

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



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

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat en : Génie Mécanique**

**Spécialité (Option) : Génie Energétique**

**Contribution au développement de matériaux isolants  
dans le domaine du bâtiment.  
Utilisation du bois de palmier dattier.**

Présentée par :  
**Farid TOULOUM**

Soutenue publiquement le 21/06/2018

**Devant le jury composé de :**

Noureddine Moummi	Professeur, Université de Biskra, Président du jury
Adel Benchabane	Professeur, Université de Biskra, Rapporteur, Directeur de thèse
Abdelhak Kaci	MC, Université de Cergy Pontoise Paris, Rapporteur, Co-Encadrant
Belkacem Adouane	Professeur, Université de Batna, Examineur
Lakhdar Sedira	MC (A), Université de Biskra, Examineur

# REMERCIEMENTS

JE REMERCIE...

NOUREDDINE MOUMMI, PRESIDENT DU JURY

ADEL BENCHABANE, RAPPORTEUR ET MON DIRECTEUR DE THESE

ABDELHAK KACI, RAPPORTEUR ET MON CO-ENCADRANT

BELKACEM ADOUANE, EXAMINATEUR

LAKHDAR SEDIRA, EXAMINATEUR

AKLI YOUNSI

TOUS LES MEMBRES DU LABORATOIRE DE MECANIQUE ET MATERIAUX DU GENIE CIVIL,  
L2MGC, DE L'UNIVERSITE DE CERGY PONTOISE

MES AMIS

**MA FAMILLE.**

**A la mémoire de mes grands parents**

**A mes parents**

**A mes frères**

**A ma femme et ma fille**

## Résumé

En Algérie, comme dans le reste du monde, le secteur résidentiel est le secteur le plus énergivore dû notamment à l'absence et ou à une mauvaise isolation thermique des bâtiments. De ce fait, le climat intérieur, des maisons, laisse à désirer. Les isolants conventionnels tels que la laine de verre, la laine de roche ou d'amiante sont des matériaux nocifs pour la santé humaine, leurs utilisations sont restreintes et ne sont plus d'actualité. Le développement de nouveaux matériaux isolants peu coûteux, respectueux de l'environnement qui de surcroît ne porte pas atteinte à la santé humaine est possible en utilisant la biomasse végétale. Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale relative au développement des composites bois ciment notés CBC. Ce type de matériaux présentent d'une part des intérêts économiques non négligeables à la fois un faible coût de revient et une possibilité de créer de la richesse à travers l'installation d'unité de production. D'autre part les CBC sont des produits à faible impact environnemental et de surcroît, thermiquement isolants. Nous utiliserons les déchets de bois de palmier dattier, type *Phoenix Dactylifera (L)*, le pétiole en occurrence. Le pétiole réduit en particules pour la fabrication de CBC, est disponible sous forme de déchets ligno-cellulosiques générés annuellement à des quantités importantes. Dans un premier temps, nous confectionnons des mortiers (ciment, eau, particules bois, sable) puis des pâtes de ciment équivalent (ciment, eau, particules bois) afin d'essayer d'interpréter et de comprendre les phénomènes complexes qui se déroulent dans le mélange. Ce manuscrit est composé de deux parties, une synthèse bibliographique et une étude expérimentale. La première partie bibliographique est consacrée aux matériaux de base à savoir le bois et le ciment et une synthèse sur les composites bois ciment. La deuxième partie purement expérimentale rapporte les résultats des essais mécaniques et thermiques ainsi que les différentes constatations morphologiques. Dans la première partie du chapitre 4, l'étude sur mortier, la teneur en particules de bois de palmier dattier est progressivement 1, 2, 3 et 4% du volume total. Par ailleurs, cinq types de composite "ciment-bois-eau" contenant différentes teneurs en particules de bois de palmier dattier : 2, 4, 6, 8 et 10 % du volume total sont fabriqués. Les mortiers et les pâtes ciment équivalent sont confectionnés suivant une méthode de formulation et un protocole définis. Les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique est corrélée positivement à la teneur en particules dans le mélange et que la résistance à la compression diminue en fonction de la teneur en particules. Toutefois, selon la norme ASTM C 109/C109-95, le composite à 10 % de particules, assimilé à un béton léger, pourrait être utilisé comme matériau de construction non structural.

**Mots-clés :** développement durable, isolation thermique, fibre cellulosique, ciment, bois de palmier dattier.

## المخلص

يعتبر قطاع السكن في الجزائر و في سائر دول العالم من أكبر القطاعات استهلاكاً للطاقة نظراً لسوء العزل الحراري، أو انعدامه في معظم المباني مما يسبب اضطرابات على الجو الداخلي للبناءات. كما أن استعمال مواد العزل التقليدية ك الصوف الزجاجي على سبيل المثال مضر لصحة الإنسان و يتسبب في أمراض خطيرة. من هذا المنطلق تدخل هذه الدراسة في إطار إعداد مواد جديدة عازلة حرارياً و تطويرها بحيث تكون غير مكلفة، صديقة للبيئة و لا تؤثر سلباً على صحة الإنسان. هذه العوازل حرارياً تنتج باستخدام الكتلة الحيوية النباتية المتوفرة على المستوى المحلي.

لهذه الدراسة هدف مزدوج (1) وضع طريقة و بروتوكول لصياغة العوازل حرارياً ، (2) تحديد الخصائص المثلى (الميكانيكية والحرارية) لها.

يركز هذا العمل على دراسة استكشافية لإعداد و تطوير مواد العزل الحراري باستخدام ساق جريد شجرة النخيل. يعرض هذا العمل نتائج دراسة تجريبية على تطوير مركب الاسمنت و ساق جريد شجرة النخيل. هذه المواد منخفضة التكلفة ذات جدوى اقتصادية كبيرة و ذلك لإمكانية خلق الثروة من خلال تركيب وحدة لإنتاج المواد المركبة. من ناحية أخرى، تعتبر مركبات الاسمنت و ساق جريد شجرة النخيل منتجات ذات تأثير منخفض على البيئة و عوازل حرارية كذلك.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الناقلية الحرارية ترتبط ارتباطاً طردياً مع كمية جسيمات ساق جريد شجرة النخيل في الخليط وأن مقاومة الضغط تنقص بزيادة كمية هذه الجسيمات. وفقاً للمعيار ASTM C 109 / C109-95، فإن خليط المركب من الاسمنت و جسيمات ساق جريد شجرة النخيل (10%)، مقارنة مع خرسانة الخفيفة الوزن، يمكن استخدامها كمادة للبناء غير الهيكلية. ويمكن تلخيص النتائج المتحصل عليها كما يلي: أولاً، ساق جريد شجرة النخيل بديهي حقيقي لتطوير مركبات العوازل الحرارية، ثانياً، إمكانية طرح و إدماج هذا المركب العازل حرارياً في السوق الجزائرية.

**الكلمات المفتاحية:** التنمية المستدامة، العزل الحراري، ألياف السليلوز، الاسمنت، ساق جريد النخيل.

# Table des matières

Résumé	I
Liste des Figures	VIII
Introduction générale	1

## Partie 1 : Etude bibliographique

### Chapitre I La biomasse végétale

La biomasse végétale	6
1 Le bois matière comme première renouvelable	8
1.1 Structures de bois	8
1.1.1 Macrostructure du bois	8
1.1.2 Microstructure du bois,	9
1.1.3 Ultra structure du bois	11
1.1.4 Formation du bois	13
1.2 Composition chimique du bois	14
1.2.1 La cellulose	15
1.2.2 Les hémicelluloses	16
1.2.3 La lignine	17
1.2.4 Les extractibles (composés libres), les matières minérales	18
2 Modèle d'association moléculaire : cellulose – hémicellulose – lignine	19
3 Propriétés du bois	20
3.1 Propriété thermique	20
3.2 Propriété mécanique	20
3.3 Propriété physique	21
3.3.1 Relation Eau/Bois	21
3.3.2 Point de saturation des fibres (PSF)	22
3.3.3 Rétractabilité volumique	22
3.3.4 La masse volumique	23
3.3.5 La porosité	23

*Table des matières*

4	Le bois de palmier dattier	24
4.1	Habitat et origine	25
4.2	Taxonomie du palmier dattier	27
4.3	Morphologie du palmier dattier	27
5	Conclusion	31
	Bibliographie	32

**Chapitre II  
Ciment Portland**

	Le ciment Portland	35
1	Mortiers et bétons	37
2	Constituants du mortier	38
2.1	Le ciment	38
2.2	Granulats (sable)	38
2.3	Eau	39
2.4	Adjuvants	39
3	Le ciment Portland	39
3.1	Composition chimique du ciment Portland	40
3.2	Principe de fabrication du ciment Portland	41
3.3	Hydratation du ciment	42
3.4	Prise et durcissement du ciment	43
3.5	Cinétique d'hydratation	44
3.5.1	Les microscopies optique et électronique	44
3.5.2	La résonance magnétique nucléaire (RMN)	45
3.5.3	Analyse thermique	45
3.5.4	Analyse de la résistance mécanique	45
3.5.5	La mesure de la chaleur d'hydratation	45
3.6	Propriétés mécanique du ciment	46
4	Conclusion	47
	Bibliographie	48

**Chapitre III**

**Composites bois – ciment (CBC)**

Composites bois – ciment (CBC)	49
1 Généralités sur les matériaux composites	51
1.1 Définition	51
1.2 Marché des composites	52
2 Constituants des composites	53
2.1 Matrice	53
2.1.1 Matrices polymères	54
2.1.2 Matrices minérales	56
2.1.3 Matrices métalliques	56
2.2 Renfort	56
3 Les composites biomasse végétale ciment	57
3.1 Enjeux et intérêts des CBC	57
3.2 Caractéristiques de CBC.	58
3.2.1 Propriétés des CBC	58
3.3 Compatibilité bois – ciment	59
3.3.1 Evaluation de la compatibilité bois ciment	61
3.3.2 Traitement permettant d'améliorer la compatibilité bois ciment	63
4 Etat de l'art	65
5 Conclusion	68
Bibliographie	69

