cellulose en milieu alcalin. Ainsi, la cellulose peut être isolée de l'holocellulose après solubilisation des hémicelluloses dans une solution alcaline diluée. Une prise d'essai de 4 g d'holocellulose est dissoute dans 60 ml de solution de KOH (24% w/v). Après 15 h d'agitation la pâte est filtrée sur un creuset n°1. Le précipité obtenu est lavé avec de l'eau jusqu'à neutralisation, puis avec une solution diluée d'acide acétique, et enfin avec de l'éthanol. La cellulose obtenue est séchée sous air ambiant puis pesée.

2.2.2.1.7. Extraction des hémicelluloses

Le filtrat obtenu après séparation de la cellulose est neutralisé par de l'acide acétique (50 % v/v). La suspension est centrifugée pendant 30 minutes à 5000 tr/min. Le précipité est traité par l'éthanol (95%), on mélange vigoureusement et on filtre sur un creuset n°4, puis on lave le précipité avec de l'éthanol absolu. On obtient ainsi une première fraction d'hémicelluloses. Le surnageant est évaporé partiellement de la solution pour en conserver 150 ml, puis redilué dans 3 volumes d'éthanol, sous agitation. Après décantation du précipité on procède par filtration sur creuset n°4. On obtient ainsi la deuxième fraction d'hémicelluloses [6].

2.2.2.1.8. Extraction de la cellulose brute

Le principe est basé sur la solubilisation des composés non-cellulosique dans des solutions d'acide sulfurique et d'hydroxyde de potassium. L'extraction de la cellulose brute des fibres de palmier dattier à été réalisée au laboratoire de Biologie de l'université de Ouargla en suivant la norme NF V03-040 [8].

2.2.2.1.8.1. Attaque acide

Après l'extraction de la matière grasse, poser 1g de l'échantillon broyé dans un creuset, ajouter 150ml de solution d'acide sulfurique préchauffée et quelques gouttes d'octanol. Porter rapidement à ébullition en 5 minutes environ, et le maintenir pendant 30 minutes. Après, filtrer immédiatement l'insoluble au moyen du dispositif de vidange à vide. Rincer l'insoluble avec de 150 ml d'eau distillée bouillante. Répéter les lavages 3fois.

2.2.2.1.8.2. Attaque alcaline

Verser dans le creuset 150 ml de solution d'hydroxyde de potassium préchauffée et quelques gouttes d'octanol. Porter rapidement à l'ébullition en environ 5 minutes, et la maintenir pendant 30 minutes. Après, filtrer immédiatement l'insoluble, le laver avec de l'eau distillée bouillante. Poursuivre le lavage avec de l'eau distillée comme indiqué ci-dessus. Déshydrater ensuite le résidu par l'acétone en utilisant la fiole à vide prévue à cet effet : verser de l'acétone dans le creuset, disperser l'échantillon et filtrer.

Après cette étape l'insoluble est séché à 103°C dans l'étuve pendant 2h ensuite refroidi dans le dessiccateur puis pesé soit (P_1). La dernière étape dans le protocole est l'incinération du résidu à 525°C pendant une heure. Après refroidissement dans le dessiccateur jusqu'à la température de laboratoire, peser à nouveau ce qu'il reste de l'échantillon, (P_2). La quantité en cellulose est déterminée par la différence entre P_1 et P_2 .

2.2.2.2. Analyse minérale

L'analyse quantitative des éléments minéraux dans l'extrait de cendre est réalisée par le photomètre à absorption atomique (figure 3.7), le spectrophotomètre à Flamme (figure 3.8), et le spectrophotomètre UV/visible (figure 3.9); la teneur en éléments minéraux de chaque échantillon a été calculée à partir des courbes d'étalonnages.



Figure 3.7 : Appareil d'absorption atomique

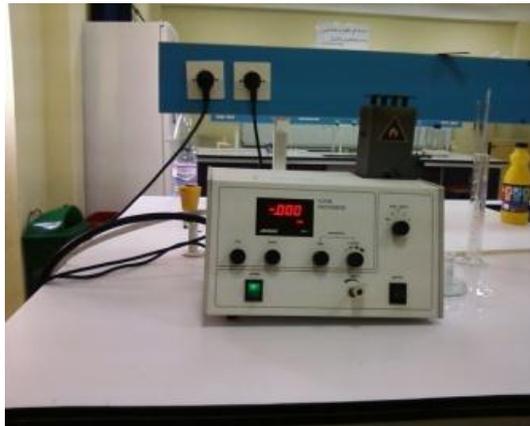


Figure 3.8 : Spectrophotomètre à flamme



Figure 3.9 : Spectrophotomètre UV / Visible

2.2.2.2.1. Préparation de l'extrait de cendre

L'extrait de cendre a été obtenu en suivant le protocole suivant :

Porter de 0.5 à 1 g de matière végétale, séchée préalablement à 105°C dans un creuset en porcelaine et calciner à 550°C dans un four à moufle pendant 5h jusqu'à l'obtention d'une cendre blanc. Sortir l'échantillon et laisser refroidir puis transférer la cendre dans un bécher de 100 ml et ajouter 5 ml HCl (2N), couvrir d'un verre de montre. Gérer une ébullition douce sur une plaque chauffante pendant 10 min. après refroidissement, ajouter 25ml d'eau distillée, ensuite filtrer avec un papier filtre dans une fiole de 50 ml, puis ajuster avec l'eau distillée à 50 ml.

L'extrait est prêt pour le dosage des éléments suivants :

K , Na : par le photomètre à flamme

Zn, Cu, Fe, Mg, ... : Par le spectrophotomètre d'absorption atomique.

P : par colorimétrie (méthode de vanadate d'ammonium, molybdate d'ammonium)

➤ Spectrophotométrie

L'analyse spectrophotométrique est fondée sur l'étude du changement d'absorption de la lumière par un milieu, en fonction de la variation de la concentration d'un constituant. On détermine la concentration d'une substance en mesurant l'absorption relative de la lumière par rapport à celle d'une substance de concentration connue. En analyse spectrophotométrique, on utilise une lumière sensiblement monochromatique. Ces méthodes d'analyse sont intéressantes car elles permettent de travailler sur de faibles quantités de substances et sont non destructrices vis-à-vis de l'échantillon. Elles s'appliquent à un très grand nombre de dosages.

➤ Le spectrophotomètre à flamme et d'absorption atomique:

Le principe du spectrophotomètre à flamme et d'absorption atomique consiste à pulvériser la solution dans une flamme ou dans un four en graphite où elle est transformée en vapeurs atomiques. On envoie sur ces vapeurs une radiation caractéristique des atomes à doser (longueur d'onde de la raie de résonance le plus souvent) qui est produite par la source qui est généralement une lampe à cathode creuse contenant l'élément à doser. La radiation est absorbée par les atomes non excités sur le trajet de la lumière (figure 3.10).

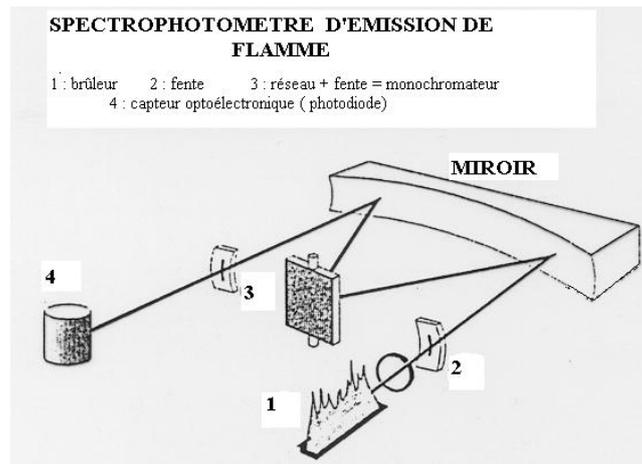


Figure 3.10 : Principe de fonctionnement de spectrophotomètre à flamme

Pour des concentrations C faibles : $A = k C$; k est une constante de proportionnalité pour une température donnée et une longueur d'onde donnée. En pratique, on compare les absorbances obtenues pour des solutions étalons et la solution à doser dans les mêmes conditions (figure 3.11).

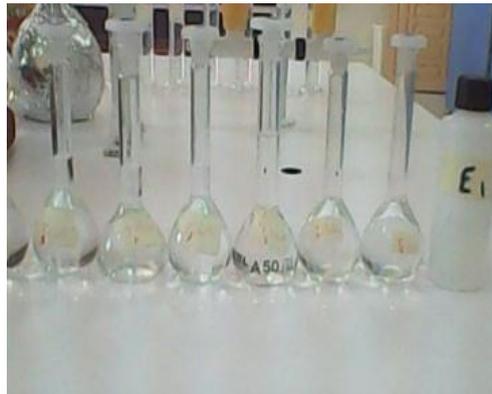


Figure 3.11 : Les solutions d'étalonnage

➤ Comparaison entre l'émission de flamme et l'absorption atomique

Dans la flamme, à la température T de l'ordre de 3000 K on a N_0 atomes dans l'état fondamental (énergie E_0) et N atomes dans l'état excité (énergie E), le rapport N/N_0 étant donné par la relation de Maxwell-Boltzmann :

$$N/N_0 \approx \exp(-(E-E_0) / kT) ; \text{ il est de l'ordre de } 10^{-4} \text{ à } 10^{-10}.$$

On voit donc aisément que l'absorption se produira pour plus d'atomes que l'émission puisque la majorité des atomes dans la flamme sont dans l'état fondamental. En effet, l'absorption atomique est généralement une méthode plus sensible que l'émission de flamme.

➤ **Le spectrophotomètre UV/ Visible (colorimètre)**

La colorimétrie est un cas particulier de la spectrophotométrie dans le domaine du visible. On utilise une source de lumière blanche et les déterminations sont faites à l'aide d'un instrument simple appelé colorimètre. Une cellule photoélectrique permet d'apprécier l'intensité de la coloration. On utilise une lumière dont les longueurs d'ondes se situent dans un domaine spectral relativement étroit grâce à des filtres qui ne transmettent que des longueurs d'ondes d'une petite région du spectre (figure 3.12).

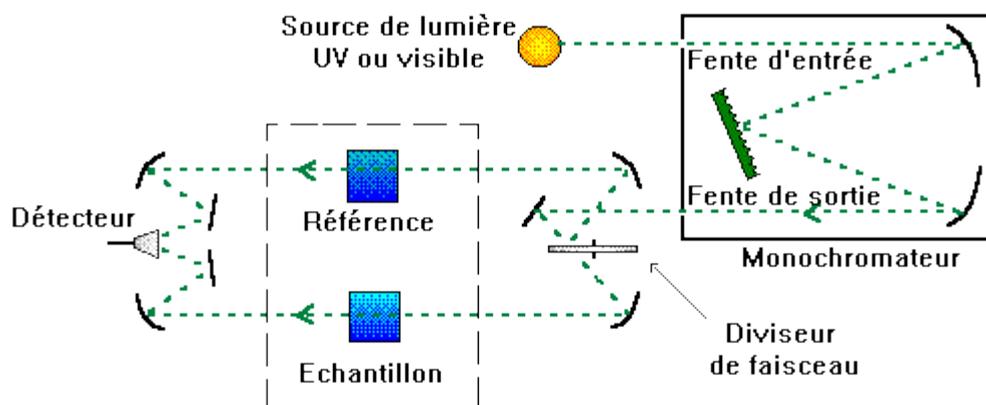


Figure 3.12 : Le principe d'un spectrophotomètre à double faisceau

2.2.3. Caractérisation physique

2.2.3.1. La densité apparente

La mesure de la densité apparente des différentes variétés de bois de palmier dattier consiste à mesurer le volume des échantillons prisent de chaque variétés. Pour réaliser cette mesure nous avons suivi le protocole suivant :

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
- Peser un échantillon sec M_0 puis le couvrir totalement par plusieurs couches de paraffine (figure 3.13) ensuite peser de nouveau M .

