

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Mohamed Khider -
Biskra

Faculté des Sciences et de la
Technologie

Département de Génie Mécanique

Réf :



جامعة محمد خيضر
بiskra

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة الميكانيكية

المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention

du diplôme de

Magistère

Spécialité : **Construction Mécanique**

**CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION ET A
L'EXPLORATION DE LA MICROSTRUCTURE ET DES
PROPRIETES DES CONSTITUANTS DU PALMIER.**

Présenté Par :

BAALI Messaoud

Soutenu publiquement le :

Devant le jury composé de:

Mr. MOUMMI Nouredine	Pr.	Président	Université de Biskra.
Mr. HADID Mohamed	MCA	Rapporteur	Université de Biskra.
Mr. BRIMA Abdelhafid	MCA	Examineur	Université de Biskra.
Mr. Bensaada Said	Pr.	Examineur	Université de Biskra.

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du Laboratoire de génie mécanique (LGM) de l'université de BISKRA.

Je tiens d'abord à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à :

Monsieur. HADID MOHAMED, Maitre conférences à l'université de BISKRA, pour m'avoir encadré et soutenu durant le travail de ce mémoire. Je le remercie aussi pour son aide précieuse et ses conseils. Il m'est difficile d'exprimer en quelques mots toute l'admiration que je lui porte.

Mes sincères remerciements s'adresse également à :

Monsieur MOUMMI Noureddine, Professeur de l'université de BISKRA pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Monsieur BENZAADA Said, Professeur de l'université de BISKRA, de m'avoir honoré en acceptant examiner mon travail.

Monsieur BRIMA Abdelhafid, Maitre de conférences de l'université de BISKRA de m'avoir honoré en acceptant examiner mon travail.

.

Finalement, je tiens à exprimer ma très profonde gratitude à **mes parents** pour leur soutien morale et matériel ainsi qu'à tous mes amis.

Table des matières

Introduction	11
I. Structure du bois.....	14
I.1. Généralités sur les fibres végétales (Les fibres lignocellulosiques).....	14
I.1.1. Définition de la fibre végétale	14
I.1.2. Classification des fibres végétales.....	14
I.1.3. Morphologie de la fibre végétale.....	15
I.1.4. Effet de la morphologie, de la structure et de la composition chimique sur les propriétés mécaniques de la fibre végétale.....	16
I.1.4.1. Effet de la morphologie des fibres végétales.....	16
I.1.4.2. Effet de la structure des fibres végétales	17
I.1.4.3. Effet de la composition chimique des fibres végétales sur leurs propriétés mécaniques	18
I.2. Le bois : structure, composition chimique et propriétés viscoélastique	18
I.2.1. Structure macroscopique du bois	19
I.2.1.1. Le cambium, le liber et l'aubier	19
I.2.1.2. La croissance annuelle : bois d'été et bois de printemps.....	20
I.2.1.3. Aubier et duramen	21
I.2.2. Microstructure du bois	21
I.2.2.1. Les plans de référence du bois	21
I.2.2.2. Le plan ligneux des résineux et feuillus	22
I.2.3. Ultrastructure du bois	23
I.2.3.1. La couche intercellulaire	24
I.2.3.2. La paroi primaire	24
I.2.3.3. La paroi secondaire	24
I.3. Composition chimique du bois.....	25
I.3.1. La cellulose	26
I.3.2. Les hémicelluloses	27
I.3.3. La lignine.....	28
I.3.4. Les extractibles.....	29
I.3.5. Les cendres.....	30
I.3.6. Association entre lignine et polysaccharides à l'intérieur de la paroi cellulaire	30

I.4.	Propriétés physiques.....	32
I.4.1.	Gravité spécifique	32
I.4.2.	Humidité du bois	33
I.5.	Comportement mécanique du bois en relation avec sa structure au niveau cellulaire	33
I.5.1.	Comportement mécanique du bois en compression et en traction simple.....	33
I.5.2.	Les propriétés mécaniques du bois en relation avec sa densité.....	36
I.5.2.1.	Élasticité.....	36
I.5.2.2.	La résistance à la traction et la compression	38
I.5.2.3.	La ténacité	40
I.6.	Le bois comparé aux autres matériaux.....	41
II.	Structure et morphologie du palmier.....	43
II.1	Généralités sur le palmier	43
II.1.1	Botanique.....	43
II.1.2	Description	43
II.1.3	Histoire	44
II.1.4	Écologie.....	44
II.1.5	Économie	44
II.1.6	Utilisations des palmiers.....	45
II.1.7	Parasites et maladies.....	46
II.2	Le palmier dattier.....	46
II.2.1	Répartition géographique	47
II.2.2	Importance.....	49
II.2.3	Botanique.....	49
II.2.3.1	Le palmier dattier (Phoenix dactylifera).....	49
II.2.4	Origine du palmier dattier.....	52
II.2.5	Morphologie du dattier	53
II.2.5.1	Le tronc et les rejets.....	53
II.2.5.2	Les racines, ou système racinaire	56
II.2.5.2.1	Les racines respiratoires	56
II.2.5.2.2	Les racines nutrition	56
II.2.5.2.3	Les racines d'absorption.....	57
II.2.5.2.4	Les racines du faisceau pivotant.....	57
II.2.5.3	Palmes.....	57
II.2.5.4	Organes floraux (l'Inflorescence).....	59
II.2.5.5	Le fruit.....	60
II.2.6	La diversité variétale et génétique du palmier dattier.....	60

II.2.7 Climat et cycle végétatif.....	61
II.2.7.1 Température et activité végétative.....	61
II.2.8 Composition chimique des différentes fibres du palmier dattier.....	62
III. Partie Expérimentations	66
III.1.1 Constituants bruts du palmier dattier.....	66
III.1.2 Méthode de découpage	67
III.1.2.1 Découpage des palmes	67
III.1.2.2 Découpage du tronc de palmier.....	68
III.2 Méthodes de caractérisation.....	71
III.2.1 Calcul de la densité.	71
III.2.2 Observation par microscopes :	74
III.2.2.1 Observation de la microstructure par microscope optique digital (MOD).....	74
III.2.2.2 Observation de la microstructure par microscope électronique à balayage MEB.	75
III.2.3 Les essais mécaniques :	76
III.2.3.1 Les essais de traction:.....	76
III.2.3.2 Les essais de flexion simple:.....	77
III.2.3.3 Les essais de compression:.....	79
III.3 Résultats obtenus :	79
III.3.1 Caractérisation de la microstructure :.....	80
III.3.1.1 Observation par le MOD	80
III.3.1.2 Observation de la microstructure par le MEB.....	84
III.3.1.3 Mesure du diamètre des fibres.....	88
III.3.2 Les résultats des essais mécaniques	90
III.3.2.1 Essai de flexion du bois de tronc sec :.....	91
III.3.2.2 Essai de flexion du bois de tronc saturé en eau.....	93
III.3.2.4 Essai de compression bois du tronc.....	96
III.3.2.5 Essai de compression du kornaf	98
III.3.2.6 Essai de flexion du kornaf.....	99
III.3.2.7 Récapitulation des résultats obtenus.....	100
CONCLUSION GENERALE.....	101
Bibliographié.....	103
Résumé.....	105

Liste des figures

Figure I.1: Variation du diamètre le long de l'axe de la fibre de lin [1].	15
Figure I.2: Modèle de la description de structure d'une fibre végétale [1].	16
Figure I.3: Exemple de défaut structural sur une fibre de lin [1].	17
Figure I.4: Variation du module d'Young axial avec l'angle microfibrillaire de fibre simple [4] [1].	18
Figure I.5 : Section transversale d'un tronc d'arbre [5].	20
Figure I.6: Coupe transversale de bois de printemps et bois d'été dans un accroissement annuel de pin maritime.	20
Figure I.7: Section transversale d'un tronc d'arbre [5].	21
Figure I.8: Les trois plans de référence du bois.	22
Figure I.9: Plan ligneux typique des résineux (à gauche) et des feuillus (à droite) [10].	23
Figure I.10: Représentation schématisée des différentes couches de	23
Figure I.11 : Proportion relative en cellulose, hémicelluloses et lignine dans la paroi cellulaire. M = couche intercellulaire ; P = paroi primaire ; S1, S2, S3 = paroi secondaire	26
Figure I.12: Formule chimique de la cellulose.	26
Figure I.13: Ponts hydrogènes intramoléculaires et intermoléculaires entre deux macromolécules adjacentes de cellulose [4].	27
Figure I.14: Les régions cristallines et amorphes dans les microfibrilles de cellulose [5].	27
Figure I.15: Structure chimique partielle de deux hémicelluloses : (A) O-acétyl-4- Ométhylglucuronoxylane de feuillus et (B) Arabino-4-O-méthylglucuronoxylane de résineux [2].	28
Figure I.16: Schéma structural d'une lignine d'épicéa [5].	29
Figure I.17: Association entre lignine et polysaccharides à l'intérieur de la paroi cellulaire du bois, à l'état anhydre : a) Section transversale, b) Section	30
Figure I.18: Différentes échelles d'observation du matériau bois [7].	31
Figure I.19: Section d'un tronc de bois (a) et un élément agrandi (b) montrant les axes longitudinale L, radiale R, et tangentielle T et les cernes annuels.	34
Figure I.20: Courbe contrainte-déformation d'une éprouvette de peuplier (densité = 0,35) de dimensions 25×25×5 mm ³ en compression simple suivant les directions L, R, et T à vitesse de déplacement contrôlée de 1mm/mn [11].	35
Figure I.21: Courbe force-déplacement d'une éprouvette normalisée sous traction en force contrôlée [11].	35
Figure I.22: Courbe typique de force-déplacement d'une éprouvette en traction sous déformation contrôlée; (a) l'éprouvette après endommagement, (b) courbe montrant l'adoucissement poste-pic [11].	36
Figure I.23: Le module d' Young du bois dépend surtout de la densité relative ρ/ρ_s , le module axial varie en ρ/ρ_s ; le module transverse varie à peu près en $(\rho/\rho_s)^2$ [8].	37
Figure I.24: Sous une contrainte parallèle aux fibres, la plupart des parois cellulaires subissent une compression axial ; b). sous une contrainte transverse, les parois de cellules fléchissent.	38
Figure I.25: La résistance à la compression du bois dépend surtout, comme le module, de la densité relative ρ/ρ_s . La résistance axiale est proportionnelle à ρ/ρ_s ; la résistance transverse à $(\rho/\rho_s)^2$	39

Figure I.26: La ténacité du bois. Comme ses autres propriétés, dépend surtout de sa densité relative ρ/ρ_s . la ténacité transversale est à peu près 10 fois supérieur à la ténacité axiale. Toutes deux varient en $(\rho/\rho_s)^{2/3}$	40
Figure II.1 : Répartition géographique des palmiers dattier dans le monde [13].	48
Figure II.2: Le palmier dattier [14].	51
Figure II.3: Le tronc (stipe) du palmier dattier.....	53
Figure II.4: La disposition des palmes sur le tronc, vue du dessus de l'arbre [14].	54
Figure II.5: Coupe transversale de tronc du palmier (dokar)	55
Figure II.6: Les plans de coupe de tronc du palmier (dokar)	55
Figure II.7 : Fibre de tronc du palmier (par microscope optique digitale).....	55
Figure II.8 : Les quatre types de racines [14].....	56
Figure II.9 : Une palme [14].....	58
Figure II.10 : Coupe d'un rachis ou pétiole (kornaf).	59
Figure II.11 : La microstructure de kornaf (Microscope optique digitale).....	59
Figure II.12 : L'activité végétative en fonction de la température.	61
Figure III.1: Les palmes et le tronc pour la préparation des échantillons.	66
Figure III.2 : Les palmes découpée : partie pétiole (kornaf) et partie foliolée (Gand)	67
Figure III.3: Le découpage du kornaf.....	67
Figure III.4 : Le découpage de la partie pétiole (kornaf).	68
Figure III.5 : Tronc de palmier.....	68
Figure III.6: Les étapes de préparation de planches du tronc de palmier.....	69
Figure III.7: Balance électronique utilisée pour le calcul de la densité.....	71
Figure III.8: La variation de la densité en fonction la position de l'éprouvette palme (partie gand).....	72
Figure III.9: Numérotation des échantillons du kornaf pour la mesure de la densité.....	73
Figure III.10 : La variation de la densité de kornaf selon la direction transversale (direction X).	73
Figure III.11 : La variation de la densité de kornaf selon la direction transversale (direction Y).	74
Figure III.12 : Le microscope optique digital (DigiBlue_QX5_QSG).....	75
Figure III.13:Représentation schématique du microscope électronique à balayage [19].....	76
Figure III.14: Éprouvette de traction pour des essais où la charge est appliquée selon la direction longitudinale [20].	77
Figure III.15 : Schématisation d'un test de flexion simple trois points [20].	78
Figure III.16: La microstructure du bois du tronc (coupe transversale), avec différents grandissements (X10, X60 et X200)	80
Figure III.17: La microstructure du bois de tronc (coupe longitudinale), avec différents grandissements (X10, X60 et X200)	81
Figure III.18: La microstructure du bois de kornaf (coupe transversale), avec différents grandissements (X10, X60 et X200)	81
Figure III.19: La microstructure de bois du kornaf (coupe longitudinale), avec différentes agrandissements (X10, X60 et X200)	82
Figure III.20: La microstructure du bois de GAND (coupe transversale), avec différents agrandissements (X10, X60 et X200)	83
Figure III.21: La microstructure du bois du GAND (coupe longitudinale), avec différents agrandissements (X10, X60 et X200)	84
Figure III.22: La microstructure du bois de tronc (coupe transversale), avec différents agrandissements (X25, X110 et X180) par le MEB.....	85

Figure III.23: La microstructure du bois de tronc (coupe longitudinale), avec différents agrandissements (X30, X400 et X450) par MEB.....	86
Figure III.24: La microstructure de la fibre du tronc, avec différents agrandissements (X70 et X370) par MEB.....	86
Figure III.25: La microstructure du bois de kornaf (coupe transversale), avec différents agrandissements (X330 et X1000) par MEB.	87
Figure III.26: La microstructure du Gand (coupe transversale), avec différents agrandissements (X27, X350 et X1500) par MEB.....	88
Figure III.27: La machine d'essai universelle Gunt WP310.....	90
Figure III.28: L'essai de compression sur la machine d'essai universelle Gunt WP310.	90
Figure III.29: L'essai de flexion sur la machine d'essai universelle Gunt WP310.....	91
Figure III.30: L'essai de traction sur la machine d'essai universelle Gunt WP310.....	91
Figure III.31: La courbe de comportement de bois sec en flexion.....	92
Figure III.32: Partie linéaire de la courbe de flexion du bois de tronc SEC (0.5% de déformation).....	92
Figure III.33: La courbe de flexion du bois de tronc saturé.....	93
Figure III.34: La courbe de la flexion du bois du tronc hum a 0.6% de déformation pour calculer le module d'Young.....	94
Figure III.35: La courbe de comportement de bois en traction.....	95
Figure III.36: Partie linéaire de la courbe de traction du bois de tronc (5% de déformation)....	96
Figure III.37: La courbe de compression du bois de tronc.....	97
Figure III.38: La courbe de compression du bois de tronc (0.15% de déformation).....	97
Figure III.39: La courbe de compression du bois de kornaf.....	98
Figure III.40: La courbe de compression du bois kornaf (1% de déformation).....	99

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales	Erreur ! Signet non défini.
Tableau I.2 : Composition chimique du bois pin maritime	Erreur ! Signet non défini.
Tableau I.3 : précise les proportions des trois constituants du bois dans les différentes couches de la paroi cellulaire.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau I.4 : Composition typique de bois de résineux et feuillus.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau I.5 : Les propriétés mécaniques des bois.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau I.6 : Les propriétés des matériaux de construction ramenées à l'unité de masse.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau II.1 : Nombre des palmiers dans le monde.	49
Tableau II.2 : Composition chimique des fibres de palmier dattier avant (Fibres sèches crues de palmier) et après (fibres (oxydées) modifiées) le traitement chimique.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau II.3 : Composition chimique du feuillet et rachis de palmier dattier (Phoenix dactylifera).	Erreur ! Signet non défini.
Tableau II.4 : Composition chimique de fibre brute de palmier dattier.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau II.5 : Composition chimique des fibres de palmier avant (fibre brute sèche de palmier) et après traitement de purification (fibres non modifiées) et modification chimique (fibres modifiées).	Erreur ! Signet non défini.
Tableau III.1 : Les valeurs de la densité d'une palme (gand) selon sa longueur	Erreur ! Signet non défini.
Tableau III.2 : La variation de la densité des échantillons du kornaf selon ses positions.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau III.3 : Diamètres de fibres du bois de tronc mesuré sur microscope optique digitale.	88
Tableau III.4 : Diamètres des fibres de kornaf mesuré sur une photo de microscope optique digitale.	89
Tableau III.5 : Le résumé des résultats des essais.	100

Liste des symboles

L_f	Longueur de la fibre
d_f	Diamètre de la fibre
θ	Angle microfibrillaire
E	Module d'Young
T	Direction d'anisotropie du bois tangentielle
R	Direction d'anisotropie du bois radiale
L	Direction d'anisotropie du bois axiale (longitudinale)
M	Couche intercellulaire
P	Paroi primaire
$S1, S2, et S3$	Les trois sous couches de la paroi secondaire
H	L'humidité
m	La masse totale de l'échantillon
m_0	Sa masse anhydre
PSF	Le point de saturation des fibres
ρ	La masse volumique
ρ_s	La masse volumique des parois cellulaires
E_b	Module d'Young du bois
$E_{b//}$	Module d'Young du bois suivant la direction des fibres (direction axial)
$E_{b\perp}$	Module d'Young du bois suivant la direction transversale des fibres
σ_s	La limite d'élasticité d'une paroi cellulaire
$\sigma_{//}$	Résistance axiale
σ_{\perp}	Résistance transverse
K_{IC}	La ténacité
L	Longueur de l'éprouvette
l	Largeur de l'éprouvette
e	Epaisseur de l'éprouvette
V	Volume de l'échantillon mesuré
MOD	Microscope optique digital
MEB	Microscope électronique à balayage
σ_{max}	La contrainte max
ε_{max}	La déformation max
E_{sec}	Module d'Young de bois sec
E_{hum}	Module d'Young de bois humide
$\sigma_{max_{sec}}$	La contrainte max de bois sec
$\sigma_{max_{hum}}$	La contrainte max de bois humide
$\varepsilon_{max_{sec}}$	La déformation max de bois sec
$\varepsilon_{max_{hum}}$	La déformation max de bois humide
L'	Longueur entre pointes en flexion
Δ	La flèche en flexion
I	Moment quadratique de la section droite du l'éprouvette
F	La force appliquée en flexion
L_0	Ecartement entre les parties parallèles larges (éprouvette de traction)
ρ_{K_X}	La densité de kornaf suivant la direction X dans un plan transversal
ρ_{K_Y}	La densité de kornaf suivant la direction Y dans un plan transversal
ρ_g	La densité de la palme (gand)

Introduction

Le développement d'un pays dans le domaine de la construction dépend de l'utilisation de ses ressources locales en termes de matière première et de son taux d'intégration au processus de développement de la société. L'augmentation de la demande sur les matériaux de construction et l'inflation de leur prix (ciment, acier etc....), rendent l'utilisation de matériaux locaux de plus en plus nécessaires.

Parmi ces alternatives ; le bois, tissu complexe produit par les plantes vasculaires, apparaît comme une réponse aux problèmes environnementaux. Malgré le développement de divers matériaux synthétiques, le bois, un des premiers matériaux utilisé par l'humanité, continue à avoir une grande importance et à être très largement utilisé dans plusieurs domaines (bâtiment, ameublement).

Si le bois de différents arbres a eu un très grand intérêt du point de vue étude et développement ; ceci n'est pas le cas pour le bois du palmier dattier. Cette plante d'une générosité sans égale qu'à connue nos ancêtres et que nous continuons à reconnaître. Il se trouve que le palmier dattier n'est pas vraiment un arbre mais plutôt une plante primitive. Les populations du grand sud exploitent le palmier dattier surtout pour son fruit qui est la datte. Les autres possibilités du palier comme matériaux structural n'ont pas suscité l'intérêt de nos chercheurs. En effet, Le palmier englobe plusieurs constituants pouvant avoir des utilisations spécifiques. Et c'est justement le but de notre travail qui veut inaugurer une voie dans l'accomplissement de cette tâche.

Notre mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre on a présenté le bois au niveau de la structure macroscopique et microscopique. Ensuite nous avons donné sa composition chimique. Et en fin on a présenté son comportement mécanique et ses propriétés physiques.

Dans le deuxième chapitre nous présentons le palmer dattier en termes de la morphologie et de la composition chimique.

Le troisième chapitre est un travail de nature expérimentale, nous commençons par la présentation de la façon de la préparation des échantillons pour les essais mécaniques (avec la présentation des techniques de caractérisation). En suite on passe à

l'observation de la microstructure de bois du palmier dattier par microscope électronique à balayage MEB et par microscope optique digital. En fin, on présente les essais mécaniques (flexion, traction, et compression) et les résultats sur des échantillons de différents constituants du palmier dattier.

Chapitre I

Structure du bois

I. Structure du bois

I.1. Généralités sur les fibres végétales (Les fibres lignocellulosiques)

I.1.1. Définition de la fibre végétale

Les fibres lignocellulosiques sont des structures biologiques fibrillaires d'origine végétale majoritairement composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine, et en proportions relativement faibles d'extractibles non azotés, de matière protéique brute, de lipide et de matière minérale [1]. Les proportions de ces différents constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante.

I.1.2. 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 (kénafe, 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 Kénafe, 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 [1].

Un cas particulier est celui des fibres longues des poils de la graine de coton qui sont monocellulaires et quasiment totalement cellulosiques.

I.1.3. 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 (tableau I.1) et au sein de la même espèce, de l'organe de provenance, 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 (figure I.1).

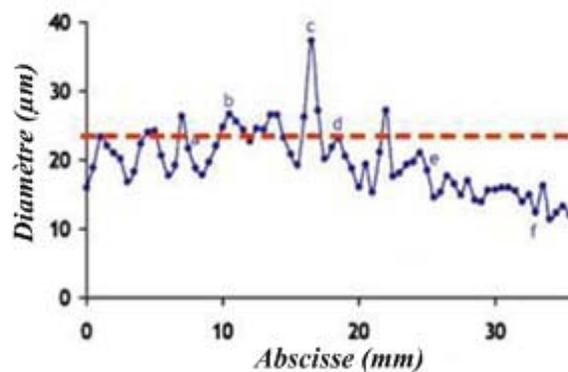


Figure I.1: Variation du diamètre le long de l'axe de la fibre de lin [1].

Tableau I. 1 : Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales [1].

Nature des fibres	Longueur (mm)	Diamètre (μm)	Angle microfibrillaire (°)	Ratio L_f/d_f
Lin	4 - 77	5 - 76	10	1 687
Chanvre	5 - 55	10 - 51	6.2	960
Ramie	40 - 250	16 - 126	7.5	3500
Kénafe (filasse)	1.4 - 5	14 - 23	-	124
Kénafe (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
Pin	2.7 - 4.6	32 - 43	-	97
Sapin	2.7 - 4.6	32 - 43	-	97
Tremble	0.7 - 1.6	20 - 30	-	48

La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire 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 hydrophile de la fibre végétale peut diverger dans de larges proportions. 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% .

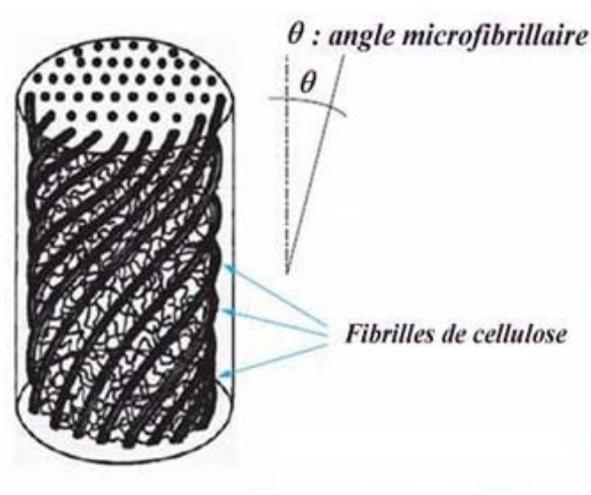


Figure I.2: Modèle de la description de structure d'une fibre végétale [1].

I.1.4. Effet de la morphologie, de la structure et de la composition chimique sur les propriétés mécaniques de la fibre végétale

La grande variabilité constitutive et anatomique de la fibre végétale implique une variabilité de leurs propriétés mécaniques.

I.1.4.1. Effet de la morphologie des fibres végétales

Les caractéristiques que sont la masse volumique, la longueur, le facteur de forme, la porosité (diamètre du lumen) constituent des paramètres de variabilité des propriétés mécaniques des fibres végétales. En effet, si la faiblesse de la masse volumique des fibres lignocellulosiques donne à ces matériaux des propriétés mécaniques spécifiques intéressantes, les fibres longues ont des contraintes en traction plus faibles que les fibres courtes, du fait que les premières ont de plus grandes chances de contenir des défauts de formation. De plus, la taille des particules ou des fibres [1,2].

I.1.4.2. Effet de la structure des fibres végétales

Les fibres végétales sont caractérisées par une très grande variabilité interspécifique et intraspécifique de leurs propriétés mécaniques qui dépendent de l'espèce, de l'organe d'origine des fibres, de la proportion cellulose-hémicelluloses-lignine, du degré de polymérisation et de la cristallinité de la cellulose, de l'angle microfibrillaire, des défauts structuraux, etc.

La cellulose cristalline est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé (90 –137 GPa), comparé à celui de la fibre de verre qui est de 75 GPa [3]. Ainsi, un index de cristallinité de la cellulose d'une fibre élevé est un indicateur de propriétés mécaniques élevées de cette fibre.

Les fréquents défauts structuraux (figure I.3) observés à la surface des fibres sont des conséquences de la grande variabilité de morphologie, de composition chimique, de structure et de comportement mécanique spécifique de ces fibres. Ces défauts surviennent en réponse aux différents stress intervenus dans la vie des plantes.

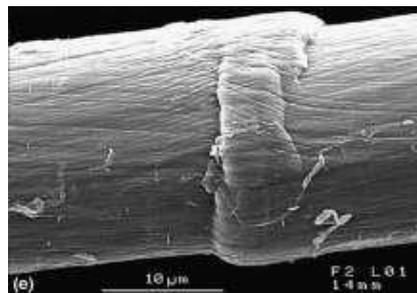


Figure I.3: Exemple de défaut structural sur une fibre de lin [1].

La masse volumique de la fibre végétale est relativement faible (1,2 à 1,5 g/cm³) en comparaison avec les fibres de verre (2,55 g/cm³) par exemple. De par la faiblesse de ces valeurs, la masse volumique est l'un des critères de choix des fibres cellulosiques et lignocellulosiques pour l'élaboration des matériaux composites structuraux et non structuraux recherchés pour leur légèreté.

L'angle microfibrillaire explique en partie la déformation élastique de la fibre végétale et dès lors son allongement à la rupture en traction. En effet, sous l'action de forces de traction relativement faibles, la fibre lignocellulosique subit une déformation réversible du fait de l'alignement progressif des microfibrilles cellulosiques avec l'axe de la fibre et une déformation élasto-visco-plastique des polymères amorphes. Si la

sollicitation de la fibre est plus forte, la déformation de celle-ci entre dans une phase irréversible qui peut se poursuivre jusqu'à la rupture. Un angle microfibrillaire élevé suppose une déformation élastique plus importante pour une sollicitation de la fibre en traction faible. Il existe une corrélation négative entre l'angle microfibrillaire de la fibre et le module d'Young correspondant (figure I.4).

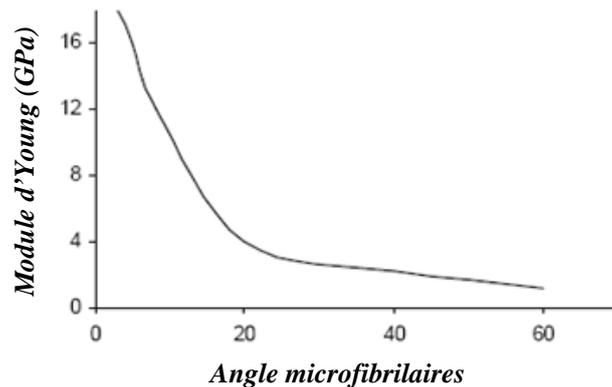


Figure I.4: Variation du module d'Young axial avec l'angle microfibrillaire de fibre simple [4] [1].