## Partie 2 : Etude expérimentale

### Chapitre IV Matériaux et méthodes expérimentales

Matériaux et méthodes expérimentales	72
1 Matériaux	73
1.1 Le bois de palmier dattier	73
1.1.1 Composition chimique du bois de palmier dattier	75
1.1.2 Masse volumique réelle du bois de palmier dattier	76
1.1.3 Conductivité thermique du bois de palmier dattier	77
1.1.4 Le ciment	78
1.1.5 Le sable	79
1.1.6 L'eau	79
2 Méthodes expérimentales	79
2.1.1 Etude sur mortier	79
2.1.2 Etude sur pâte	81
3 Caractérisations	84
3.1.1 Temps de prise	84
3.1.2 Propriétés morphologique	85
3.1.3 Propriétés thermiques	86
3.1.4 Propriétés mécaniques	86
Bibliographie	88

### Chapitre V Résultats et discussions

Résultats et discussions	90
1 Analyse morphologique	91
2 Etude sur mortier	92
2.1.1 Analyse thermique	92
2.1.2 Analyse du comportement mécanique	95
3 Conclusion	99
4 Etude sur pâte ciment	100
4.1.1 Propriétés thermique	100
4.1.2 Analyse du comportement mécanique	102
5 Conclusion	105

Bibliographie	107
---------------	-----

## Chapitre VI

### Le marché de l'isolation thermique en Algérie

Le marché de l'isolation thermique en Algérie	108
1 Le paysage énergétique Algérien	110
2 Isolation thermique dans le bâtiment	113
3 Réglementation thermique	114
3.1 Réglementation thermique Algérienne	114
4 Critères de choix des isolants	115
4.1 Propriétés thermiques	115
4.2 Propriétés techniques	115
4.3 Propriétés environnementales	115
4.4 Propriétés économiques	116
4.5 Qualité de l'isolant	116
5 Isolants traditionnels en Algérie	116
5.1 Isolant polymère	116
5.2 Isolants minéraux	118
5.3 Isolants d'origine végétale	118
5.3.1 Panneaux de fibres de bois	119
5.3.2 Laine de cellulose	119
5.3.3 Le liège expansé	119
5.3.4 Le chanvre	119
6 Les paramètres de calculs économiques de l'isolation	119
6.1 Le coût de l'isolant	120
6.2 Epaisseur de l'isolant	120
6.3 La durée de vie de l'isolant	120
Bibliographie	125

Conclusion générale et perspectives	127
-------------------------------------	-----

Annexes	
---------	--

# Liste des figures

<b>Figure.I.1.</b> Section transversale du tronc d'un arbre [Jebrane (2009)].	9
<b>Figure.I.2.</b> Représentation schématique de la microstructure d'un : (i) résineux ; (ii) feuillus [Govin (2004)].	10
<b>Figure.I.3.</b> Directions principales dans le bois (R : radiale, T : tangentielle et L : longitudinale) [Abanto (2011)].	11
<b>Figure.I.4.</b> Représentation schématique de l'ultrastructure d'une fibre végétale.	12
<b>Figure.I.5.</b> Modèle de structure de la couche S2 d'une fibre végétale a) vue isométrique, b) projection 2Dimensions [Bledzki. and Gassan (1999)].	12
<b>Figure.I.6.</b> Sections transversales. (a) section transversale d'un troc ;(b) agrandissement d'une partie de l'écorce, de l'assise génératrice, de l'aubier et du duramen [Navi and Heger (2005)].	13
<b>Figure.I.7.</b> Distribution en pourcentage massique des différents constituants de la paroi cellulaire. M= couche intercellulaire ; P= paroi primaire ; S1, S2, S3= parois secondaires [Navi and Heger (2005)].	14
<b>Figure.I.8.</b> Représentation schématique de la molécule de cellulose [Ragoubi (2010)].	15
<b>Figure.I.9.</b> Régions cristallines et amorphe d'une fibrille [Navi and Heger (2005)].	16
<b>Figure.I.10.</b> Formules des différents glucides composant les hémicellulose [Thiebaud (1995)].	17
<b>Figure.I.11.</b> Structure des différents monomères constituant la lignine [Govin (2004)].	18
<b>Figure.I.12.</b> Association moléculaire : cellulose – hémicellulose – lignine dans la paroi cellulaire du bois à l'état anhydre : a) section transversale, b) section longitudinale [Navi and Heger (2005)].	19
<b>Figure.I.13.</b> Courbe contrainte déformation du matériau bois [Abanto (2011)].	20
<b>Figure.I.14.</b> Représentation schématique des trois formes de l'eau en bois. (a) au dessus de PFS, (b) au PFS, (c) en dessous de PFS [Navi and Heger (2005)].	22
<b>Figure.I.15.</b> Rétractabilité du bois en fonction du taux d'humidité [Govin (2004)].	23
<b>Figure.I.16.</b> Oasis El Hadjeb et sa palmeraie, autre culture adjacentes – Biskra (Algérie).	25
<b>Figure.I.17.</b> Répartition géographique des palmeraies à travers le monde [Hadrami and Hadrami (2009)].	26
<b>Figure.I.18.</b> Morphologie du palmier dattier [Munier (1973); Peyron (2000)].	29
<b>Figure.I.19.</b> Représentation schématique de la palme adaptée de [Munier (1973); Peyron (2000)].	30
<b>Figure.II. 1.</b> Fabrication du ciment Portland [ANGLET (2006)].	42
<b>Figure.II. 2.</b> Evolution du flux de chaleur durant l'hydratation du ciment Portland	46
<b>Figure.III. 1.</b> Production mondiale des matériaux composites [Bathias and Coll (2005)].	52
<b>Figure.III. 2.</b> Classification des différents types de matériaux composites à base de fibres naturelles [Sedan (2007); Ragoubi (2010)].	56
<b>Figure.III. 3.</b> Facteurs influençant la prise du ciment.	60
<b>Figure.III. 4.</b> Courbe typique de l'hydratation du ciment pure et mélangé avec le bois[Espinoza Herrera (2009)].	62
<b>Figure.IV. 1.</b> Représentation schématique de la palme.	74

*Liste des figures*

<b>Figure.IV. 2.</b> Palmes (palmier dattier) sans valeur ajoutée - Biskra (Algérie). .....	74
<b>Figure.IV. 3.</b> Tamisage après broyage des copeaux de bois de palmier. ....	75
<b>Figure.IV. 4.</b> Mesure de la masse volumique des particules de bois de palmier dattier. ....	76
<b>Figure.IV. 5.</b> Mesure de la conductivité thermique de bois de palmier dattier. ....	77
<b>Figure.IV. 6.</b> Evolution de E/C en fonction du volume bois. ....	82
<b>Figure.IV. 7.</b> Affaissement des pâtes bois – ciment en fonction du dosage en bois. ....	83
<b>Figure.IV. 8.</b> Test de prise Vicat des pâtes bois – ciment en fonction du dosage en bois. ....	85
<b>Figure.IV. 9.</b> Préparation des échantillons de bois. ....	85
<b>Figure.IV. 10.</b> Mesure de la conductivité thermique par la méthode fil chaud . ....	86
<b>Figure.IV. 11.</b> Schéma du montage de flexion 3 points. ....	87
<b>Figure.V. 1.</b> Images au microscope électronique à balayage d'un pétiole. ....	91
<b>Figure.V. 2.</b> Conductivité thermique des mortiers à base de bois de palmier dattier. ....	92
<b>Figure.V. 3.</b> Gain thermique des mortiers à base de bois de palmier dattier. ....	93
<b>Figure.V. 4.</b> Evolution du rapport E/C des CBC développés. ....	94
<b>Figure.V. 5.</b> Evolution de la quantité de ciment dans CBC. ....	94
<b>Figure.V. 6.</b> Contrainte de compression des composites mortiers - bois. ....	96
<b>Figure.V. 7.</b> Contrainte de flexion des composites mortiers - bois. ....	98
<b>Figure.V. 8.</b> Courbe contrainte de flexion – déformation à 28 jours. ....	99
<b>Figure.V. 9.</b> Conductivité thermique des pâtes de mortiers correspondantes. ....	101
<b>Figure.V. 10.</b> Contrainte de compression pâtes – bois. ....	103
<b>Figure.V. 11.</b> Module d'Young pâtes – bois. ....	104
<b>Figure.V. 12.</b> Contrainte de flexion, pâtes ciment bois à 14, 21 et 28 jours. ....	105
<b>Figure.VI. 1.</b> Evolution de la consommation énergétique en Algérie 1980-2013. ....	111
<b>Figure.VI. 2.</b> Consommation moyenne d'énergie finale moyenne en Algérie entre 1980-2014. ....	112
<b>Figure.VI. 3.</b> Echanges thermiques avec l'extérieur d'une maison individuelle. ....	113

# INTRODUCTION

« Soyez bons avec la Terre : elle ne vous a pas été donnée par vos parents, elle vous a été prêtée par vos enfants. Nous n'héritons pas la terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants ».

Antoine de St-Exupéry.



**E**n quelques décennies, la technologie et les ressources du sous – sol ont bouleversé les standards de confort et transcendé les exigences. Jamais dans l'histoire des civilisations le niveau de vie n'avait atteint une telle excellence. Cependant, contrainte par l'épuisement des ressources, l'augmentation de coût et des gravissimes atteintes à la biosphère, la tendance s'inverse rapidement.

Outre les valeurs écologiques et les motivations géopolitiques d'un changement de cap énergétique, la croissance démographique plus de 2 milliards en 2020, ajouté au développement légitime de pays vers un meilleur confort multiplient les pollutions inhérentes à l'accroissement des besoins énergétiques. Ces arguments réunis, conduiront progressivement au doublement du taux de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Le dioxyde de carbone, gaz à effet de serre prend naissance des activités humaine, majoritairement composé de molécules liées aux usages de l'énergie. Ce gaz présente un taux d'accroissement anormal et fait l'objet de toutes les attentions. Par ailleurs il est en mesure de provoquer des bouleversements considérables aux conséquences graves sur l'équilibre de l'écosystème et qui ne sont pas de surcroît toutes connues.