- Introduire l'échantillon couvert de paraffine dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air (figure 3.14).
- Lire le nouveau volume d'eau V_2

La masse volumique apparente se calcule de la formule suivante :

$$\rho_{apparente} = \frac{M_0}{(V_2 - V_1) - \frac{M - M_0}{\rho_{paraffine}}}$$

La masse volumique du paraffine utilisé dans cette expérience est mesurée en suivant le même principe est trouvée égale 850 kg/m^3 .



Figure 3.13 : Immersion de l'échantillon dans la paraffine



Figure 3.14 : mesure du volume apparent

2.2.3.2. La densité absolue

La mesure de la densité absolue consiste à éliminer le vide qui existe dans la substance de l'échantillon et de mesurer le volume absolu de l'échantillon. Cette méthode est appelée la méthode de pycnomètre. Nous avons choisi le protocole suivant :

- Broyer finement 20g de l'échantillon (figure 3.15).
- Peser le pycnomètre (sec et propre) avec son couvercle, soit P_0
- Dévisser le couvercle et introduire 20 g de l'échantillon puis peser l'ensemble, soit P_1
- Ajouter de l'eau jusqu'à 2 cm du bord supérieur, visser à fond et le remplir à l'aide d'une pissette par le trou supérieur.
- Secouer le pycnomètre en rebouchant avec un doigt le trou du couvercle. Laisser reposer un bon moment, pour permettre à l'air de s'échapper et toute mousse ou écume de se disperser (on peut utiliser une pompe à vide pour accélérer le phénomène), compléter si nécessaire.
- Sécher les parois extérieures du pycnomètre et peser l'ensemble, soit P_2 .
- Vider le pycnomètre, le laver et le remplir d'eau jusqu'au niveau du trou supérieur. Sécher les parois extérieures du pycnomètre et peser l'ensemble, soit P_3 .



Figure 3.15 : le broya fin de bois de Pétiole < 0,1mm

La masse volumique absolue de l'échantillon est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\rho = \frac{P_1 - P_0}{P_3 - P_0} \rho_{\text{eau}}$$

-



Figure 3.16 : Principe de mesurer la densité absolue

2.2.3.3. Le taux d'absorption

Le principe consiste à peser l'échantillon qui est préalablement lavé et séché, soit MC le résultat de la mesure. Ensuite les mettre dans une éprouvette convenable. Commencer à ajouter lentement de l'eau distillée afin que l'échantillon puisse l'absorber en fur et à mesure. Continuer à ajouter de l'eau jusqu'à ce que l'échantillon soit totalement immergé avec environ 2cm d'eau au dessus. Retirer l'échantillon après 24h d'immersion et essuyer avec un chiffon pour enlever l'excès d'eau sur la surface puis peser de nouveau, soit MS la nouvelle masse. Répéter la procédure jusqu'à ce que MS soit constante. Le taux d'absorption est donné par la relation [9] :

$$\frac{MS-MC}{MC} \times 100$$

2.2.3.4. Le taux de porosité

Consiste à calculer le volume du vide qui existe à l'intérieur de l'échantillon par rapport au volume total de l'échantillon. Le taux de porosité est calculé à partir de l'équation suivante [10] :

$$p = 1 - \left(\frac{\text{densité apparente}}{\text{densité absolue}} \right)$$

2.2.4. Caractérisation mécanique

Nos tests de traction ont été effectués dans le laboratoire de génie mécanique de l'université de Ouargla. La résistance à la traction, l'allongement à la rupture et le module d'élasticité des fibres de palmier dattier ont été déterminées selon la norme NF EN ISO 5079 [11], à l'aide d'une machine de traction électromécanique universelle WDW équipée avec

une cellule de 100 KN (figure 3.17). Cet appareil est équipé d'un système d'acquisition automatique relié à un ordinateur qui permet le traçage directe de la courbe contrainte-déformation. Les valeurs de la résistance à la traction, l'allongement à la rupture et le module d'élasticité sont directement obtenues du logiciel Max Test associé à l'appareil. Les échantillons de chaque type de bois ont été testés dans les conditions climatiques de travail $T = 24^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} = 65\%$.



Figure 3.17 : Machine de traction électromécanique universelle WDW

Pour éviter le glissement ou le détachement de l'extrémité supérieure de la fibre ou la rupture précoce de celle-ci lors de la traction nous avons effectué ce qui suit :

- Fixer la vitesse du déplacement à 0,5 mm/min.
- Fixer la longueur testée des fibres à 100 mm.
- Gratter une rainure au milieu de deux contreplaqués de dimension 4x4cm et les insérer entre les mors de la machine avant de placer la fibre (figure3.18). Ce procédé aide de distribuer l'effort le long de la surface latérale des deux extrémités de la fibre et par conséquence empêcher leur déformation (aplatissement).



Figure 3.18 : Technique pour éviter le glissement de la fibre végétale

2.2.5. Analyse thermique

L'analyse thermique consiste à mesurer la variation d'un certain paramètre physique en fonction de la température, nous avons utilisé dans notre étude l'analyse thermogravimétrique ATG, et l'analyse thermique différentielle ATD.

2.2.5.1. L'analyse thermogravimétrique (ATG)

L'analyse thermogravimétrique est une technique d'analyse thermique qui permet la mesure de la quantité et la vitesse de variation de masse d'un échantillon en fonction de la température et du temps. Elle permet d'évaluer toute perte de masse ou des variations de phase lorsque le matériau se décompose, se déshydrate ou s'oxyde sous une atmosphère inerte ou contrôlée.

2.2.5.2. L'analyse thermique différentielle (ATD)

L'ATD consiste à mesurer la différence de température entre l'échantillon à analyser et un échantillon de référence en fonction de temps. Tout phénomène thermique au sein de l'échantillon fait naître une différence de température avec le creuset de référence qui ne subit pas de transformations. Le maximum d'écart en température est atteint en fin de réaction et s'annule lorsque l'équilibre de température est de nouveau établi.

L'analyse thermogravimétrique et thermique différentielle de nos échantillons ont été réalisées en utilisant l'appareil LINSEIS 2400 sous air dans les conditions suivantes : La prise d'essai est environ 5 mg du broyat de l'échantillon, le palier de température varie entre 25°C et 700°C par une vitesse de chauffe de 5°C/min.

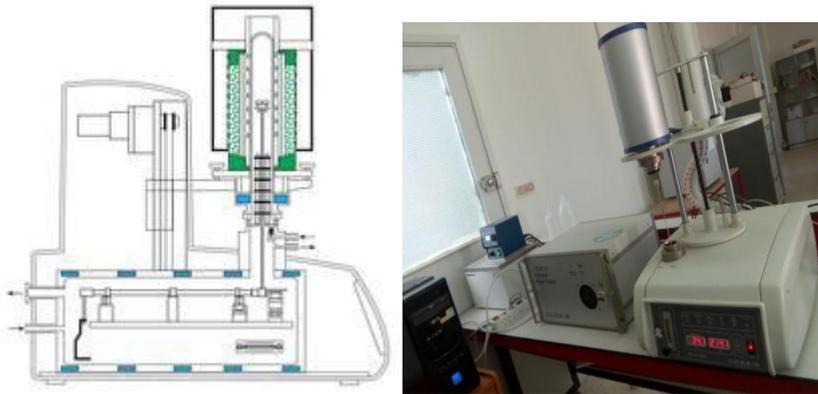


Figure 3.19: l'appareil ATG LINSEIS 2400

3. Protocoles expérimentaux et appareils de caractérisation du matériau composite élaboré à base du bois de palmier dattier.

3.2. Mise en forme du matériau composite

Le protocole expérimental de la mise en forme du matériau composite ainsi que la préparation des matériaux misent en œuvre seront présentés en détaille dans le chapitre cinq.

3.3. Caractérisation du matériau composite

3.3.2. Caractérisation physique

3.3.2.1. Masse volumique

La masse volumique du matériau composite élaboré est calculée en déterminant sa masse m et mesurant ses dimensions pour calculer son volume V . la masse volumique (la densité) se calcule par la formule :

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

3.3.2.2. Le taux du gonflement en épaisseur

Le gonflement en épaisseur TS (Thickness Swelling) des l'éprouvettes préparées est déterminé par la mesure d'épaisseurs des éprouvettes avant et après leur immersion dans l'eau pendant 2 heures ou 24 heures. Le taux de gonflement en épaisseur de chaque éprouvette est calculé suivant la formule ci-dessous [12] :

$$TS(\%) = \frac{E_2 - E_1}{E_1} \times 100$$

Où E_1 : Epaisseur de l'éprouvette avant immersion, E_2 : Epaisseur de l'éprouvette après immersion.

3.3.3. Caractérisation mécanique

Les propriétés mécaniques étudiées dans cette partie sont les propriétés de flexion en trois points. Le principe de la flexion 3 points consiste à poser l'éprouvette sur deux appuis et lui appliquer une force à vitesse constante perpendiculairement à sa surface (figure 3.20).

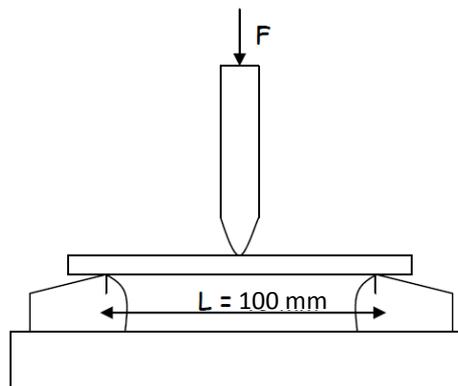


Figure 3.20: Principe de l'appareillage de flexion [6]

Les tests de flexion en trois points de chaque matériau composite sont réalisés selon la norme NF-EN 310 [12] En utilisant une machine électromécanique universelle d'essai INSTRON équipé d'une cellule de force de 50 kN et d'un logiciel Blue hill qui permet l'obtention de toutes les propriétés mécaniques concernant le test effectué par cette machine (figure 3.21). Le module d'élasticité en flexion (MOE) et de résistance à la flexion (MOR) sont calculés suivant les formules suivantes :

$$MOE = \frac{L^3}{4 \times b \times e^3} \times \frac{F_2 - F_1}{a_2 - a_1}$$

$$MOR = \frac{3 \times L}{2 \times b \times e^2} \times F_{\text{rupture}}$$

Où F_i : la force mesurée pour un déplacement a_i

F_{rupture} : la charge mesurée à la rupture

L : distance entre les points d'appui

b : largeur de l'éprouvette

e : épaisseur de l'éprouvette



Figure 3.21 : Machine d'essais mécanique de flexion trois points

3.3.4. Caractérisation thermique

La conductivité thermique (λ) d'un matériau est une grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur, elle s'exprime en $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Le mode de transfert de chaleur associée à cette grandeur est la conduction thermique. Il ya d'autres propriétés qui sont liées aux transferts de chaleur ; on a la diffusivité thermique (a) qui s'exprime en m^2/s et qui caractérise la capacité d'un matériau à transmettre un signal de température d'un point à un autre dans ce matériau. Il y a aussi la capacité thermique volumique ou la chaleur spécifique (C_p) qui s'exprime en $\text{J}/\text{m}^3 \text{K}$ et qui caractérise la capacité d'un matériau à stoker la chaleur.