I.1.4.3. Effet de la composition chimique des fibres végétales sur leurs propriétés mécaniques

Pour plusieurs auteurs, les bonnes propriétés mécaniques des fibres cellulosiques proviennent des liaisons hydrogènes qui s'établissent le long et entre les chaînes cellulosiques, et de l'état de cristallinité de la cellulose. Les hémicelluloses, qui constituent un liant amorphe, jouent un rôle déterminant dans les propriétés plastiques de la fibre cellulosique, alors que la lignine a un rôle d'adhésif, de rigidifiant et de durcisseur dans la fibre lignocellulosique.

I.2. Le bois : structure, composition chimique et propriétés viscoélastique

Le bois est un matériau composite, tant en terme structural qu'au niveau de sa composition chimique. Sa structure est cellulaire et poreuse. Il est sans doute l'écomatériau par excellence. Employé par l'homme depuis longtemps, son usage a influencé l'évolution des civilisations. Ses nombreuses qualités le rendent incontournable, intemporel et source d'innovations [5].

I.2.1. Structure macroscopique du bois

I.2.1.1. Le cambium, le liber et l'aubier

Le tronc d'un arbre est constitué de bois, d'écorce et d'une couche mince située entre le bois et l'écorce, appelée cambium (Figure I.5). La fonction de cette couche est de produire les cellules du bois et de l'écorce. Le cambium est la partie la plus importante de l'arbre. En effet, les cellules mères qui y sont présentes participent chaque année à son développement par division cellulaire. Il donne naissance au liber vers l'extérieur et au bois d'aubier vers l'intérieur du tronc [5].

Différentes zones peuvent également être identifiées [6]:

- L'ECORCE : Composée de cellules mortes. Elle est imperméable mais permet des échanges gazeux pour la respiration des cellules du cambium et de l'aubier.
- LE LIBER : La plupart des cellules le composant sont mortes. La partie la plus interne du liber possède des canaux qui amènent la sève élaborée des feuilles aux cellules du cambium.
- LE CAMBIUM : C'est une fine couche de cellules génératrices qui produit la croissance de l'arbre. Il est uniquement visible au microscope.
- L'AUBIER : Composé de cellules plus ou moins vivantes, en voie de duraminisation. Il transporte la sève brute des racines aux feuilles.
- LE DURAMEN : Composé de cellules mortes, qui ont fini d'évoluer, ayant subies une transformation chimique et physique afin d'augmenter la durabilité naturelle. C'est le support de l'arbre, aussi appelé Bois Parfait.
- LA MOELLE : Tissu mou au centre. Il se forme au début de la croissance de l'arbre et ne se modifie pas.

L'épaisseur de l'aubier et des cernes annuels d'accroissement, la densité, le grain, la rétractabilité marqueront définitivement la croissance de l'arbre et révéleront, en grande partie les qualités du bois.

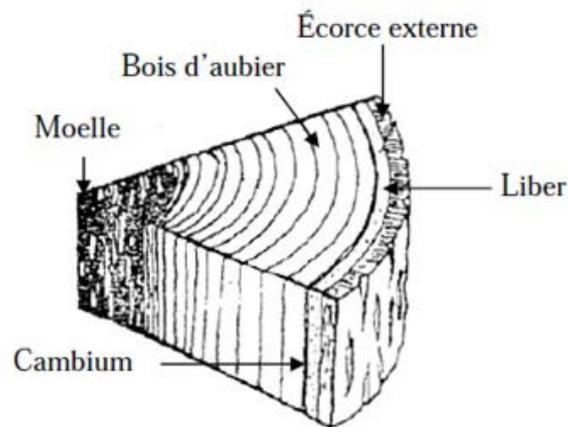


Figure I.5: Section transversale d'un tronc d'arbre [5].

I.2.1.2. La croissance annuelle : bois d'été et bois de printemps

L'activité du cambium est saisonnière. La croissance commence au début du printemps, se poursuit en été et s'arrête en automne et en hiver, jusqu'au printemps suivant. La partie produite au printemps s'appelle bois de printemps ou bois initial et celle d'été, bois d'été ou bois final. Lors de la saison de croissance, l'arbre forme une nouvelle couche de bois entre le bois existant et l'écorce, dans le tronc, les branches et les racines. Les anneaux de croissances annuels, appelés cerne, ainsi que les zones du bois de printemps et d'été, sont en général visibles sur les sections transversales du bois. Dans le cas du pin maritime par exemple, la croissance annuelle du bois est facile à distinguer grâce à la différence de taille entre les cellules des deux types de bois (Figure I.6).

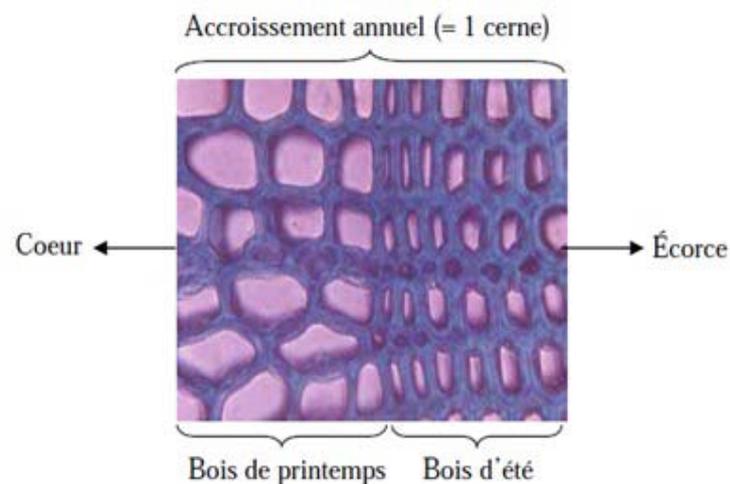


Figure I.6: Coupe transversale de bois de printemps et bois d'été dans un accroissement annuel de pin maritime.

I.2.1.3. Aubier et duramen

Les couches successives de vaisseaux qui se forment sous le cambium constituent l'aubier qui correspond au bois physiologiquement actif. Ces vaisseaux cessent peu à peu d'alimenter l'arbre après quelques années. Ils se bouchent et s'imprègnent de différentes substances : tanins, résines, etc. Cette transformation progressive en duramen (bois parfait) est appelée duraminisation [7].

L'aubier est en général plus clair que le duramen. Il est plus ou moins imprégnable et ne résiste pas aux champignons lignivores et aux larves xylophages. Le duramen, au contraire, possède une durabilité naturelle qui varie selon les essences; il est en général, peu ou pas imprégnable.

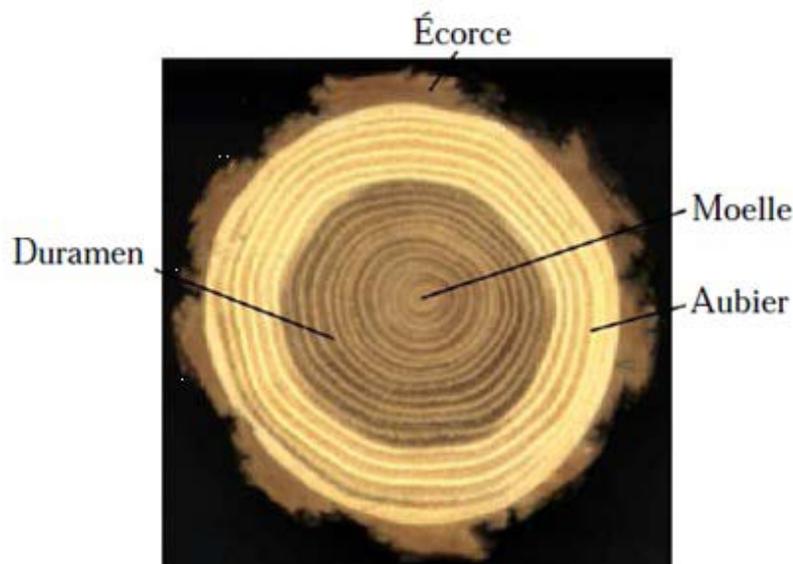


Figure I.7: Section transversale d'un tronc d'arbre [5].

I.2.2. Microstructure du bois

I.2.2.1. Les plans de référence du bois

Pour une description plus fine du bois, à l'échelle de quelques dizaines de micromètres, il est d'usage d'effectuer les observations suivant des plans de coupe privilégiés définis sur la Figure I.8. Ces plans sont : le plan transversal, perpendiculaire à l'axe de la tige et sur lequel sont observés les cernes annuels ; le plan radial, passant au centre de la tige ; et le plan tangentiel qui est excentré, parallèle à l'axe de la tige et tangent aux cernes annuels. Les trois directions, axiale (L) radiale (R) et tangentielle (T), sont les directions d'anisotropie du bois. L'examen microscopique des trois

sections permet de définir l'organisation des cellules caractéristiques du plan ligneux et ainsi d'identifier un bois [8].

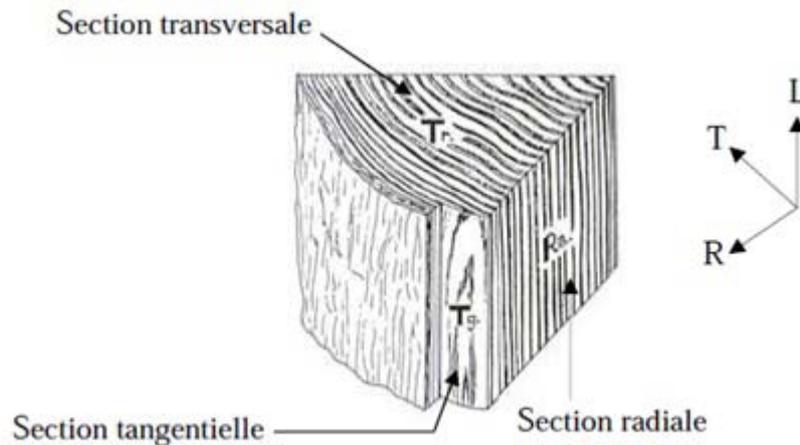


Figure I.8: Les trois plans de référence du bois.

I.2.2.2. Le plan ligneux des résineux et feuillus

Les arbres sont répartis en deux grandes catégories : les gymnospermes (résineux ou conifères) et les angiospermes (feuillus). Les résineux ont une structure anatomique simple composée principalement de cellules longitudinales (Figure I.9) : les trachéïdes. Les trachéïdes du bois de printemps possèdent de nombreuses ponctuations aréolées leur permettant l'échange de différentes substances. Les trachéïdes du bois d'été ont une paroi plus épaisse et remplissent d'avantage une fonction de soutien. Dans la structure des résineux on retrouve aussi des cellules de parenchyme en orientation axiale et radiale qui permettent le stockage de substances nutritives. Enfin, chez certains résineux on trouve des canaux résinifères en direction axiale, radiale ou les deux.

Les feuillus présentent un plan ligneux plus différencié (Figure I.9). L'ensemble du tissu se compose en grande partie de fibres orientées axialement ayant une fonction de soutien. Ces fibres ont une paroi plus épaisse que celles des trachéïdes. L'épaisseur de la paroi est variable selon les essences leur donnant ainsi chacune une densité spécifique. Les vaisseaux assurent la fonction de conduction chez les feuillus. Lorsque ces vaisseaux ont environ la même taille et sont répartis de façon homogène dans le cerne, on parle de bois à pores diffus ; s'ils sont plus nombreux au bord de la limite de

cerne, on parle de bois à zone initiale poreuse. Ici aussi, les cellules axiales et radiales des parenchymes assurent la fonction de stockage des substances nutritives [2] [3].

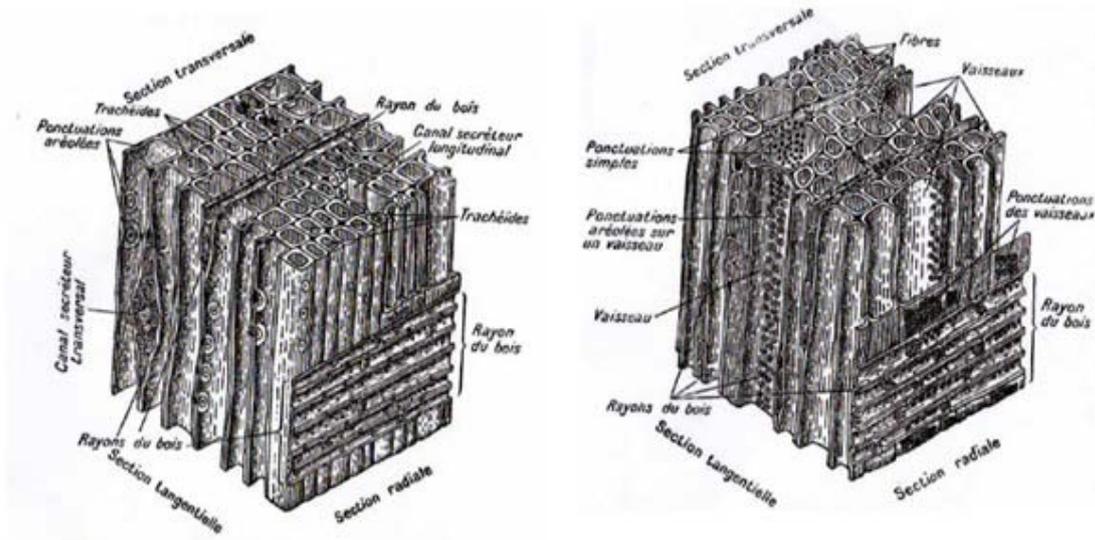


Figure I.9: Plan ligneux typique des résineux (à gauche) et des feuillus (à droite) [10].

I.2.3. Ultrastructure du bois

La paroi cellulaire du bois est multicouche. Elle possède essentiellement une couche intercellulaire, une paroi primaire et une paroi secondaire (Figure I.10). Chaque couche est un milieu composite constitué de filaments de cellulose (microfibrilles) scellés dans une matrice de lignine et d'hémicelluloses [2,8].

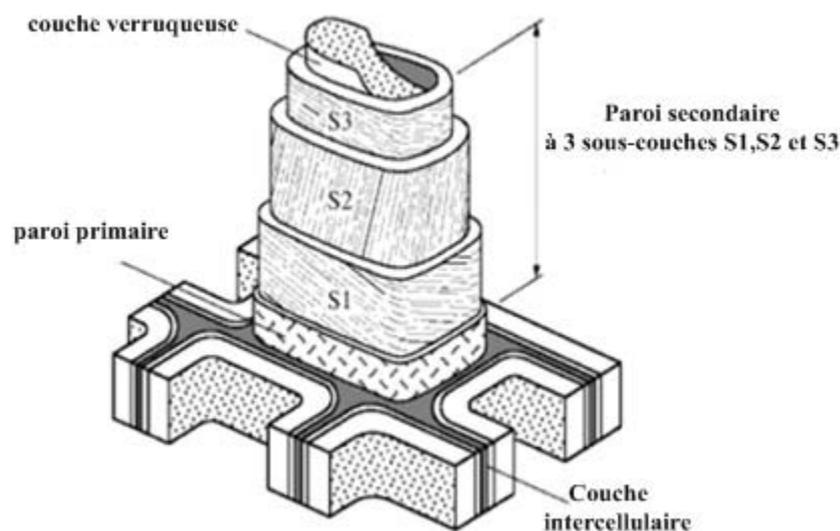


Figure I.10: Représentation schématique des différentes couches de la paroi cellulaire [8].

I.2.3.1. La couche intercellulaire

La couche intercellulaire apparaît après la division de la cellule mère. Son épaisseur varie entre 0,5 et 1,5 μm . Cette couche permet de lier les cellules les unes aux autres, elle possède une importante quantité de lignine. Si certaines microfibrilles isolées traversent cette couche, son pourcentage en cellulose peut cependant être considéré comme négligeable.

I.2.3.2. La paroi primaire

Cette paroi très mince mesure environ 0,1 μm d'épaisseur. Comme la couche intercellulaire, elle contient une grande quantité de lignine. Elle contient également des microfibrilles de cellulose enchevêtrées, formant un réseau poreux. Il est souvent difficile de différencier la paroi primaire de la couche intercellulaire.

I.2.3.3. La paroi secondaire

Cette paroi est essentiellement constituée de microfibrilles de cellulose alignées parallèlement entre elles et disposées en hélice. Selon l'orientation des microfibrilles, trois sous-couches sont discernables :

La couche S1 est constituée de microfibrilles croisées, avec un angle compris entre 60° et 80° par rapport à l'axe de la cellule. Sa structure peut être considérée comme étant lamellaire (3 à 6 lamelles) et son épaisseur varie entre 0,1 et 0,35 μm .

La couche S2 constitue la partie la plus volumineuse de la paroi. Elle est composée de microfibrilles en hélice formant un angle de 5° à 50° par rapport à l'axe de la cellule. Cet angle dans les cellules du bois de printemps varie entre 30° et 50° et dans les cellules du bois d'été entre 5° et 30° . L'épaisseur de la couche S2 varie entre 1 et 10 μm ; elle représente 15 à 85 % de l'épaisseur totale de la couche.

La couche S3 est relativement mince. Son épaisseur varie entre 0,5 et 1,1 μm . Elle est constituée de microfibrilles dont l'orientation varie entre 60° et 90° par rapport à l'axe de la cellule.

Chacune de ces trois couches contient également de la lignine et des hémicelluloses.

I.3. Composition chimique du bois

Le bois est constitué principalement de cellulose, hémicelluloses et lignine. À ces trois constituants, viennent s'ajouter des substances extractibles de nature organique et des substances minérales (cendres). Les extractibles sont déposés dans la paroi de la cellule pendant la duraminisation. Le tableau I.2 donne la composition chimique du pin maritime, utilisé lors de notre étude [2].

3Tableau I.2 : Composition chimique du bois pin maritime.

<i>Constituants</i>	<i>% (masse sèche)</i>
<i>Cellulose</i>	<i>47,1</i>
<i>Hémicelluloses</i>	<i>25,2</i>
<i>Lignine</i>	<i>25,6</i>
<i>Résine</i>	<i>2 à 4</i>
<i>Tannins et Gommés</i>	<i>1,3</i>
<i>Protéines</i>	<i>1,0</i>
<i>Cendres</i>	<i>0,3</i>

Dans la paroi cellulaire, la proportion relative en cellulose, hémicelluloses et lignine varie, en fonction de la couche considérée (Figure I.11).

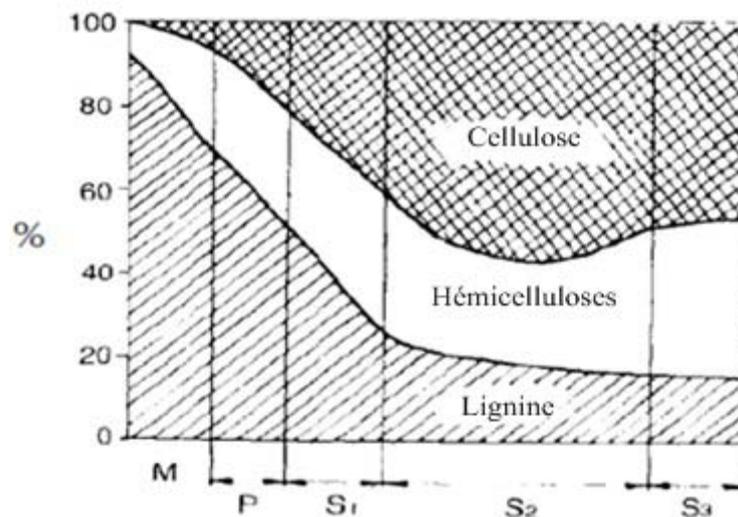


Figure I.11 : Proportion relative en cellulose, hémicelluloses et lignine dans la paroi cellulaire. M = couche intercellulaire ; P = paroi primaire ; S1, S2, S3 = paroi secondaire

I.3.1. La cellulose

La cellulose est le constituant structural principal des parois cellulaires végétales. C'est un homopolymère, dont l'unité de base est le glucose, ou plus exactement un dimère du glucose, le cellobiose. Les unités sont liées entre elles par des liaisons $\beta(1-4)$ -glycosidiques (Figure I.12). Le degré de polymérisation (en glucose) peut atteindre 15000 [2].

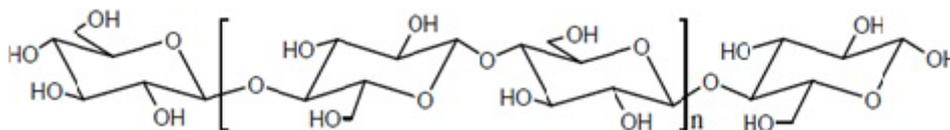


Figure I.12: Formule chimique de la cellulose

Dans le bois, les chaînes moléculaires de la cellulose s'associent entre elles par liaisons hydrogène intra et intermoléculaires (Figure 1.13), et forment des faisceaux appelés microfibrilles. Ces microfibrilles présentent des zones cristallines et des zones amorphes (figure I.14). Le degré de cristallinité de la cellulose du bois est de l'ordre de 60 à 70 %.

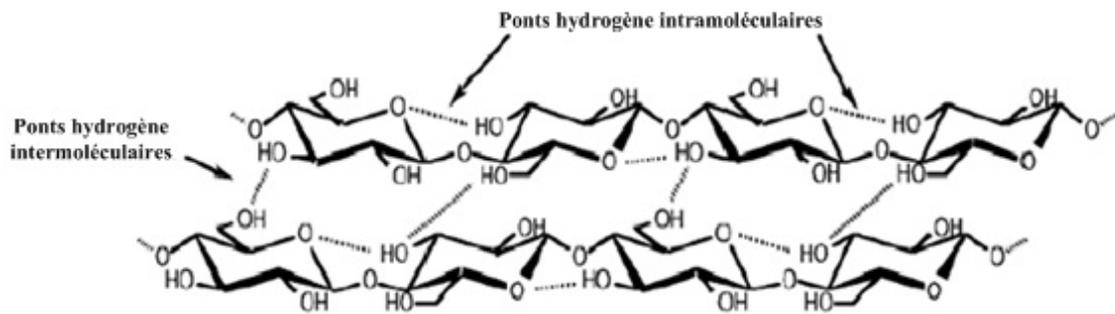


Figure I.13: Ponts hydrogènes intramoléculaires et intermoléculaires entre deux macromolécules adjacentes de cellulose [4].

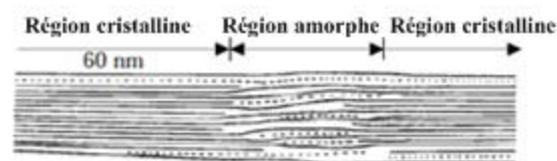


Figure I.14: Les régions cristallines et amorphes dans les microfibrilles de cellulose [5].

I.3.2. Les hémicelluloses

Dans le bois, les hémicelluloses sont intimement liées à la cellulose. Les hémicelluloses sont des polyoses, dont les unités sont des pentoses, hexoses, acides hexauroniques et désoxyoses. Elles diffèrent de la cellulose par des chaînes moléculaires beaucoup plus courtes et par des ramifications sur la chaîne principale (Figure I.15). En général, les hémicelluloses ont une structure amorphe ; leur teneur et leur composition varient en fonction des essences. On distingue différents types d'hémicelluloses : les xylanes, les mannanes, les glucanes, les galactanes et les pectines.

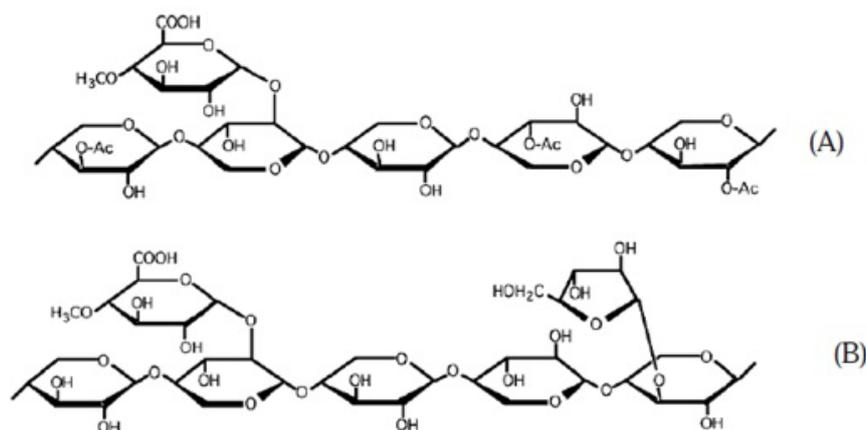


Figure I.15: Structure chimique partielle de deux hémicelluloses : (A) *O*-acétyl-4-*O*-méthylglucuronoxylane de feuillus et (B) Arabino-4-*O*-méthylglucuronoxylane de résineux [2].

I.3.3. La lignine

Après la cellulose, la lignine est la substance organique la plus abondante dans les plantes. Elle est chimiquement très différente de la cellulose et des hémicelluloses. C'est un polymère tridimensionnel, amorphe et de nature phénolique, qui assure la rigidité de la paroi cellulaire.

Dans le bois, la lignine est biosynthétisée à partir de trois alcools phénoliques : les alcools *p*-coumarylique, coniférylique et sinapylique (Figure I.16). La polymérisation de ces trois alcools conduit respectivement à trois types d'unités dans la lignine : H pour parahydroxyphényle, G pour guaiacyle, S pour syringyle. Les lignines des résineux et des feuillus se différencient alors par leur teneur en unités G, S et H (essentiellement G chez les résineux, G-S chez les feuillus). La variabilité de la composition est plus grande chez les feuillus, la teneur en unités G-S varie entre 20 et 60 %. La Figure I.17 présente la structure schématisée d'une lignine de résineux [6].

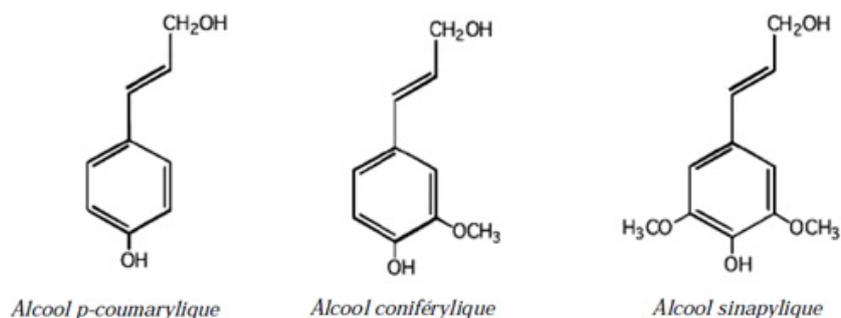


Figure I.16: Précurseurs de la biosynthèse de la lignine [6] [2].

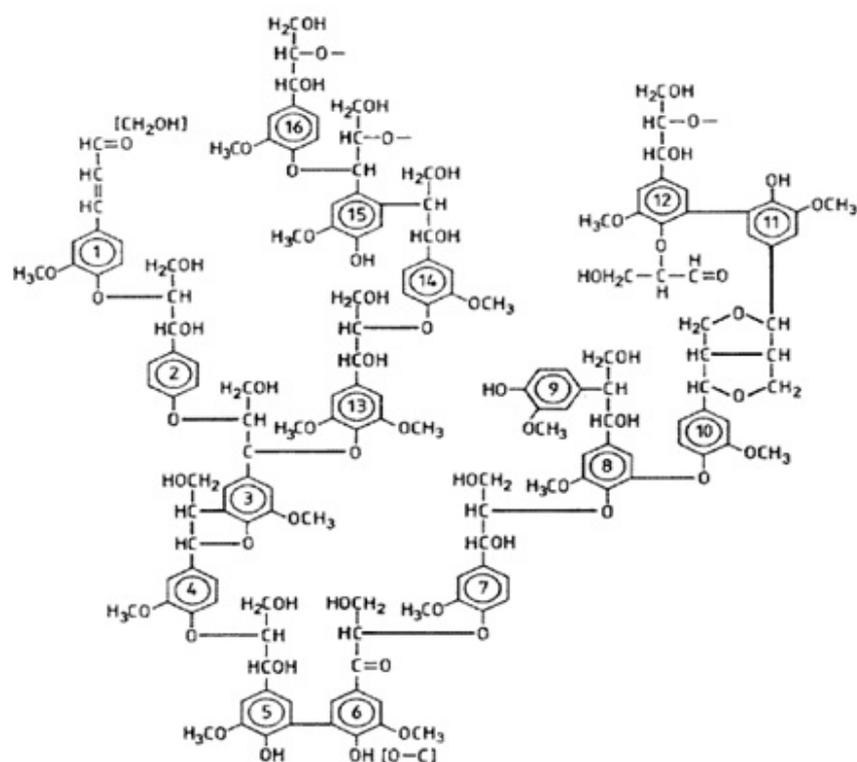


Figure I.17: Schéma structural d'une lignine d'épicéa [5].