L'heure est au bilan, au cours des précédents millénaires, l'homme n'a cessé de creuser de puiser sans relâche dans les réserves naturelles au nom d'évolution et du développement industrielle sans se soucier des dommages causés à son environnement. Devant l'ampleur des problèmes qui prennent une dimension planétaire, la communauté internationale tente de s'organiser pour diminuer notamment les émissions de gaz à effet de serre. Cette initiative sera entérinée par la convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique lors du sommet mondial sur la Terre à Rio de Janeiro au Brésil qui s'est tenu en juin 1992 [Brundtland and Khalid (1987)]. Ceci a abouti en 1997 au protocole de KYOTO qui énonçait des objectifs juridiquement contraignants de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>), protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O)) de 5% à l'horizon 2012 par rapport au niveau enregistré en 1990 pour les pays industrialisés et créait des mécanismes innovants pour aider les pays à atteindre ceux-ci. Cette politique n'est toutefois pas sans diviser ces pays, peu enclins à remettre en cause leur modèle de croissance et les pays du Sud inquiets pour leurs projets de développement.

Le protocole de Kyoto a été signé par les premiers pays en 1997 et si les objectifs sont clairs jusqu'à 2020, ils doivent être précisés pour les périodes suivantes. Le sommet mondial de Paris « COP21 » en 2015, qui se tient durant la deuxième période d'engagement du protocole de Kyoto, une période qui court de 2013 à 2020 vient éclaircir et lever le doute sur l'objectif à venir à savoir contenir entre 2°C et 1,5°C le réchauffement par rapport à l'ère pré-industrielle.

A cet effet, les parties s'engagent à atteindre un pic des émissions de gaz à effet de serre le plus tôt possible et d'entreprendre ensuite des réductions rapides afin de parvenir à un équilibre entre les émissions dues aux activités humaines et celles absorbées par les puits de carbone, que sont par exemple les forêts ou les méthodes de captage et stockage de CO<sub>2</sub> en couche géologique profonde.

Face à des réalités difficiles entre autre le changement climatique, l'effet de serre, la pollution des nappes phréatiques, les atteintes à la santé, l'appauvrissement social,... etc., l'amélioration de l'efficacité énergétique prend progressivement tous autre aspect, sa mise en place est un facteur de survie capital pour l'ensemble de la planète mais aussi l'un des grands enjeux de notre époque et les bâtiments en sont une des composantes majeures.

Réduire l'influence des pollutions implique une diminution des consommations d'énergie, contrairement aux idées reçues, le bâtiment, résidentiel soit t'il ou tertiaire et le secteur le plus énergivore et le plus émetteur de gaz à effet de serre [APRUE (2009)]. Une situation qui laisse entrevoir de réelles opportunités d'amélioration génératrices d'économies d'énergie et des perspectives environnementale. Dans l'habitat, la maîtrise de la dépense passe le plus souvent par des actes et des choix judicieux ; notamment par l'amélioration de l'isolation thermique des enveloppes extérieures. Ces dernières représentent en effet les éléments les plus déperditifs de la construction [Gallauziaux and Fedullo (2010)].

Avec un parc logement de 5 745 645 dont 62% urbain [MHUV (2011)] et en net progression, le paysage urbain, villes et villages, algérien a connu des changements radicaux. Depuis l'indépendance l'Algérie a lancée de nombreux plans de relogement dans l'unique but est de satisfaire la demande et désengorger le marché de l'habitat. Le retour d'expérience de ces deux décennies d'effort en matière de construction et l'amélioration significatif du niveau de vie de la famille algérienne, met la lumière sur la nécessité de concilier l'aspect quantitatif et le coté qualitatif, l'aire des maisons dortoir est révolue.

Le programme présidentiel prévoit notamment la construction d'un million de logements sur la période 2005 2009 [Meghraoui (2006)], à ce juste titre l'Algérie à vue doublé sa consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel et tertiaire pour atteindre 6 millions de tonnes équivalent pétrole (tep) en 2005 soit 41% [APRUE (2009)]. Ainsi, ils représentent le premier secteur grand consommateur d'énergie électrique au niveau national.

les matériaux tels que la laine de verre, de roche, de bois et l'amiante couvrant une variété assez large des produits d'usage courant dans le bâtiment comme isolants thermiques et ou acoustique. Cependant, suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, ou pour des raisons économiques relatives aux quelques fibres industrielles, plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les matériaux végétales en raison de leur disponibilité et de leur faible impacte environnementale [Sandermann and Kohler (1964); John and Thomas (2008); Ragoubi (2010); Agoudjil, Benchabane et al. (2011); Pacheco-Torgal and Jalali (2011); Dittenber and GangaRao (2012); Touloum, Benchabane et al. (2012); Townsend and Sette (2016)].

Avec de tels arguments qui ne sont pas les moindres, les biomatériaux s'affirment au plus grand jour et prennent la mesure des événements pour développer les standards. Ils s'imposent désormais dans la construction d'un avenir sûr qui s'inscrit et s'articule au tour de la notion du développement durable [Brundtland and Khalid (1987)]. En effet, l'utilisation des ressources renouvelables devient de plus en plus fréquente de nos jours.

Ce travail de thèse vise un double objectif. En premier lieu, définir et optimiser la proportion et la granulométrie du bois de palmier dattier notamment la forme, les dimensions et distribution. En deuxième lieu, mettre en place une méthode de formulation des composites bois ciment. Ce travail constitue une première étape dans la connaissance du comportement à la fois thermique et mécanique d'un matériau de construction à base de bois de palmier dattier réduit en particules dans une matrice cimentaire. Celui-ci est structuré de deux grandes parties constitué de six chapitres.

**Partie 1 :** Etude bibliographique, comprenant les chapitres suivants :

- I) La biomasse végétale : macro, micro et ultra structures, caractéristiques thermo physiques et mécaniques.
- II) Le ciment Portland : consacré aux mortiers à ses différents constituants à savoir le ciment portland, le sable, l'eau et les adjuvants. Nous avons passé en revue les caractéristiques intrinsèques de chacun des composants. Nous nous sommes attardés sur la matrice ciment portland car une fois en contact avec l'eau plusieurs phénomènes très complexes à l'image de l'hydratation se manifestent.

III) Composites bois ciment : définition des composites d'une manière générale et les composites à renfort végétale en particulier. Les composites à base de bois représentent une gamme très diversifiée de produits que l'on peut classer selon leur format ou le niveau de déstructuration de la matière première. On constatera que le plus gros des travaux effectués dans le domaine des composites bois – ciment (CBC) concernent la caractérisation mécanique de ces matériaux.

**Partie 2 :** Etude expérimentale, comprenant les chapitres suivants :

IV) Matériaux et méthodes : cette partie du manuscrit récapitule les caractéristiques des CBC étudiées et les facteurs expérimentaux contrôlés et expose les différentes méthodes et techniques expérimentales utilisées ainsi que les analyses théorique et expérimentale menées afin de valider la méthode de formulation proposée et de déterminer l'utilisation adéquate dans le bâtiment du produit développé.

V) Résultats et discussions : nous présentons dans ce chapitre les résultats des mesures de propriétés morphologiques, thermiques et mécaniques. Dans cette partie nous discutons l'influence de la concentration des particules des bois de palmier dattier sur les propriétés mécaniques et thermiques de ces CBC. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux existants dans la littérature pour une application d'isolation thermique.

VI) Le marché de l'isolation thermique en Algérie : nous nous intéressons au marché local de l'isolation thermique des habitations. Cette étude est le point de jonction entre l'étude théorique, le développement en laboratoire des CBC et les besoins réels du marché local. Dans un premier temps, nous chiffrons la consommation nationale en énergie puis, dans un deuxième temps, nous rappellerons les formules et les paramètres de calculs techniques et économiques du matériau isolant.

La conclusion rappelle ces résultats et les perspectives d'études pour une valorisation complète des déchets issue du palmier. Ce dernier point constitue sûrement le défi à engager pour les études sur les composites bois de palmier dattier ciment.

# Bibliographie

- Brundtland, G. and M. Khalid (1987). Notre Avenir à Tous, Commission mondiale sur l'Environnement et le Développement ONU.
- APRUE (2009). Consommation Energétique Finale de l'Algérie, Chiffres clés année 2007, Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.
- Gallauziaux, T. and D. Fedullo, "Le grand livre de l'isolation", Ed Eyrolles, (2010).
- MHUV (2011). La revue de l'habitat N°6, Ministère de l'habitat et de l'urbanisme.
- Meghraoui, N., "Quel Habitat pour l'Algérie", Ed Constantine (2006).
- Sandermann, W. and R. Kohler, "Studies on mineral-bonded wood materials. IV. A short test of the aptitudes of woods for cement-bonded materials." *Holzforschung* **18**, 53-59.(1964)
- John, M. J. and S. Thomas, "Biofibres and biocomposites." *Carbohydrate Polymers* **71**, 343-364.(2008)
- Ragoubi, M., "Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France (2010)
- Agoudjil, B., A. Benchabane, et al., "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood." *Energy and Buildings* **43**, 491-497.(2011)
- Pacheco-Torgal, F. and S. Jalali, "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review." *Construction and Building Materials* **25**, 575-581.(2011)
- Dittenber, D. B. and H. V. S. GangaRao, "Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure." *Composites Part A* **doi:10.1016/j.compositesa.2011.11.019**.(2012)
- Touloum, F., A. Benchabane, et al. (2012). Valorisation des fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Huitièmes Journées de Mécanique, Ecole Militaire Polytechnique - Bourdj El Bahri.
- Townsend, T. and J. Sette (2016). Natural Fibres and the World Economy. Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications: From Science to Market. R. Figueiro and S. Rana. Dordrecht, Springer Netherlands: 381-390.