La mesure des propriétés thermiques de nos plaques composites a été réalisée dans le laboratoire de Génie Civil de l'université de Laghouat, en utilisant l'analyseur thermique Hot Disk-Thermoconcept (figure 3.22). Ce dispositif de caractérisation thermique utilise la technique de la source plane transitoire qui est régie par la norme internationale ISO 22007-2. Une sonde constituée d'une double spirale de nickel sur un support isolant en kapton (figure 3.23) est placée entre deux échantillons plans du matériau à caractériser. Cette sonde est déclinée en plusieurs diamètres ce qui permet de caractériser des échantillons de toute taille avec une épaisseur de quelques millimètres pour les isolants et de quelques centimètres pour les conducteurs. L'appareil Hot Disk permet en une seule expérience de mesurer directement la conductivité et la diffusivité thermique et indirectement la capacité thermique volumique du matériau à travers la relation suivante :

$$\lambda \text{ (W/m.K)} = a \text{ (m}^2\text{/s)} \cdot C_p \text{ (J/m}^3 \text{ K)}$$



Figure 3.22 : l'appareil Hot Disk-Thermoconcept de caractérisation thermique



Figure 3.23 : Sonde en kapton

Références

- [1] **M. F. Pays.** Composite piping: Basic Materials, Manufacturing Methods, Hydrolysis Resistance. Bibliographical Data and State of the Art, EDF page 3, **1996**.
- [2] **Y. Lamy.** Nanostructuration de résines polyester insaturé par des copolymères à blocs : application aux composites SMC et BMC. Thèse de doctorat, **2012**, École doctorale Matériaux de Lyon.
- [3] **H. J. Jaafer.** Effects of Fibers on Damping Behaviors of Composites Materials. Thesis, **2010**, University of Technology, Iraq
- [4] **D. Gay.** Matériaux composites. Édition Hermes. **1997**.
- [5] **M. Jean Marie.** Contribution à l'histoire industrielle des polymères en France. Centre de recherche de Lyon.
- [6] **D. Sibih**, Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres. Thèse doctorat, INSA De Lyon **2011**.
- [7] **ASTM** Standard Test Method for Preparation of Extractive-Free Wood. D1105–96. **2007**
- [8] **AFNOR.** Produits agricoles et alimentaires. Détermination de la cellulose brute. F V 03-040, **1993**, 12pp.
- [9] **ASTM C-127-88.** Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate, **1988**.
- [10] **Kriker A, Debicki G, Bali A, et al.** Mechanical properties of date palm fibers and concrete reinforced with date palm fibers in hot-dry climate. Cem Concrete Comp **2005**; 27: 554–564.
- [11] **AFNOR.** Norme Européenne NF EN ISO 5079 Fibres. France, **1996**, p.20
- [12] **A.Y. Nenonene.** Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs a base de colle d'os, de tannin ou de mucilage. Thèse doctorat, Université de Toulouse, **2009**.

Références

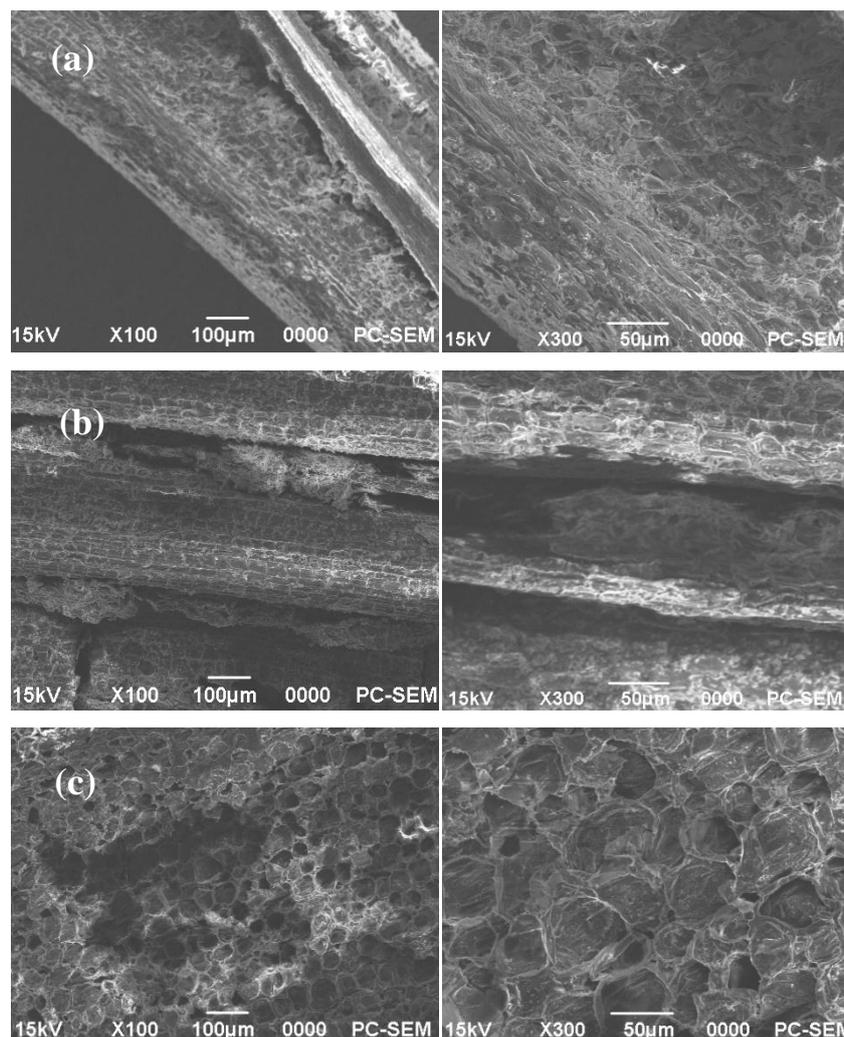
- [1] **M. F. Pays.** Composite piping: Basic Materials, Manufacturing Methods, Hydrolysis Resistance. Bibliographical Data and State of the Art, EDF page 3, **1996**.
- [2] **Y. Lamy.** Nanostructuration de résines polyester insaturé par des copolymères à blocs : application aux composites SMC et BMC. Thèse de doctorat, **2012**, École doctorale Matériaux de Lyon.
- [3] **H. J. Jaafer.** Effects of Fibers on Damping Behaviors of Composites Materials. Thesis, **2010**, University of Technology, Iraq
- [4] **D. Gay.** Matériaux composites. Édition Hermes. **1997**.
- [5] **M. Jean Marie.** Contribution à l'histoire industrielle des polymères en France. Centre de recherche de Lyon.
- [6] **D. Sibih,** Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres. Thèse doctorat, INSA De Lyon **2011**.
- [7] **ASTM** Standard Test Method for Preparation of Extractive-Free Wood. D1105–96. **2007**
- [8] **AFNOR.** Produits agricoles et alimentaires. Détermination de la cellulose brute. F V 03-040, **1993**, 12pp.
- [9] **ASTM C-127-88.** Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate, **1988**.
- [10] **Kriker A, Debicki G, Bali A, et al.** Mechanical properties of date palm fibers and concrete reinforced with date palm fibers in hot-dry climate. Cem Concrete Comp **2005**; 27: 554–564.
- [11] **AFNOR.** Norme Européenne NF EN ISO 5079 Fibres. France, **1996**, p.20
- [12] **A.Y. Nenonene.** Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs a base de colle d'os, de tannin ou de mucilage. Thèse doctorat, Université de Toulouse, **2009**.

Chapitre IV : Caractéristiques du bois de palmier dattier

La mise en œuvre d'un matériau végétal non conventionnel tel que le bois de palmier dattier pour l'élaboration des matériaux composites suppose une bonne connaissance des propriétés chimiques, physiques, mécaniques et thermiques de ce matériau. Après avoir exposé l'ensemble des matériels et méthodes mis en œuvre pour la caractérisation des matières premières utilisées dans cette étude, nous allons dans ce chapitre présenter et discuter les différents résultats de la caractérisation du bois de palmier dattier.

1. Micro structure

La structure morphologique de différents types de bois de palmier dattier étudiés est illustrée ci-dessous par les photos MEB :



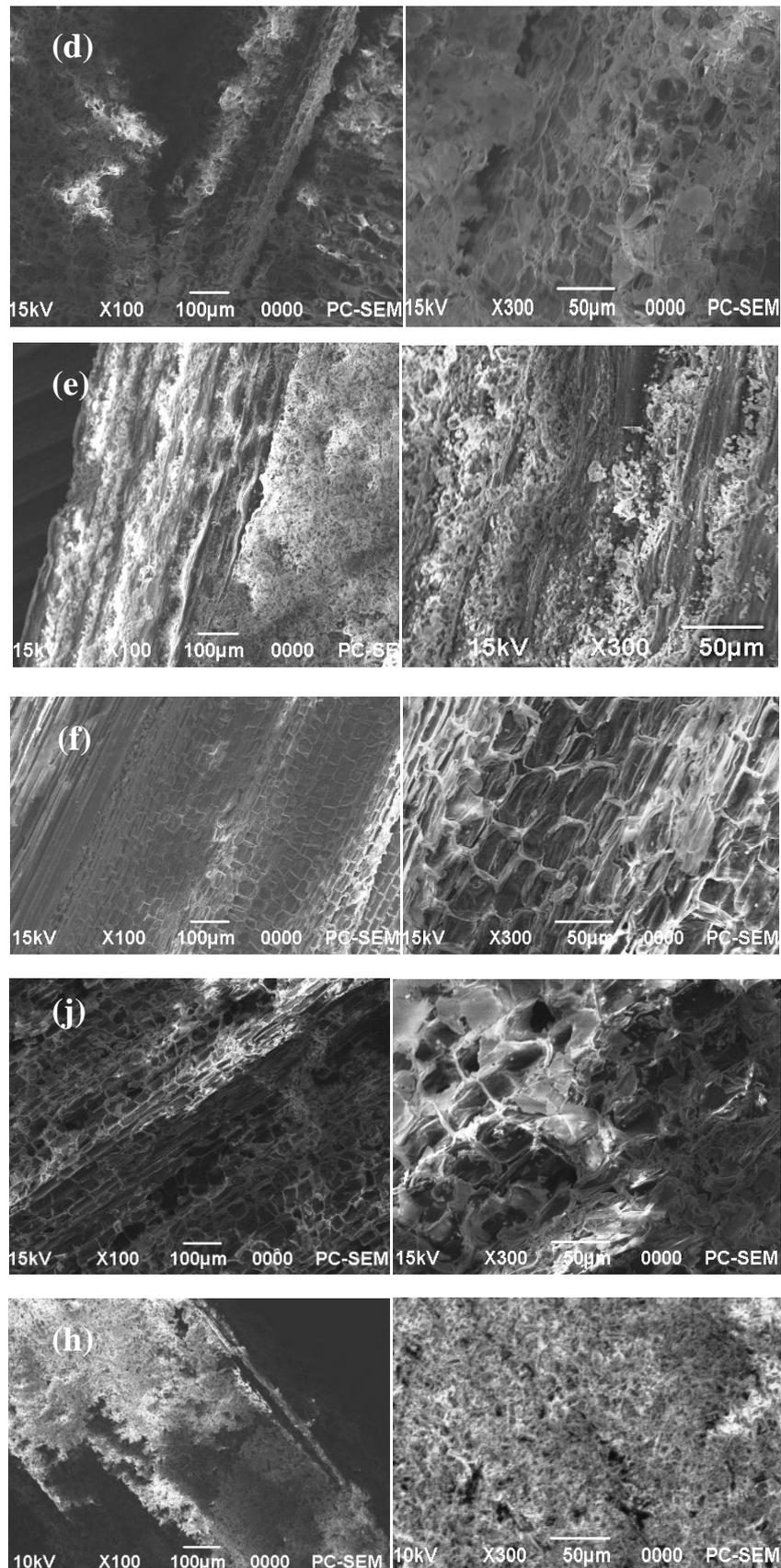


Figure 4.1 : Observation sous MEB de bois de palmier dattier : (a) Fibrillum, (b) Spathe, (c) Rachis, (d) Pétiole, (e) Folioles, (f) Grappe, (j) Pédicelles, (h) Epines, en utilisant deux échelles d'observation : 100 µm, 50 µm