I.3.4. Les extractibles

Les extractibles sont des molécules qui peuvent être extraites du bois par des solvants polaires (acétone, eau, éthanol) ou apolaires (toluène, cyclohexane, dichlorométhane). La teneur et la composition de ces extractibles varient fortement d'une essence à l'autre, les résineux en contenant généralement plus que les feuillus. Il existe trois types d'extractibles : les terpénoides (myrcène, limonène, α -pinène...), les polyphénols (tannins condensés et hydrolysables, flavonoides, tropolones, stilbènes, quinones...) et les composés aliphatiques (acides gras saturés et insaturés, triglycérides, alcaloïdes...).

Bien qu'ils ne représentent qu'un faible pourcentage, l'odeur, la couleur et la résistance aux agents de dégradation biologique, dépendent en grande partie de ces extraits.

I.3.5. Les cendres

Ce sont les résidus minéraux obtenus après combustion du bois à haute température. Ils représentent généralement moins de 1 % de la masse sèche du bois en zone tempérée, ce pourcentage étant souvent supérieur en zone tropicale [9].

I.3.6. Association entre lignine et polysaccharides à l'intérieur de la paroi cellulaire

La Figure I.18 présente un modèle décrivant l'association entre la cellulose, les hémicelluloses et la lignine à l'intérieur des parois cellulaires.

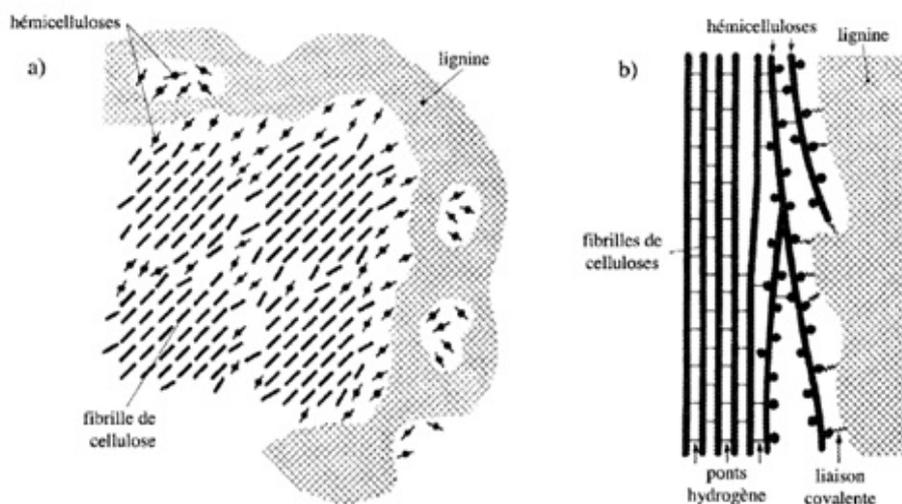


Figure I.18: Association entre lignine et polysaccharides à l'intérieur de la paroi cellulaire du bois, à l'état anhydre : a) Section transversale, b) Section longitudinale [5].

Dans ce modèle, les microfibrilles de cellulose, les chaînes de celluloses moins ordonnées ainsi que les hémicelluloses s'associent entre elles grâce à de nombreux ponts hydrogène. Les hémicelluloses sont plus fortement liées à la lignine, par des liaisons covalentes. Ce modèle servira de base de raisonnement pour émettre quelques idées concernant la diffusion des réactifs lors de la modification chimique du bois.

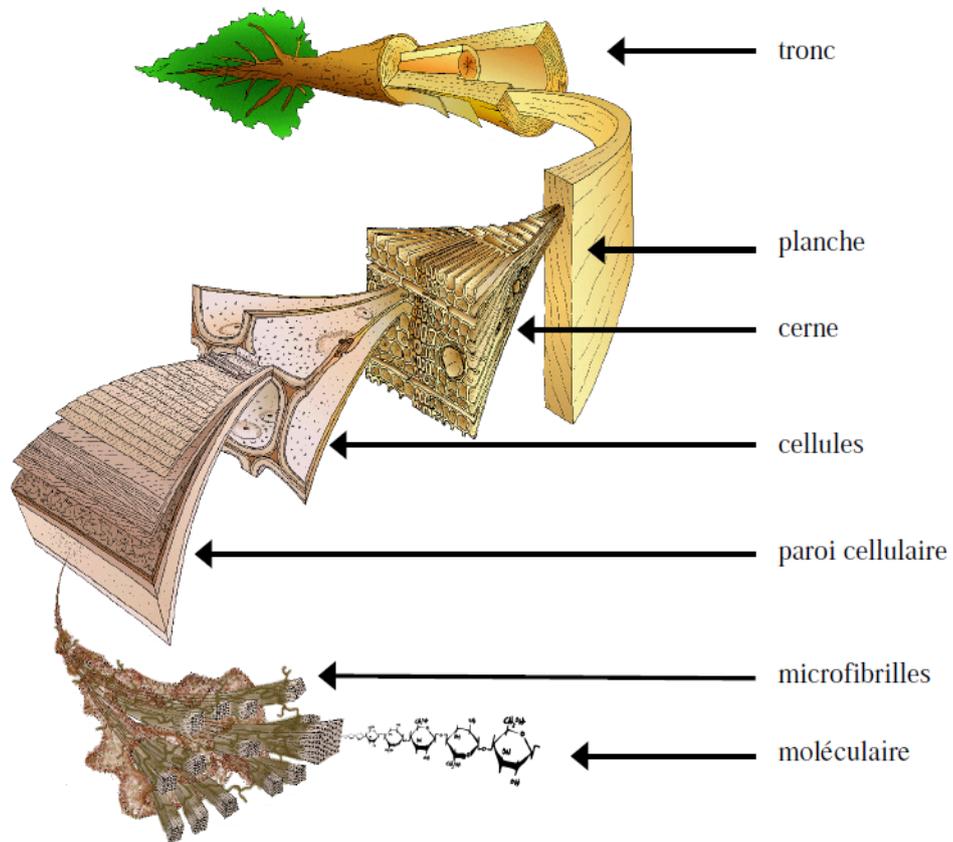


Figure I.19: Différentes échelles d'observation du matériau bois [7].

Tableau I.3: Précise les proportions des trois constituants du bois dans les différentes couches de la paroi cellulaire [8].

<i>Parois</i>	<i>Celluloses</i>	<i>Hémicelluloses</i>	<i>Lignines</i>
<i>Lamelle moyenne</i>	5 %	10 %	85 %
<i>Paroi primaire</i>	10 %	15 %	75 %
<i>Paroi secondaire</i>	<i>S₁</i>	30 %	40 %
	<i>S₂</i>	50 %	20 %
	<i>S₃</i>	50 %	15 %

Tableau I.4: Composition typique de bois de résineux et feuillus [4].

<i>Constituant</i>	<i>Composition massique (%)</i>		<i>Rôle</i>
	<i>Résineux</i>	<i>Feuillus</i>	
<i>Cellulose</i>	40-45	38-50	<i>Renfort</i>
<i>Hémicellulose</i>	7-15	19-26	<i>Matrice</i>
<i>lignine</i>	26-34	23-30	<i>Matrice</i>
<i>Extractibles</i>	4	4	<i>Lubrifiant</i>
<i>Cendres</i>	<1	<1	-

D'une manière plus générale, la composition du bois ne varie pas beaucoup d'une essence à l'autre. On peut considérer les pourcentages suivants : cellulose de 40 à 50%, hémicellulose de 25 à 40% et lignine de 20 à 35% [4].

I.4. Propriétés physiques

I.4.1. Gravité spécifique

Bien que le bois sec de beaucoup d'espèces puisse flotter sur l'eau, la densité réelle des substances de base qui les composent, est supérieure à 1,55 pour toutes ces espèces. Cette constatation prouve qu'une grande partie du volume du bois est occupée par des cavités cellulaires et des pores, ce qui confère au bois une densité apparente inférieure à 1 pour beaucoup d'espèces.

De ce fait, la densité du bois est un bon indicateur de sa dureté, plus la densité est forte et plus la dureté sera importante, tous autres facteurs étant égaux par ailleurs. On note également une grande variation de la taille des pores cellulaires et de l'épaisseur des parois ce qui confère, à de nombreuses espèces, une plus grande quantité

de substances par rapport à d'autres. Dans ces conditions, la densité du bois d'une espèce à l'autre est relativement variable.

I.4.2. Humidité du bois

Le bois est un matériau hygroscopique et sa masse, ses dimensions, sa densité et ses propriétés mécaniques, électriques et thermiques sont affectées par le taux d'humidité. Dans le bois, la rétention d'eau est liée à différents mécanismes physiques et se présente sous trois formes: l'eau libre, l'eau hygroscopique et l'eau de constitution. L'eau libre remplit totalement ou partiellement les vides des canaux ou des vaisseaux, ainsi que les lumens des fibres ou des trachéides. Elle est retenue dans le bois par des mécanismes de pression capillaire. L'eau hygroscopique est retenue sur les parois cellulaires grâce aux propriétés hydrophiles des molécules de cellulose par des ponts hydrogène ou par liaison de type Van der Waals. L'eau de constitution entre dans la composition chimique des polymères du bois [4,6].

Le taux d'humidité (H) est défini par la norme NF B 51-004 (1985) comme

$$H = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100$$

Où m est la masse totale de l'échantillon à l'humidité H et m_0 est sa masse anhydre. Par définition, le bois anhydre est obtenu après un séjour dans une étuve à 103 °C jusqu'à stabilisation de la masse.

Le point de saturation des fibres (PSF) est défini comme la quantité d'eau nécessaire pour saturer les parois cellulaires sans qu'il n'y ait d'eau libre dans les lumens. L'humidité du point de saturation des fibres (HPSF) est de l'ordre de 28% et dépend de l'essence et de la température [4,6].

I.5. Comportement mécanique du bois en relation avec sa structure au niveau cellulaire

I.5.1. Comportement mécanique du bois en compression et en traction simple

Le bois est un matériau anisotrope, d'où des propriétés mécaniques physiques et technologiques qui changent suivant la direction choisie. Les trois directions principales du bois (figure I.20) sont définies par rapport à l'axe du tronc et aux cernes annuels. La direction longitudinale L est parallèle à l'axe du tronc, la direction tangentielle T est

tangente au cerne, considéré comme étant circulaire, et la direction radiale R est un rayon du cerne.

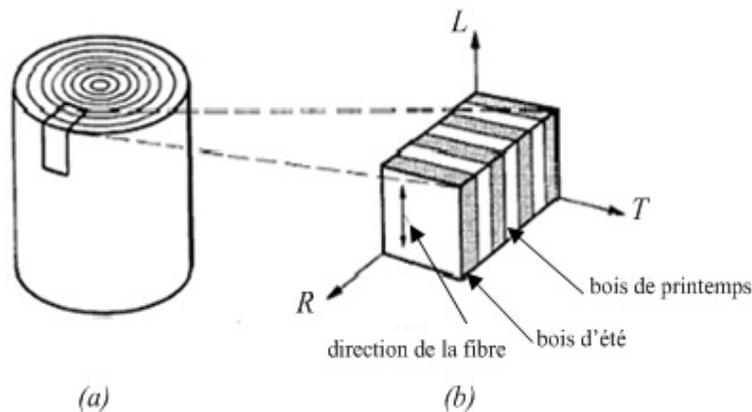


Figure I.20: Section d'un tronc de bois (a) et un élément agrandi (b) montrant les axes longitudinale L , radiale R , et tangentielle T et les cernes annuels.

La courbe contrainte-déformation d'une éprouvette de bois sollicitée en compression ou en traction simple est différente suivant les directions de la sollicitation et selon que la sollicitation est de type compression ou traction. L'allure des courbes contrainte-déformation en compression simple des éprouvettes en Peuplier (densité = 0.35), carrées de faible épaisseur, $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$, pour trois directions d'orthotropie L , R , T en mode de déformation contrôlée, est donnée dans la figure I.21 [11].

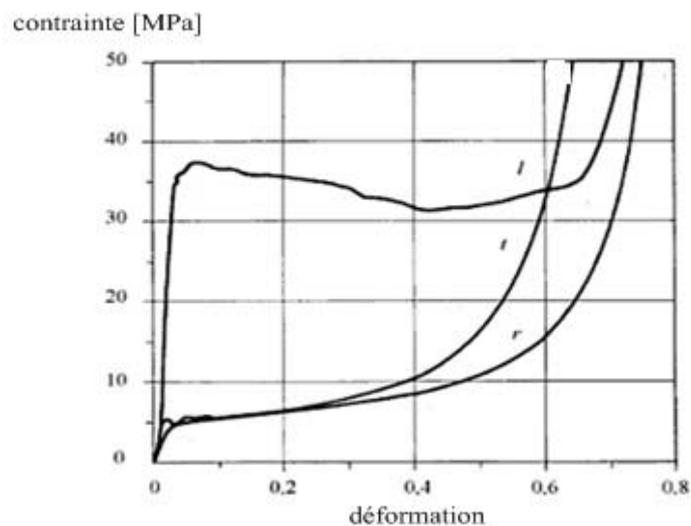


Figure I.21: Courbe contrainte-déformation d'une éprouvette de peuplier (densité = 0,35) de dimensions $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ en compression simple suivant les directions L , R , et T à vitesse de déplacement contrôlée de 1 mm/mn [11].

La courbe force-déplacement obtenue dans un essai en traction simple sur les éprouvettes normalisées suivant la direction L et en mode de force contrôlée est présentée à la figure I.22. [12]

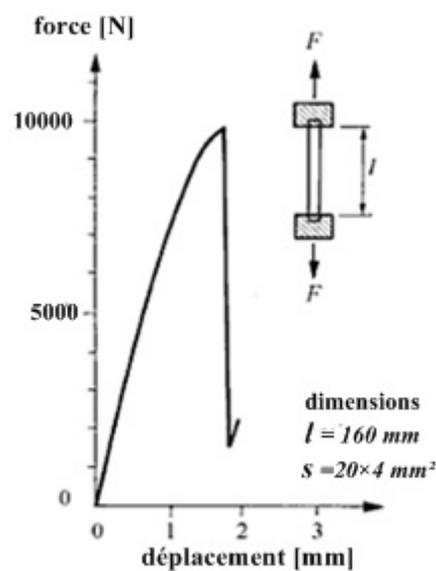


Figure I.22: Courbe force-déplacement d'une éprouvette normalisée sous traction en force contrôlée [11].

La courbe force-déplacement typique en cas de déplacement contrôlé est donnée à la figure I.22. Cette courbe montre un adoucissement poste-pic, comportement qui est une conséquence de la localisation de déformation (propagation la fissure mais aussi la zone endommagée) de l'éprouvette de bois à une traction simple en déplacement contrôlé est différente de celle qui est présentée la figure I.23.

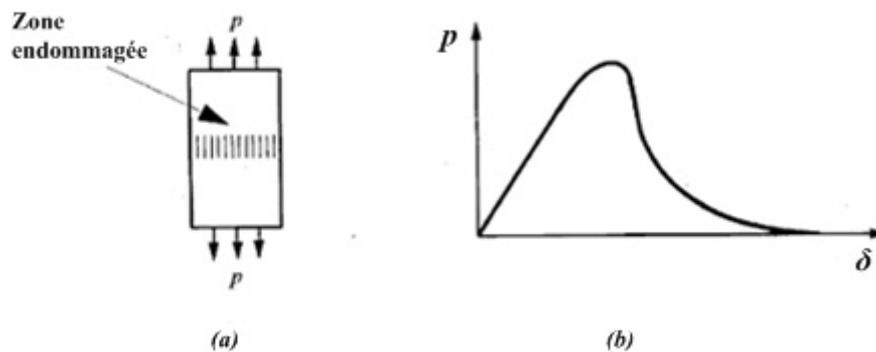


Figure I.23: Courbe typique de force-déplacement d'une éprouvette en traction sous déformation contrôlée; (a) l'éprouvette après endommagement, (b) courbe montrant l'adoucissement poste-pic [11].

I.5.2. Les propriétés mécaniques du bois en relation avec sa densité

Toutes les propriétés du bois dépendent dans une certaine mesure de la quantité d'eau qu'il recèle. Le bois vert peut contenir jusqu'à 50% d'eau. Par séchage à l'air (entre 2 et 10 ans) ou par étuvage (quelques jours), cette quantité descend aux environs de 14%. Le bois subit alors un *retrait* ; son module et sa résistance augmentent (parce que les fibrilles de cellulose sont plus tassées). Pour empêcher le *gonflement* – pour empêcher de travailler- il faut sécher le bois jusqu'à au degré d'humidité qui assurera l'équilibre avec l'atmosphère dans laquelle il sera utilisé.

I.5.2.1. Élasticité

Les bois sont des solides viscoélastiques : sous contrainte, ils subissent une déformation élastique immédiate suivie d'un fluage lent (déformation élastique "retardée"). En bureau d'études, le bois considéré comme *un matériau élastique*. A degré d'humidité donné, le module d'un bois dépend en premier lieu de sa masse volumique et de l'angle entre la direction de sollicitation et les fibres.

La figure I.24 : montre les variations avec la densité du module d'Young, dans une direction parallèle aux fibres (*chargement axial*) et perpendiculaire aux fibres (*chargement radial ou tangentiel*). Le module axial est une fonction linéaire de la densité. Et les autres sont à peu près proportionnels au carré de la densité.

Cela a pour conséquence que *l'anisotropie du bois* (le rapport entre le module axiale et le module perpendiculaire aux fibres) augmente lorsque la densité diminue [8].

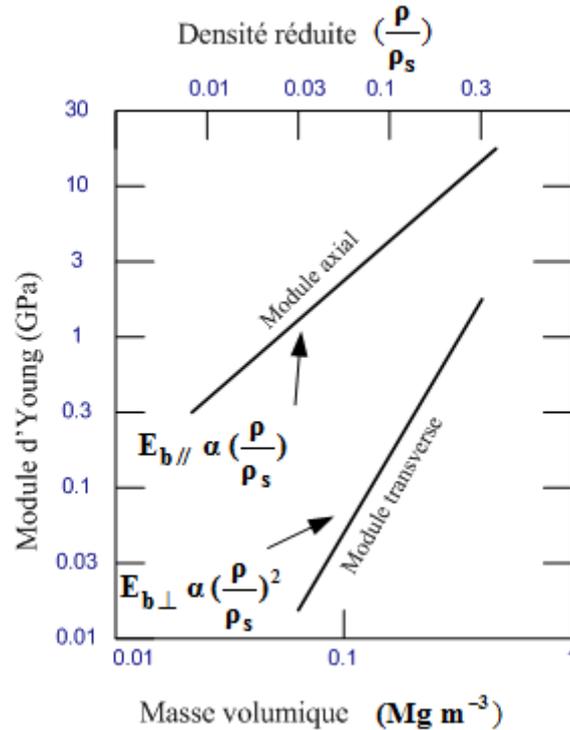


Figure I.24: Le module d'Young du bois dépend surtout de la densité relative ρ/ρ_s , le module axial varie en ρ/ρ_s ; le module transverse varie à peu près en $(\frac{\rho}{\rho_s})^2$ [8].

La structure du bois permet d'expliquer son module. Sous contrainte axiale, les cellules sont étendues ou comprimées (figure I.25.a). Le module $E_{b//}$ du bois est celui d'une paroi cellulaire, E_s ramené à la surface réellement occupée par les parois cellulaires dans une section axiale.

Si la densité double, donc la surface double, et aussi le module double. On en déduit immédiatement [8]:

$$E_{b//} = E_s \frac{\rho}{\rho_s} \quad \text{I.1}$$

Avec ρ_s est la masse volumique des parois cellulaires.

Le module transverse $E_{b\perp}$ est plus faible, parce que la paroi cellulaire est moins rigide dans cette direction, et cette structure expansée est intrinsèquement anisotrope à cause de la forme des cellules.

Dans le bois sollicité dans une direction perpendiculaire aux fibres, les parois de cellules fléchissent (figure I.25.b et c). Le matériau comporte comme mousse, pour laquelle :

$$E_{b\perp} = E_S \left(\frac{\rho}{\rho_S} \right)^2 \quad \text{I.2}$$

L'anisotropie élastique est :

$$\frac{E_{b//}}{E_{b\perp}} = \frac{\rho_S}{\rho} \quad \text{I.3}$$

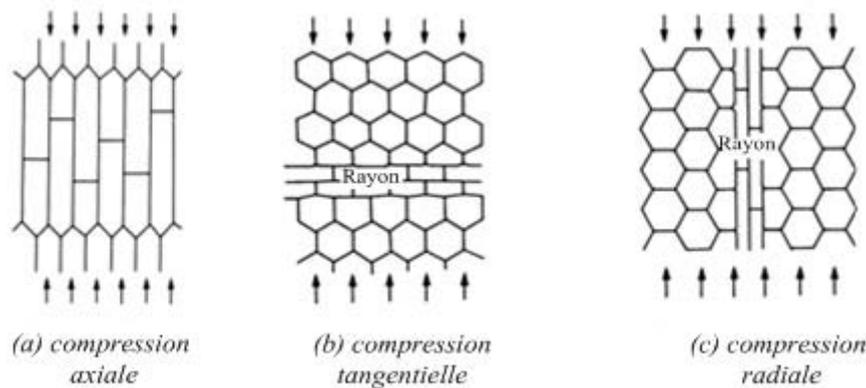


Figure I.25: Sous une contrainte parallèle aux fibres, la plupart des parois cellulaires subissent une compression axiale ; b). sous une contrainte transverse, les parois de cellules fléchissent.

I.5.2.2. La résistance à la traction et la compression

La résistance à la traction axiale de nombreux bois est voisine de 100 MPa, à peu près la même que celle des polymères résistants comme les polyépoxydes. La ductilité est faible, la déformation à la rupture étant typiquement 1%.

Comme le module, les résistances à la traction et à la compression dépendent principalement de la masse volumique (figure I.26). La résistance axiale varie

linéairement avec la densité, pour la même raison que le module axiale varie lui aussi linéairement : elle mesure la résistance d'une paroi cellulaire, ramenée à la section occupée par les parois, soit :

$$\sigma_{//} = \sigma_s \frac{\rho}{\rho_s} \quad \text{I.4}$$

Avec σ_s est la limite d'élasticité d'une paroi cellulaire. La figure 6 montre que la résistance à l'écrasement (compression) σ_{\perp} varie en gros en :

$$\sigma_{\perp} = \sigma_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 \quad \text{I.5}$$

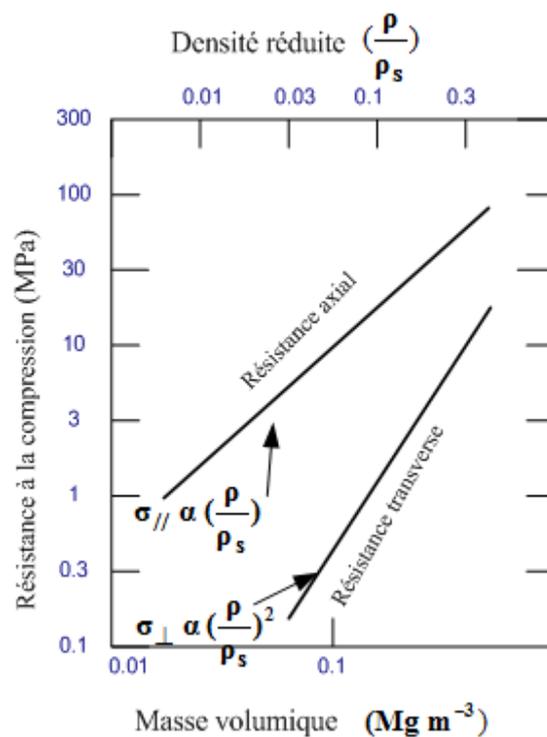


Figure I.26: La résistance à la compression du bois dépend surtout, comme le module, de la densité relative ρ/ρ_s . La résistance axiale est proportionnelle à ρ/ρ_s ; la résistance transverse à $\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2$.

I.5.2.3. La ténacité

La ténacité du bois est un facteur important, elle permet de dire si une structure est susceptible de rompre soudainement et à l'improviste par la propagation rapide d'une fissure. Dans une structure en bois, le défaut initial peut-être un nœud du bois, une coupure de scie, ou des cellules endommagées par une manipulation trop brutale.

Le paramètre adéquat est bien sûr la ténacité K_{IC} . Sans surprise, elle dépend de la masse volumique (figure I.27), en $(\frac{\rho}{\rho_s})^{2/3}$. On sait bien que le bois se fend facilement parallèlement aux fibres, mais avec difficulté dans une direction perpendiculaire. La figure I.27) explique pourquoi : la ténacité est plus faible d'un facteur 10 dans la direction axiale que dans une direction transverse.

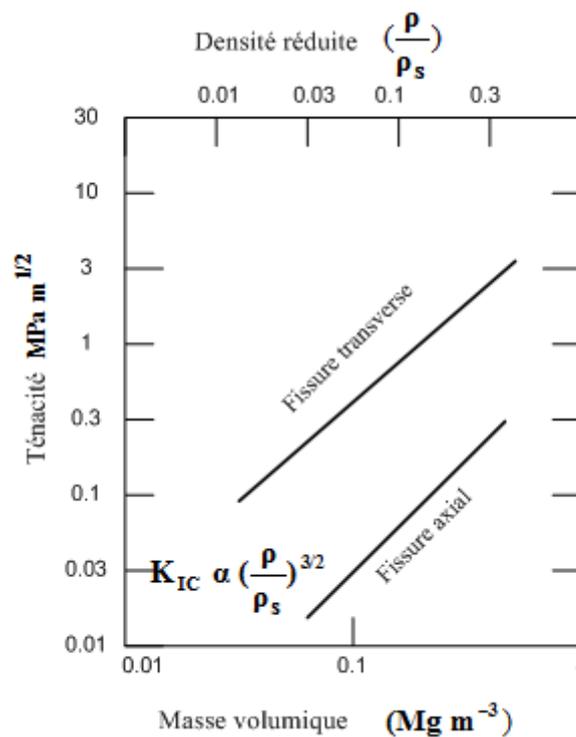


Figure I.26: La ténacité du bois. Comme ses autres propriétés, dépend surtout de sa densité relative ρ/ρ_s . la ténacité transversale est à peu près 10 fois supérieure à la ténacité axiale. Toutes deux varient en $(\frac{\rho}{\rho_s})^{2/3}$.

I.6. Le bois comparé aux autres matériaux

Les propriétés mécaniques du bois, matériau de construction primordial à cause de son utilisation universelle, découlent directement de la forme et la taille de ses cellules, et des propriétés des parois cellulaires, véritable matériau composite. Sous une contrainte *parallèle aux fibres*, les parois cellulaires subissent une contrainte de traction ou compression simple, et les propriétés dépendent linéairement de masse de volumique. En revanche, sous une *contrainte transverse*, les parois cellulaires travaillent en flexion, et les propriétés sont fonction d'une puissance (3/2 ou 2) de la densité relative. Ceci, ajouté à la grande anisotropie du matériau constitutif des parois cellulaires (qui est un composite directionnel de fibres en cellulose dans une matrice de lignine et d'hémicellulose), rend compte des différences énormes du module, de la résistance, et de la ténacité parallèlement ou perpendiculaires aux fibres.

Les propriétés du bois sont en règle générale moins bonnes que celles des métaux. Mais ce n'est pas le cas des propriétés ramenées à l'unité de masse. Le tableau I.5 montre que pour une masse donnée, les propriétés du bois sont meilleures que celles de l'acier doux, et aussi bonnes que celles des alliages d'aluminium (c'est pourquoi, pendant des années, on a construit les avions en bois). En outre, le bois est évidemment beaucoup moins cher.

Tableau I.5: Les propriétés mécaniques des bois [8].

Bois	Masse volu (Mg /m3)	Module d'Young (GPa)		Résistance (MPa) // aux fibres		Ténacité (MPa ml/2)	
		// aux fibre	⊥aux fibre.	traction	compression	//aux fibre	⊥aux fibre.
Balsa	0.1-0.3	4	0.2	23	12	0.05	1.2
Acajou	0.53	13.5	0.8	90	46	0.25	6.3
Sapin douç	0.55	16.4	1.1	70	42	0.34	6.2
Pin d'Ecos	0.55	16.3	0.8	89	47	0.55	6.1
Bouleau	0.62	16.3	0.9	-	-	0.56	-
Frêne	0.67	15.8	1.1	116	53	0.61	9.0
Chêne	0.69	16.6	1.0	97	52	0.81	4.0
Hêtre	0.75	16.7	1.5	-	-	0.95	8.9

Tableau I.6: Les propriétés des matériaux de construction ramenées à l'unité de masse.