# PARTIE 1

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

# CHAPITRE I

# Chapitre I

## La biomasse végétale

La biomasse végétale	6
1 Le bois matière comme première renouvelable	8
1.1 Structures de bois	8
1.1.1 Macrostructure du bois	8
1.1.2 Microstructure du bois,	9
1.1.3 Ultra structure du bois	11
1.1.4 Formation du bois	13
1.2 Composition chimique du bois	14
1.2.1 La cellulose	15
1.2.2 Les hémicelluloses	16
1.2.3 La lignine	17
1.2.4 Les extractibles (composés libres), les matières minérales	18
2 Modèle d'association moléculaire : cellulose – hémicellulose – lignine	19
3 Propriétés du bois	20
3.1 Propriété thermique	20
3.2 Propriété mécanique	20
3.3 Propriété physique	21
3.3.1 Relation Eau/Bois	21
3.3.2 Point de saturation des fibres (PSF)	21
3.3.3 Rétractabilité volumique	22

3.3.4 La masse volumique	23
3.3.5 La porosité	23
4 Le bois de palmier dattier	24
4.1 Habitat et origine	25
4.2 Taxonomie du palmier dattier	27
4.3 Morphologie du palmier dattier	27
5 Conclusion	31
Bibliographie	32

Depuis l'origine des temps, l'homme a toujours eu recours à la biomasse végétale. C'est ainsi, mais à par le fait de le nourrir et de le soigner, la biomasse végétale a également répondu à d'autres besoins essentiels en offrant les matériaux nécessaires à son habitat et à ses multiples usages domestiques (bois de chauffage, habillement, huile ... etc.). La biomasse végétale est aussi l'unique source de nourriture indispensable aux animaux de trait et aux chevaux ou dromadaires, premiers moyens utilisés par nos ancêtres pour leurs déplacements sur de longues distances. Toutefois, l'élan prit par les différentes activités agricoles et forestières s'est progressivement estompé avec l'avènement au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, de la révolution industrielle. On tronqua le charbon pour le pétrole qui s'est imposé de façon quasi hégémonique à l'ensemble des activités humaines.

Dans le contexte actuel du développement durable, nous assistons à un regain d'intérêt pour le remplacement des dérivés pétrochimiques par des ressources biomasses végétales renouvelables. La biomasse végétale est un matériau naturel formé par une combinaison de fibres de cellulose, longues chaînes moléculaires partiellement cristallisées et une matrice constituée de lignine et d'hémicellulose composés amorphes. Les travaux de recherche pour la valorisation de la biomasse végétale concernent principalement des fibres végétales telles que le lin, le chanvre, le jute, le sisal, le ramie ... etc.

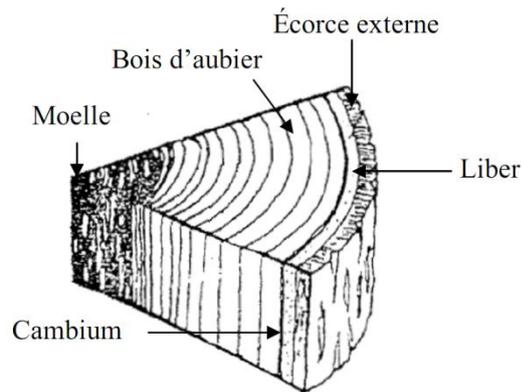
Dans la présente étude nous nous emploierons à développer des composites bois-ciment à base de bois de palmier dattier comme renfort fibreux. Nous nous intéressons dans ce chapitre au bois et à une espèce végétale de palmier dattier. Nous allons dans ce qui suit les distinguer à fin de comprendre leur comportement vis-à-vis du ciment portland.

## **1 Le bois matière comme première renouvelable**

### **1.1 Structures de bois**

#### **1.1.1 Macrostructure du bois**

Le bois est un matériau composite d'une grande complexité à caractère hétérogène dont la structure est cellulaire, poreuse et fortement hygroscopique. Le comportement mécanique du bois dépend considérablement de son organisation cellulaire mais aussi de l'âge du matériau [Besset (1987)], de sa teneur en eau [Abanto (2011)], de sa rétractibilité et de sa densité [John and Thomas (2008)]. La coupe transversale (figure 1) d'un tronc d'arbre permet de différencier, de l'extérieur vers l'intérieur : l'écorce, le liber, le cambium et enfin le bois.



**Figure 1.** Section transversale du tronc d'un arbre [Jebrane (2009)].

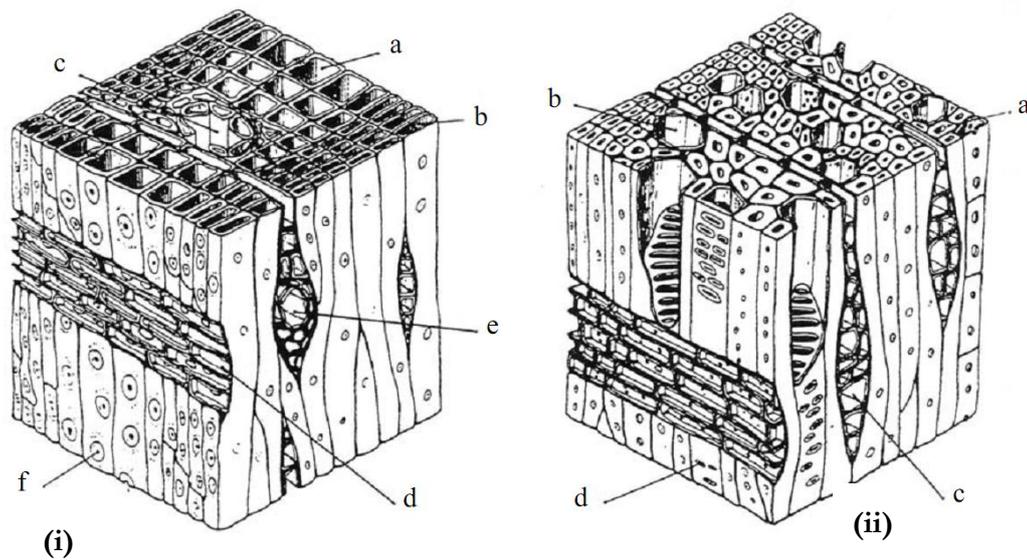
## **1.1.2 Microstructure du bois,**

### **1.1.2.1 Classification des arbres**

On distingue d'une manière générale deux classes d'arbres à savoir :

- Les résineux (Gymnospermes) communément appelés conifères ou arbres à bois tendre
- Les feuillus (Angiospermes) ou arbres à bois dur.

Chacune de ces deux types renferme des milliers d'espèces différentes. Les résineux présentent une organisation cellulaire relativement simple et uniforme figure 2 (i); ils sont constitués de deux types de cellules. Les cellules longitudinales (trachéides) qui constituent 90% à 95% de l'ensemble des cellules de ce type de bois, et les cellules parenchymes. Les trachéides remplissent la double fonction de conduction et de soutien quant aux parenchymes, elles assurent la répartition et l'emmagasinement des substances. Pour les feuillus, sa structure est beaucoup plus complexe figure 2 (ii) et possède différents types de cellules (vaisseaux, trachéides et cellules parenchymes). Dans le bois des feuillus, il existe des vaisseaux spécialisés pour transporter la sève brute et des fibres assurant la résistance mécanique et de soutien.



**Figure 2.** Représentation schématique de la microstructure d'un : (i) résineux ; (ii) feuillus [Govin (2004)].

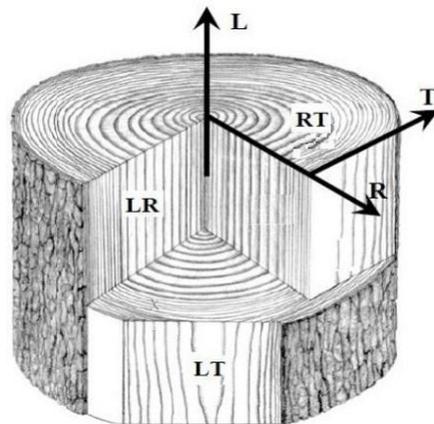
**Avec :**

**Désignation**

(i)	(ii)
a - Trachéide (bois initial)	a - Fibre
b - Trachéide (bois final)	b - Vaisseau
c - Canal résinifère	c - Rayon
d - Rayon ligneux	d - Ponctuation
e - Rayon ligneux avec canal résinifère	
f - Ponctuation	

**1.1.2.2 Le plan ligneux**

De par sa nature biologique, les cellules de bois varient en forme et en dimension, la manière dont elles sont disposées les unes par rapport aux autres définit le plan ligneux. D'autre part, le bois est un matériau anisotrope, les caractéristiques mécaniques et physiques varient suivant une direction donnée. L'analyse et l'observation du bois se font suivant trois plans de coupes orthogonaux (figure 3) ; le plan transversal (RT), le plan radial (LR) et le plan tangentiel (LT) qui définissent trois directions principales ; la direction longitudinale (L), la direction tangentielle (T) et la direction radiale (R).



**Figure 3.** Directions principales dans le bois (R : radiale, T : tangentielle et L : longitudinale)  
[Abanto (2011)].

### 1.1.3 Ultra structure du bois

Le bois est une structure biologique principalement composée de cellulose, hémicellulose et lignine [Besset (1987); Baley (2004)]. Chaque fibre se présente sous la forme d'un composite multicouches (figure 4) [Besset (1987); Thiebaud (1995); Bledzki. and Gassan (1999); Michaud (2003); Baley (2004); Navi and Heger (2005); Sedan, Pagnoux et al. (2007); John and Thomas (2008); Jebrane (2009)] dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant un élément structurant très rigide qu'est la cellulose (figure 4), elle est constituée de :

- Une paroi primaire (P) très mince mesurant  $0,1 \mu\text{m}$  et contient une grande quantité de lignine.
- Une paroi secondaire (S), elle même composée de 3 couches S1, S2, S3. La couche S2 est la plus épaisse et conditionne le comportement de l'ensemble de la fibre [Baley (2004); John and Thomas (2008)], sa structure est assimilée à celle d'un matériau composite renforcé par des fibrilles de cellulose disposées en hélice [Bledzki. and Gassan (1999)] (figure 5). Les paramètres les plus importants sont le pourcentage de cellulose et l'angle microfibrillaire, la composition chimique et les défauts structuraux [John and Anandjiwala (2008); Dittenber and GangaRao (2012)]. D'une manière générale, les caractéristiques mécaniques de la fibre végétale sont influencées par le pourcentage de cellulose. Le module de Yong et la résistance en traction des fibres végétales sont d'autant plus important que la quantité de cellulose est grande.