La figure 4.1 montre que tous les types de bois de palmier dattier sont constitués des fibres reliées entre elles par des agrégats qui sont supposés être de la lignine. La présence d'alvéoles dans la structure du bois lui assure une porosité importante qui peut influencer sa conductivité thermique. L'observation d'une coupe transversale du bois de pétiole à des échelles plus petites 20 μm et 10 μm (figure 4.2.a,b) montre qu'elle se constitue par des faisceaux de fibres de rainures composées par des vaisseaux conducteurs (figure 4.2.c). Le diamètre des fibres est de l'ordre de 10 μm .

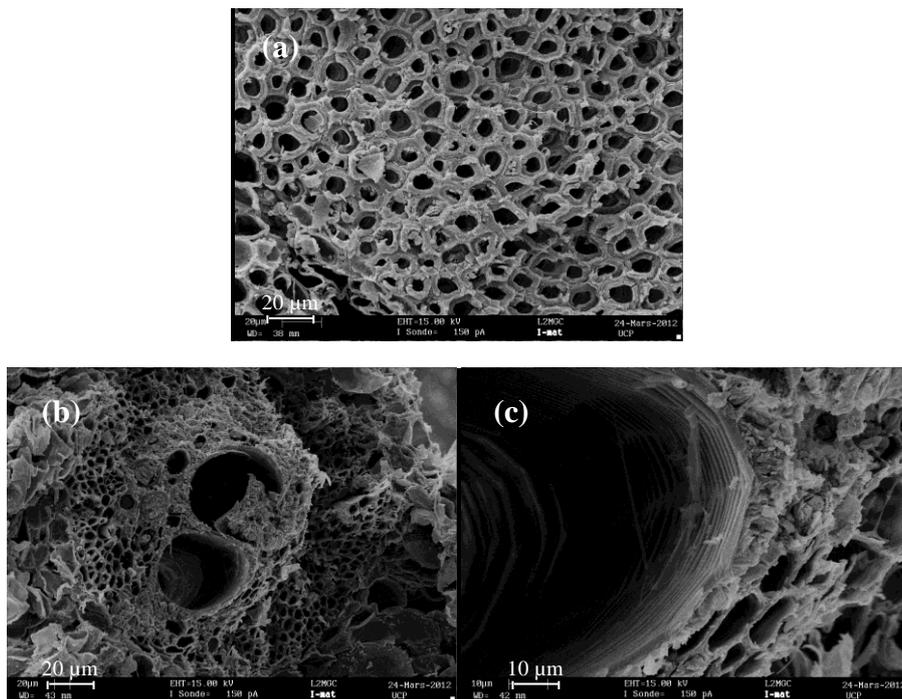


Figure 4.2 : Coupe transversale du bois de pétiole

2. Composition chimique

Les résultats obtenus de la composition chimique de nos échantillons sont consignés dans le tableau 4.1. Il apparaît clairement que la composition principale de tous les types de bois de palmier dattier est le carbone et l'oxygène et une quantité minimale de l'hydrogène, comme n'importe quelle matière organique dans la nature. On peut seulement noter que la quantité de carbone dans le bois de Fibrillium est relativement élevée par rapport aux teneurs de carbone dans les autres échantillons. Toutefois, lorsqu'on compare cette quantité et celle des grappes avec celles rapportées dans la littérature pour le même type de bois [1,2], on

remarque qu'elles sont bien inférieures. Cela provient essentiellement de l'influence de la composition chimique du sol et de l'environnement dans le quel la plante a été cultivée. Le reste de la composition représente des traces des différents minéraux.

Tableau 4.1 : La composition chimique du bois de palmier dattier

Echs	Cu 10 ⁻³ (%)	Mn 10 ⁻³ (%)	Zn 10 ⁻³ (%)	Fe 10 ⁻³ (%)	Na (%)	Ca (%)	K (%)	Mg (%)	P (%)	Cr (%)	C (%)	O (%)	H (%)
Pétiole	0.630	0.091	0.632	1.660	0.020	0.526	0.168	0.342	0.095	ND	40.1	49.8	2.18
Rachis	0.640	0.756	13.617	1.682	0.029	1.469	0.442	0.290	0.195	ND	43.6	40.3	6.40
Epines	0.382	0.195	0.627	7.150	0.017	1.123	0.196	0.223	0.111	ND	42.0	40.8	3.31
Folioles	0.661	0.940	1.255	15.186	0.016	1.393	0.095	0.099	0.172	ND	45.2	43.5	4.77
Grappes	0.413	0.332	4.314	3.210	0.033	0.289	1.452	0.041	0.135	ND	41.5	50.3	5.04
Pédicelles	0.434	0.160	0.616	6.508	0.034	0.310	0.543	0.040	0.096	ND	58.8	40.7	3.65
Spathes	0.588	0.389	0.731	4.007	0.012	0.281	1.225	0.098	0.253	ND	40.6	41.6	5.71
fibrillum	0.599	0.321	2.799	10.471	0.096	0.313	0.006	0.082	0.128	ND	61.2	32.0	5.24

2.1. Composition organique

La figure 4.3 montre la composition organique de différents types de bois de palmier dattier comparée avec celle obtenue pour d'autres fibres naturelles. On peut remarquer qu'il n'y a pas une différence significative entre les différents types de bois étudiés concernant leur composition organique. Ils sont constitués de trois composants majoritaires : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Le reste de la composition comprend les extractibles, les hydrosolubles et les cendres. La cellulose est le premier constituant du bois de palmier dattier, elle varie entre 33% et 44% de la matière sèche. Ce pourcentage est comparable à celui des fibres d'alfa, de cannes à sucre, de lin, de bambou, de noix de coco, et de tige de kéraf [3-5]. Par contre, il est plus grand que celui des fibres de sabai [3,6-8] et plus faible que celui des fibres de chanvre, de Ramie, d'abaca, d'henequen et des fibres de sisal [4]. Les hémicelluloses représentent le deuxième constituant majoritaire dans le bois de palmier. Leur taux est de l'ordre de (20%) est comparable à celui des fibres de pailles de blé, de cannes à sucre, d'abaca et de kéraf et nettement élevé par rapport aux fibres de sisal, de ramie, de jute, de lin, et de bambou et de 2 à 5 fois plus grand que celui des fibres de henequen [3,4]. Le bois du palmier est très riche en lignine. Le taux mesuré est de l'ordre de 29%. Ce dernier est proche de celui déterminé dans le cas de fibres de cannes à sucre, de bambou et les fibres de coco [4,5]. Il est légèrement plus grand que celui de jute, de lin et 3.5 fois plus grand que celui des fibres de feuilles d'abaca et de sisal où la lignine ne représente qu'en moyenne 8% de la

matière sèche [3]. L'analyse des résultats obtenus et présentés dans le tableau 4.3 nous a permis de noter que le rachis est le bois le plus riche en lignine (33%) parmi les autres types de bois de palmier dattier. C'est la caractéristique qui lui confère une structure consistante et rigide et au même temps flexible, ce qui favorise son utilisation comme un matériau de construction [9]. La teneur élevée en lignine dans le bois de rachis est observée également dans les résultats rapportés par d'autres travaux [10-13]. Par ailleurs, le taux de cellulose qui caractérise le bois de rachis, le bois de spathe, et de fibrillium appartient à la gamme de cellulose du bois tendre (softwood 40–52%) et du bois dur (hardwood 38–56%). Cette caractéristique offre l'avantage à ces types de bois d'être utilisés comme matière première de pâte de bois dans l'industrie de papier [14]. En outre, La teneur en matière extractible en toluène du bois de pétiole, de grappe, et de folioles ($7\% <$) pourrait être un facteur améliorant la résistance de bois contre la désintégration lorsqu'il est utilisé comme panneau de bois [15]. On peut noter également la faible teneur en cendre du bois de Fibrilliums, et de folioles, ce qui peut affecter positivement les machines de traitement [14]. En plus de leur faible teneur en cendre, qui est comparable à celui des biomasses non ligneux (non wood) [13], le bois de

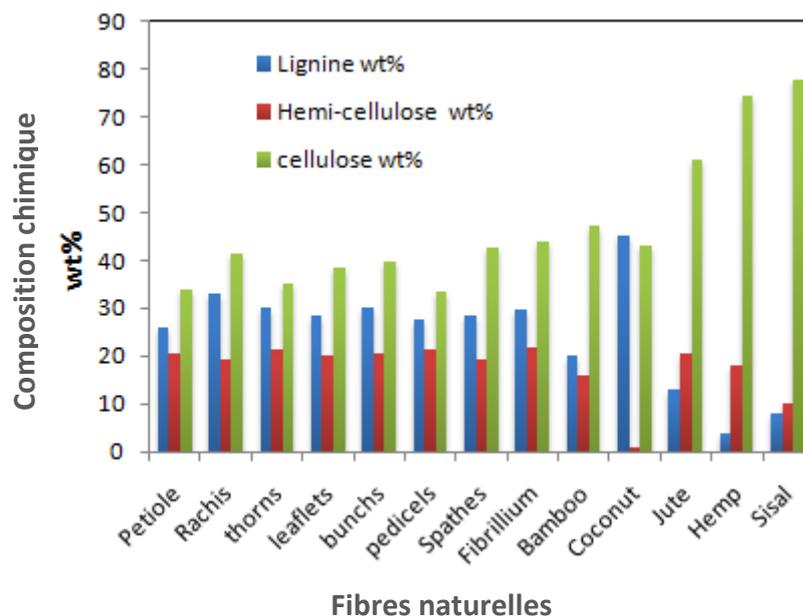


Figure 4.3 : Composition organique des différentes parties de bois de palmier dattier comparée à celle d'autres fibres naturelles

Fibrilliums, et des folioles se caractérisent par un taux de cellulose brute relativement élevée. Cette propriété améliore leur résistance contre les acides et les alcalins, donc ce sont des matériaux convenables pour le renforcement des matrices alcalines.