Matériaux	Erreur ! Signet non défini. E /ρ	Re /ρ	Kic/ρ
Bois	20-30	120-17	1-12
Alliage d'Al	25	179	8-16
Acier doux	26	30	18
Béton	15	3	0.08

Chapitre II

Structure et morphologie du palmier

II. Structure et morphologie du palmier

II.1 Généralités sur le palmier

Les palmiers, palmacées (*Palmae*) ou arécacées (*Areaceae*) - les deux noms sont reconnus - forment une famille de plantes monocotylédones. Facilement reconnaissables à leur tige non ramifiée, le stipe, surmonté d'un bouquet de feuilles pennées ou palmées, les palmiers symbolisent les côtes et les paysages tropicaux [12].

II.1.1 Botanique

La famille des *arécacées* comprend plus de 2 500 espèces réparties en plus de 200 genres, dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées chaudes, de l'Afrique aux Amériques et à l'Asie.

Conformément aux règles de la nomenclature scientifique, le nom de la famille découle de celui du genre le plus représentatif (dans le cas d'espèce, il s'agit du genre *Areca*, qui comprend notamment *Areca catechu* L., l'aréquier ou palmier à bétel).

D'un point de vue botanique, les palmiers sont des monocotylédones et ne sont donc pas des arbres, mais des "herbes géantes". Cela n'empêche pas les Ceroylon des Andes de posséder les plus hauts stipes du monde (40 à 60 m). Quant au cocotier du Chili (*Jubaea chilensis*), il présente un stipe de plus d'1 m de diamètre.

L'épaississement du tronc chez le palmier résulte de l'addition répétée de faisceaux appelé "croissance secondaire diffuse".

II.1.2 Description

C'est une famille de plantes généralement arborescentes connues sous le nom de palmiers, à bois atypique n'ayant pas de cambium pour assurer une croissance en largeur d'un tronc, parfois à l'aspect de lianes ou d'arbustes. Elle est répandue dans toute la zone intertropicale. Seules deux espèces (*Phoenix theophrasti*, le dattier de Crète, et *Chamaerops humilis*, le palmier nain ou palmier doum) sont spontanées en Europe.

Le palmier a un tronc, une tige remplie de moelle ou de fibres, et n'a pas non plus de branches mais des palmes, qui selon les espèces peuvent avoir la forme d'un éventail (*feuilles palmées*), d'une plume (*feuilles pennées*) ou d'une structure

intermédiaire entre ces deux formes (*feuilles costapalmées*). Son inflorescence caractéristique est le spadice.

Plante à la fois primitive (*ancienne*) et très évoluée (*complexe*), elle peut s'adapter à des conditions climatiques diversifiées (*de la forêt équatoriale au désert aride*). Sensibles au gel, les palmiers ne dépassent pas la latitude de 50° Nord ou Sud et préfèrent les nombreuses contrées tropicales. Ils sont le plus souvent à leur aise sous un climat méditerranéen [12].

II.1.3 Histoire

Les palmiers occupent une place à part dans le monde végétal, parce qu'ils comptent parmi les plus anciennes espèces de plantes depuis 80 millions d'années. La datation des plus anciens fossiles de palmiers les donne du début du Crétacé, il y a environ 120 millions d'années.

De nombreux fossiles de palmiers ont été découverts en Europe sur des terrains datant de l'Oligocène (*38 millions d'années*) au Miocène (*6 millions d'années*). Ils témoignent d'une ancienne période de climat tropical. Toutes les civilisations de la Méditerranée les ont vénérés. Ils symbolisent l'arbre de vie, la fécondité et le succès.

II.1.4 Écologie

Les palmiers, largement répandus dans les régions intertropicales, font partie intégrante de l'écosystème tropical. Un grand nombre d'espèces poussent dans les forêts pluvieuses tropicales, au niveau de la canopée et dans la strate arborescente inférieure. Les palmiers poussent également dans des endroits durablement humides, comme les marais, à proximité des mangroves et sur les rives des fleuves. Ils prospèrent également dans les zones au climat subtropical humide ou méditerranéen, semi-arides et arides de plaines. Dans la cordillère des Andes on les rencontre encore à 4000 mètres d'altitude. On les trouve aussi dans les oasis, notamment au Sahara.

II.1.5 Économie

Les palmiers sont des plantes parmi les plus utiles dans l'économie agricole des pays des zones tropicales où ils ne sont dépassés en importance que par les graminées.

Toutes les parties de la plante sont employées de manière très variée. Les fruits, noix de coco ou dattes, font partie depuis des millénaires des aliments de base des populations vivant sous les tropiques. Avec le bois des stipes, on fabrique des planchers et des murs, et avec les feuilles on réalise la couverture des maisons.

Les représentants les plus importants de cette famille sur le plan économique sont les suivants :

- le cocotier cultivé, genre *Cocos*
- les palmiers à huile, genres *Elaeis* et *Orbignya*
- le palmier-dattier, genre *Phoenix*
- le palmier à raphia, genre *Raphia*
- le palmier à bétel, genre *Areca*
- le palmier à cire, genre *Copernicia*
- le palmier à ivoire, genre *Phytelephas*
- le palmier à rotin, genre *Calamus*
- les palmiers à sucre, genre *Caryota* et *Arenga*

II.1.6 Utilisations des palmiers

- usage alimentaire : dattes, noix de coco, sucre, vin de palme, coprah, sagou (fécule), chou palmiste (cœur de palmier), huile de palme, chenilles.
- usage thérapeutique : noix d'arec, sang-dragon.
- usage industriel : cire de palmier, fibres textiles (raphia, rônier, crin végétal), rotin. pour vannerie, ivoire végétal...
- usage ornemental : parcs et jardins, avenues, plantes d'appartement (kentia).
- usage médical : par exemple, les baies de *Serenoa* utilisés (industriellement) pour lutter contre l'adénome prostatique.

Il faut savoir que dans de nombreux pays (Polynésie, Panama, Thaïlande, Philippines, Nouvelle-Guinée, Indonésie, Amazonie), les palmiers servent de matériaux de construction. Tout d'abord, on se sert des stipes des palmiers pour établir la structure principale de la construction (charpente, poutre). Ensuite, pour réaliser la toiture, on se sert des feuilles qui ont la propriété de former une excellente couche étanche. Les cloisons intérieures quant à elles sont réalisées à partir de folioles tressées.

II.1.7 Parasites et maladies

Entre autres, deux insectes ravageurs de palmiers :

- *Rhynchophorus ferrugineus* : Le charançon rouge des palmiers (CRP).
- *Paysandisia archon* : Le papillon ravageur du palmier.

II.2 Le palmier dattier

Le palmier dattier était primitivement cultivé dans les zones arides et semi arides chaudes de l'Ancien Monde. Il fut propagé, par la suite, en dehors de son aire d'extension et de culture, non seulement comme arbre fruitier, mais aussi comme essence ornementale.

On le trouve en association avec d'autres palmiers d'espèces voisines dans toutes les localités privilégiées à hiver doux des rivages méditerranéens, où sa présence communique au paysage une note de chaleur et d'exotisme.

Il fut introduit sur les côtes orientales de l'Afrique par les Arabes, bien avant les premiers voyages des navigateurs européens du XVe siècle dans ces parages, au XVIIe et XVIIIe siècle aux îles Comores et Mascareignes, ainsi qu'à Madagascar, au XIXe siècle en Australie, et récemment en Afrique du Sud.

Son introduction au Nouveau Monde, au début du XVIe siècle, a suivi de très près la découverte de ce continent.

Le dattier fait l'objet d'une exploitation intensive en Afrique méditerranéenne, au Moyen-Orient et aux U.S.A., mais dans la plupart des pays où sa culture est très anciennement pratiquée, son exploitation est souvent menée en association avec d'autres cultures. De nombreuses palmeraies sont encore conduites en culture extensive ou selon des techniques très rudimentaires, en Afrique tropicale notamment. Enfin, certaines palmeraies, en raison de leur état d'abandon, ont pris l'aspect de peuplements naturels.

II.2.1 Répartition géographique

- **Europe**

Sur les rivages européens de la Méditerranée, ainsi que celui du secteur méridional de la Péninsule Ibérique, le dattier est surtout cultivé comme arbre ornemental, bien qu'il le soit aussi pour la production de ses fruits dans quelques provinces d'Espagne [13].

- **Asie**

Arabie Saoudite : Principales région de culture du dattier : El-Haza (Hofhouf), Chamar (Hail), région de Riad, El-Hisma (Tebrouk).

Iraq : L'Iraq est l'un des pays les plus importants producteurs de dattes du monde ; les palmeraies irakiennes représentent 37 % des peuplements de dattiers du globe.

- **Amérique**

Etats- Unis : Le dattier a été introduit au XVIIIe siècle en Floride, par des missionnaires espagnols, mais sa culture ne débuta que vers 1900 en Californie, avec des variétés introduites d'Algérie et l'Iraq. Les principaux centres de production sont actuellement en Californie méridionale.

- **Australie**

Les premières introductions ont été effectuées en 1880 avec des noyaux. Par la suite, les rejets ont été importés d'Algérie, des U.S.A. et d'Iraq ; les deux principaux centres de production sont la Queensland et la Northern Australia.

- **En Algérie**

L'Algérie possède deux millions de Km² de Sahara regroupant des oasis dont l'espèce type est le palmier dattier, on compte 14.506.030 d'espèces couvrant superficie de 128.800 ha, avec 9.641.680 dattiers représentant le potentiel productif soit 66 %.

Selon des statistiques de 1996 l'Algérie est classée à la cinquième place des pays producteurs de dattes avec 120 milles tonnes et 9 millions de palmiers soit 10 % du patrimoine mondiale dont 6.666.000 espèces productives occupant une superficie de

85.000 ha, et il faut signaler que l'Algérie occupe le premier rang le point de vue qualité triomphé par la variété Deglet Nour, figure II.1.

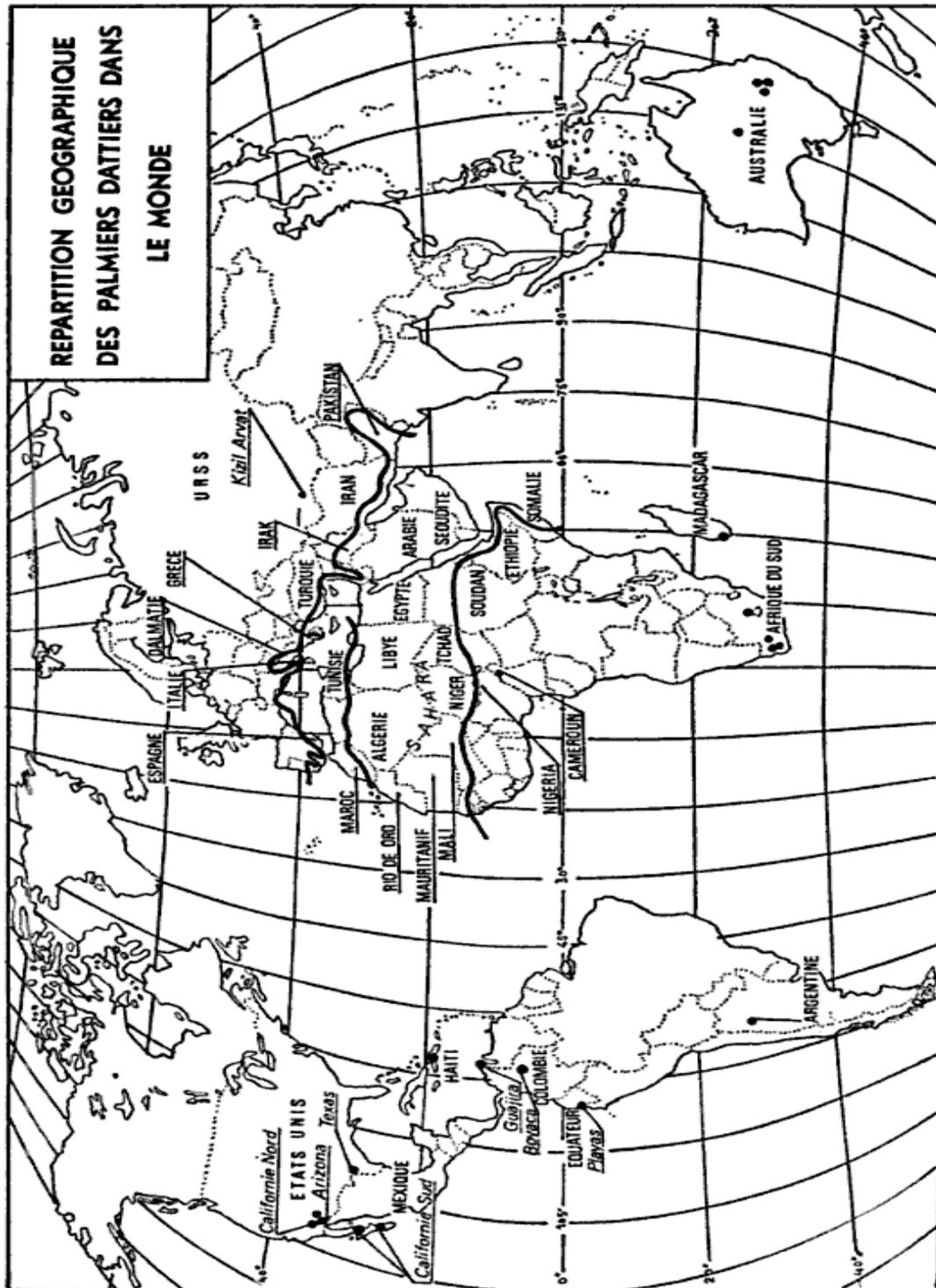


Figure II.1 : Répartition géographique des palmiers dattier dans le monde [13].

II.2.2 Importance

Le nombre de dattiers existant dans le monde peut être évalué à 93 millions de plants, pouvant être ainsi répartis :

Tableau II.1: Nombre des palmiers dans le monde [13].

	<i>pays</i>	<i>Nombre des palmiers</i>
<i>Europe</i>	<i>Espagne</i>	300.000
	<i>Pays divers</i>	20.000
	<i>Total</i>	320.000
<i>Afrique</i>	<i>Maroc</i>	4.000.000
	<i>Algérie</i>	7.500.000
	<i>Tunisie</i>	3.000.000
	<i>Libye</i>	5.000.000
	<i>Égypte</i>	8.000.000
	<i>Mauritanie</i>	1.000.000
	<i>Mali</i>	50.000
	<i>Niger</i>	300.000
	<i>Tchad</i>	1.400.000
	<i>Soudan</i>	2.000.000
	<i>Somalies</i>	150.000
	<i>Pays divers</i>	100.000
	<i>Total</i>	32.500.000
<i>Asie</i>	<i>Arabie saoudite et sud de la péninsule arabique</i>	11.000.000
	<i>Iraq</i>	32.000.000
	<i>Iran</i>	10.000.000
	<i>Reste de moyen orient</i>	90.000
	<i>Pakistan occidental</i>	6.500.000
	<i>U.R.S.S</i>	10.000
		<i>Total</i>
<i>Amérique</i>	<i>U.S.A</i>	400.000
	<i>Mexique</i>	100.000
	<i>Pays divers</i>	50.000
	<i>Total</i>	550.000
<i>Australie</i>	<i>Australie</i>	30.000

II.2.3 Botanique

II.2.3.1 Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*)

Le palmier dattier, comme le précise son nom, appartient à une grande famille arbres à palmes et produit des dattes. Le palmier dattier est aussi date palm en anglais, *nakhil ou tamr* en arabe, en afar et en somali. Mais, dans tous les pays, il porte le même nom latin, *Phoenix dactylifera* [14].

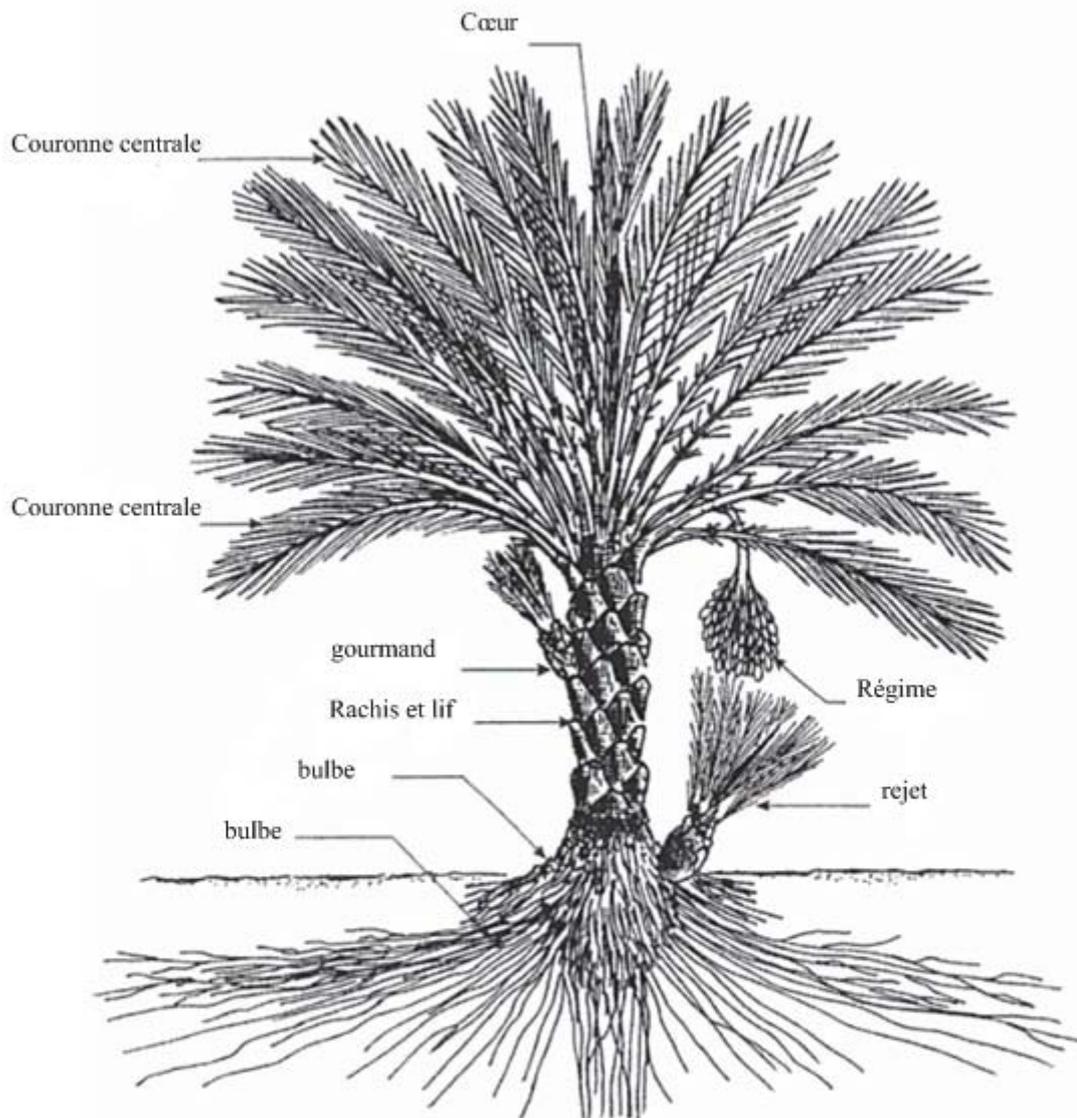
Le palmier dattier a été dénommé *phœnix dactylifera* par LINNE en 1734, *phœnix* dérive de Phoinix, nom du dattier chez les Grecs de l'antiquité, qui le considéraient comme l'arbre des phéniciens ; *Dactylifera* vient du latin *dactylus* dérivant du grec daktulos, signifiant doigt, en raison de la forme du fruit [13].

Le dattier est une monocotylédone de la famille des palmiers, sous famille ou tribu des Coryphinées, dans la classification de Martius et Blume.

C'est Linné, en 1734, qui a repris le nom de *Phoenix dactylifera* et qui en a fait la description complète. Du dessin des contours à la description des organes, l'étude morphologique du palmier est une première étape (figure II.2).

Le palmier est une monocotylédone arborescente, qu'il faut classer dans le règne végétal à côté des herbes, ou herbacées. Il en découle quatre caractéristiques à ne jamais oublier lorsqu'on cultive cette herbe géante [14].

- Le palmier dattier possède un bourgeon terminal, ou apex, qui assure sa croissance en longueur. Ce bourgeon terminal est unique, et il convient donc de le protéger. Il est cependant flanqué de bourgeons axillaires qui parfois le remplacent en cas de dommage localisé.
- Le diamètre du tronc du palmier, ou stipe, évolue en fonction du climat et des conditions de culture. Cette caractéristique est importante dans les premières années de vie du jeune arbre car le tissu de prolifération, qui détermine le diamètre du tronc, s'arrête rapidement de fonctionner. Le tronc atteint alors son diamètre maximal.
- Chaque palme est reliée par un faisceau libéro-ligneux à une racine ou à un groupe de racines.
- Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir de l'apex et perd un nombre similaire de palmes par dessèchement. Le nombre moyen de palmes est fonction du caractère variétal, mais aussi des conditions agroclimatiques.



**La couronne, ou frondaison
(le feuillage de l'arbre)**

- les palmes :
- Couronne basale, formée des palmes les plus âgées.
- Couronne centrale, formée des palmes en pleine activité.
- Palmes du cœur, dont celles en pinceau.
- les inflorescences et les régimes

Le tronc. Ou stipe

- les rachis des palmes
- le fibrillum, ou lif
- les gourmands et les rejets

Les racines, ou système racinaire

- le bulbe
- les racines

Figure II.2: Le palmier dattier [14].

II.2.4 Origine du palmier dattier

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est une plante très ancienne. En se référant aux travaux de Berry cité par Munier, (1973), les fossiles des palmiers à feuilles pennées remontent au début de tertiaire.

L'ancêtre du dattier est inconnu. De fait de la ressemblance morphologique de dattier avec *Phoenix sylvestris* et *Phoenix canariensis*. Ces deux espèces ont été apparentées au dattier. D'où l'hypothèse de l'ancêtre probable du palmier dattier à travers les deux espèces ou leurs hybrides. La forme actuelle du palmier est un hybride de parents inconnus. Par d'ailleurs, les Phoenix peuvent s'hybrider entre eux et donner de nouveaux génotypes très variables.

Plusieurs régions ont été supposées comme centre d'origine possible de cette plante. Parmi ces régions la Péninsule arabique le croissant fertile. La Perse et les Iles Canaries.

Certains pensent que le palmier dattier cultivé provient de Phoenix existant encore dans le voisinage de son aire de dispersion primitive (le Sud-ouest asiatique ou l'Afrique nord orientale), à partir de laquelle il serait réparti. D'autre supposent qu'il a pu naître d'une ou plusieurs formes sauvages distribuées dans son aire actuelle de dispersion et plus ou moins passées dans les formes cultivées;

Des travaux récents auraient permis d'identifier l'ancêtre sauvage de cette espèce, distribué sur la frange méridionale chaude et sèche du proche Orient sur le Nord-est du Sahara et le Nord du désert d'Arabie.

Ses exigences écologique et sa morphologie sont les mêmes que celle du dattier cultivé par contre, ses fruits sont petits et présentent une pulpe réduite.

L'intervention de l'homme aurait consisté en une sélection intuitive des cultivars en fonction de la quantité du fruit.

II.2.5 Morphologie du dattier

II.2.5.1 Le tronc et les rejets

Le tronc (figure II.3), qu'on appelle plus justement « stipe », est cylindrique, c'est-à-dire d'un même diamètre de base en haut, sauf à la base, où l'on trouve les racines respiratoires. Mais le stipe ne sera d'un diamètre vraiment constant que si la croissance de l'arbre a été régulière depuis son plus jeune âge [14].



Figure II.3: Le tronc (stipe) du palmier dattier.

Le tronc « pousse » au fur et à mesure de la croissance du bourgeon terminal, ou apex, ou encore phyllophore, et de l'émission des palmes.

Il ne se ramifie que très rarement, à partir des rejets aériens, *rhebs* ou *rkebs*, qui sont généralement enlevés.

Lorsque le bourgeon terminal est endommagé soit par blessure, soit par maladie, soit par dégâts de ravageurs, le palmier réagit en développant un ou plusieurs bourgeons axillaires. Ce ou ces bourgeons axillaires remplacent alors la « tête » du pied mère en produisant palmes et régimes [14].

Le tronc peut présenter de nombreuses traces de rétrécissement et d'écrasement des bases pétiolaires, ou *kornafs*. Ces variations du diamètre du tronc sont les témoins

de la vie biologique du palmier. Les rétrécissements indiquent les périodes de défaut de nutrition qui entraînent un développement réduit du bourgeon terminal-manque d'irrigation, sécheresse, accidents divers. Les augmentations d'écart entre les *kornafs* indiquent les périodes fastes de culture.

A la base, on trouve les racines respiratoires qui poussent en faisant éclater les *kornafs*. On y trouve également les rejets [13].

Dans la partie médiane, on trouve les *kornafs*. Les *kornafs* sont les bases pétiolaires du palmier qui restent collées au stipe après la mort de la palme. Ils se dessèchent à leur extrémité et assurent une protection du tronc. Leur présence permet de grimper sur le palmier.

Entre les *kornafs*, le tronc est recouvert d'un fibrillum, qui est bourre fibreuse, sorte de tissage végétal que l'on appelle le *lif*.

Dans la partie terminale du tronc, on trouve les palmes en activité, c'est-à-dire les palmes vertes qui sont insérées en hélices très rapprochées. La disposition des palmes sur le tronc détermine la phyllotaxie, ou foliation (figure II.4).

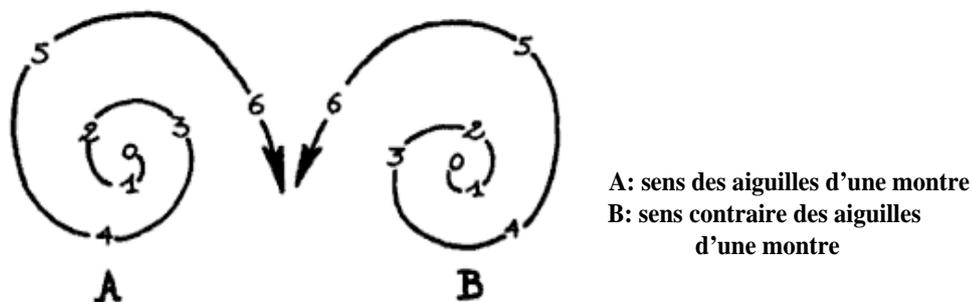


Figure II.4: La disposition des palmes sur le tronc, vue du dessus de l'arbre [14].

Le stipe mesure entre 15 et 20 mètres, mais il peut atteindre jusqu'à 30 mètres de hauteur. Ne s'accroît pas en épaisseur ; il garde durant toute son existence le même diamètre.



Figure II.5: Coupe transversale de tronc du palmier (dokar)

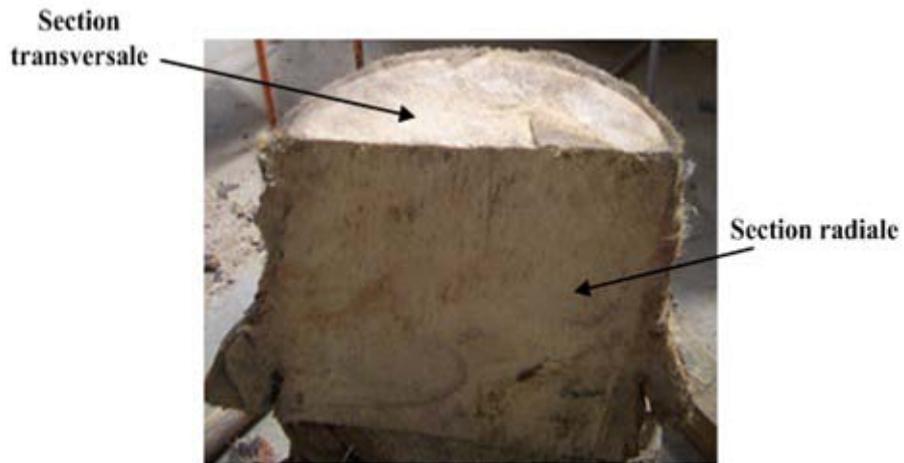


Figure II.6: Les plans de coupe de tronc du palmier (dokar)

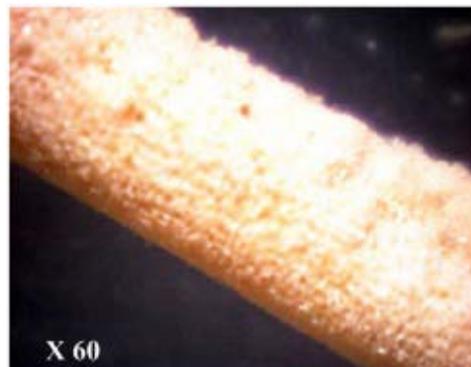


Figure II.7 : Fibre de tronc du palmier (par microscope optique digitale)

II.2.5.2 Les racines, ou système racinaire

Le système racinaire est dit fasciculé, c'est-à-dire qu'il est disposé en faisceaux de racines, parfois ramifiées avec beaucoup ou peu de radicelles, selon qu'elles se trouvent ou non au contact d'amendements humiques. Il est sans pivot, c'est-à-dire sans racine pivotante. On distingue quatre grands types de racines (figure II.8).