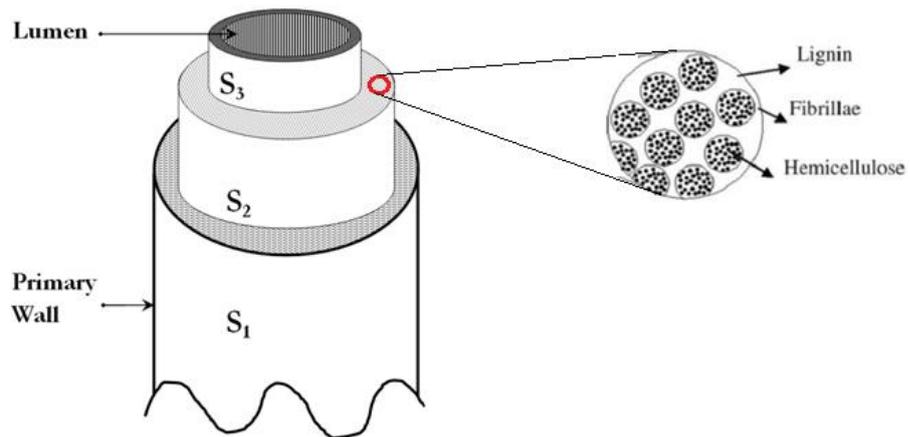


Figure 4. Représentation schématique de l'ultrastructure d'une fibre végétale.

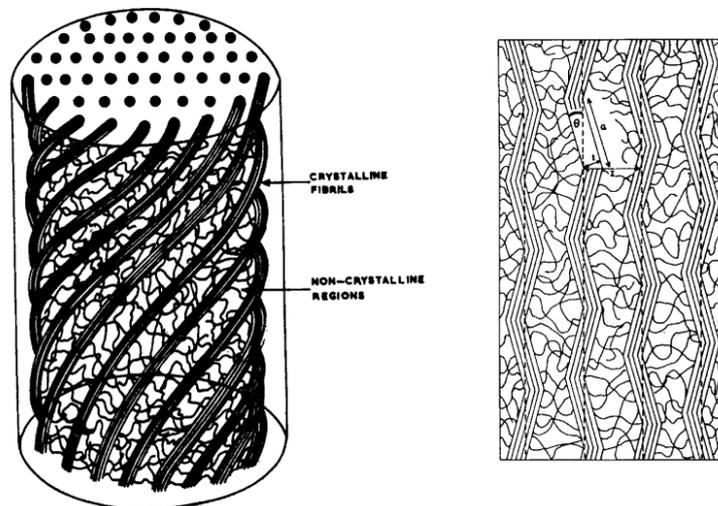


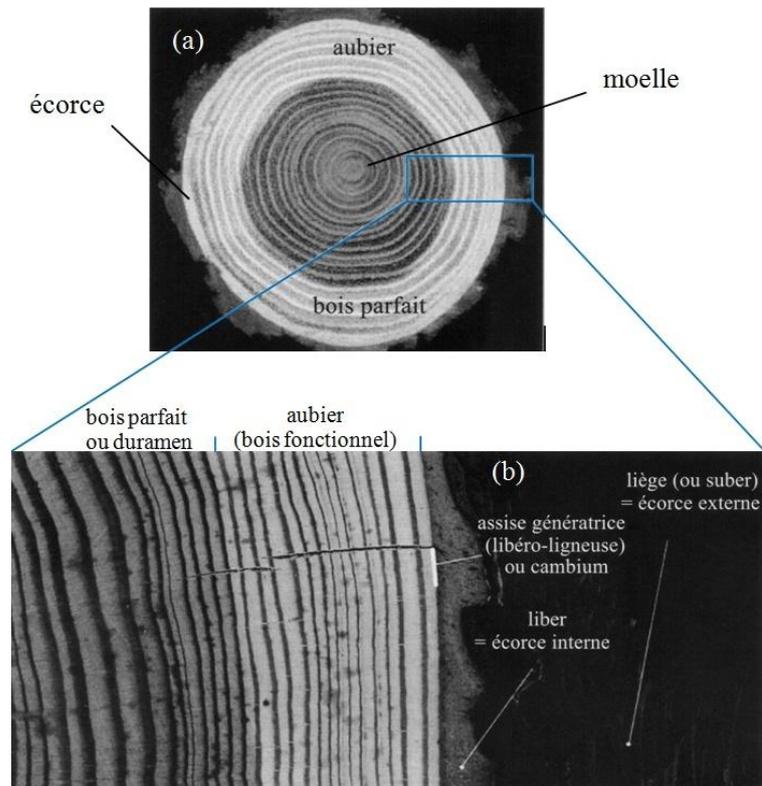
Figure 5. Modèle de structure de la couche S2 d'une fibre végétale a) vue isométrique, b) projection 2Dimensions [Bledzki. and Gassan (1999)].

Avec

- Primary wall : paroi primaire (0,1  $\mu\text{m}$ )
- S<sub>1</sub> : paroi externe solide (Contient les fibres cellulosiques)
- S<sub>2</sub> : paroi centrale secondaire
- Tertiary wall (S<sub>3</sub>) : paroi interne
- L : lumen

### 1.1.4 Formation du bois

Le bois est généré par division des cellules du cambium (figure 6) qui assurent les différentes fonctions physiologiques du bois au sein de l'arbre tandis que les cellules de l'aubier adjacent au bois parfait se convertissent en duramen [Navi and Heger (2005)], ainsi les cellules mortes de ce dernier assurent le soutien mécanique de l'arbre [Abanto (2011)]. La proportion d'aubier et de bois parfait varie selon l'âge et l'essence de l'arbre. Une analyse plus poussée révèle une croissance concentrique de l'arbre qui débute au printemps (bois de printemps ou bois initial) et s'achève en été (bois d'été), formant ainsi une nouvelle couche de bois entre le bois existant et l'écorce dans le tronc, les branches et les racines. Ainsi les anneaux de croissances annuels formés sont appelés cernes.



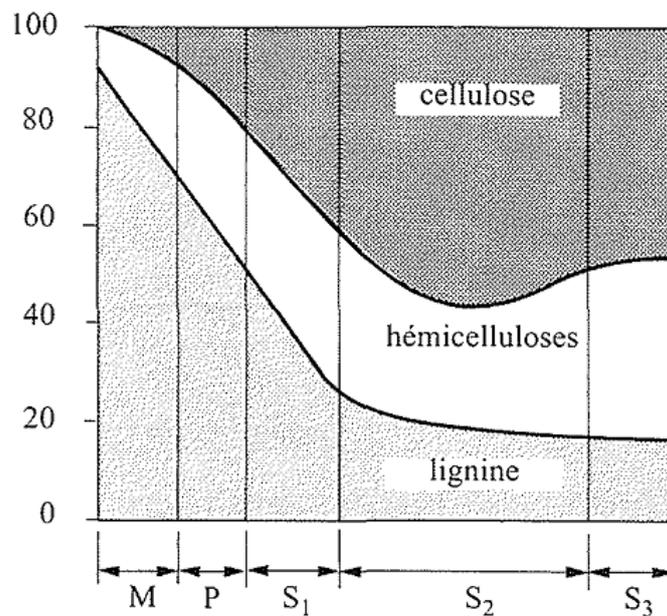
**Figure 6.** Sections transversales. (a) section transversale d'un tronc ;(b) agrandissement d'une partie de l'écorce, de l'assise génératrice, de l'aubier et du duramen [Navi and Heger (2005)].

## 1.2 Composition chimique du bois

Les principaux constituants chimiques du bois sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Dans une proportion beaucoup plus faible il contient des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques [Michaud (2003)]. La proportion d'holocellulose (cellulose, hémicelluloses) et de lignine varie beaucoup selon les essences du bois (Tableau 1) [Monties (1980)] et d'une couche à une autre de la paroi cellulaire (figure 7) [Navi and Heger (2005)]. Parmi les nombreux constituants des tissus végétaux, ne seront décrit ici que ceux qui sont importants en terme de structure et de quantité pour leur analyse et celles qui justifient leur emploi dans des différentes industries.

**Tableau 1.** Répartition moyenne des différents constituants chimiques du bois [Govin (2004)].

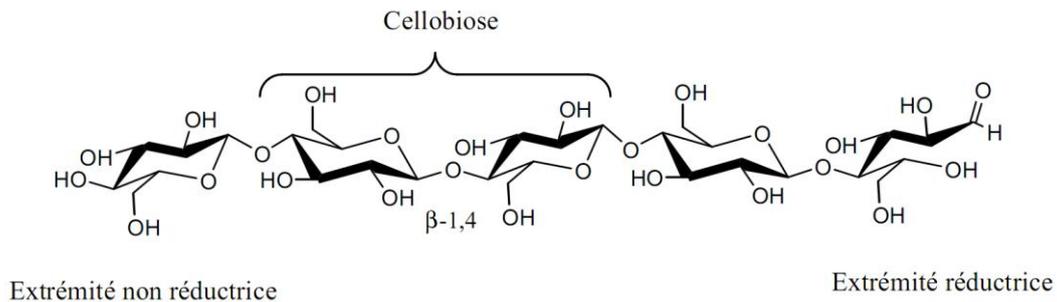
	Essence	
	Résineux (% en poids)	Feuillus (% en poids)
Cellulose	42±2	45±2
Hémicellulose	27±2	30±5
Lignine	28±3	20±4
Extractibles	3±2	5±3



**Figure 7.** Distribution en pourcentage massique des différents constituants de la paroi cellulaire. M= couche intercellulaire ; P= paroi primaire ; S1, S2, S3= parois secondaires [Navi and Heger (2005)].