Tableau 4.2 : Composition organique du bois de palmier dattier

Echs	Extractives wt %	Solubilité dans l'eau chaude wt%	Cendre wt %	Cellulose Brute wt %	Lignine wt %	Hemi- cellulose wt %	Cellulose wt %
Pétiolle	13.86	27.00	3.70	23.97	26.03	20.44	33.79
Rachis	7.68	17.67	4.00	54.02	33.00	19.35	41.42
Epines	7.55	14.00	5.52	56.29	30.10	21.17	35.05
Folioles	9.56	22.64	2.62	49.00	28.57	20.05	38.58
Grappes	10.27	11.45	5.14	59.77	29.97	20.68	39.82
Pédicelles	5.89	12.26	3.05	68.29	27.64	21.15	33.29
Spathe	5.38	29.42	5.10	43.27	28.27	19.10	42.48
Fibrillium	4.32	3.37	1.55	82.28	27.80	21.68	43.94

2.2. Composition minérale

Les résultats de l'analyse minérale du bois de palmier dattier sont présentés dans le tableau 4.1 et illustrés sur la figure 4.4. En moyenne le taux de matière minérale analysée dans le bois de palmier dattier varié de la valeur 1.55% de la matière sèche de fibrillium à la valeur 5.52 % de la matière sèche d'épines. L'analyse effectuée montre que le bois de palmier est riche principalement en calcium, et en potassium. Les épines, les grappes, et les spathes sont les parties du bois renouvelables les plus riches en matière minérale (tableau 4.2). Cette proportion de matière minérale reste faible devant d'autres déchets agricoles tel que les fibres issues du riz, elle atteint 14% de leur matière sèche [3]. Ceci est revient aux plusieurs facteurs : la composition chimique du sol, les conditions climatiques, les traitements chimiques que pourrait subir la plante, en plus de l'espèce, et de l'âge de la plante [16].

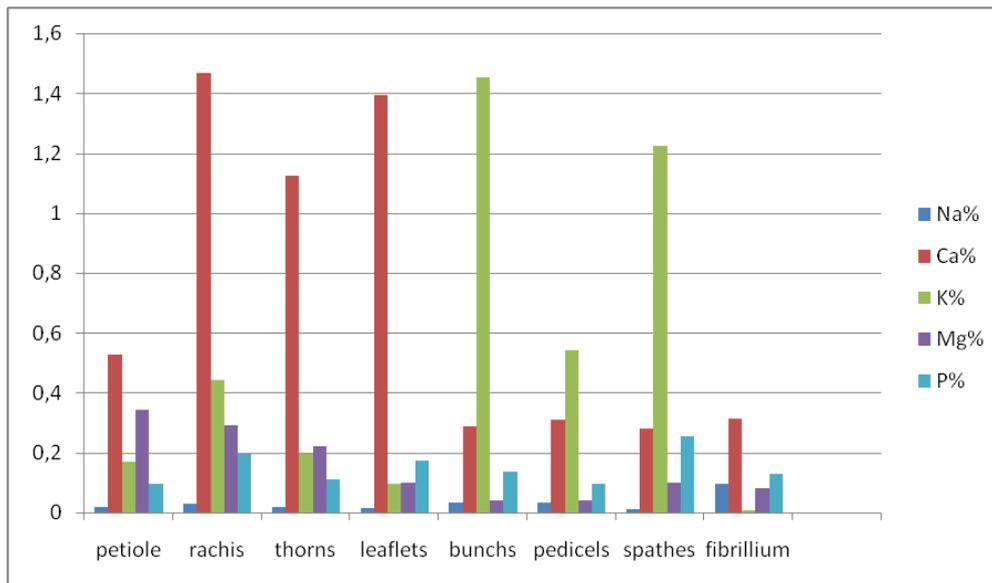


Figure 4.4 : Composition minérale des différents types de bois de palmier

3. Propriétés physiques

Les résultats des propriétés physiques du bois de palmier dattier sont résumés dans le tableau 4.3. Au vu de ces résultats il apparaît clairement que la densité du bois de rachis et de celui de grappe sont les plus élevées par rapport à celles des autres types de bois examinés dans notre étude. Ce type de bois est classé léger ($500\text{--}650\text{ kg/m}^3$), par contre le bois de pétiole, fibrillum, spathe, folioles, pédicelles, et des épines est classé très léger ($< 500\text{ kg/m}^3$) d'après le classement rapporté dans la littérature [17]. Selon la même référence ce type de bois se caractérise par une souplesse que lui rend plus facile à traiter. La faible densité du bois de palmier dattier, notamment le bois du pétiole, est remarquable en le comparant avec d'autres matériaux utilisés comme renfort [5]. En effet, Le poids légers du bois de palmier dattier représente un avantage économique vis-à-vis la réduction de la consommation d'énergie lors du processus de transport d'une part, et de l'autre facilite son traitement et son utilisation.

Les résultats représentant le taux d'absorption après 24 h d'immersion, montrent que le bois de pétiole, de spathe, et de Fibrillum se caractérisent par une grande affinité pour l'eau, comparés aux autres types de bois. Le taux de Pétiole atteint 140 %, il est inférieur au taux moyen d'absorption du sisal (230 %), et supérieur à celui des fibres de coco (100%) [18]. Le taux moyen d'absorption du bois de rachis, des épines, des pédicelles, des grappes, et des folioles est inférieur à celui des fibres de noix de coco. Ceci pourrait avoir un effet bénéfique

sur la consommation du traitement chimique contre la prise d'humidité, particulièrement pour le bois du rachis (36.88%).

De manière globale, on remarque qu'il existe une corrélation positive, illustré dans le tableau 4.3, entre le taux d'absorption d'eau et le taux de porosité des échantillons testés. Ainsi, le bois de pétiole, de fibrillium, et de spathe sont caractérisés par un taux élevé de porosité. Il atteint 81.52 % dans le cas du bois de pétiole, cette valeur est inférieure au taux de porosité des fibres de paille (96%) [19], et nettement supérieure à celui de plusieurs d'autres fibres naturelles tel que les fibres de coco [20]. En effet, la porosité contribue d'une manière primordiale dans le processus d'absorption d'eau. Ce qui constitue l'inconvénient majeur de l'utilisation du bois de palmier dattier notamment celui de pétiole. Néanmoins, la porosité est l'origine des excellentes propriétés d'isolation thermique et acoustique du matériau. Ainsi, l'utilisation du bois du Pétiole, de Fibrillium, et de Spathe en raison de ces propriétés sera bénéfique [2].

Tableau 4.3 : Les propriétés physiques du bois de palmier dattier

Propriétés	Pétiole	Rachis	Epines	Folioles	Grappe	Pédicelles	Spathe	Fibrillium
Densité (kg/m ³)	160 ± 54	635 ± 22.8	431 ± 8.5	411± 41.4	555±11.8	425± 23.6	328 ± 42.4	209± 31.7
Densité Absolue (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
Absorption de l'eau (% wt)	146 ± 21	36.88± 10	83.85± 3.1	96.6± 1.4	63.2 ± 5	73.78± 3	130.83± 2	115 ± 15 .7
Porosité (%)	81.52	15.44	39.80	50.6	32.8	43.25	63.43	73.41

4. Propriétés mécaniques

Les valeurs moyennes de la résistance à la traction, l'élongation à la rupture et du module d'élasticité de chaque type de bois issue de déchet de palmier dattier sont regroupées dans le tableau 4.4. Les résultats montrent qu'il ya une légère différence entre les propriétés mécaniques des huit types de bois étudiés. Néanmoins, on peut distinguer les bonnes propriétés mécaniques du bois de rachis par rapport aux autres. Ceci peut être attribué aux

caractéristiques chimiques et physiques de ce bois, confirmés par le taux relativement élevé de cellulose et relativement faible de porosité (tableau 2, 3). En outre, on peut noter que les propriétés mécaniques (le module de Young, et la résistance à la traction) du bois de Fibrillium obtenues dans ce travail sont comparables à celles rapportées en littérature [21, 22], tandis que celles obtenues pour le bois de pétiole sont sensiblement plus élevées comparées à celles de la littérature rapportées pour le même type de bois [23]. En effet, les fibres végétales présentent une grande variabilité des propriétés intrinsèques d'une fibre à l'autre et également tout au long d'une même fibre [28, 29], ce n'est pas comme les fibres synthétiques qui sont géométriquement uniformes. Plusieurs facteurs influencent les propriétés mécaniques en traction des fibres végétales, tels que la forme géométrique, la structure morphologique, la vitesse en traction, la température, l'humidité ambiante et le mécanisme de rupture de la fibre, etc. [20, 24-27]. Ces facteurs et d'autres sont probablement la cause de la dispersion des valeurs expérimentales de la résistance en traction, même dans des conditions de laboratoire soigneusement contrôlées. Par ailleurs, La comparaison des propriétés mécaniques de bois de palmier dattier avec celles d'autres fibres végétales (la figure 4.5) indique que le module de Young de la matière végétale provenant du déchet annuel de palmier dattier est comparable à celui des fibres de coco, mais nettement inférieur à celui des fibres de ramie, de lin, de jute et de la plupart des fibres végétales exploitées industriellement dans la fabrication des matériaux composites [30]. La faible rigidité du bois de palmier dattier par rapport à celle des fibres végétales pourrait être attribuée au taux relativement faible de cellulose [24] dans le bois de palmier, la matière qui contribue à la rigidité du matériau comme l'indique le chapitre I. Cependant, lorsque le module spécifique est considéré (figure 4.6), le bois de palmier dattier indique des valeurs comparables ou meilleures à celles des autres fibres naturelles [24].

Tableau 4.4 : Les propriétés mécaniques du bois de palmier dattier

Propriétés	Pétiole	Rachis	Epines	Folioles	Grappes	Pédicell -es	Spathe	Fibrillium
Diamètre (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-.51	0.50-0.80
Résistance à la rupture (MPa)	90 ± 8.87	213 ± 58	95.35± 48	100±43.87	114 ±54	86± 5.0	120.5±12	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±.15	2.41±.05	4.59±0.90
Module de Young (GPa)	7.00± 2.00	8.50±2.33	3.87±2.13	4.00±1.33	4.33±2.	3.00±1.0	5.00±1.0	3.66±2.33

La valeur élevée des propriétés spécifiques constitue l'un des avantages d'utilisation du bois de palmier dattier comme renfort pour des composites à des applications qui exigent à la fois la rigidité et la légèreté du matériau.