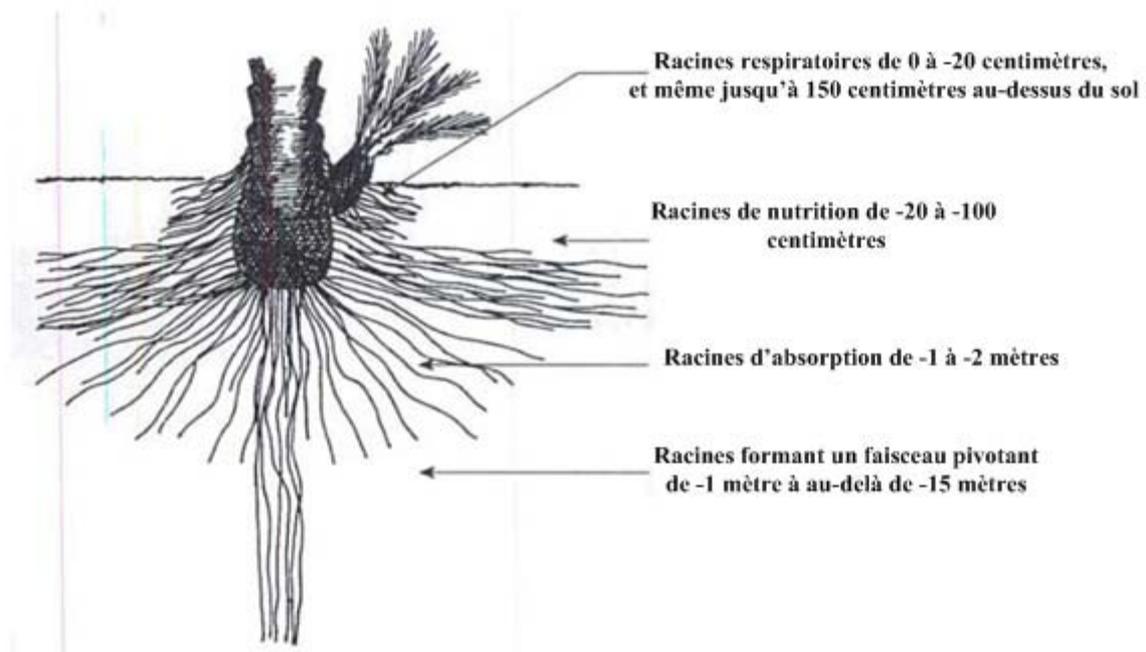


Figure II.8 : Les quatre types de racines [14].

II.2.5.2.1 Les racines respiratoires

Les racines respiratoires servent, comme leur nom l'indique, aux échanges gazeux. Elles se développent quelquefois très haut à la base du tronc, ou stipe, en poussant sous les bases pétiolaire des palmes, kornafs ou cornafs. Ce sont alors des racines aériennes. Les racines respiratoires souterraines ont peu de radicelles.

Ce système joue un rôle important, et nécessaire au palmier, dans les échanges gazeux avec l'aire de l'atmosphère du sol.

II.2.5.2.2 Les racines nutrition

Les racines de nutrition constituent la plus forte proportion de racines du système. Elles sont très longues, obliques ou horizontales.

Elles sont pourvues de nombreuses radicelles et peuvent se développer bien au-delà de la zone de projection de la frondaison d'un palmier adulte, d'où l'importance des grandes cuvettes ou, mieux, des planches d'irrigation.

II.2.5.2.3 Les racines d'absorption

Les racines d'absorption ont pour fonction de chercher l'eau. La zone de ces racines est plus ou moins développée selon le mode de culture et la profondeur de la nappe phréatique.

II.2.5.2.4 Les racines du faisceau pivotant

Le pivot de racines d'absorption est quasi inexistant si la conduite de culture permet une absorption suffisante au niveau des racines de nutrition et d'absorption. Il est réduit si la nappe phréatique se trouve à faible profondeur. Mais, si nécessaire, ce véritable pivot de racines peut atteindre l'eau jusqu'à une profondeur de 17 mètres (G.Toutain, comm.pers).

Le développement des racines est fonction :

- De la nature du sol ;
- Du mode de culture ;
- De la profondeur de la nappe, ou de l'aquifère ;
- Du cultivar, ou variété.

On remarque aussi un « déséquilibre » dans la répartition circulaire des racines longues. Si les palmiers sont plantés près de seguias, ou canaux d'irrigation, de puits non cimentés, les racines dérivent vers les zones humides et développent de nombreuses radicelles.

II.2.5.3 Palmes

Une palme, ou *djerid*, est une feuille composée, pennée (figure II.9). La base *pétiolaire*, ou *Kornaf*, engaine partiellement le tronc et est en partie recouverte par le *fibrillum*, ou *lif* [14].

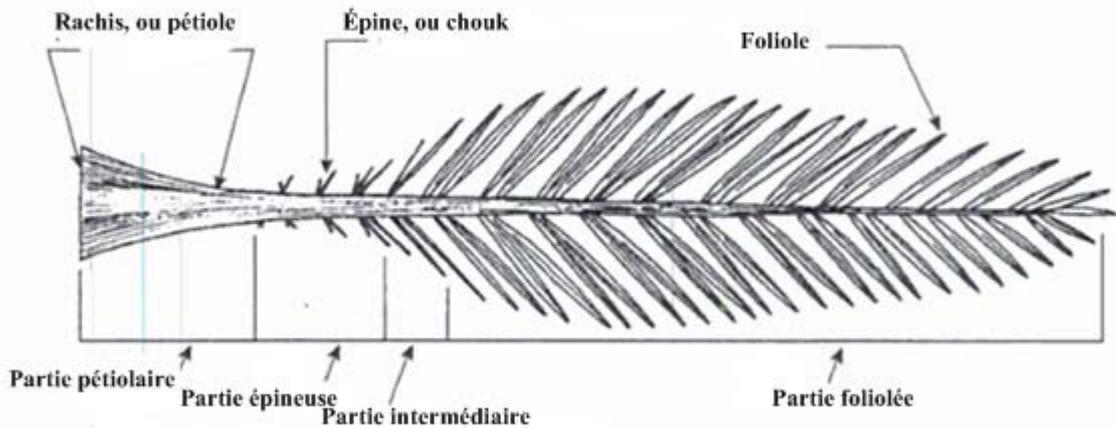


Figure II.9 : Une palme [14].

Le rachis, ou pétiole, est semi-cylindrique, plus ou moins ailé, et porte les épines, *chouks* ou encore *chouques*, et les folioles. Le pétiole est dure et relativement rigide (figure II.10).

Les épines sont plus ou moins nombreuses et plus ou moins longues. On constate un gradient entre les premières épines et les épines du haut, qui se transforment progressivement en folioles.

Épines et folioles sont plus ou moins régulièrement disposées en position généralement oblique le long du rachis, seules ou en un groupe de trois au maximum.

La finesse, la rigidité et la couleur des folioles diffèrent selon le cultivar. L'épiderme des folioles est recouvert d'une mince couche cireuse. Cependant, la couleur peut varier avec les conditions de culture : les folioles d'un palmier qui a soif ternissent. La morphologie et la disposition des folioles et des épines sur le rachis constituent l'un des éléments de caractérisation des cultivars [14].



Figure II.10 : Coupe d'un rachis ou pétiole (kornaf).

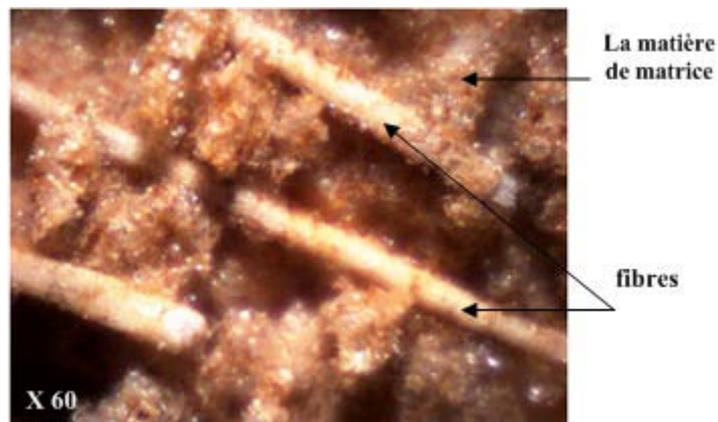


Figure II.11 : La microstructure de kornaf (Microscope optique digitale)

II.2.5.4 Organes floraux (l'Inflorescence)

L'arbre est dioïque ; les pieds mâles fleurissent en générale à partir de la troisième année et les pieds femelles vers 5 ou 6 ans, les fleurs sont groupées en une inflorescence très fournie pouvant contenir plusieurs dizaines de milliers de fleurs et enfermées avant la floraison dans une grand bractée appelée spathe celle-ci ne porte que des fleurs du même sexe les fleurs mâles ont tous les deux une couleur blanc ivoire [12 ,14].

La fécondation peut être assurée par le vent mais dans les palmeraies elle est faite artificiellement par l'homme : on introduit dans la jeune inflorescence femelle quelques rameaux mâles dont le pollen est mûr.

II.2.5.5 Le fruit

Après la fécondation un seul carpelle sur les trois se développe, la durée de fructification est variable selon les cultivars et les conditions climatiques.

Le fruit est une baie, monosperme, appelée “datte “, contenant une seule graine appelée aussi “noyau“. Le fruit est généralement cylindrique oblongue et très polymorphe [12].

II.2.6 La diversité variétale et génétique du palmier dattier

L’homme a fourni beaucoup d’effort pour aboutir à des générations dont la production satisfait ses besoins et pour la transmission fidèle des caractères agronomiques appréciées.

Et en ce qui concerne la nomenclature des catégories de plantes, on peut toujours pas leur attribuer des noms scientifiques vue qu’elles sont sélectionnées ou maintenues dans le but de les cultivées, se sont des plantes dites améliorées pour mieux servir les intérêts de l’homme, elles se plient aux exigences du marché.

Pour le palmier dattier, chaque palmeraie possède sa propre composition variétale qui s’est installée par sélection et nomination au sein de chaque oasis due aux échanges entre les agricultures d’une même région sans l’existence de programme dirigé pour l’amélioration d’une variété. La variabilité des chiffres pour le sondage des variétés de dattes révèle le problème d’ambiguïté liée à la nomination des cultivars, et accentuées par l’absence de toute procédure normalisée et de descripteur communs adoptés pour les pays phoenicicoles.

La nomination d’un cultivar pourrait être influencées par la langue ou même l’accent de la région, comme elle peut changée lors de son transfert dans autre palmerai, on site qu’en Algérie Ben Khalifa (1989) a dénombré environ 270 variétés dans la région de l’ouest. Le khalt est la conséquence de la diversité génétique des palmeraies traditionnelles et de nombreuses palmeraies sont issus de ce type de reproduction comme les palmeraies du Sahel au mali, au Niger, au Tchad, d’Elche (Espagne) et de Marrakech.

Il existe actuellement quelque 260 cultivars en Tunisie, environ 800 variétés en Algérie et 223 variétés en Tunisie et un nombre indéterminé de khalt au Maroc, dont la majorité sont des variétés de datte communes, quoique certaines variétés communes

sont très connus et même appréciées par la population régional, une grande partie se trouve envahit par des variétés qui ont un poids économique et donc une grande valeur marchande tel que la variété de Deglet Nour qui représente le principale danger d'érosion génétique de la biodiversité du palmier dattier.

II.2.7 Climat et cycle végétatif

Le palmier dattier est cultivé comme arbre fruitier dans les régions chaudes arides et semi-arides du globe. Bien qu'originare de pays chauds et humides, cet arbre peut s'adapter à de nombreuses conditions, grâce à sa grande variabilité. Ainsi, sa culture, ou phœniciculture, est pratiquée en zones marginales soit par tradition, soit en raison de conditions historiques ou économiques particulières.

II.2.7.1 Température et activité végétative

De nombreuses études ont montré que l'activité végétative du palmier dattier se manifeste à partir de +7 à +10 °C, selon les individus, les cultivars et les conditions climatiques locales (Figure II.12).

Entre 10 et 40 °C, le palmier est en activité végétative. Il atteint son maximum d'activité vers 30 à 38 °C. Au-delà de 38 à 40 °C, l'activité végétative décroît rapidement.

Il tolère des maxima de 56 °C pendant plusieurs jours sans paraître en souffrir lorsqu'il est normalement alimenté en aux, mais ce n'est qu'une résistance [14].

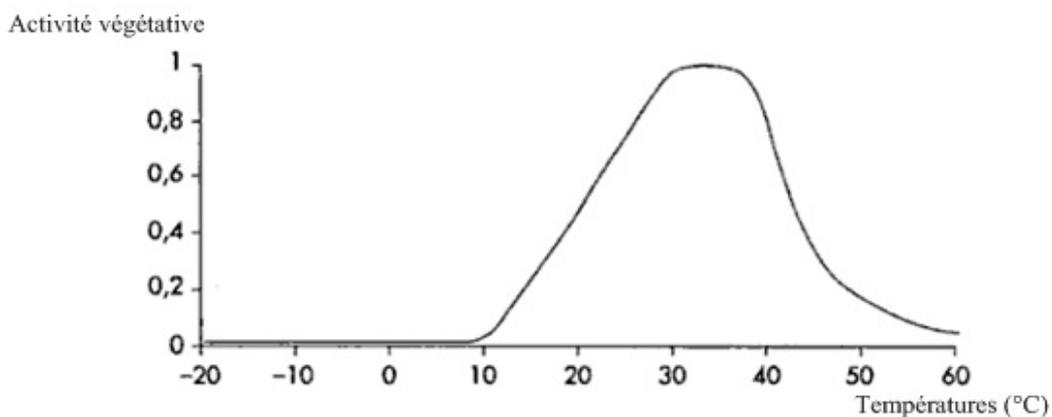


Figure II.12 : L'activité végétative en fonction de la température.

Le dattier est sensible à l'humidité de l'air pendant sa période de fructification. A l'époque de la floraison, une forte humidité favorise la pourriture des inflorescences et gêne la pollinisation en provoquant une germination du pollen. A l'époque de la maturation, elle diminue la transpiration des dattes, et celle-ci cesse complètement vers 90 %. Or, maturation des dattes s'accompagne d'une diminution de leur teneur en eau par transpiration. Si celle-ci ne peut s'effectuée, les dattes restent gorgées d'eau et ne mûrissent pas ; elles peuvent même éclater, et la pulpe en contact de l'air humide, fermente et pourrit.

II.2.8 Composition chimique des différentes fibres du palmier dattier

- **Composition chimique des feuilles du palmier dattier**

Les fibres lignocellulosiques ont été obtenues en coupant *des feuilles* du palmier dattier en petits morceaux approximativement de 5 cm long et 10 mm de large [15].

Les compositions chimiques des fibres sèches du palmier dattier sont déterminées selon la norme française (NFT12-011). Il est ainsi possible d'évaluer la fraction de poids de la cellulose, des hémicelluloses, et de la lignine.

Tableau II.2: Composition chimique des fibres de palmier dattier avant (Fibres sèches crues de palmier) et après (fibres (oxydées) modifiées) le traitement chimique [15].

Constituant	Fibres brutes sèches de palmier (%)	Fibres oxydées (%)
Cellulose	35	46
Hémicelluloses	28	34
Lignine	27	12

- **Composition chimique des feuilles et rachis de palmier dattier**

Les constituants et la composition chimique des *feuilletts* et *rachis* de palmier dattier sont donnés au Tableau II.3.

Tableau II.3: Composition chimique du feuillet et rachis de palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) [16].

<i>Constituant</i>	<i>Feuillets</i> (% de matière sèche)	<i>Rachis</i> (% de matière sèche)
<i>Cendre</i>	6.5	2.5
<i>Graisse et cire</i>	3	4
<i>Lignine</i>	27	14
<i>Protéine</i>	2	6
<i>Cellulose</i>	33.5	44
<i>autres polysaccharides</i>	26	28

- **Composition chimique du brut de la maille qui entoure le palmier dattier**

Des échantillons bruts de la maille (tapis naturel) qui entoure le palmier dattier sont analysés. Le tapis naturel se compose de fibres individuelles qui se croisent, tableaux II.4.

Tableau II.4 : Composition chimique de fibre brute de palmier dattier [21].

<i>Élément</i>	<i>Cellulose</i> (% En poids)	<i>Lignine</i> (% En poids)	<i>Hémicelluloses</i> (% En poids)	<i>teneur en humidité</i> (% En poids)	<i>Autres</i> (% En poids)
<i>Composition</i>	46	20	18	5	11

- **Composition chimique d'une fibre de feuilles du palmier dattier**

La fibre lignocellulosique a été obtenue par la coupure *des feuilles* de palmier dattier en des morceaux de 1.5 cm long et de largeur de 1 mm. Les fibres blanchies sont ensuite séchées à 80 ° C pendant 2 h, les fibres obtenues ont été notés comme non modifié [18].

Les compositions chimiques des fibres sèches de palmier dattier sont déterminées selon la norme française (*N-F T 12-011*). Elle donne la fraction de poids de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine, d'extractible et des cendres, tableaux II.5.

Tableau II.5: Composition chimique des fibres de palmier avant (fibre brute sèche de palmier) et après traitement de purification (fibres non modifiées) et modification chimique (fibres modifiées) [18].

<i>Constituant</i>	<i>Fibre brute sèche de palmier (% En poids)</i>	<i>Fibre non modifiée (% En poids)</i>	<i>Fibre modifiée (% En poids)</i>
<i>Cellulose</i>	33.9±1.9	33.5±0.5	43.0±0.5
<i>Hémicelluloses</i>	26.1±2.0	28.5±1.5	20.3±1.2
<i>Lignine</i>	27.7±1.2	26.5±0.5	26.0±1.0
<i>Cendres</i>	6.9±0.1	6.5±0.5	5.2±0.2
<i>Extractibles CH₂Cl₂</i>	3.5±1.0	0	0

Chapitre III

Expérimentations

III. Partie Expérimentations

Ce chapitre constitue la contribution expérimentale de notre travail. Il comprend plusieurs étapes. On commence par la présentation des constituants dans leurs états bruts, ensuite il est exposé la méthode de préparation des échantillons. Ces derniers sont le sujet de caractérisation. Essentiellement il est procédé à une caractérisation morphologique et une caractérisation mécanique que nous allons présenter dans ce qui suivra.

III.1 Préparation des échantillons

III.1.1 Constituants bruts du palmier dattier

Nous avons préparé trois types d'échantillons à savoir ; des échantillons pour la détermination de la densité, des échantillons pour les observations sur microscope de la microstructure des différentes constituants et des échantillons pour les essais mécaniques.

Ces échantillons sont prélevés à partir de quatre palmes et de tronc de palmier dattier figure (III.1).



Figure III.1: Les palmes et le tronc pour la préparation des échantillons.

III.1.2 Méthode de découpage

III.1.2.1 Découpage des palmes

- **Première étape**

La palme est coupée en deux parties : la partie pétiolaire et la partie foliolée, comme illustré dans la figure (III.2).



Palme II

Figure III.2 : Les palmes découpée : partie pétiolaire (kornaf) et partie foliolée (Gand)

- **Deuxième étape**

Il est question maintenant de prélever des échantillons de kornaf sous forme de morceaux prismatique (de 2cm de largeur environ) *Figure (III.3)*

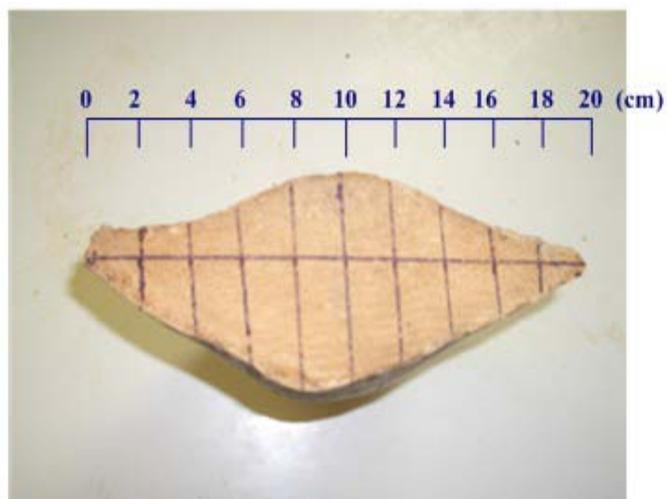


Figure III.3: Le découpage du kornaf.



Partie II-1
(palme II)

Figure III.4 : Le découpage de la partie pétiolaire (kornaf).

- **Troisième étape**

A partir des morceaux découpés de kornaf, nous réalisons des éprouvettes de compression et des éprouvettes de flexion selon les normes.

III.1.2.2 Découpage du tronc de palmier

Le morceau du tronc de palmier dattier ayant un diamètre 29.5 cm d'environ comme illustrée dans la figure III .5, servira pour le prélèvement des éprouvettes.

Nous coupons ce morceau en deux parties égalées (figure III.6.B), chaque partie est couper en de petits morceaux de 2 cm de largeur (figure III.6.D). A partir des ces petits morceaux nous fabriquons les éprouvettes de traction, de compression et de flexion. L'outil utilisé est une scie à chaine pour la découpe de tronc d'arbres.

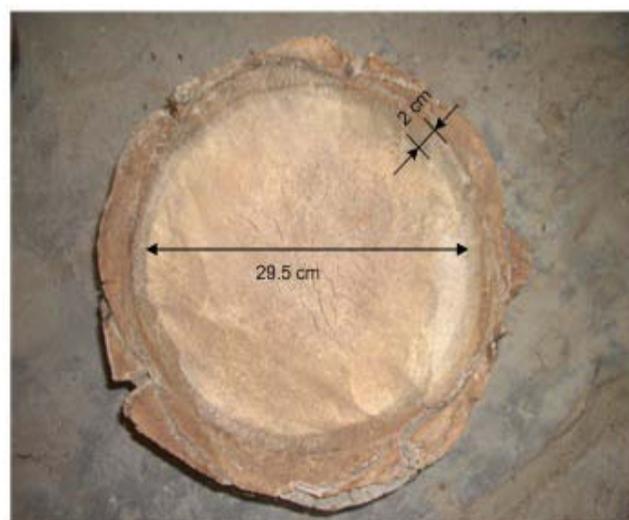


Figure III.5 : Tronc de palmier.



Figure III.6: Les étapes de préparation de planches du tronc de palmier.

En somme il est réalisé deux types d'éprouvettes pour le bois de kornaf et trois types d'éprouvettes pour le bois du tronc. De plus, on prépare aussi des échantillons pour la détermination de la densité et pour la caractérisation morphologique à l'aide d'observation sur microscopes.

✓ **Pour le bois du tronc :**

○ **Les éprouvettes de flexion**

Les éprouvettes de flexion préparé ont pratiquement les dimensions suivantes :
Longueur $L= 122\text{ mm}$,

Largeur $l= 28\text{ mm}$

Epaisseur $e=10\text{ mm}$

- **Pour les éprouvettes de traction**

Pour les éprouvettes de traction qui ont une forme plate dont les dimensions sont les suivantes : une longueur $L= 160\text{ mm}$, une largeur $l= 13\text{mm}$ et une épaisseur $e=5\text{ mm}$

- **Les éprouvettes de compression**

Les éprouvettes de compression ont une longueur $L= 48\text{ mm}$, une largeur $l= 28\text{mm}$ et une épaisseur $e=17\text{mm}$.

- ✓ **Pour le bois de kornaf :**

- **Les éprouvettes de compression**

Les éprouvettes de compression ont une longueur $L= 48\text{ mm}$, une largeur, $l= 16\text{mm}$ et une épaisseur $e=16\text{mm}$.

- **Les éprouvettes de flexion**

Les éprouvettes de flexion pour bois de kornaf ont les dimensions suivantes : une longueur $L= 160\text{ mm}$, une largeur $l= 15\text{mm}$ et une épaisseur $e=15\text{mm}$.

III.1.3 Préparation des échantillons pour les observations sur microscope optique et sur microscope électronique à balayage

Pour l'obtention de photos d'échantillons du bois de palmier (bois du tronc, kornaf et gand), et dans l'objectif d'étudier la morphologie, il nécessaire de procéder à une préparation adéquate des surfaces d'observation.

Pour cela nous avons utilisé deux méthodes pour la préparation des surfaces d'observation à savoir : une préparation par l'utilisation du papier verre et une autre préparation par usinage en utilisant une fraiseuse. Il est fait recourt à usinage des surfaces car l'utilisation du papier verre n'a pas donné de bonnes résultats. En effet, l'utilisation du papier verre engendre la couverture et le bourrage de la surface préparée par les débris enlevés et par les grains abrasifs du papier verre. Ce qui résulte à des surfaces non illustratives. Pour ces considérations on a opté pour la préparation des surfaces par usinage sur fraiseuse.

III.2 Méthodes de caractérisation

III.2.1 Calcul de la densité.

La première caractérisation concerne la détermination de la densité des différents constituants du palmier. Pour le calcul de la densité nous utilisons une technique très simple qui consiste à prélever plusieurs échantillons du palmier de plusieurs endroits, à faire la pesé des ces échantillons et à mesurer leurs volume respectives. Le volume des échantillons est mesuré par la technique d'immersion dans de l'eau distillé et par la pesé du volume d'eau déplacé par l'échantillon. Les moyens nécessaires pour cela sont : une balance électronique de précision (0.001 g), de l'eau distillée et un récipient à trop-plein. La figure III.7 montre la balance utilisée pour les pesés.

La mesure de la densité concerne : le tronc, la palm et le kornaf.



Figure III.7: Balance électronique utilisée pour le calcul de la densité.

- **Calcul de la densité des palmes (Gand)**

Pour cette partie (gand) de palme, nous avons prélevé des échantillons dans différentes positions le long du gand et nous avons procédé à la mesure de la densité. Le tableau III.1, donne les valeurs de la densité selon la longueur.

Tableau III.1 : Les valeurs de la densité d'une palme (gand) selon sa longueur.

N° d'échantillon	2	5	8	10	12	14
Position	3	12	21	27	33	39
d'échantillon (cm)						
Densité	0.91	0.86	0.84	0.73	0.76	0.63

Alors que la figure III.8, illustre variation de la densité en fonction la position de l'échantillon.

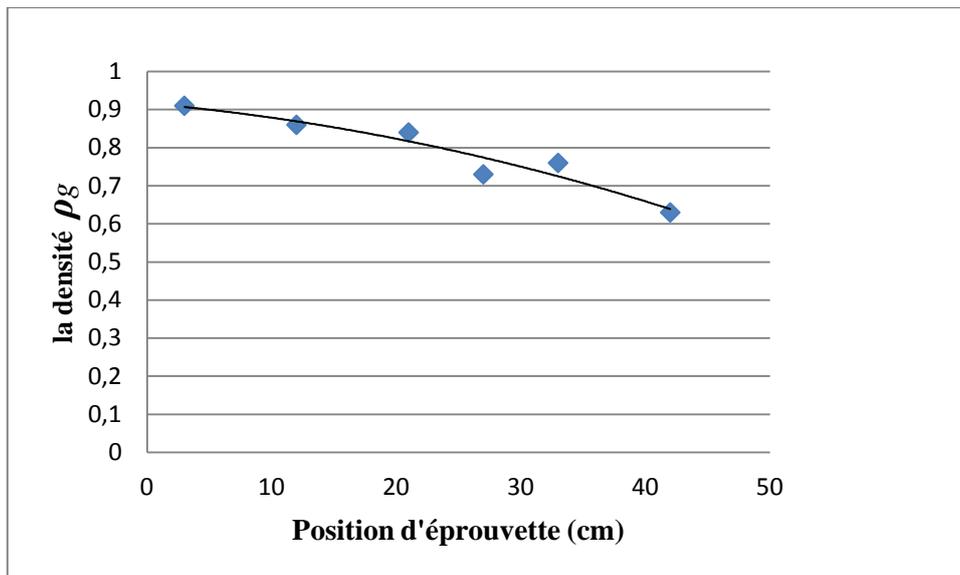


Figure III.8: La variation de la densité en fonction la position de l'éprouvette palme (partie gant) direction axiale (direction longitudinale) de palme.

- **Pour bois de KORNAF**

Il faut mentionner que aussi pour la mesure de la densité du kornaf nous avons considéré l'effet de la position de l'échantillon sur dans la détermination de sa densité.