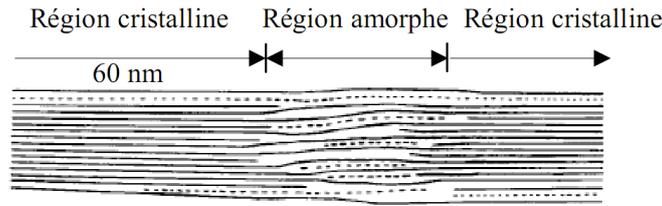
### 1.2.1 La cellulose

La cellulose est un biopolymère qui a un rôle structural de premier plan dans la grande majorité des parois végétales. Élément constitutif majeur du bois et celui presque unique du coton et des fibres textiles du type lin, chanvre, jute et ramie (tableau 1). Rappelons que cette macromolécule est constituée par un enchainement de maillons de glucoses ( $C_6H_{11}O_5$ ) avec une liaison glycosidique du type  $\beta$ -1,4 (figure 8)[John and Thomas (2008)]. Le nombre de motifs de répétition ou le degré de polymérisation varie suivant l'origine des fibres [Bledzki. and Gassan (1999); Ragoubi (2010)]et le type de procédés d'isolement [Monties (1980); Govin (2004)]. Il est à titre d'exemple de 3000 à 10000 pour le coton [Govin (2004)], de 26500 pour l'algue valonia [Sedan (2007)]. Sa masse moléculaire est de l'ordre de  $1,5$  à  $5,0 \cdot 10^6$  g.mol<sup>-1</sup>[Monties (1980); Sedan (2007)].



**Figure 8.** Représentation schématique de la molécule de cellulose [Ragoubi (2010)].

De par son origine végétale et sa structure polymérique, la cellulose se présente sous forme fibrillaire et partiellement cristalline [Monties (1980); Ragoubi (2010)]. Il est important de noter que les microfibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines ordonnées et de zones amorphes (figure 9) totalement désordonnées[John and Thomas (2008)]. Les microfibrilles sont imbriquées dans une matrice d'hémicelluloses et de lignine pour constituer la paroi cellulaire. Il est important de noter que la cellulose cristalline est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé, soit environ 136 GPa à comparer au 75 GPa de la fibre de verre. Cette rigidité provient de la structure cristalline qui suit un agencement supramoléculaire hélicoïdal très ordonné [Michaud (2003)]. Les groupements hydroxyles sont responsables du comportement physico-chimique de la cellulose. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogène intra et intermoléculaires.



**Figure 9.** Régions cristallines et amorphe d'une fibrille [Navi and Heger (2005)].

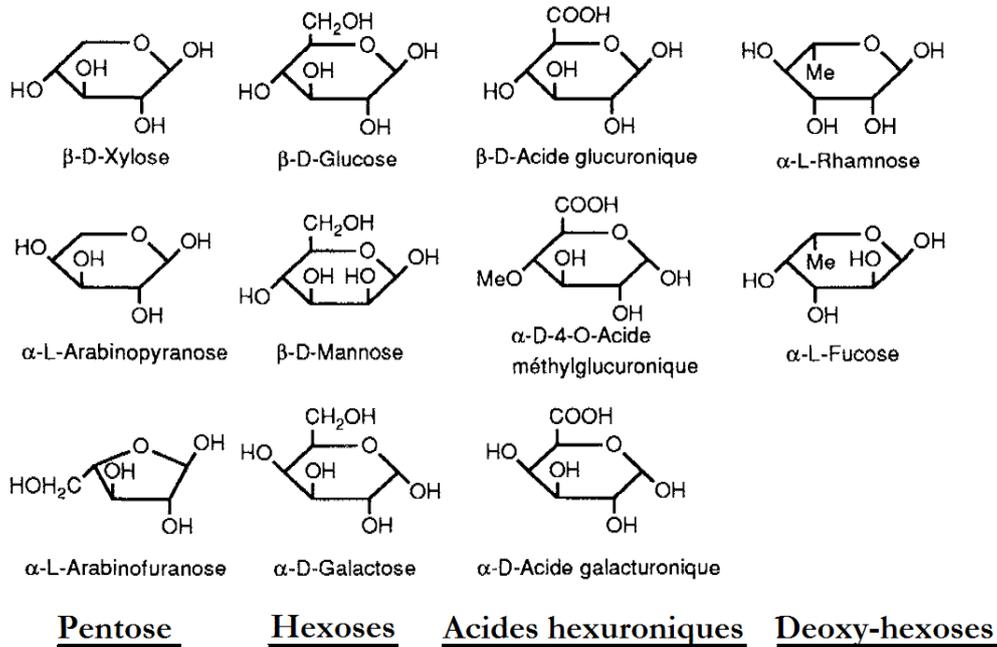
Les liaisons hydrogènes inter-chaînes dans les zones cristallines sont fortes, donnant ainsi aux fibres une bonne ténacité et l'insolubilité dans la plupart de solvants. Elles protègent également la cellulose de fusion. Néanmoins, il existe certaines méthodes mises au point à fin de répondre à la demande effrénée du marché mais qui reste au plan laboratoire, on citera les acides nitrique, sulfurique ou phosphorique, certains acides de Lewis (solutions aqueuses de sels métalliques) tels que le chlorure de zinc ou le perchlorate de béryllium, leur utilisation à l'échelle industrielle est sujet à des pollutions très onéreuses et à la dégradation de la cellulose. Egalement les bases minérales fortes en solution aqueuse (mercerisation) sur la cellulose conduit à la formation d'alcali-cellulose, composés très résistants. Depuis quelques années, des solvants organiques font leur apparition, les amines-oxydes. Ces composés liquides ou solides ont la propriété de dissoudre la cellulose à des températures moyennes comprises entre 80 et 130°, qui ne provoquent qu'une faible dégradation de la macromolécule.

Cette macromolécule à caractéristiques uniques est rapidement devenue une matière première de grande importance économique. En effet parmi les nombreuses applications de la cellulose, la fabrication de papier. Dans le domaine pharmaceutique joue le rôle d'un additifs ou de liants utilisés lors de la préparation de comprimés, gélules ou granulés [Govin (2004)].

### 1.2.2 Les hémicelluloses

On désigne par hémicellulose tous polysaccharides solubles dans l'eau pouvant être extrait de la paroi des cellules végétales par des solutions alcalines ; Ce sont des polysaccharides amorphes. Les hémicelluloses, à la différence de la cellulose sont composés de différents sucres (glucides) qui forment des chaînes courtes avec ramifications dont le degré de polymérisation est de 50 à 300 [Bledzki. and Gassan (1999); John and Thomas (2008)], les sucres présents peuvent se diviser en différents groupes : les pentoses, hexoses, acides hexouroniques et les L-désoxyhexoses (figure 3). Leur structure dépend de l'espèce végétale, du type cellulaire, de la localisation dans la paroi

ou bien encore l'âge des cellules [Monties (1980); Sedan (2007)]. Le nom d'hémicellulose a été donné en 1891 par Schulze [Monties (1980)].



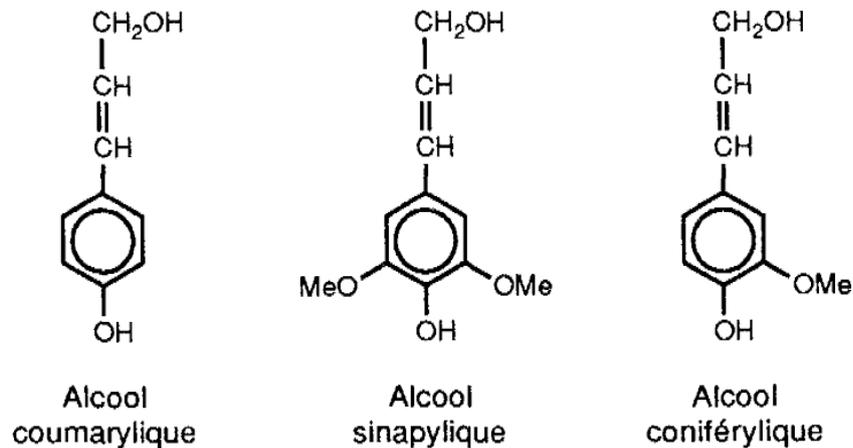
**Figure 10.** Formules des différents glucides composant les hémicellulose [Thiebaud (1995)].

De même que pour la cellulose, les hémicelluloses possèdent un grand nombre de fonctions hydroxyles. Comme elles ne forment pas de réseaux cristallins, leur fonctionnalisation est par conséquent plus facile que celle de la cellulose [Govin (2004)]. De part sa constitution polymérique très variée (de nombreux monomères et de nombreux branchements différents), la structure de l'hémicellulose est mal définie. Elle est utilisée essentiellement comme source de monomères ou oligomères pour obtention de polymères. En effet, en milieu acide, l'hydrolyse de la plupart des hémicelluloses conduit aux monomères constitutifs tels que le xylose, le glucose, l'arabinose. La fermentation alcoolique ou enzymatique des sucres ainsi formés, les transforme en alcools (éthanol, butanol) et en acides organiques (butyrique, acétique, lactique ...) [Reguant and Rinaudo (1999); Govin (2004)].

### 1.2.3 La lignine

Les lignines sont des polymères pariétaux qui représentent le deuxième constituant le plus abondant dans le bois. Dans leur état natif, on parle de protolignines [Govin (2004)]. L'existence de la lignine a été rapportée pour la première fois en 1819 par Braconnot. La lignine sont des

polymères tridimensionnels provenant de la copolymérisation de trois alcools à savoir l'alcool coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique [Monties (1980)] (figure 10). Elles sont composées de constituants aliphatiques et aromatiques [Bledzki. and Gassan (1999); Sedan (2007); John and Thomas (2008)], la lignine a une structure très hétérogène qui varie en fonction des différentes espèces végétales.



**Figure 11.** Structure des différents monomères constituant la lignine [Govin (2004)].

La lignine présente une structure totalement amorphe et hydrophobe, elle est soluble dans la plus part des solvants [John and Thomas (2008)], elle confère aux parois cellulaires une certaine rigidité et une résistance mécanique.