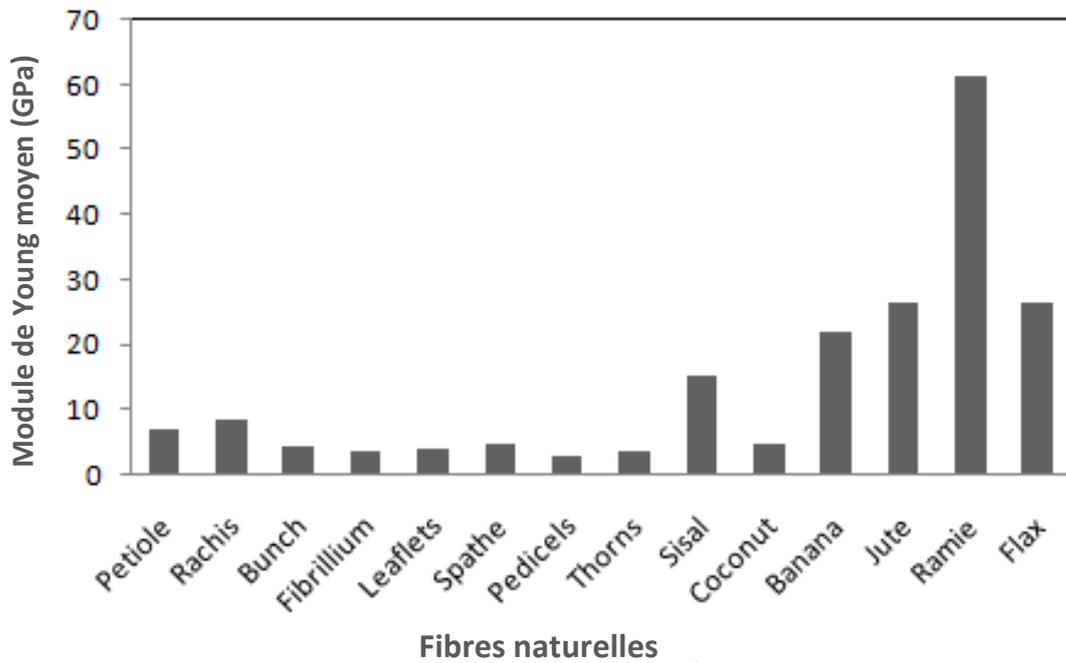


Figure 4.5 : Comparaison des propriétés mécaniques du bois de palmier avec d'autres fibres végétales

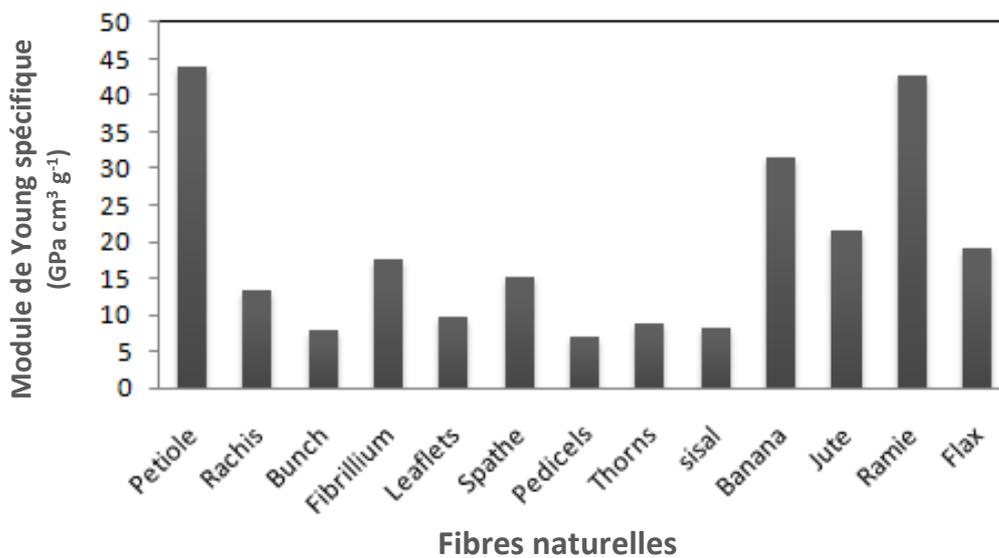


Figure 4.6 : Module de Young spécifique du bois de palmier dattier comparé à celui de quelques fibres végétales

5. Comportement thermique du bois de palmier dattier

Afin de déterminer les limites supérieures de température auxquelles le bois de palmier dattier peut être soumis sans avoir des dommages majeurs et d'analyser les phénomènes thermiques qui se passent au sein de l'échantillon, des analyses thermogravimétriques (ATG) et thermique différentielle (ATD) ont été réalisées. Les résultats obtenus pour les huit types de bois de palmier dattier sont illustrés sur les thermogrammes de la figure 4.7. On peut constater qu'il n'y a pas une grande différence entre les allures des courbes représentant l'évolution de la perte de masse des différents échantillons de bois en fonction de l'évolution de la température. Ces thermogrammes présentent tous les mêmes tendances de perte de masse en fonction de l'augmentation de la température. En effet, les courbes de l'ATG de nos échantillons montrent trois phases principales dans l'évolution de la pyrolyse. Chaque phase est caractérisée par une vitesse de perte de masse spécifique.

La première phase est une phase endothermique, qui se situe pour la plupart des échantillons dans la plage de températures allant de 75°C à 250°C correspond à une perte de masse sous air qui varie de 6.81% (dans le cas de fibrillium) à 14.80% (dans le cas de pétiole). Dans cette phase, l'évolution de la perte de masse se fait en deux parties : entre 75°C et 120°C, l'essentiel de la perte de masse est observée, puis n'évolue presque plus entre 120°C et 250°C. Le phénomène de perte de masse observé dans cette première phase est attribué essentiellement à la déshydratation des échantillons [31], en plus de l'élimination de composés volatils [32] et la dégradation d'une partie de lignine [33].

La deuxième phase est plus marquée que la première, elle se situe dans la gamme de température allant d'environ 250°C à 450°C (elle commence à 200, 220, 240, 250°C pour le pétiole, spathe, épines, et le Fibrillium, respectivement ; à 230°C pour le bois de grappe et de rachis ; et à 260°C pour le bois de pédicelles et de folioles . elle se termine à 460, 420, 420, 410, 450, 470, 400, et 450°C, pour le même ordre précédent des échantillons). Les courbes sont caractérisées par des pentes très fortes correspondant à des pertes de masse plus importantes (66.3, 65.79, 63.15, 69.45, 61.5, 63, 69.66, et 56.66% pour le même ordre précédent des échantillons). Cette deuxième phase, exothermique, correspond à la décomposition et à l'oxydation pyrolytiques du matériel végétal sec [32, 33]. Au cours de cette phase, des produits volatils de faible poids moléculaires sont libérés [34]. La gamme de température de la deuxième phase comprend la température de destruction de

l'hémicellulose, cellulose, pectine, et d'une partie de la lignine [32]. Selon [35], les températures de destruction des hémicelluloses et de la cellulose sont de 320°C et 360°C respectivement et celle de la destruction de la lignine est de 400°C. En travaillant sur la pyrolyse du bois de différentes espèces, l'auteur de la référence [36] a trouvé que la décomposition des hémicelluloses est complète à 320°C, c'est une température nettement plus faible que celle requise pour la cellulose (400°C), et la lignine (470°C) alors que pour [37], la dépolymérisation des hémicelluloses ou des pectines intervient dans la gamme de température de 250 à 320°C tandis que la décomposition de la cellulose a lieu entre 390 et 400°C. Selon [33], la dégradation de la lignine se fait sur une large gamme de température allant de 160°C jusqu'à 900°C.

Les courbes DTA de la deuxième phase des échantillons étudiés montrent deux pics exothermiques. Le premier pic est clairement observé pour tous les échantillons, il se situe à 320°C pour le bois de pétiole, de spathe et de fibrillium, à 350°C pour le bois de grappes et de rachis, et à 340, 330, 360°C pour le bois d'épines, de pédicelles et de folioles respectivement. Par contre, il n'est pas facile de distinguer le deuxième pic exothermique sauf pour le cas du bois de pétiole où il est localisé à 440°C (figure 4.7(a)), pour le reste il se situe aux alentours de 400°C. Comme on a déjà expliqué, le premier pic correspond à la destruction de certains éléments structuraux et à la réorganisation de la structure d'autres composants de ces produits, et le second à la formation d'autres liaisons chimiques avec probablement la cyclisation aromatique des résidus carbonés [32, 37]. Ainsi la dégradation principale du bois de palmier dattier se produit à une température supérieure à 320°C. Les résultats obtenus sont comparable à ceux rapportés dans la littérature [22, 38,39] concernant le bois de fibrillium, de rachis, de grappe et de folioles. la comparaison des thermogrammes de l'analyse thermique différentielle DTA du bois de palmier dattier notamment celui du bois de folioles avec ceux d'autres fibres naturelles, montre que la température du premier pic exothermique (la décomposition) du bois de foliole (360°C) est proche de celle de sisal, de chanvre, et de jute qui est égale à 350°C [20,40], et elle est plus élevée de celle de noix de coco et de bambou [4].

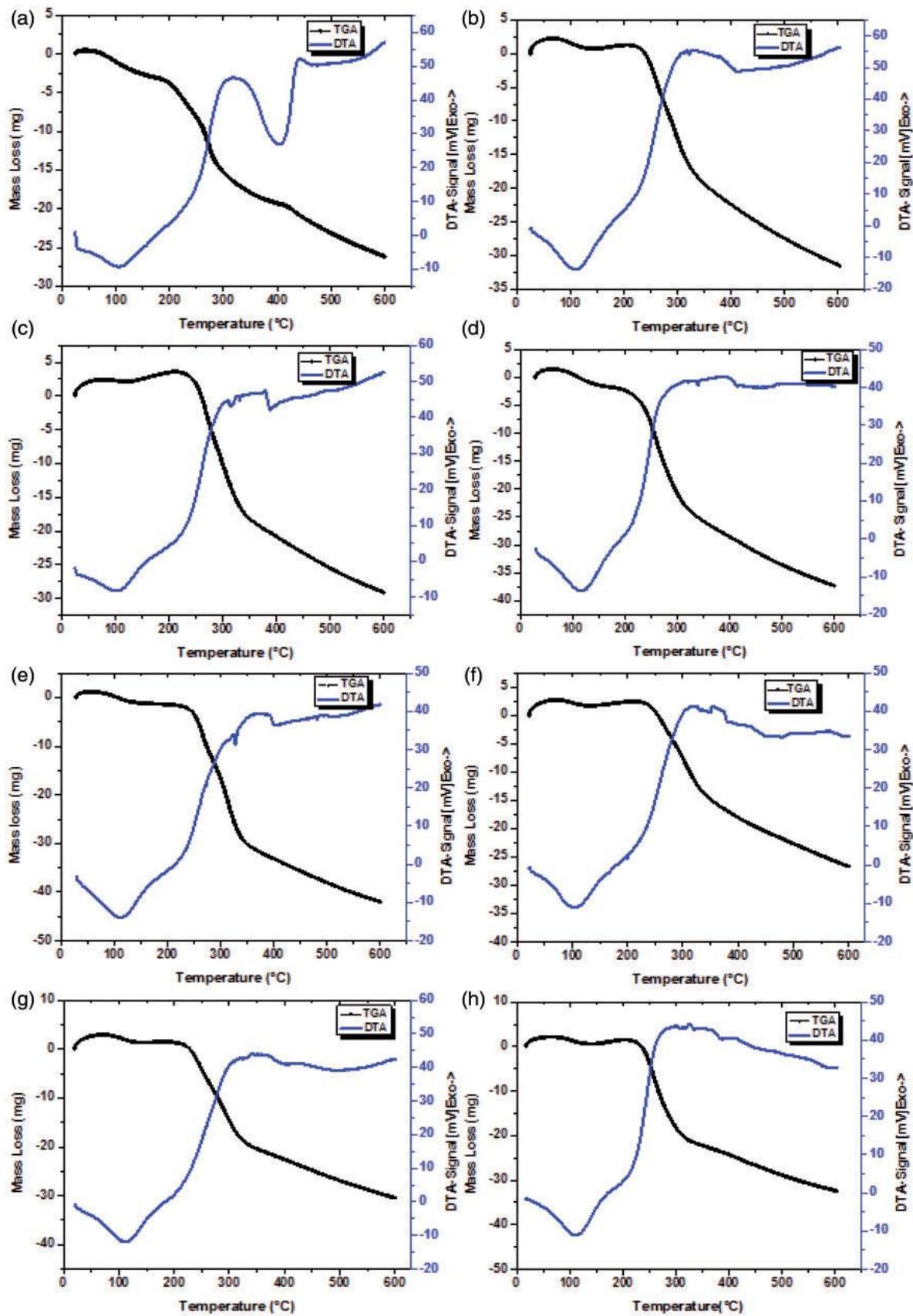


Figure 4.7: L'analyse thermique du bois de palmier dattier: a)Pétiole, b)Epines, c)Pédicelles, d)Spathe, e)Fibrillium, f)Folioles , g)Rachis, h)Grappes.