La figure III.8 donne la numérotation choisie pour identifier la position des éprouvettes prélevées pour la détermination de la densité. Ceci permet d'identifier d'éventuelle relation dans la distribution de la densité. Le tableau III.2, donne la valeur de la densité du kornaf selon sa position.

Tableau III.2 : La variation de la densité des échantillons du kornaf selon ses positions.

N°	1'	1	2	3	4	5	6
d'échantillon							
Position	-	-	2	4	6	8	-
d'échantillon							
suivant x (cm)							
Position	2	4	-	-	-	-	6
d'échantillon							
suivant y (cm)							
Densité	0.24	0.18	0.16	0.18	0.16	0.24	0.14

La figure III.10, et III.11, illustre l'évolution de la densité.

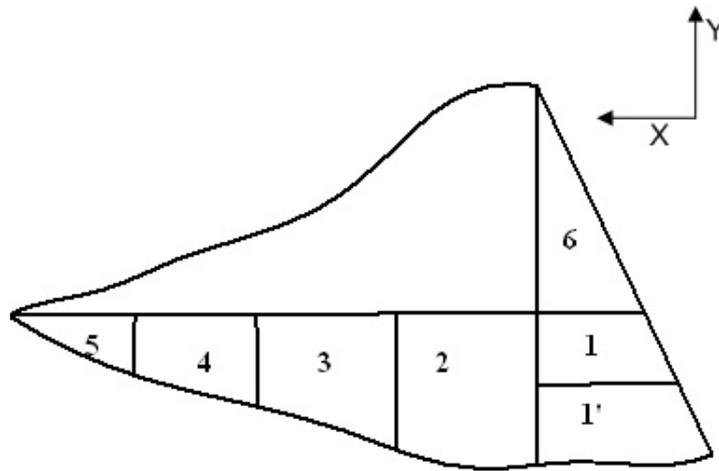


Figure III.9: Numérotation des échantillons du kornaf pour la mesure de la densité.

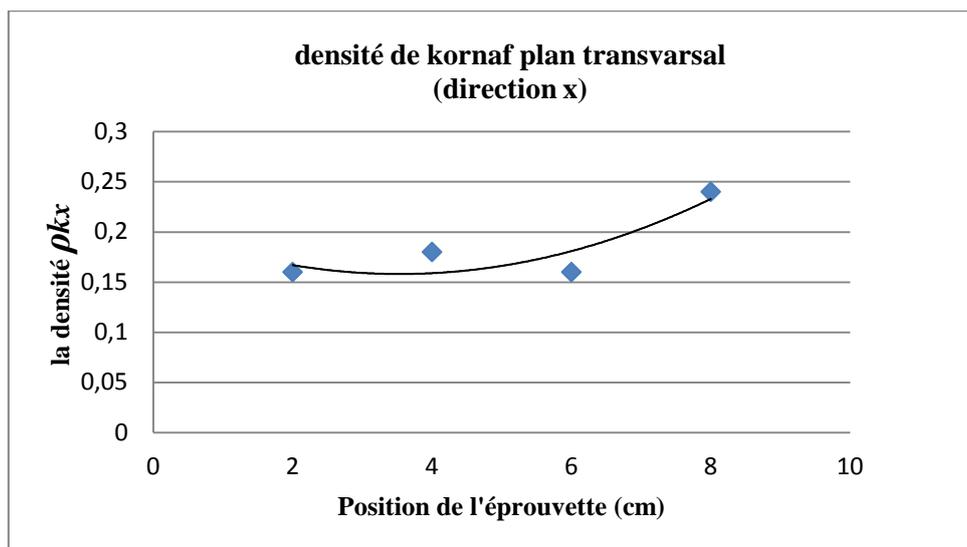


Figure III.10: La variation de la densité de kornaf selon la direction transversale (direction X).

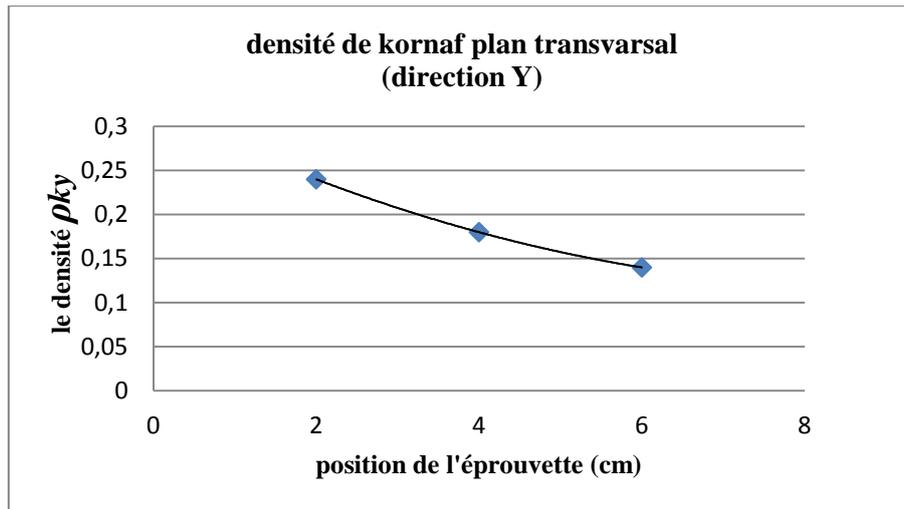


Figure III.11: La variation de la densité de kornaf selon la direction transversale (direction Y).

D'après les figures (III.10 et III.11), la densité de kornaf dans un plan Transversal augmente dans la direction X et diminuée dans la direction Y.

- **Les échantillons du tronc de palmier**

La densité mesurée du bois de tronc, donne une valeur moyenne de près de **0,88**.

III.2.2 Observation par microscopes :

III.2.2.1 Observation de la microstructure par microscope optique digital (MOD)

Le moyen utilisé pour ces observations est le microscope optique digital (DigiBlue_QX5_QSG) représenté sur la figure (III.12). Le microscope en question peut être connecté à un microordinateur via un port USB pour la prise de photos, il permet des agrandissements de x10, x60 et x200.



Figure III.12 : Le microscope optique digital (DigiBlue_QX5_QSG).

III.2.2.2 Observation de la microstructure par microscope électronique à balayage MEB

- **Principe de fonctionnement**

Le principe de fonctionnement et de la formation de l'image par microscope électronique à balayage (MEB) sont entièrement différents de ceux du MO ou du MET. Dans un MEB, un faisceau d'électrons primaires, d'un diamètre pouvant varier de quelques nanomètres à un micromètre environ, est focalisé sur l'échantillon à l'aide de lentilles électromagnétiques (figure III.13). L'intensité des électrons réémis par la surface dépend de l'orientation et de la composition de celle-ci. Les électrons réémis (rétrodiffusés ou secondaires) sont collectés par un détecteur approprié, et le signal électrique ainsi obtenu est amplifié et sert à moduler l'intensité du faisceau d'électrons (spot) sur un écran cathodique. Des bobines de balayage permettent au faisceau incident de couvrir ligne par ligne la région à étudier. Le faisceau d'électrons de l'écran cathodique se déplace de façon synchrone, ligne par ligne ; à chaque position du faisceau incident sur l'échantillon correspond une position homologue du spot sur l'écran cathodique (figure III.13). La brillance du spot est proportionnelle à l'intensité du signal d'électrons émis par le point de l'échantillon. On obtient ainsi sur l'écran cathodique une image (en noire et blanc) reconstituée de la surface de l'échantillon à partir du signal détecté provenant de chaque point de la surface balayée par les électrons primaires. Le grossissement G obtenu sur l'écran cathodique est tout simplement égal

au rapport de la largeur de cet écran à la largeur de la zone balayée sur l'échantillon ($G = A'D'/AD$) [19].

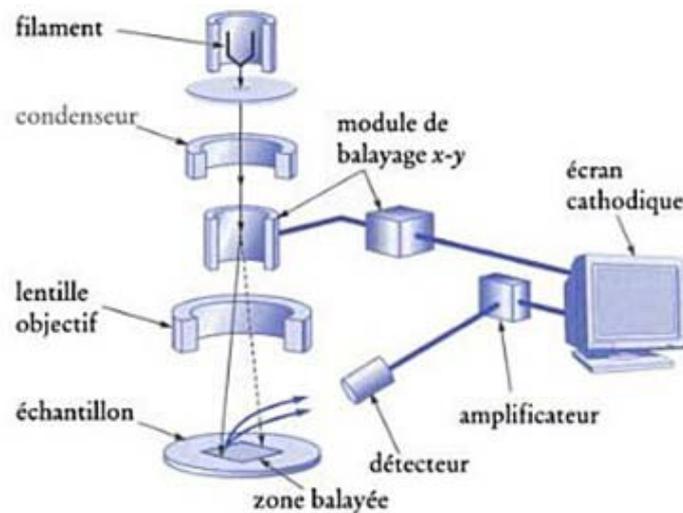


Figure III.13: Représentation schématique du microscope électronique à balayage [19].

Le pouvoir de résolution du MEB dépend de la taille de la zone d'où provient le signal utilisé pour former l'image : environ 1 à 4 μm avec les électrons rétrodiffusés et les rayons X ; 5 nm avec les électrons secondaires, ce qui permet d'atteindre des grossissements utiles de 50 000 x. La profondeur de champ du MEB est d'environ 100 fois supérieur à celle d'un microscope optique (500 μm à 100 x et 30 μm à 2000 x), ce qui permet d'observer des surfaces présentant des reliefs, telles que des surfaces de rupture.

Pour nos observations nous utilisons le MEB [JEOL- Jsim.6390 LV] existant au niveau de l'université du Biskra.

III.2.3 Les essais mécaniques :

III.2.3.1 Les essais de traction:

L'essai de traction dans les directions naturelles du bois est réalisé selon l'essai normalisé américain ASTM D143. Le type d'éprouvette est utilisé, pour obtenir la résistance à la traction dans la direction longitudinale (Figure III.14). L'éprouvette de traction longitudinale est fixée aux têtes d'amarrage par l'intermédiaire de mors à coins, ce qui peut provoquer parfois des ruptures indésirables.

Le diagramme contrainte-déformation présente une partie linéaire relativement importante et un domaine réduit où apparaît une non-linéarité. Celle-ci peut être

attribuée à de l'endommagement et plus particulièrement à des fissurations des parois cellulaires. La fin du comportement proportionnel peut être assimilée à une véritable limite d'élasticité [20].

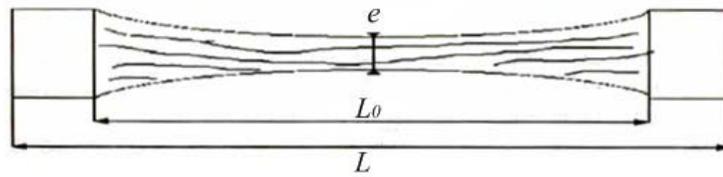


Figure III.14: Éprouvette de traction pour des essais où la charge est appliquée selon la direction longitudinale [20].

La résistance en traction axiale du bois est particulièrement élevée et il faut prendre des précautions spéciales pour appliquer les efforts sur l'éprouvette qui doit être affilée, longue et avec des têtes larges. Dans le sens perpendiculaire au fil, la résistance en traction caractérise l'adhérence des fibres entre elles.

III.2.3.2 Les essais de flexion simple:

Le module de Young dans la direction du grand axe d'une éprouvette prismatique longue peut être déduit de la mesure de la rigidité à la flexion de cette éprouvette.

L'essai réalisé par la norme de flexion statique européenne (NF B51 008), est destiné en premier lieu à évaluer les caractéristiques de rupture et non les caractéristiques élastiques. L'éprouvette utilisée est de 340 mm de long, à section droite carrée (20x20 mm²) placée sur deux appuis cylindriques à axes parallèles (30 mm de diamètre) (Figure III.15).

L'interprétation de cet essai a été conduite dans le cadre de la théorie classique de la résistance des matériaux appliquée aux poutres droites. L'enregistrement de la courbe caractéristique effort-flèche permet de calculer à l'intérieur de la zone de rigidité le module d'élasticité.

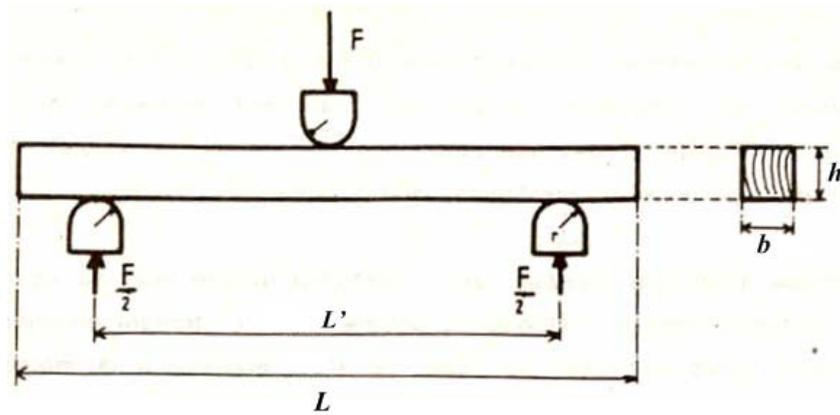


Figure III.15 : Schématisation d'un test de flexion simple trois points [20].

La flexion statique s'effectue également suivant la norme américaine ASTM D-143. Les éprouvettes sont de dimensions 50x50x762 mm selon la grande norme ou de 25x25x400 mm. Les essais normalisés tendent vers des résultats qui sont à la fois reproductibles et représentatifs de certaines conditions d'utilisation. Un important avantage de la flexion statique est qu'elle permet d'établir facilement le diagramme effort-déformation. L'analyse de ce dernier fournit des informations de base sur le comportement des matériaux, en l'occurrence celui du bois suivant son fil, l'énergie totale de rupture, qui correspond à la surface sous la courbe, est même considérée comme un excellent indice de la résistance au choc en flexion. Les formules correspondantes en flexion sont les suivantes:

La flèche

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} \quad \text{III.1}$$

La déformation

$$\varepsilon = \frac{6\delta l}{L^2} \quad \text{III.2}$$

Module d'Young

$$E = \frac{FL^3}{48\delta I} \quad \text{III.3}$$

I est le moment quadratique avec

$$I = \frac{le^3}{12}$$

L : Longueur de l'éprouvette.

l : Largeur de l'éprouvette.

e : L'épaisseur de l'éprouvette.

III.2.3.3 Les essais de compression

L'essai de compression normalisé européen (NF B 51 007) est exécuté sur des éprouvettes de dimensions (20x20x60mm). Le taux d'élanement (hauteur sur diamètre) est suffisamment petit pour éviter les phénomènes de flambage. La friction inévitable qui apparaît à l'interface des plateaux de compression est limitée en intercalant dans la zone de contact des feuilles de téflon. La valeur du coefficient de frottement a par ailleurs une influence considérable sur la forme du diagramme charge déplacement. Celui-ci présente une courte période de comportement élastique et ensuite un domaine non linéaire relativement important. Le point critique est considéré comme le maximum de la courbe et intervient après une déformation importante.

Selon la norme américaine ASTM D-143, on utilise des éprouvettes de dimensions 50x50x200mm. L'expérience consiste à effectuer un essai de compression longitudinale du bois massif. Une première mesure des déformations de l'éprouvette se fait suivant son axe au moyen d'un extensomètre à cadran sur une distance d'environ 150 mm. Une mesure semblable est effectuée à l'aide d'une jauge de déformation, d'une longueur de 50 mm de préférence collée au milieu d'une autre face : elle doit être correctement orientée suivant le fil du bois, donc correspondre aussi à l'axe de compression. Enfin une troisième mesure, faite avec un capteur linéaire, sert à établir la contraction de l'éprouvette suivant toute sa longueur, qui est de l'ordre de 200 mm. Les essais de compression selon les directions tangentielles et radiales sont plus délicats à réaliser car au-delà d'une certaine déformation le bois se densifie et augmente ainsi sa résistance.

III.3 Résultats obtenus :

Dans la première partie de ce chapitre nous avons exposé les constituants bruts du palmier, ensuite nous avons exposé les différentes éprouvettes et échantillons préparés pour les différentes caractérisations. Les techniques utilisées pour la caractérisation sont montrés. Dans ce qui suivra nous présentons l'essentielle des résultats obtenus.

III.3.1 Caractérisation de la microstructure :

III.3.1.1 Observation par le MOD

- **La microstructure de bois du tronc dans une coupe transversale**

Les photos suivant illustrent la microstructure du bois de tronc dans la direction transversale, différents agrandissements sont utilisés à savoir (X10, X60 et X200)

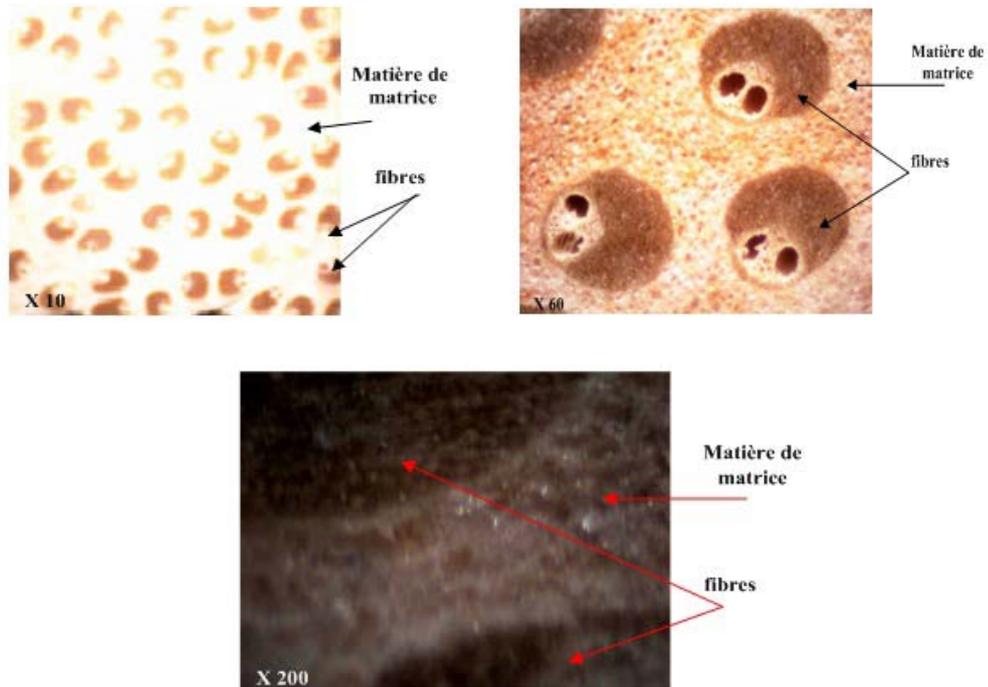


Figure III.16: La microstructure du bois du tronc (coupe transversale), avec différents grossissements (X10, X60 et X200)

D'après cette observation, nous remarquons que la structure de bois du tronc est composée par une matrice de est lignine, dans cette dernière sont dispersés des fibres de renforcement avec une orientation essentiellement unidirectionnelle. Leur composition chimique est la cellulose.

La fibre contient deux Vaisseaux vasculaires qui sont responsable du transport de la sève vers les palmes.

- **La microstructure de bois du tronc dans une coupe longitudinale :**

Les photos suivant illustrent la microstructure du bois du tronc dans la direction longitudinale, différents agrandissements sont utilisés à savoir (X10, X60 et X200). Ici aussi on confirme l'orientation unidirectionnelle des fibres dans la matrice.

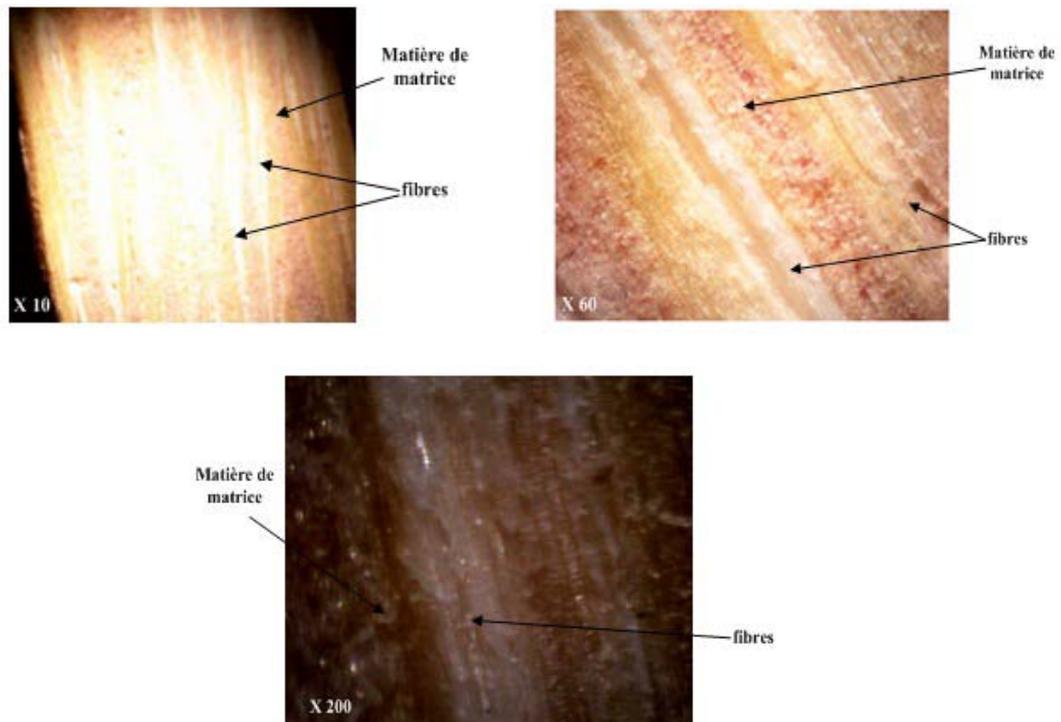


Figure III.17: La microstructure du bois de tronc (coupe longitudinale), avec différents grossissements (X10, X60 et X200)

- **La microstructure du bois de kornaf dans une coupe transversale :**

Les photos suivant figure III.18 illustrent la microstructure du bois du kornaf dans la direction transversale, différents grossissements sont utilisés à savoir (X10, X60 et X200)

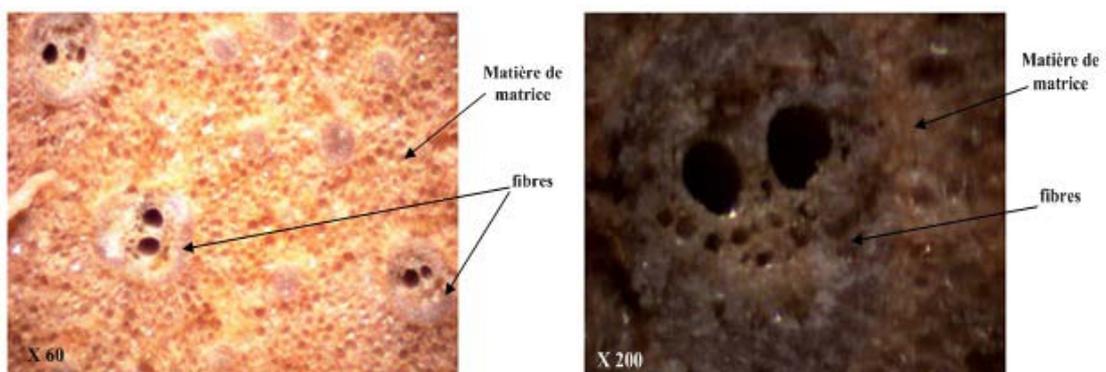


Figure III.18: La microstructure du bois de kornaf (coupe transversale), avec différents grossissements (X10, X60 et X200)

D'après ces photos, et de façon similaire au bois du tronc, la structure du bois de kornaf est composée aussi par une matrice de composition lignineuse, et de fibres de

renfort de composition cellulosique. La fibre contient deux Vaisseaux vasculaires qui sont responsable du transporter de la sève.

- **La microstructure du bois de kornaf dans une coupe longitudinale :**

Les photos suivant figure III.19 illustrent la microstructure du bois du kornaf dans la direction longitudinale, différents agrandissements sont utilisés à savoir (X10, X60 et X200)

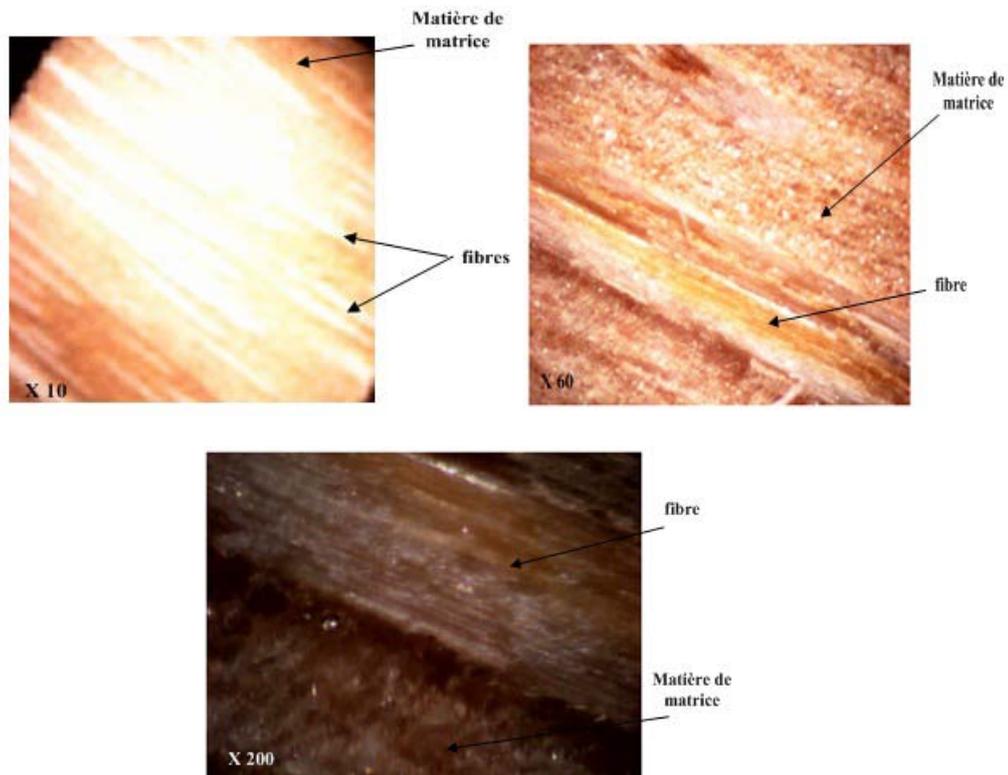


Figure III.19: La microstructure de bois du kornaf (coupe longitudinale), avec différentes agrandissements (X10, X60 et X200)

- **La microstructure de bois du GAND dans une coupe transversale :**

Les photos sur la figure III.20 illustrent la microstructure du bois du gand dans la direction transversale, différents agrandissements sont utilisés à savoir (X10, X60 et X200)