## 1.2.4 Les extractibles (composés libres), les matières minérales

### 1.2.4.1 Les substances extractibles

En plus de ses constituants principaux la cellulose, l'hémicellulose et lignine, le bois contient un certain nombre de composés libres qui sont facilement éliminés du bois par des solvants organiques polaires (acétone, eau, éthanol) ou apolaires (toluène, cyclohexane, dichlorométhane) ou l'eau. Les substances extractibles sont des composés de faibles poids moléculaires localisés dans le lumen, les canaux résinifères, la lamelle moyenne et des espaces intercellulaires. Les extractibles du bois sont généralement classés en trois groupes, en fonction de leurs propriétés chimiques ou leur structure

- Les polyphénols, phénols : tannins condensés et hydrolysables, flavonoïdes, tropolones, stilbènes, quinones ;

- Les terpénoïdes : monoterpènes, sesquiterpènes, diterpènes ;
- Autres composés : les sucres, esters d'acides gras, alcaloïdes et les stéroïdes.

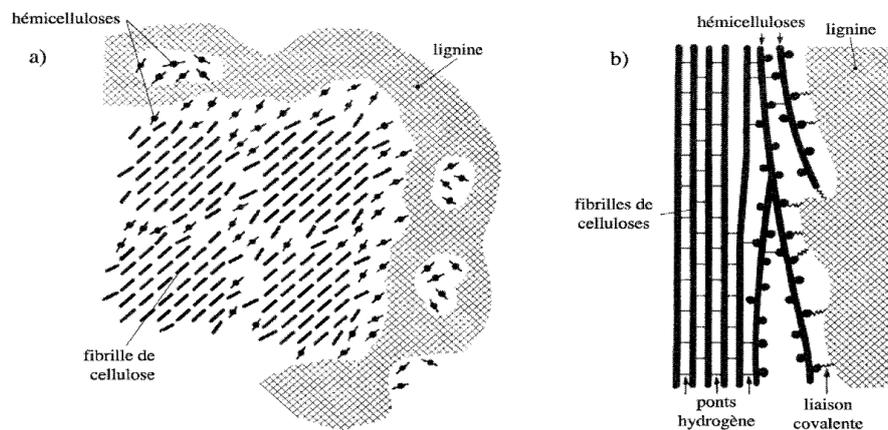
Les substances extractibles ne contribuent pas aux propriétés mécaniques du bois [Navi and Heger (2005)] mais confèrent à ce dernier d'autres propriétés comme l'odeur, la couleur, la durabilité naturelle. Le passage de l'aubier au duramen s'accompagne d'une augmentation de la teneur en substances extractibles, ce qui explique la couleur plus sombre communément observée pour le duramen par rapport à l'aubier [Cheumani (2009); Jebrane (2009)].

#### 1.2.4.2 Les matières minérales

Les matières minérales ou cendres sont les résidus obtenus après combustion de la matière organique. Ils représentent 1% à 2 % du bois anhydre (sèche) [Cheumani (2009); Jebrane (2009)]. L'élément métallique le plus abondant est le calcium, suivi du potassium et du magnésium.

### 2 Modèle d'association moléculaire : cellulose – hémicellulose – lignine

A partir d'observations faites aux échelles ultra-structurale et moléculaire, Fengel [Navi and Heger (2005)] présente un modèle précis pour décrire la synergie des microfibrilles de la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. La liaison entre les microfibrilles de la cellulose et les hémicelluloses s'effectue grâce à plusieurs ponts hydrogènes. Par contre, les hémicelluloses et la lignine s'associent par des liaisons covalentes.



**Figure 12.** Association moléculaire : cellulose – hémicellulose – lignine dans la paroi cellulaire du bois à l'état anhydre : a) section transversale, b) section longitudinale [Navi and Heger (2005)]

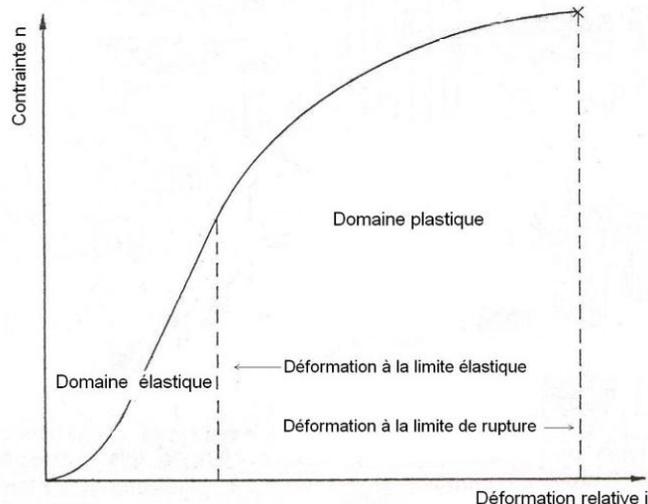
### 3 Propriétés du bois

#### 3.1 Propriété thermique

Les propriétés thermiques de la cellulose s'ont d'une importance capitale. En effet la dégradation thermique est un facteur limitant la fabrication des composites. La plus part des fibres naturelles perdent leurs rigidité des 160°C, la lignine quant à elle se dégrade aux alentours de 200°C, néanmoins, la destruction de l'ordre cristallin n'est visible qu'au dessus de 320°C par agitation thermique des molécules [Weiss (1983); Ragoubi (2010)], la conductivité thermique du bois est de l'ordre de 0,12 à 0,23 W/m.K [Michaud (2003)], ce qui le prédestine à l'isolation thermique.

#### 3.2 Propriété mécanique

La grande variabilité anatomique et constitutive des fibres végétales, associés aux traitements qu'elles ont subi, confèrent à ces dernières des propriétés mécaniques diverses [Bledzki. and Gassan (1999); Baley (2004); John and Thomas (2008)]. De part sa structure cristalline, la cellulose est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé qui est de l'ordre de 136 GPA pour 75 GPA pour la fibre de verre. Annexe 1 regroupe les caractéristiques mécaniques en traction de différentes fibres naturelles. Il en ressort de la littérature différentes (figure 13) valeurs en traction, ces variations sont dues aux caractères naturels de ces fibres. Également nous constatons que pour une même fibre, il y'a des dispersions qui sont dues au climat, à la variété, aux conditions de croissance et de récolte.



**Figure 13.** Courbe contrainte déformation du matériau bois [Abanto (2011)].

### 3.3 Propriété physique

#### 3.3.1 Relation Eau/Bois

Le bois est un matériau naturel hygroscopique. En effet il adsorbe et désorbe l'eau en fonction de l'humidité relative et de la température de l'air qui l'entoure, il va s'imprégner d'une certaine quantité d'eau afin d'établir un équilibre avec son environnement. Les molécules d'eau sont adsorbées par groupes hydroxyles (-OH) qui se trouvent sur les macromolécules d'hémicelluloses, de cellulose amorphe et au niveau de la lignine dans une moindre mesure, ainsi qu'à la surface des parties cristalline de la cellulose. Une fois adsorbée, l'eau joue le rôle de plastifiant pour les chaînes de polymère constituant les parois cellulaires.

Cette spécificité est à l'origine de beaucoup de phénomènes physiques et de disparité dans ses propriétés mécaniques. La teneur en eau du bois (H) est le rapport de la masse ( $M_H$ ) de l'eau qu'il contient à l'air ambiant à la masse anhydre ( $M_0$ ) [Almeida (2006); Chassagne (2006)]. (H) est une grandeur sans dimension souvent exprimée en pourcentage et pouvant facilement avoir des valeurs supérieures à 100%.

$$H = \frac{M_H - M_0}{M_0} \times 100 \quad (1.1)$$

La masse anhydre est obtenue après séchage à  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à obtention d'une masse constante.

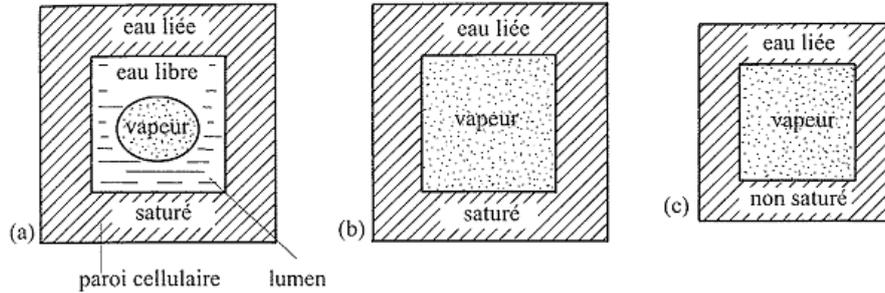
Il faut préciser que le bois contient généralement de l'eau (figure 14) sous trois formes [Navi and Heger (2005)] à savoir :

- L'eau libre : remplit les pores des parois cellulaires et les lumens. Elle est la première à sortir du bois vert durant le séchage car elle n'est retenue que par capillarité.
- L'eau liée : intimement associée et combinée avec la structure de la paroi cellulaire
- L'eau sous forme de vapeur : présente dans la cavité cellulaire, elle est en équilibre avec l'eau d'absorption et d'adsorption.

#### 3.3.2 Point de saturation des fibres (PSF)

Au milieu naturel, le bois gonfle au cours d'une adsorption d'eau ou se rétracte pour s'équilibrer avec les conditions climatiques. Une fois la teneur en eau est de l'ordre de 25 à 30% (tous dépend

des essences), le bois ne contient plus que de l'eau liée. Ce point est connu sous le nom de point de saturation des fibres (PSF).



**Figure 14.** Représentation schématique des trois formes de l'eau en bois. (a) au dessus de PFS, (b) au PFS, (c) en dessous de PFS [Navi and Heger (2005)].

L'hygroscopie du bois a pour conséquence de rendre délicate son utilisation en tant que matériau naturel, pour espérer denter ce matériau, il faut une maîtrise complète du taux d'humidité.

### 3.3.3 Rétractabilité volumique

Comme conséquence directe de l'instabilité dimensionnelle due à l'hygroscopie du bois, on définit la rétractabilité volumique (figure 15) du bois R.

$$R = \frac{V_H - V_0}{V_0} \times 100 \quad (1.2)$$

Avec

$V_H$  volume de l'échantillon au taux d'humidité H,  $V_0$  volume de l'échantillon anhydre.