La troisième phase, qui va de 450 °C à 600 °C pour tous les échantillons, correspond à la destruction pyrolytique du reste de la matière organique transformée pour la plupart en produits carbonisés au cours de la deuxième phase. Cette phase se caractérise par une diminution de la vitesse de perte de masse. A haute température, la perte de masse du bois de fibrillium semble quasi-totale par rapport aux autres, parce que les échantillons broyés de ce type de bois ont montré des teneurs en matière minérale (1,55%) nettement plus faibles (tableau 4.2).

La comparaison entre les thermogrammes des différents types de bois de palmier dattier, illustré dans la figure 4.8, montre que le bois de folioles est plus résistant à la dégradation thermique que les autres types de bois issus du déchet de palmier dattier. Ceci peut avoir une relation avec la composition élémentaire et chimique du bois [41]

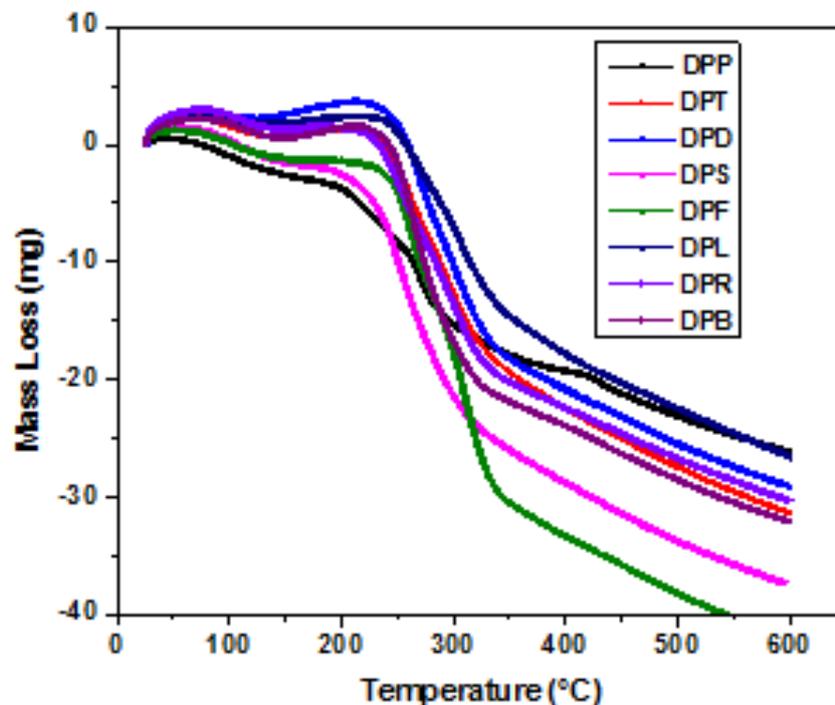


Figure 4.8 : Comparaison entre les courbes Thermogravimétriques du bois de palmier dattier: (DPP) Pétiole, (DPT) Epines, (DPD) Pédicelles, (DPS) Spathe, (DPF) Fibrillium, (DPL) Folioles, (DPR) Rachis, (DPB) Grappes

6. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier les propriétés de toute sorte de bois issus de la partie renouvelable de palmier dattier dans la perspective d'élaboration d'un nouveau matériau composite à base de cette matière renouvelable et abondante. Ainsi la structure morphologique, la composition chimique, les propriétés physiques, et mécaniques en plus du comportement thermique de huit types de bois de palmier dattier ont été étudiées. Les résultats expérimentaux du bois de rachis, de pétiole, de folioles, de spathe, de fibrillium, de grappe, de pédicelles et d'épines ont été présentés, comparés entre eux et avec ceux d'autres matières végétales. Suite à ces résultats obtenus, il ressort les analyses suivantes:

- l'analyse de la composition chimique montre que la quantité de lignine est élevée dans tous les types de bois de palmier dattier (de l'ordre 28%) notamment dans le bois de rachis qui représente la plus grande teneur en lignine, la quantité de cellulose variée entre la valeur minimale 33.29% qui correspond au bois de pédicelles et la valeur maximale 43.94% qui correspond au bois de fibrillium. La teneur en hémicellulose est presque la même dans tous les types de bois étudiés, elle est de l'ordre de 20%.
- L'analyse de la caractérisation physique montre que la densité la plus faible caractérise le bois de pétiole, elle correspond à un taux d'absorption relativement élevé (146%). Le bois de fibrillium et celui de spathe se caractérisent également par un taux élevé d'absorption d'eau qui dépasse 100%, et une densité plus ou moins faible. En revanche, le bois de rachis représente la plus grande densité et le plus faible taux d'absorption d'eau (36.88%).
- L'analyse de la caractérisation mécanique montre que le bois de rachis se caractérise par une relativement grande rigidité qui s'interprète par une valeur relativement élevée de module de Young et de la résistance à la rupture, elles atteignent respectivement 8.5 GPa et 213 MPa. Les caractéristiques mécaniques des autres types de bois de palmier sont relativement faibles et se diffèrent peu. Cependant, leurs propriétés mécaniques spécifiques sont considérables, notamment pour le bois de pétiole, en les comparants avec d'autres fibres naturelles.
- L'analyse thermique indique une perte de masse d'environ 10 % de nos échantillons qui se fait aux alentours de 100°C et qui correspond à la déshydratation et

l'entraînement de composés organiques volatiles. Au-delà de cette température, la pyrolyse de nos échantillons est stable jusqu'à 250°C, sans perte de masse significative, ce qui n'exclut pas des modifications structurales des biopolymères aux alentours de 200°C. La dégradation commence au alentour de 200°C pour le bois de pétiole, spathe, grappe et de rachis et aux alentours de 260°C pour le bois de folioles, fibrillum, épines, et de pédicelles. L'analyse différentielle thermique montre que la principale dégradation du bois de palmier aura lieu aux alentours de 320°C, excepté pour le bois de folioles qui montre une résistance à la dégradation thermique bien meilleure que celle des autres (360°C).

Au vu de tous les résultats expérimentaux obtenus dans ce chapitre, on peut noter que quoi qu'il existe quelques exceptions peu repérés, les différents bois étudiés présentent des propriétés comparables et se comportent comme un seul type de bois. Cette propriété qui caractérise le bois de palmier dattier va nous permettre d'une part d'amplifier la quantité de bois utilisée, d'éviter la procédure de triage et de faciliter la mise en œuvre du bois, et d'autre part minimiser la grande dispersion des résultats qui pourrait survenir à cause de la non homogénéité du matériau.

Références

- [1] **K. Riahi, B. Ben Thayer, A. Ben Mammou, A. M.H. Ben Ammar.** Biosorption characteristics of phosphates from aqueous solution onto *Phoenix dactylifera* L. date palm fibers Jaafoura, Journal of Hazardous Materials; 170, **2009**, 511.
- [2] **B. Agoudjil, A. Benchabaneb, A. Boudenec.** Renewable materials to reduce building heat loss: characterization of date palm wood. Energy Build; 43, **2011**, 491.
- [3] **D. Sibih**, Matériaux composites a matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres. Thèse doctorat, INSA De Lyon, **2011**.
- [4] **V. V. Do Thi**, Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non. Thèse de PhD, Université de Grenoble, **2011**.
- [5] **A. K. Bledzki, S. Reihmane , J. Gassan.** Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. J Appl Polym Sci; 59, **1996**, 1329–1336.
- [6] **R. M. Rowell, R. Jacobson, J. L. O'dell.** Use of Natural Fibers in Resine Transfer molding. International Conference on Wood fiber - plastic Composites. Madison, USA, **1995**, 137-140 p.
- [7] **M. Reyne**, Technologie Des Composites, Traité des nouvelles technologies. Série Matériaux ; Hermès, **1990**, 13.
- [8] **A. Gandini, M. N. Belgacem**, La chimie des substances renouvelables. L'actualité chimique. **2002**, 6-14.
- [9] **A. Rajan, C. R. Senan, C. Pavithran.** Biosoftening of coir fiber using selected microorganisms. Bioprocess Biosyst Eng; 28, **2005**, 165–173.
- [10] **A. Bendahou, A. Dufresne, H. Kaddamai, Y. Habibi.** Carbohydrate Polymers, 68, **2007**, 601–608.
- [11] **H. Ammar, M. Abid, S. Abid.** Cellulose fibers obtained by organosolv process from date palm rachis (*Phoenix dactylifera* L.). Mater Sci Eng; 11, **2012**, 012002.
- [12] **R. Khiari, M. F. Mhenni, M. N. Belgacem.** Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica* – a comparison with other wood and non- wood fiber sources. Bioresour Technol; 101, **2010**, 775–780.
- [13] **P. Khristova, O. Kordsachia T. Khider.** Alkaline pulping with additives of date palm rachis and leaves from Sudan. Bioresour Technol; 96, **2005**, 79–85.

- [14] **L. Xiaobo**, Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. Thesis of Master of Science, Baton Rouge, Louisiana, US: School of Renewable Natural Resources, **2004**.
- [15] **W.Y. Feng, Z. Wang, W.J. Guo**. A study on chemical composition and fiber characteristics of two sympodial Bamboos. Research Report. Beijing: Research Institute of Wood Industry, CAF, **2002**
- [16] **C. Ververis, K. Georghiou, N. Christodoulakis, P. Santas, R. Santas**. Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. *Industrial Crops and Products* 19, **2004**, 245–254.
- [17] **J. Besset**, Bois Et Matériaux Dérivés. Direction Du Centre Technique Du Bois Et De L'ameublement.
- [18] **R. D. Tolêdo Filho, K. Scrivener, G. L. England**. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibers in cement. *J Cem Concr Compos*; 22, **2000**, 127–143.
- [19] **M. Bouasker, N. Belayachi, H. Dashnor**. Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications. *Materials*; 7, **2014**, 3034–3048.
- [20] **H. Thi, T. Nga**. Etude de L'influence de La Température et de L'humidité sur les Propriétés Mécaniques en Traction des Fibres de Chanvre et de Coco, PhD Thesis, Ecole De Technologie Supérieure, Université Du Québec, **2008**.
- [21] **A. Kriker, G. Debicki, A. Bali**. Mechanical properties of date palm fibers and concrete reinforced with date palm fibers in hot-dry climate. *Cem Concrete Comp*; 27, **2005**, 554–564.
- [22] **A. Alawar, A. M. Hamed, K. Al-Kaabi**. Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Compos Part B*; 40, **2009**, 601–606.
- [23] **M. Tlijania, A. Gouadriab, A. Benyounesc**. Study and optimization of palm wood mechanical properties by alkalization of the natural fiber. *Int J Sci Basic Appl Res*; 11, **2013**, 30–38.
- [24] **A. K. Bledzkî, J. Gassan**. Composites reinforced with cellulose based fibres, *Progress in Polymer science*, 24, **1999**, 221-274.
- [25] **K. G. Satyanarayana, K. Sukumaran, P. S. Mukherjee**. Materials science of some lignocellulosic fibers, *Metallography*, 19, **1986**, 389-400.
- [26] **P. S. Mukherjee, K. G. Satyanarayana**. Structure and properties of some vegetable fibres - Part 1 : Sisal fibre, *Journal of Materials Science*, 19, **1984**.