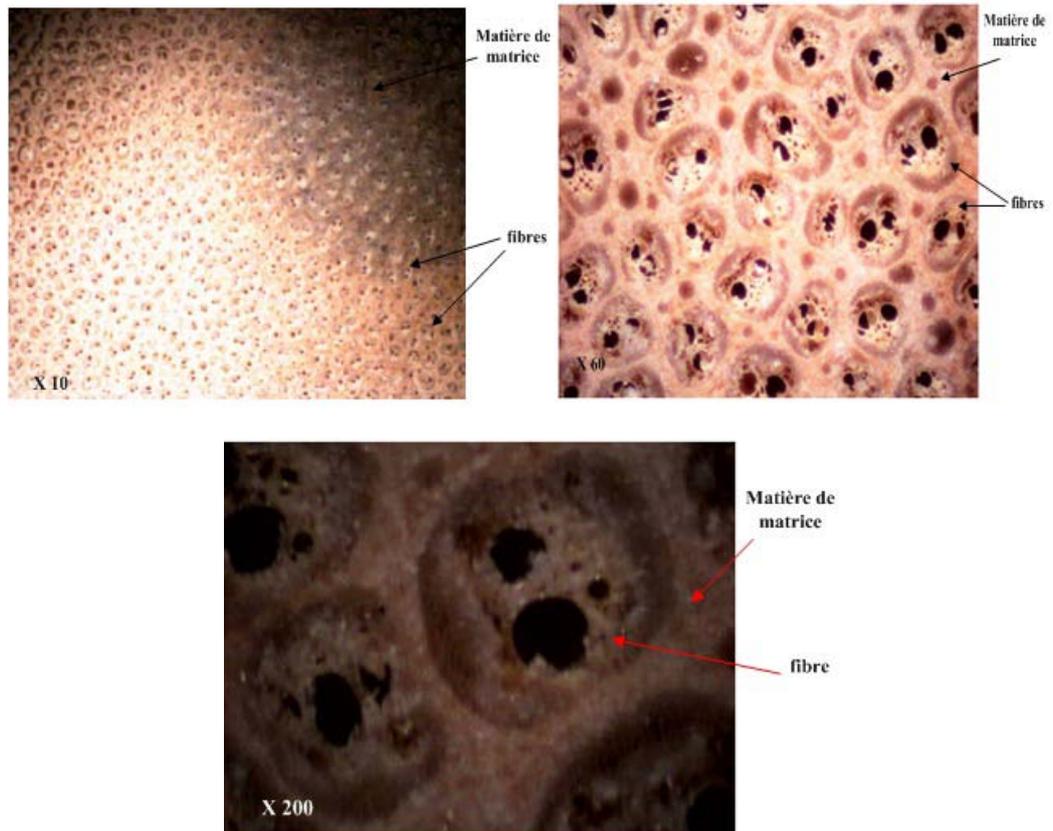
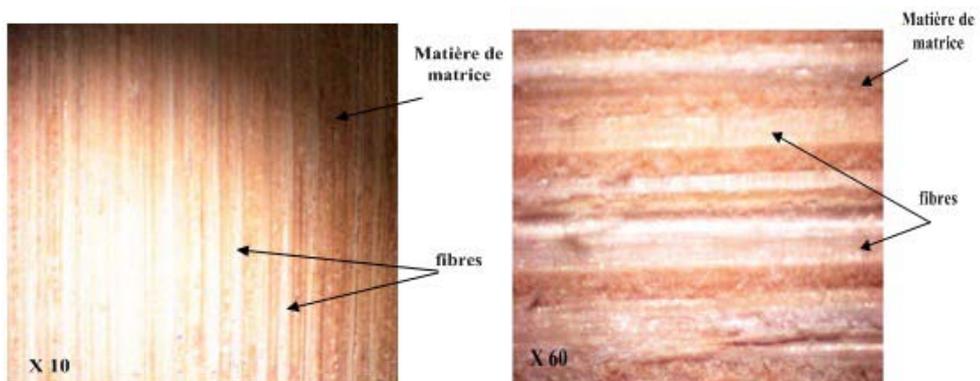


Figure III.20: La microstructure du bois de GAND (coupe transversale), avec différents agrandissements (X10, X60 et X200)

- **La microstructure de bois du GAND dans une coupe longitudinale :**

Les photos suivant figure III.21 illustrent la microstructure du bois du gand dans la direction longitudinale, différents agrandissements sont utilisés à savoir (X10, X60 et X200)



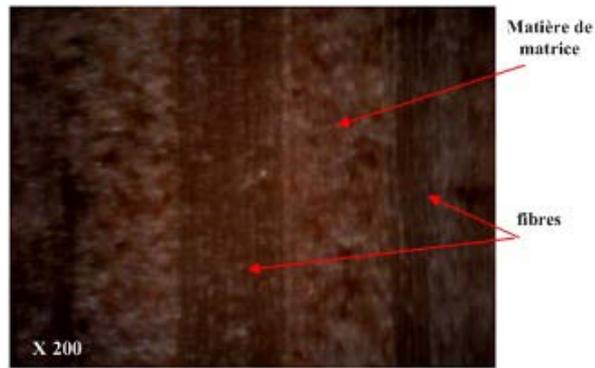
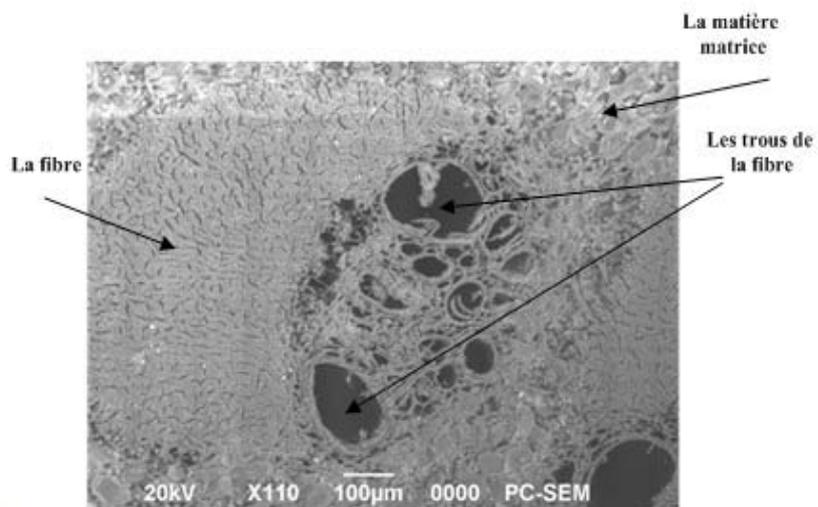
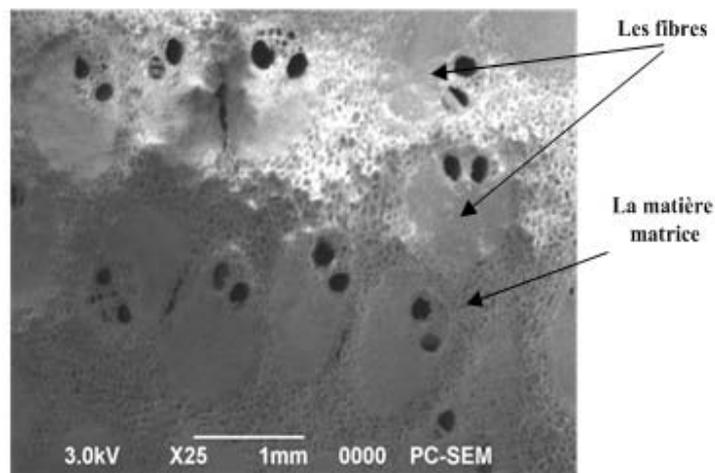


Figure III.21: La microstructure du bois du GAND (coupe longitudinale), avec différents agrandissements (X10, X60 et X200)

III.3.1.2 Observation de la microstructure par le MEB

- **La microstructure de bois du tronc (coupe transversale), avec différents agrandissements**



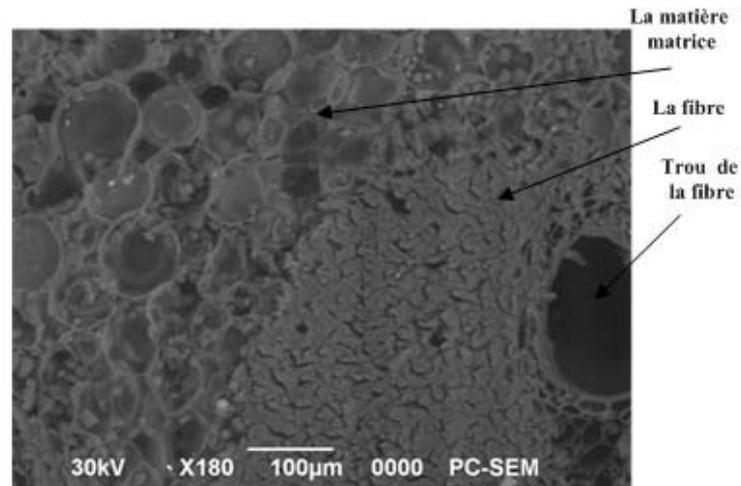
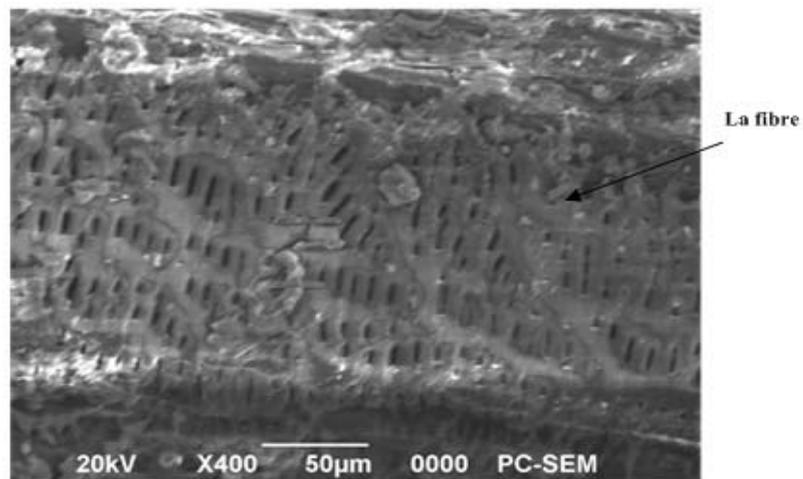
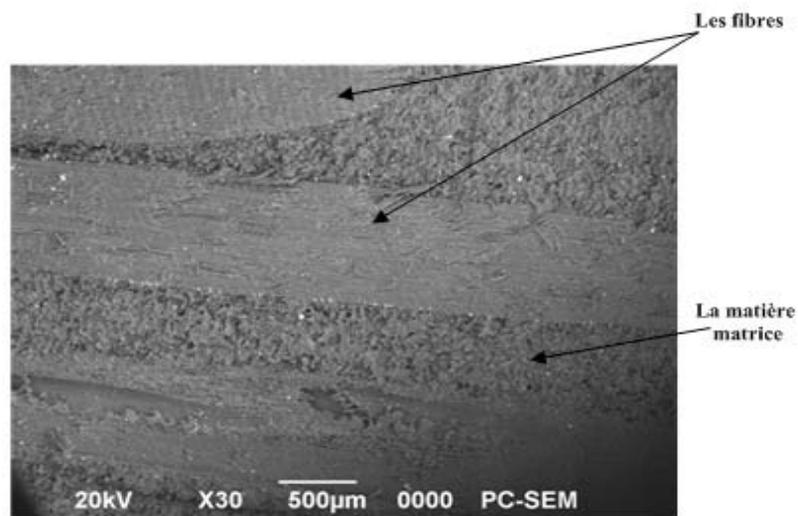


Figure III.22: La microstructure du bois de tronc (coupe transversale), avec différents agrandissements (X25, X110 et X180) par le MEB.

- La microstructure du bois de tronc (coupe longitudinale), avec différents agrandissements



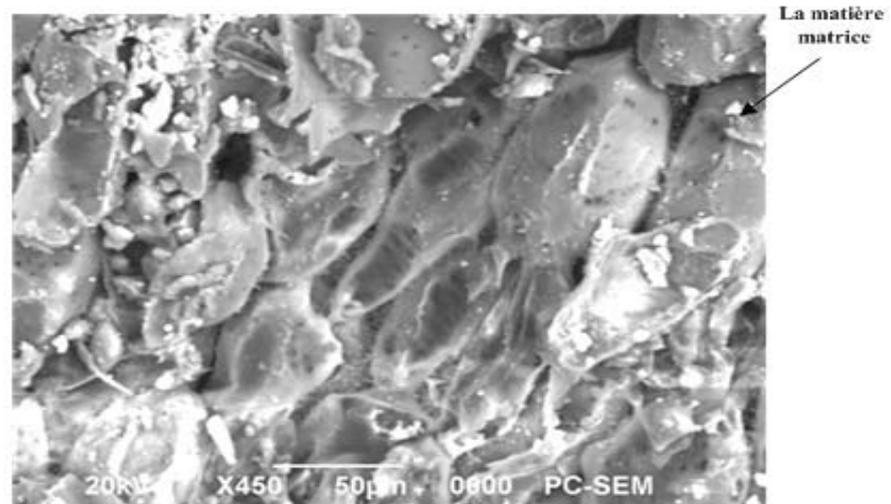


Figure III.23: La microstructure du bois de tronc (coupe longitudinale), avec différents agrandissements (X30, X400 et X450) par MEB.

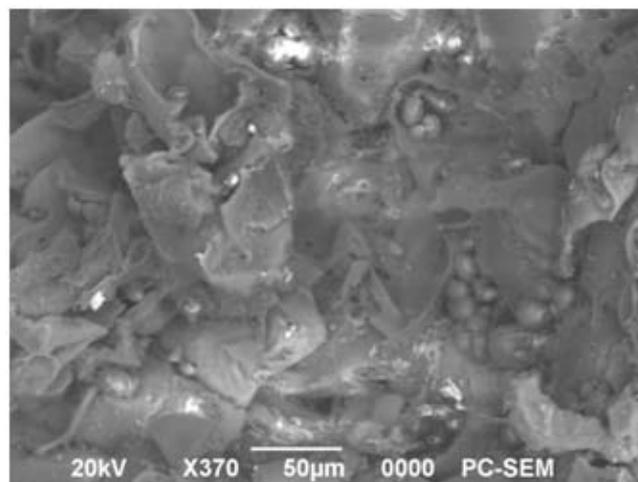
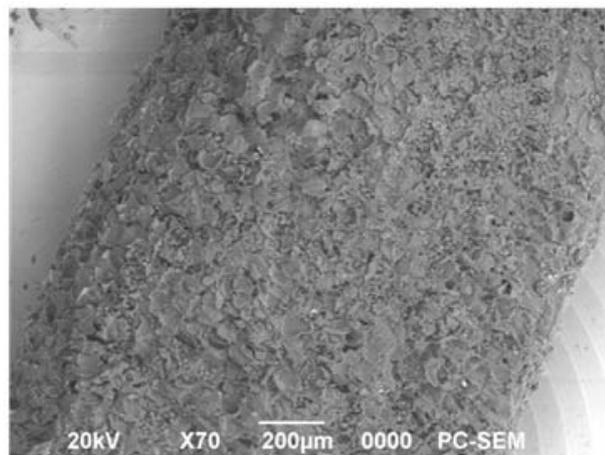


Figure III.24: La microstructure de la fibre du tronc, avec différents agrandissements (X70 et X370) par MEB.

- La microstructure du bois de kornaf (coupe transversale), avec différents agrandissements

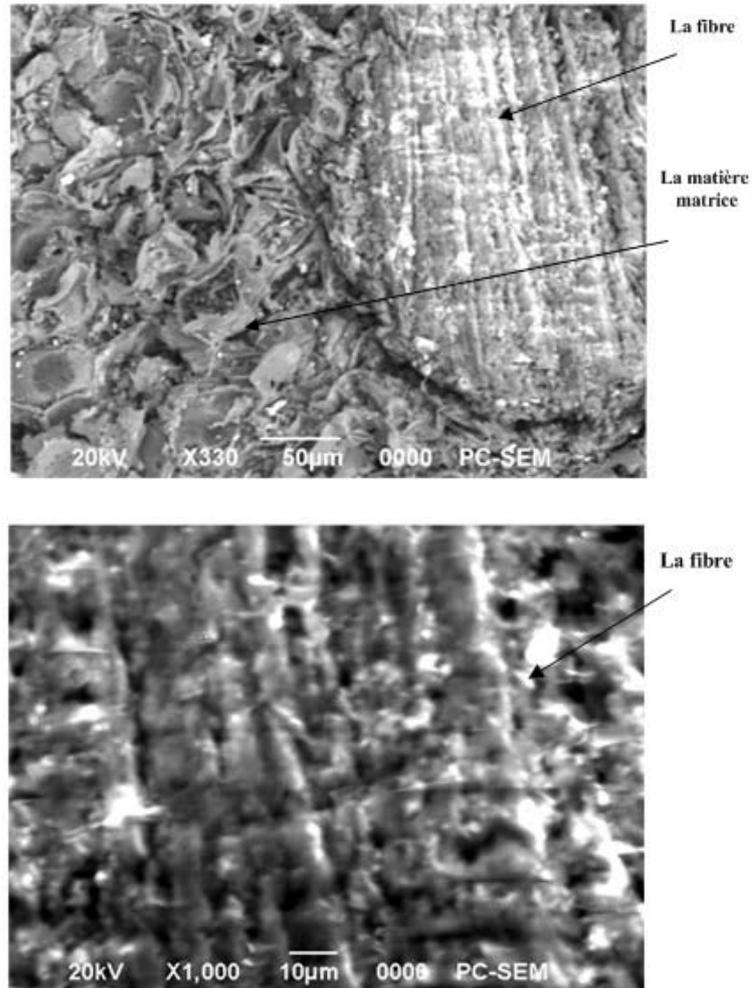
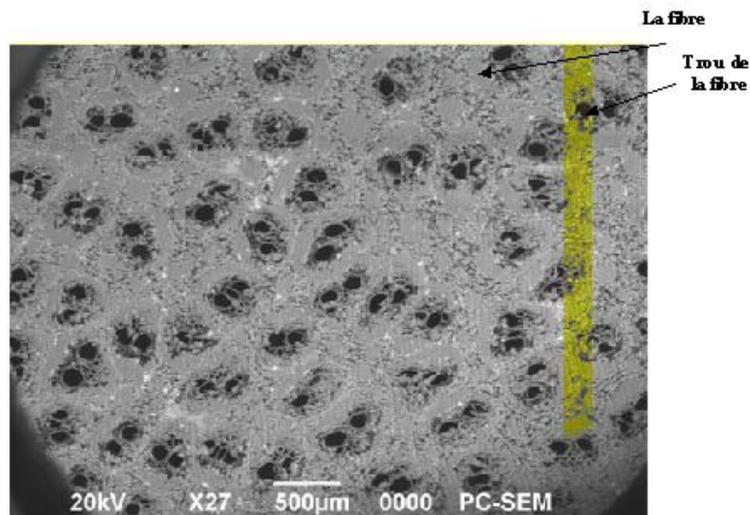


Figure III.25: La microstructure du bois de kornaf (coupe transversale), avec différents agrandissements (X330 et X1000) par MEB.

- La microstructure de bois du Gand (coupe transversale), avec différentes grandissements



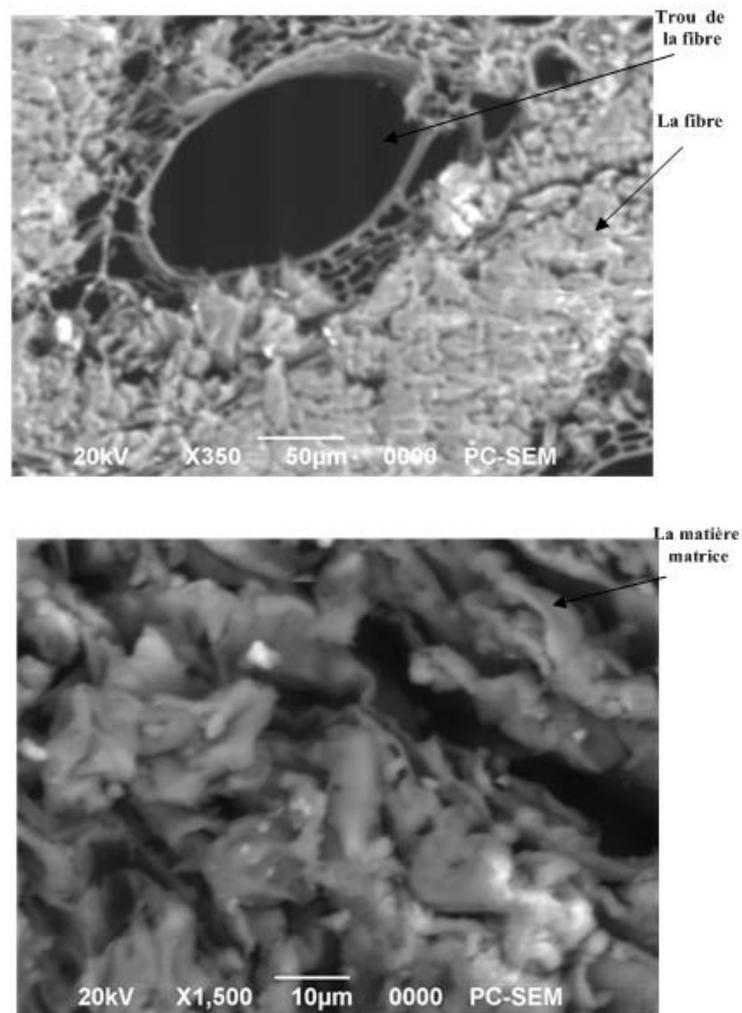


Figure III.26: La microstructure du Gand (coupe transversale), avec différents agrandissements (X27, X350 et X1500) par MEB.

III.3.1.3 Mesure du diamètre des fibres

- **Le bois du tronc d'un palmier dattier**

Par la considération d'une photo pris sur le microscope optique digitale et dans une coupe transversale de l'échantillon (bois du tronc), nous procédons à la prise de mesure du diamètre des 7 fibres, les résultats sont rapportés sur le tableau III.3.

Tableau III.3: Diamètres de fibres du bois de tronc mesuré sur microscope optique digitale.

N° de fibre	1	2	3	4	5	6	7
Diamètre (mm)	0.9	0.9	1	0.8	0.9	0.9	0.8

Nous remarquons que l'intervalle de la variation du diamètre des fibres du bois de tronc d'un palmier dattier est compris entre *0.8mm et 1 mm*. Avec une moyenne de *0.88mm*.

- **Mesure du diamètre des fibres du bois de kornaf**

On procède de la même façon sur une coupe transversale d'échantillon du bois de kornaf, nous mesurons le diamètre de 7 fibres.

Tableau III.4: Diamètres des fibres de kornaf mesuré sur une photo de microscope optique digitale.

<i>N° de fibre</i>	1	2	3	4	5	6	7
<i>Diamètre (mm)</i>	0.6	0.25	0.3	0.6	0.4	0.3	0.4

Nous avons trouvé que le diamètre des fibres du bois de kornaf d'un palmier dattier varie dans un intervalle compris entre *0.25mm et 0.6mm*. Avec une moyenne de *0.41mm*.

- **Discussion sur les images**

Suite aux observations par microscope optique et électronique, nous pouvons dire que :

Les deux types de photos, que ce soit optique ou électronique donnent des surfaces bien nets et complémentaires illustrant la microstructure des constituants du palmier.

La microstructure des échantillons est une microstructure fibreuse. Pour tous les constituants on a trouvé une matrice en lignine renforcée par des fibres en cellulose.

La matrice est formée par la juxtaposition des cellules de forme ovale. La mise en évidence de cette structure est le résultat de la préparation des surfaces par usinage.

Il est remarqué aussi une orientation essentiellement unidirectionnelle des fibres.

III.3.2 Les résultats des essais mécaniques

Pour la réalisation des essais mécanique de traction, de flexion et de compression nous avons utilisé la machine d'essai universelle *Gunt WP310* disponible au niveau de l'université de Ouargla.

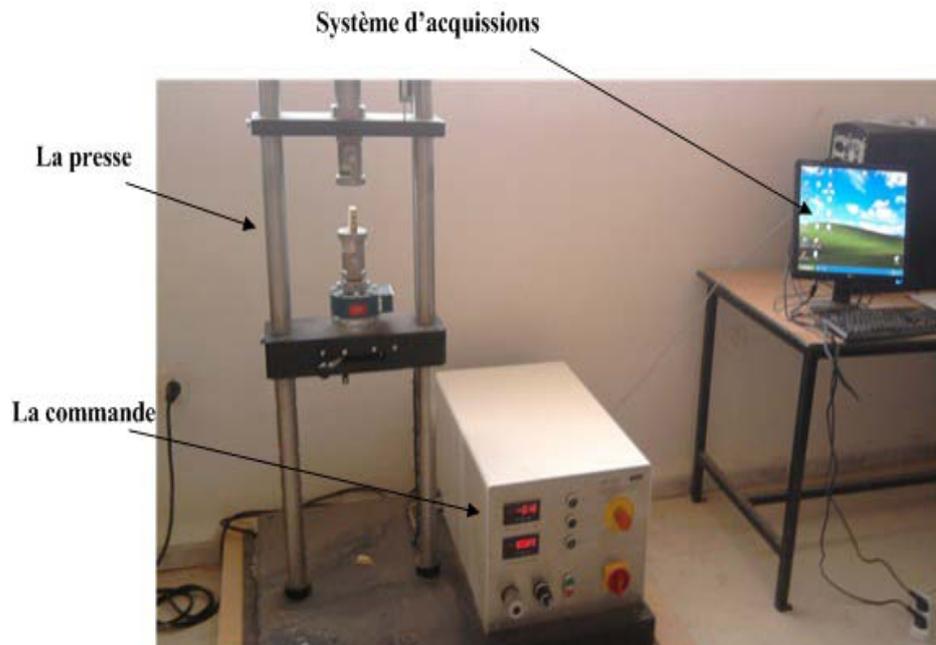


Figure III.27: La machine d'essai universelle Gunt WP310.

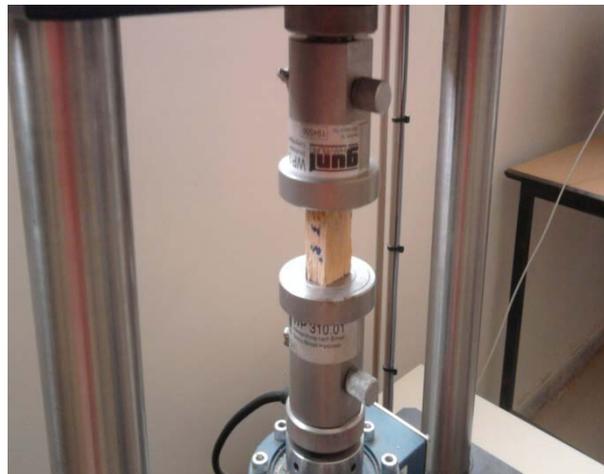


Figure III.28: L'essai de compression sur la machine d'essai universelle Gunt WP310.



Figure III.29 : L'essai de flexion sur la machine d'essai universelle Gunt WP310.



Figure III.30: L'essai de traction sur la machine d'essai universelle Gunt WP310.

III.3.2.1 Essai de flexion du bois de tronc sec

L'essai de flexion 3 points est réalisé sur des éprouvettes secs et sur des éprouvette saturées. La courbe sur la figure III.31 donne la courbe type de contrainte-déformation de flexion trois points.

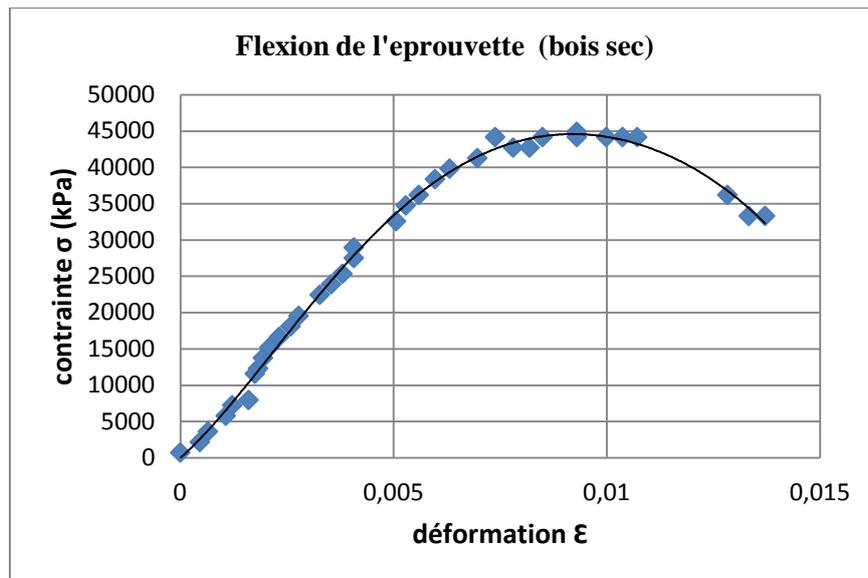


Figure III.31: La courbe de comportement de bois sec en flexion.

- **Calcul du module d'Young de flexion E**

Nous obtenons la valeur du module d'Young de flexion à partir de graphe III.32, en considérant la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation sans dépassé une déformation de 0.5%.

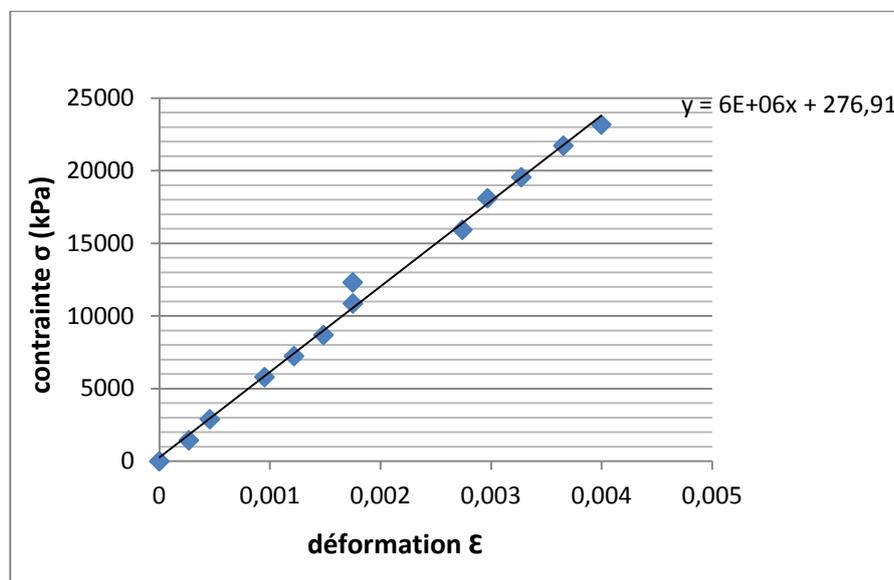


Figure III.32: Partie linéaire de la courbe de flexion du bois de tronc SEC (0.5% de déformation).

A partir de ce graphe la valeur du module de Young est donc :

$$E = 6 \text{ GPa}$$

- **Détermination de la contrainte max σ_{max} et de la déformation max ϵ_{max}**

Nous obtenons les valeurs de σ_{max} et ϵ_{max} à partir du graphe de la figure III.31, le point de changement du comportement représente le point max, donc :

$$\sigma_{max} = 44,17 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{max} = 0,0089$$

III.3.2.2 Essai de flexion du bois de tronc saturé en eau

La courbe de flexion obtenue pour le bois du tronc saturé est représentée sur la figure III.33.

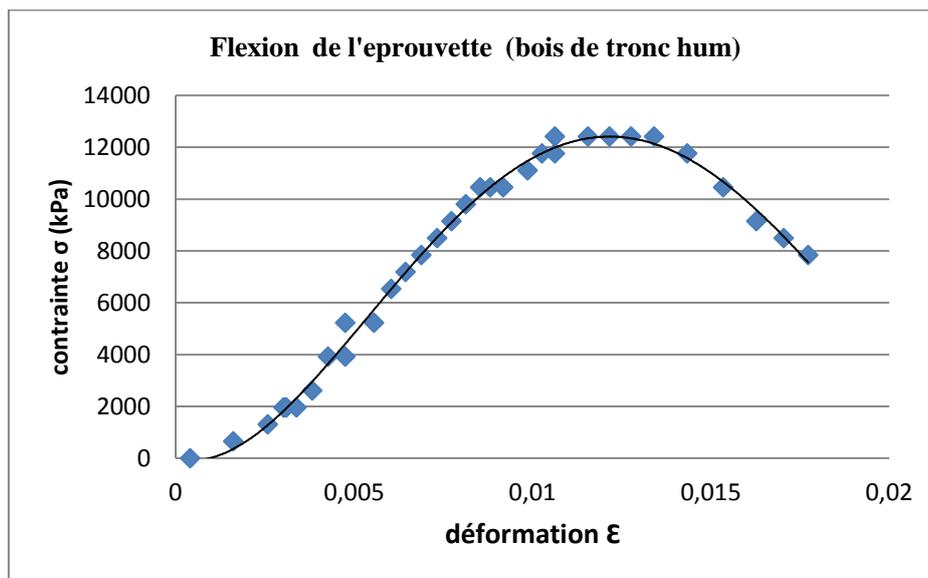


Figure III.33 : La courbe de flexion du bois de tronc saturé.

- **Détermination du module d'Young E**

La valeur du module d'Young est déterminée à partir du graphe de la figure III.34, la valeur trouvée pour le module correspond à la pente de la partie linéaire de la courbe.

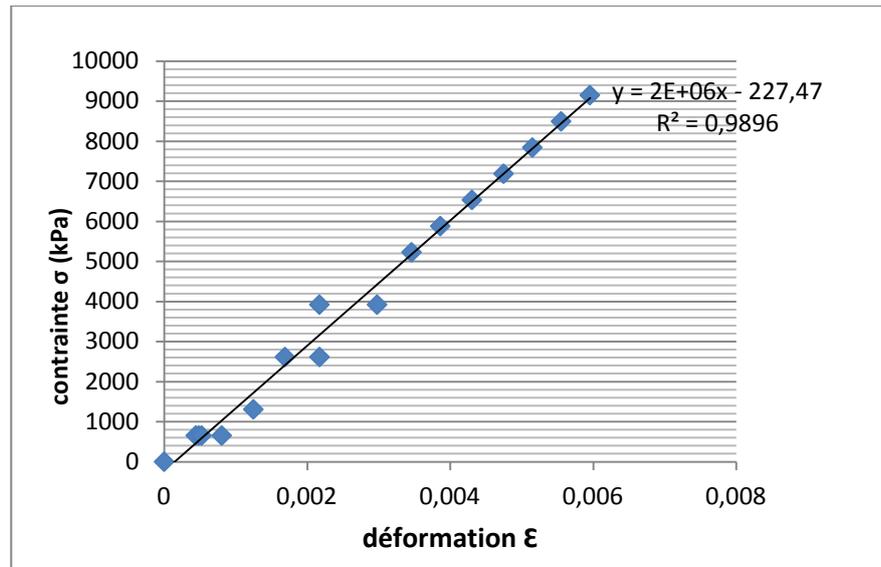


Figure III.34: La courbe de la flexion du bois du tronc hum a 0.6% de déformation pour calculer le module d'Young.

La valeur du module d'Young trouvé est :

$$E = 2 \text{ GPa}$$

- **Calcul de la contrainte max σ_{max} et de la déformation max ϵ_{max}**

Nous déterminons les valeurs de σ_{max} et ϵ_{max} à partir les graphes figure III.33, ces points se présente comme suit :

$$\sigma_{max} = 12,41 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{max} = 0,0106$$

- **Discussion et comparaison entre les caractéristiques du bois de tronc sec et du bois de tronc humide**

D'après les figures (III.31 et III.33), nous remarquons la même forme de comportement pour le bois sec et le bois humide, la courbe commence par une partie linéaire suivie d'un comportement nonlinéaire.

Nous remarquons que la valeur du module d'Young du bois sec est supérieure à la valeur du module d'Young de bois humide.

$$E_{sec} = 6 \text{ GPa} > E_{hum} = 2 \text{ GPa}$$

Et la contrainte max pour le bois sec est supérieur à la contrainte du bois humide.

$$\sigma_{max_{sec}} = 44,17 \text{ MPa} > \sigma_{max_{hum}} = 12,41 \text{ MPa}$$

Par contre il est trouvé que la déformation max du bois sec est inférieure à la déformation max du bois humide.

$$\varepsilon_{max_{sec}} = 0,0089 < \varepsilon_{max_{hum}} = 0,0106$$

Il est trouvé aussi que la résistance du bois de tronc sec est pratiquement à 4 fois supérieur à la résistance du bois de tronc humide.

Le module d'Young du bois de tronc sec est supérieur à 3 fois au module d'Young du bois de tronc humide.

Comme résultat, l'humidité diminue les caractéristiques mécaniques en terme de résistance maximale et de module d'Young, mais augmenter la souplesse ce qui se traduit par une déformation max plus importante.

III.3.2.3 Essai de traction sur le bois de tronc

L'essai traction donne des courbes contrainte-déformation de traction type comme représenté sur la figure III.35.

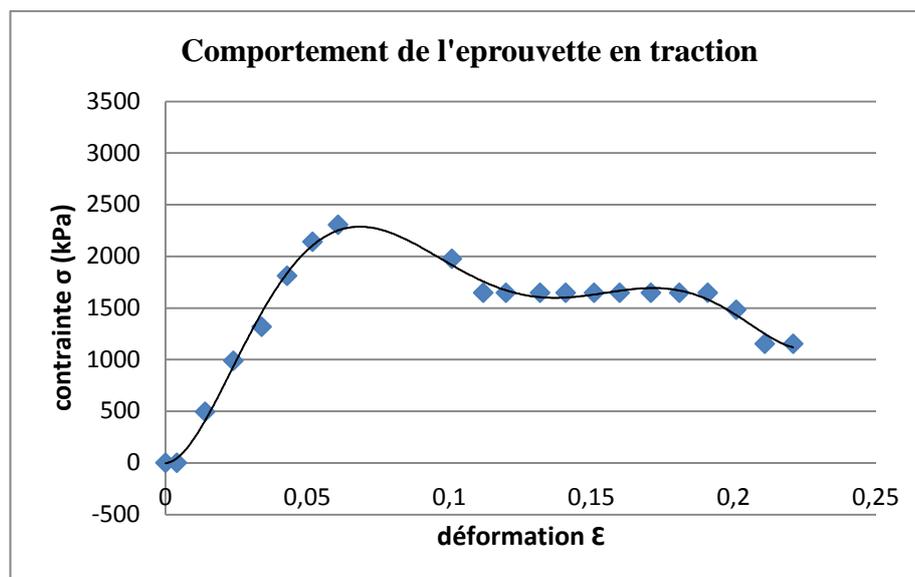


Figure III.35 : La courbe de comportement de bois en traction.

- **Détermination du module d'Young E**

Nous déterminons la valeur du module d'Young à partir du graphe suivant, la valeur du module d'Young correspond à la pente de la partie linéaire de la courbe.

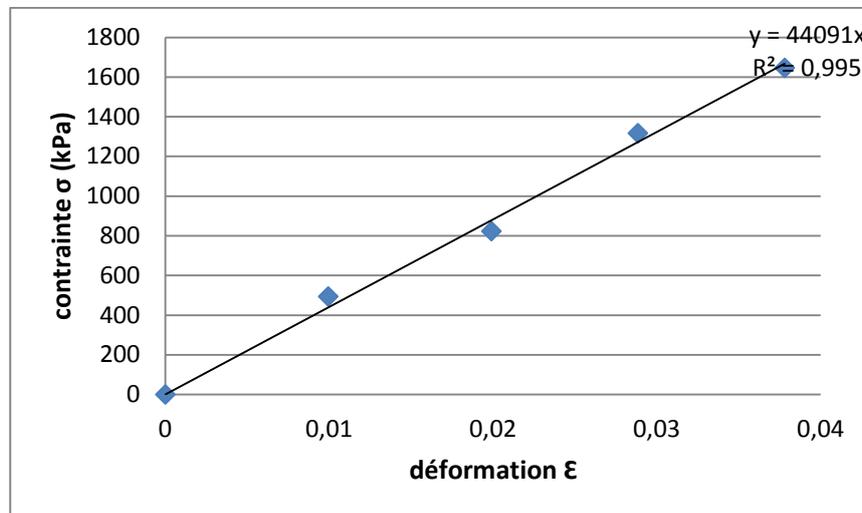


Figure III.36: Partie linéaire de la courbe de traction du bois de tronc (5% de déformation).

Pour l'essai de traction on ne peut pas estimer la valeur du module d'Young car on manque d'extensiomètre à contact, cette outil est indispensable car le déplacement mesuré selon le déplacement des mâchoires comprend du glissement important au niveau des mors ce qui a pour conséquence une perte en précision dans les mesures.

- **Calcul la contrainte max σ_{max} et déformation max ϵ_{max}**

Nous calculons les valeurs de σ_{max} et ϵ_{max} à partir du graphe de la figure III.35, le point de changement du comportement représente le point max, donc :

$$\sigma_{max} = 23,04 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{max} = 0,060$$

III.3.2.4 Essai de compression du bois de tronc

L'essai compression donne les courbes type contrainte déformation en compression représenté sur la figure III.37.

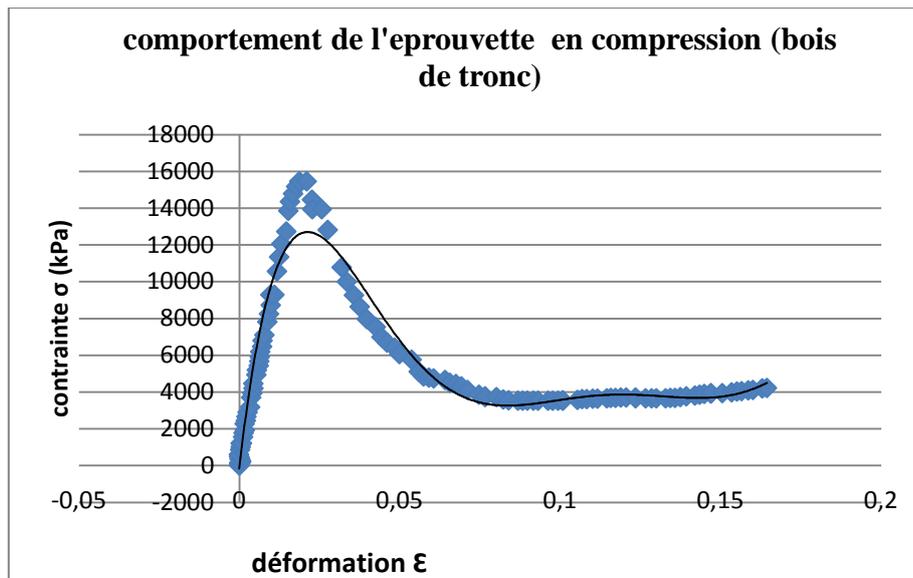


Figure III.37 : La courbe de compression du bois de tronc.

- Détermination du module d'Young E en compression

Nous déterminons la valeur du module d'Young à partir du graphe suivant, en considérant la partie linéaire de la courbe contrainte déformation.

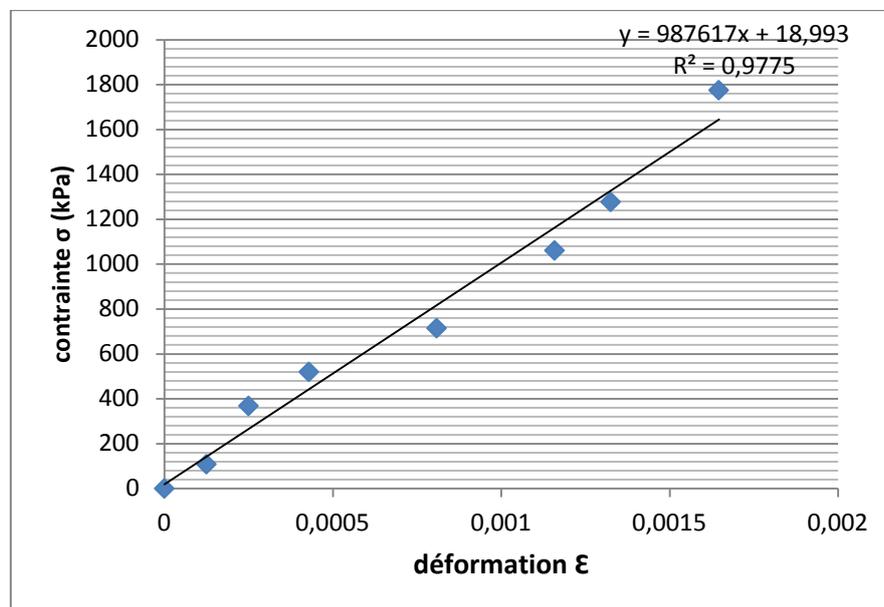


Figure III.38: La courbe de compression du bois de tronc (0.15% de déformation).

A partir de ce graphe le module de Young représenté par la pente, est donc :

$$E \cong 1 \text{ GPa}$$

- Détermination de la contrainte max σ_{max} et déformation max ϵ_{max}

Nous déterminons les valeurs de σ_{max} et ϵ_{max} à partir du graphe de la figure III.37, le point de changement du comportement représente le point max, ce qui donne :

$$\sigma_{max} = 15,17 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{max} = 0,0177$$

III.3.2.5 Essai de compression du kornaf

L'essai de compression réalisé sur les éprouvettes de Kornaf donne des courbes de contrainte-déformation en compression type rapporté sur la figure III.39.

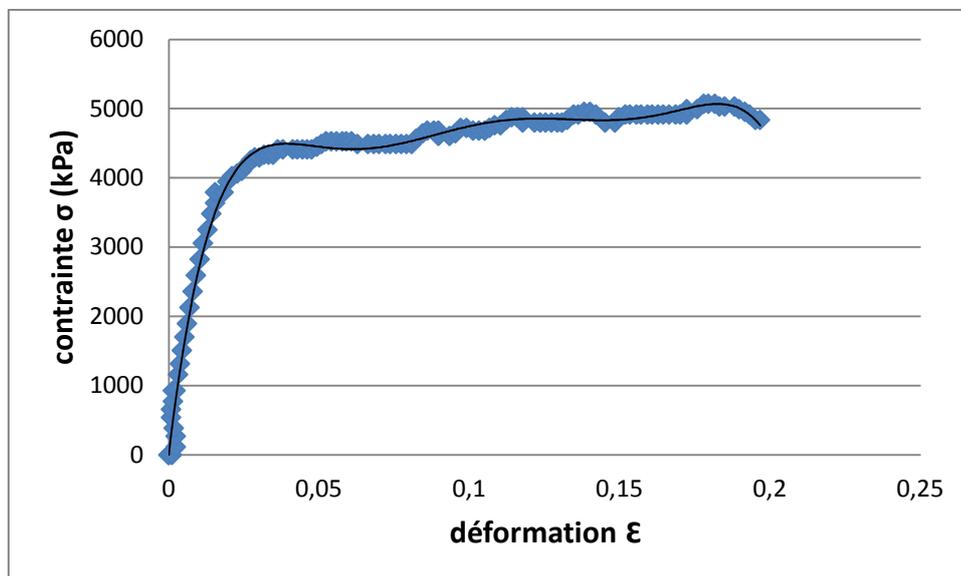


Figure III.39: La courbe de compression du bois de kornaf.

- Détermination du module d'Young E

Nous déterminons la valeur du module d'Young à partir du graphe suivant, la valeur de module d'Young correspond à la pente de la partie droite de la courbe.

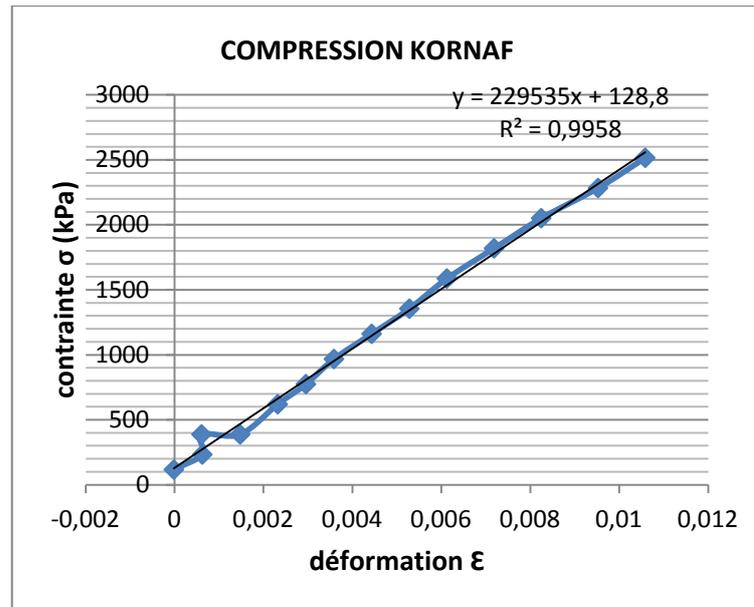


Figure III.40: La courbe de compression du bois kornaf (1% de déformation).

A partir de ce graphe la valeur du module d'Young est donc :

$$E = 0,23 \text{ GPa}$$

- Calcul de la contrainte max σ_{max} et de la déformation max ϵ_{max}

Nous calculons les valeurs de σ_{max} et ϵ_{max} à partir du graphe de la figure III.39, le point de changement du comportement représente le point max, donc :

$$\sigma_{max} = 3,79 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{max} = 0,0154$$

III.3.2.6 Essai de flexion du kornaf

L'essai de flexion n'a pas pu être réalisé car d'une part le matériau a de faibles propriétés mécaniques, et d'autre part la machine utilisée manque de sensibilité. Ceci nous a obligés d'annuler l'essai de flexion sur le kornaf.

III.3.2.7 Récapitulation des résultats obtenus

Sur le tableau suivant nous rassemblant tous les valeurs obtenues suite aux essais mécaniques.

Tableau III.5 : Les résultats des essais.

<i>Type d'essai</i>	<i>Module d'Young (GPa)</i>	<i>La contrainte max σ_{max} (MPa)</i>	<i>La déformation max ϵ_{max}</i>
<i>Compression bois du tronc</i>	1	15,17	0,0177
<i>Flexion bois du tronc sec</i>	6	44,17	0,0089
<i>Flexion bois du tronc hum</i>	2	12,41	0,0106
<i>Traction bois du tronc</i>	-	23,04	0,060
<i>Compression kornaf</i>	0,23	3,79	0,0154
<i>Flexion kornaf</i>	—	—	—

CONCLUSION GENERALE

L'exploration et la conception de nouveaux matériaux est un souci qui a préoccupé et reste un sujet préoccupant et de recherche. Le progrès de l'homme s'est associé intimement aux avancés dans le monde des matériaux. La considération de développement de matériaux locaux d'une région dans le but de leur utilisation dans des applications spécifiques peut avoir de larges retombés sur l'activité socioéconomique de la population de cette région.

Dans cet objectif s'inscrit et s'articule ce mémoire. En effet, Connue par le palmier dattier, le grand sud Algérien base son activité économique sur cette plante 'magique'. Néanmoins l'exploitation du palmier se limite essentiellement sur son fruit comme un aliment de base. Dans ce travail, il est consacré un effort pour explorer les différents constituants du palmier dattier comme matériau pour des utilisations diverses, pour cela il est question de déterminer ses caractéristiques et ses propriétés d'une part, et d'explorer la microstructure de ses différents constituants d'autre part.

Essentiellement les constituants du palmier considérés sont ; le bois du tronc, le bois de kornaf et le bois du Gand.

Le travail a commencé par une recherche bibliographique et par une collecte d'informations théoriques concernant la structure et la morphologie du bois au niveau de la microstructure, de la composition chimique et du comportement mécaniques. En suite il a été présenté les travaux sur le palmier dattier.

La partie expérimentale se compose de deux volets ; l'observation de la microstructure à l'aide de microscope optique et de microscope électronique. Et la caractérisation mécanique des constituants.

Les deux types de photos, que ce soit optique ou électronique donnent des surfaces bien nets et complémentaires illustrant la microstructure des constituants du palmier.

La microstructure des échantillons est une microstructure fibreuse. Pour tous les constituants on a trouvé une matrice en lignine renforcée par des fibres en cellulose. La matrice est formée par la juxtaposition des cellules de forme ovale. La mise en évidence de cette structure est le résultat de la préparation des surfaces par usinage. Il est remarqué aussi une orientation essentiellement unidirectionnelle des fibres. Le diamètre des fibres du bois de tronc du palmier est compris entre 0.8mm et 1mm.

La caractérisation mécanique a concernée des essais de traction, de compression et de flexion. Pour cela il était nécessaire de prélever plusieurs éprouvettes de plusieurs constituants du palmier dattier, à savoir le bois du tronc, de kornaf et de Gand. Des éprouvettes ont été préparées et testées ce qui a permis d'avoir des valeurs des propriétés mécaniques qui sont : le module d'Young, la contrainte maximale et la déformation maximale. Nous avons aussi pu déterminer la densité des différents constituants.

Enfin, ce travail peut inaugurer d'autres travaux et études prenant des aspects particuliers sont possibles. Cela peut résulter en de conception de nouveaux matériaux utilisant les constituants du palmier comme matière première.

Bibliographié

- [1] NENONENE Amen Yawo, «Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage », thèse de doctorat soutenue le 10 juillet 2009, l'université de Toulouse.
- [2] Roger M. Rowell, "Handbook of: Wood Chemistry and Wood Composites", 2005 by CRC Press.
- [3] Mohssine Moutee, « Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage », thèse de doctorat soutenue le aout 2006, l'université de Laval.
- [4] Christophe JAMMES, « Co-valorisation d'effluents grassex et de résidus lignocellulosiques : déshydratation mécanique et compostage », thèse de doctorat soutenue le 23 mars 2007, université de LIMOGES.
- [5] Mohamed JEBRANE « Fonctionnalisation chimique bois par transesterification des esters d'enol» thèse de doctorat soutenue le 25 Septembre 2009, l'université de bordeaux1.
- [6] Poliana DIAS de MORAES, «Influence de la température sur les assemblages bois », thèse de doctorat soutenue le 29 novembre 2003, l'université Henri Poincaré, Nancy 1.
- [7] Jean-Marie HUSSON «Loi comportement viscoélastique avec effet mémoire application à la mécanosorption dans le bois » thèse de doctorat soutenue le 02 décembre 2009, l'université de limoges.
- [8] Michael F. Ashby & David R. H. Jones, «Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design», Department of Engineering, Cambridge University, England, Second Edition, 1998.
- [9] Tiago Edson SIMKUNAS SEGURA, « Étude des propriétés viscoélastiques du bois saturé de Peuplier et d'Eucalyptus », Formation d'Ingénieurs Forestiers, Université de São Paulo – USP, Octobre 2007.

- [10] Jean Lemaitre, Jean-Louis Chaboche « Mécanique des matériaux solides », 2^e édition, DUNOD.
- [11] Parviz Navi, Frédéric Heger « Comportement thermo-hydrromécanique du bois, application technologique et dans les structures ». Presse polytechniques et universités romandes.
- [12] http://fr.wikipedia.org/wiki/Palmier#cite_note-1
- [13] P. MUNIER, « Le palmier dattier » G.P. Maisonneuve et Larose - France, 1973.
- [14] Gilles Peyron, « Guide illustré de formation : Cultiver le palmier dattier » Cirad-France, 2000.
- [15] Adil. Sbiai, Abderrahim Maazouz, Etienne Fleury, Henry Sautereau, and Hamid Kaddami « Short date palm fibers/polyepoxy composites prepared using rtmprocess : effect of tempo mediated oxidation of the fibers ».
- [16] Abdelkader Bendahou, Alain Dufresne, Hamid Kaddami, Youssef Habibi « Isolation and structural characterization of hemicelluloses from palm of Phoenix dactylifera L ».
- [17] A. Al-Khanbashi, K. Al-Kaabi, A. Hammami « Date Palm Fibers as Polymeric Matrix Reinforcement: Fiber Characterization »
- [18] Hamid Kaddami, Alain Dufresne, Bertine Khelifi, Abdelkader Bendahou, Moha Taourirte, Mustapha Raihane, Nathalie Issartel, Henry Sautereau, Jean-Francois Gérard, Noureddine Sami « Short palm tree fibers – Thermoset matrices composites »
- [19] Jean-Marie Dorlot, Jean-Paul Bâilon « Des matériaux, 3^e édition » Presses internationales Polytechnique Montréal.
- [20] Mohssine Moutee, « Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage », thèse de doctorat soutenue le août 2006, l'université de Laval.
- [21] Ahmad Alawar a, Ahmad M. Hamed, Khalifa Al-Kaabi « Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement »
- [22] Abdelkader Bendahou, Hamid Kaddami, Alain Dufresne « Investigation on the effect of cellulosic nanoparticles' morphology on the properties of natural rubber based nanocomposites ».

Résumé:

Le présent travail est une contribution dans la caractérisation et l'exploration de la microstructure et des propriétés des constituants du palmier. Le palmier dattier est une plante très répandue dans notre région, il constitue un élément majeur dans l'activité socioéconomique de la région, cependant peu de travaux ont essayé d'explorer ses propriétés en vue de son utilisation pour d'autres utilisation non conventionnel. Cette étude prend justement cet aspect en charge et constitue un pas important dans la caractérisation de ces constituants pour leur utilisation éventuelle pour des applications spécifiques. Des observations au microscope optique et au MEB sont réalisées, elles ont permis de montrer la structure fibreuse de tous les constituants, par ailleurs des essais mécaniques sont réalisés afin d'évaluer les propriétés de ses constituants.

Mots clés : Palmier, palmier dattier, bois, microstructure de bois, MEB, flexion, traction, compression.

Abstract: The present work is a contribution in the characterization and exploration of the morphology and the properties of the palm constituents. The date palm is a plant very common in our region, it is a major element in economic activity in the region, however, few studies have tried to explore its properties. This study takes care of this fact and is an important step in the characterization of components for their possible use for specific applications. Observations by optical microscopy and by the SEM are made; they have shown the fibrous structures of all the components, the mechanical tests also were conducted to evaluate the properties of its constituents.

Keywords: palm trees, date palm, wood, wood microstructure, SEM, bending, tension, compression.

ملخص : العمل الحالي هو مساهمة في توصيف واستكشاف البنية المجهرية وخصائص مكونات النخيل. شجرة النخيل نبات شائع جدا في منطقتنا، يعتبر عنصر رئيسي في النشاط الاقتصادي والاجتماعي في المنطقة، ومع ذلك يوجد عدد قليل من الدراسات لاستكشاف خصائصه لاستخدامها في مجالات غير تقليدية. هذه الدراسة تهتم بهذه الحقيقة وخطوة مهمة سمحت بإظهار هذه المكونات لاحتمال استخدامها لتطبيقات محددة. ان الملاحظات المعطاة من قبل المجهر الضوئي ومجهر المسح الإلكتروني أظهرت أن بنية جميع مكونات النخيل ليفية كما أجريت الاختبارات الميكانيكية اللازمة لتقييم خصائص هذه المكونات .