- [27] **P. S. Mukherjee , K. G. Satyanarayana**, Structure and properties of some vegetable fibres - Part 2:Pineapple fibre, *Journal of materials science*, 21, **1986**, 51-56.
- [28] **M. K. Kompella, J. Lambros**. Micromechanical characterization of cellulose fibres, *Polymer Testing*, 21, **2002**, 523 - 530.
- [29] **S. S. Tripathy, L. Di Landro, D. Fontanelli**. Mechanical Properties of Jute Fibers and Interface Strength with an Epoxy Resin, *Journal of applied polymer science*, 75, **1999**, 1585-1596.
- [30] **J. J. Maya, T. Sabu**. Natural polymers: Composites. Cambridge: Royal Society of Chemistry, **2012**, 40.
- [31] **P. Budrugaec, V. Trandafir, M. G. Albu**. The effect of the hydration degree on the hydrothermal and thermo-oxidative stability of some collageneous matrices. *J Therm Anal Calorimetry*; 72, **2003**, 581–585.
- [32] **A. Y. Nenonene**, Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kéraf et de bioadhésifs a base de colle d'os, de tannin ou de mucilage. Thèse doctorat, Université de Toulouse, **2009**.
- [33] **H. Yang, R. Yan, H. Chen**. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*; 86, **2007**, 1781–1788.
- [34] **P. Budrugaec, V. Trandafir, M. G. Albu**. The effect of the hydration degree on the hydrothermal and thermo-oxidative stability of some collageneous matrices. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 72, **2003**, 81. 585
- [35] **M.V. Ramiah**, Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicelluloses and lignin, *Journal of Applied Polymer Sciences*, 14, **1970**, 1323-1337.
- [36] **V. Strezov, B. Moghtaderi, J. A. Lucas**. Thermal study of decomposition of selected biomass samples. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 72, **2003**, 1041-1048.
- [37] **S. Ouajai, R. A. Shanks**. Composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatments. *Polymer Degradation and Stability*. 89, **2005**, 327-335
- [38] **Y. El may, M. Jeguirim, S. Dorge, G. Trouvé, S. Said**. Study on the thermal behavior of different date palm residues: Characterization and devolatilization kinetics under inert and oxidative atmospheres. *Journal of energy*, **2012**, 10, 1016.
- [39] **A. Al-Khanbashi, K. Al Kaabi, A. Hammami**. Date palm fibers as polymeric matrix reinforcement: fiber characterization. *Wiley Intersci Polym Comp*, 486–97, **2005**. 10.1002/pc.20118.

- [40] **D. Sedan**, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite. Thèse doctorat, Université de Limoges, **2007**.
- [41] **K. G. Mansaray, A. E. Ghaly**. Thermal degradation of rice husks in nitrogen. *Bioresour Technol*; 65, **1998**, 13–20.

Conclusion générale

La durabilité de développement des ressources naturelles pour des besoins industriels, à travers la maîtrise de leur gestion et de l'impact de leur transformation sur l'environnement, constitue une préoccupation majeure pour les chercheurs de vingt et unième siècle. Face à l'épuisement annoncé des énergies fossiles, en particulier du pétrole, et à l'accroissement des émissions de gaz carbonique que génère le prélèvement de carbone fossile, la biomasse par son caractère renouvelable et sa grande diversité apparaît de plus en plus comme la ressource alternative. L'exploitation des productions agricoles pour l'alimentation humaine d'une part, et comme matière première pour la production d'énergie, de produits chimiques et de matériaux composites d'autre part, est l'un des objectifs principales du développement durable.

L'industrie de la production des matériaux composites à base de fibres ou des particules de bois aux multiples applications dans le domaine de la construction, du bâtiment et ses aménagements, de l'ameublement, la décoration, etc. est essentiellement issue de la filière bois. Cependant, de nombreux travaux ont porté, ces dernières années, sur l'exploitation d'autres sources de particules lignocellulosiques comme les coproduits de culture et de transformation agro-industrielle de plantes annuelles. Le déchet de palmier dattier est une biomasse inépuisable disponible en Algérie et partout dans le monde, une quantité énorme et croissante de ce déchet est générée lors de la récolte des dattes et de l'entretien annuelle des palmiers. D'après l'étude statistique qu'on a effectuée, le palmier peut produire au moyenne 47.57 kg de déchet annuellement. Ce dernier contient huit types de bois à savoir le bois de folioles (28.7%), de rachis (27%), de pétiole (24%), de fibrillium (6.3%), de spathes (5%), de grappes (4.9%), de pédicelles (3.3%), et le bois d'épines (0.8%).

Le travail présenté dans cette thèse vise à valoriser l'utilisation du bois de déchet de palmier dattier comme source alternative de bois en Algérie. Ceci à travers l'élaboration des matériaux biosourcés à diverse applications et à faible coût, en utilisant les particules de tout les types de bois qui constituent ce déchet avec des liants disponibles et de faible coût, en l'occurrence la colle poly acétate de vinyle et la résine polyester.

L'incorporation des particules de cette variété de bois dans une matrice nécessite une bonne compréhension de ses propriétés physiques, chimiques, thermiques et mécaniques.

Conclusion générale

Aucun travail à notre connaissance ne fait référence à la caractérisation morphologique, chimique, physique, thermique et mécanique de tous les types de bois de palmier dattier issus du même environnement. Ainsi, la première partie de notre étude expérimentale, a été consacrée à la caractérisation de toute la partie renouvelable du bois de palmier de la variété Deglat Noor qui provient d'une palmeraie située dans la région Est de la Wilaya de Biskra. Les résultats de caractérisation obtenus nous ont permis de concevoir une base de données sur chaque type de bois de déchet de palmier dattier d'une part, et d'autre part comparer leurs propriétés entre eux et avec d'autres types de bois, afin de faciliter leur intégration individuelle ou par groupe dans une matrice éventuelle. Les résultats expérimentaux obtenus dans cette partie indiquent des propriétés comparables de tous les types de bois de palmier dattier étudiés, ce qui nous a encouragé de les considérer comme un seul type de bois. Cette propriété qui caractérise le bois de palmier dattier peut avoir des intérêts économiques et scientifiques. La composition chimique a montré que le bois de palmier contient relativement faible taux de cellulose et un taux relativement élevé d'hémicellulose et de lignine, au moyenne 40% wt de cellulose, 20% wt d'hémicellulose, et 28% wt de lignine. La caractérisation physique a montré qu'il se caractérise par un taux élevé d'absorption, au moyen supérieur à 100%, et une faible densité, inférieure à 600 kgm^{-3} qui correspond à un taux élevé de porosité, il peut atteindre une valeur supérieure à 80%.

Les résultats expérimentaux indiquent également des propriétés mécaniques relativement faibles des échantillons testés, Le module de Young varié de 3 à 8 GPa, tandis que La résistance à la traction variée de 86 à 213 MPa. Ces propriétés sont comparables à celles du bois de noix de coco et faibles par rapport à celles des fibres qui sont déjà exploitées dans l'industrie tel que les fibres de chanvre, de jute, et de ramie. Toutefois, leurs propriétés spécifiques peuvent avoir des valeurs considérables, ce qui offre l'avantage au bois de palmier dattier d'être utilisé dans le développement des matériaux à la fois rigides et légers. Les thermogrammes issus de la pyrolyse de nos échantillons indiquent que la dégradation principale de la matière organique du bois de palmier dattier commence à partir de 320°C et que la dépolymérisation des hémicelluloses ou des pectines intervient dans la gamme de température de 200 à 320°C . Donc il est préférable que la température maximale de mise en forme du matériau, ne doive pas dépasser 200°C , pour éviter l'affaiblissement ou la dégradation thermique de notre matière végétale.

L'étude des conditions opératoires du thermopressage (température de thermopressage, durée de pressage, granulométrie des particules de bois, type de liant, taux d'incorporation du

Conclusion générale

liant) des particules de bois de déchet de palmier dattier, broyées en présence du liant a permis de définir un protocole d'élaboration des matériaux composites avec des bonnes caractéristiques physiques, mécaniques, et thermiques. Les paramètres d'élaboration optimisés sont déterminés selon le type de liant et la granulométrie utilisée comme suit.

- La colle PVA associée à la granulométrie 1, avec les conditions optimisées : 30 % de colle, 80 °C pendant 10 min, temps de pressage 40 min à 10 Tm⁻² ont permis d'obtenir des matériaux composites avec les caractéristiques suivantes : densité = 995.14 kg/m³, MOE = 1143.16 MPa, MOR = 12.47 MPa, la conductivité = 0.2087 W/m°C et TS = 14.28 %.
- La colle PVA associée à la granulométrie 3 avec les mêmes conditions ont permis d'avoir des matériaux avec les caractéristiques suivantes : densité = 950.57 kg/m³, MOE = 1733.22 MPa, MOR = 22.25 MPa, la conductivité = 0.1981 W/m°C et TS = 33%.
- La résine UP associées à la granulométrie 1, avec les conditions suivantes : 30 % de colle, 140 °C pendant 10 min, temps de pressage 300 min à 10 Tm⁻² ont permis d'obtenir des matériaux composites avec les caractéristiques suivantes : densité = 1070,65 kg/m³, MOE = 1330.53 MPa, MOR = 12.89 MPa, la conductivité = 0.2101 W/m°C et TS = 11.11 %. Pour des raisons économiques, la température de thermopressage et le temps de pressage optimums identifiés sont 80°C et 40min. Les caractéristiques seront, dans ce cas là, les suivantes : densité = 979.10 kg/m³, MOE = 1065.36 MPa, MOR = 7.41 MPa, la conductivité = 0.1988 W/m°C et TS = 16.66%.
- La résine UP associée à la granulométrie 3, avec les conditions optimisées : 30 % de colle, 80 °C pendant 10 min, temps de pressage 40 min à 10 Tm⁻² ont permis d'obtenir des matériaux composites avec les caractéristiques suivantes : densité = 977.47 kg/m³, MOE = 2279.42 MPa, MOR = 21.61 MPa, la conductivité = 0.1918 W/m°C et TS = 11.11 %.

Dans les conditions optimales, les caractéristiques des matériaux composites obtenus pour la colle PVA et la résine UP associées aux granulométries 1 et 3, sont satisfaisantes pour une utilisation comme matériaux de haute densité, à applications générales en milieu sec d'autant plus lorsque la colle UP est utilisée.

Conclusion générale

Suite aux résultats obtenus lors de cette étude, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour une suite éventuelle de travail.