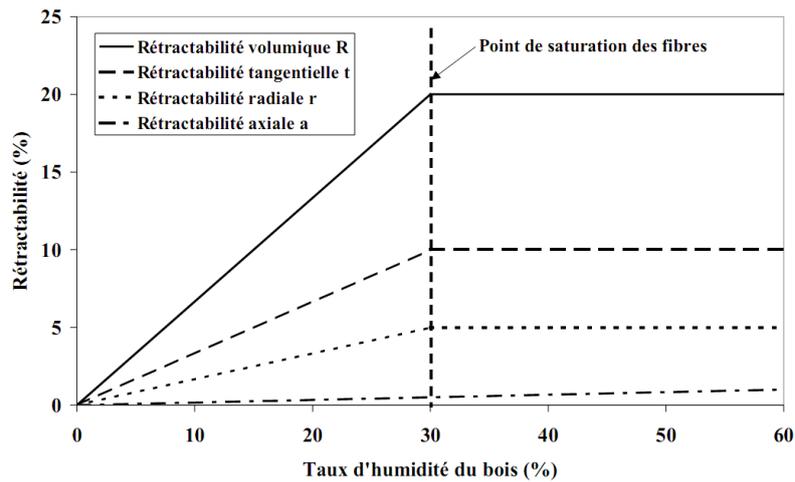


Figure 15. Rétractabilité du bois en fonction du taux d'humidité [Govin (2004)].

L'évolution de la rétractabilité est quasiment linéairement en fonction du taux d'humidité jusqu'à une valeur seuil égale au taux d'humidité du PSF.

### 3.3.4 La masse volumique

Certains bois sont légers (peuplier, épicéa,...) et d'autres sont très lourds (chêne,...). La densité varie non seulement d'une essence à l'autre, mais aussi au sein d'une même espèce. Par ailleurs, elle varie en fonction de la teneur en eau. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\rho_x = \frac{M_x}{V_x} \quad (1.3)$$

Avec

$M_x$  et  $V_x$  masse et volume à l'humidité  $x$ .

### 3.3.5 La porosité

Le réseau cellulaire qui est formé par les parois, les lumens et les ponctuations des différents éléments cellulaires fait du bois un matériau poreux. Une surface spécifique de la matrice solide, espace poreux effectif et la distribution des tailles des pores sont des aspects typiques des ce type de matériaux. La porosité est définie par le rapport du volume de pores ( $V_p$ ) au volume total ( $V_t$ ) du matériau. Plus la porosité est importante, plus le bois est léger et moins il sera résistant, dur et stable[Almeida (2006); Benmansour (2011)].

$$\Phi = \frac{V_p}{V_t} \quad (1.4)$$

#### 4 Le bois de palmier dattier

Le palmier dattier du nom scientifique *Phoenix Dactylifera L* revêt une importance particulière parmi les espèces végétales cultivées au Sahara. Il tient un rôle majeur dans l'équilibre des écosystèmes oasiens, il constitue l'armature des oasis qui sont de véritables îlots de verdure et de vie au milieu du désert; en effet, le recouvrement assuré par sa frondaison (figure 16) crée un micro climat favorable à la vie des hommes et de leurs cultures en partageant la superficie avec les palmiers des palmeraies n'est pas occupée exclusivement par le palmier dattier mais le plus souvent partagée par d'autres espèces associées au palmier et formant les étages de l'agriculture d'oasis (arbres fruitiers et cultures basses). On pourra voir des arbres fruitiers beaucoup moins hauts que les dattiers, plus précisément des arbres fruitiers appartenant à de diverses espèces selon les conditions locales, les traditions et le goût locaux. On trouve entre autre le figuier, l'orangé, grenadier, le bananier etc (figure 16).

Le palmier dattier représente pour les populations des régions sahariennes l'arbre de la providence qui fournit non seulement des dattes dont la composition à prédominance de sucres, riche en minéraux avec présence de quelques protéines et vitamines offrent à la datte une assimilabilité facile et la qualifient pour un aliment énergétique appréciable et pour les hommes et pour les animaux. Le palmier dattier trouve aisément d'autres applications notamment les matériaux destinés à l'artisanat, à la construction ou à la production d'énergie [Barreveld (1993); Peyron (2000)].

Bien entretenue, les premières dattes n'adviennent que vers l'âge de 5 ans avec une production annuelle moyenne de 400-600 kg [Sahari, Barzegar et al. (2007)] et la production continuera au-delà de 60 ans, en moyenne 80 ans car le palmier dattier est centenaire [Raj Bhansali (2010); Agoudjil, Benchabane et al. (2011)]. La production mondiale de dattes en 2010 a atteint 7857455.60 tonnes [FAO (2010)] mais elle ne concerne qu'un nombre limité de pays, les pays arabes constituent la majorité des producteurs. A l'heure actuelle, d'autres pays comme les Etats Unis d'Amérique (Californie et Arizona) [Raj Bhansali (2010)] et l'Espagne initient la culture du palmier dattier [Hadrami and Hadrami (2009)]. La phoeniculture est devenue progressivement une culture de rente. Cependant, l'industrie des dattes dans le monde arabe est encore à l'état embryonnaire [Alshuaibi (2011)], des efforts énormes restent à fournir afin de bien utiliser le grand potentiel du palmier dattier pour la consommation locale et l'exportation.

En Algérie, les palmeraies sont essentiellement localisées dans les zones de la partie sud-est du pays (Biskra, El Oued, Ouargla, Ghardaïa et Adrar), cette culture couvre une superficie de 169 361 ha en 2009 [Agoudjil, Benchabane et al. (2011)]. L'Algérie, de part son effectif de plus de

18,7 millions de palmiers [Boukrouh (2010)] et de 800 variétés, occupe la 6<sup>ème</sup> place [FAO (2010)] parmi les pays producteurs et exportateurs des dattes dans le monde, plus encore, elle occupe le premier rang du point de vue qualité, grâce notamment à la fameuse variété Deglet Nour.



**Figure 16.** Oasis El Hadjeb et sa palmeraie, autre culture adjacentes – Biskra (Algérie)

#### **4.1 Habitat et origine**

L'origine précise du palmier dattier est incertaine à nos jours. Les différentes fouilles archéologiques menées [Tengberg (2012)] conclues que, probablement un ou plusieurs pays situés sur la bande aride afro-asiatique qui s'étend de l'Afrique du Nord au Moyen-Orient.

Le dattier est cultivé par l'homme depuis des millénaires dans les zones chaudes entre l'Euphrate et le Nil vers 4500 - 5000 avant J.C. [Kwaasi (2003)]. Cependant Tengberg [Tengberg (2012)] assure que le dattier remonte encore plus loin dans le temps (tableau 2), Actuellement la culture

du palmier dattier s'étend à travers l'hémisphère nord du globe jusqu'au USA, Australie, Espagne et Afrique du nord (figure 17).



**Figure 17.** Répartition géographique des palmeraies à travers le monde [Hadrami and Hadrami (2009)].

**Tableau 2.** Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) ou moyen orient [Tengberg (2012)]

Site	Period	Dating	Part of the date palm
Dalma 11, United Arab Emirates (UAE)	Neolithic	5290–4940 calBC 4810–4540 calBC	Seeds
H3, Sabiyah, Kuwait	Neolithic	5530–5320 calBC	Seeds, phytoliths
Tell el-Oueili, Iraq	Ubaid period	4700–4200 BC	Seeds, stem/leaf fragments
Eridu, Iraq	Ubaid period	4000 BC	Seeds
Tepe Gaz Tavila, Iran	Neolithic	5400–4800 BC	Seeds
Shahr-i Sokhta, Iran	Bronze Age	2700 BC	Stem/leaf fragments
Tepe Yahya, Iran	Bronze Age	2400–1800 BC	Seed
Konar Sandal, Iran	Bronze Age	3000–2500 BC	Seeds, stem/leaf fragments
Hili 8, UAE	Bronze Age	3000–2000BC	Seeds, stem/leaf fragments
Bat, Oman	Bronze Age	2500–2000 BC	Seeds, stem/leaf fragments, impressions on mud brick
Umm an-Nar, UAE	Bronze Age	2700–2200 BC	Impressions on mud brick
Tell Abraç, UAE	Bronze Age	2500–400 BC	Seeds, stem/leaf fragments, impressions on mud brick
Failaka, Kuwait	Bronze Age	2000–1500 BC	Seeds, stem/leaf fragments
Nud Ziba, UAE	Bronze Age	c. 2000 BC	Seeds
Muweilah, UAE	Iron Age	800-600 BC	Seeds, fruits, stem/leaf fragments
Rumeilah, UAE	Iron Age	800–400 BC	Seeds
Mleiha, UAE	Late Pre-Islamic	400 BC–400 AD	Seeds, stem/leaf fragments
Ed-Dur, UAE	Late Pre-Islamic	1st century AD	Phytoliths
Saar, Bahrain	Bronze Age	1900 BC	Seeds, stem/leaf fragments, phytoliths
Qal'at al-Bahrain, Bahrain	Bronze Age-Achaemenian	2200 BC–300AD	Seeds, stem/leaf fragments, impressions on mud brick
Kush, UAE	Sasanian, Islamic	4th–13th centuries AD	Seeds, stem/leaf fragments, phytoliths

## 4.2 Taxonomie du palmier dattier

Le palmier a été dénommé *Phoenix Dactylifera* L par Linné 1734. Phoenix, nom du dattier chez les Grecs de l'antiquité, considéré chez eux comme l'arbre des phéniciens. Dactylifera vient du latin dactylus dérivant du grecs daktulos, signifiant doigt, en raison de la forme du fruit. Le palmier dattier est une monocotylédone qui appartient à la famille des Palmacées des sous famille des Coryphinées en genre Phoenix [Munier (1973)].

## 4.3 Morphologie du palmier dattier

Le palmier est un arbre de très grande taille à pseudo tronc unique, terminé par un panache de feuilles [Munier (1973); Peyron (2000); Mazoyer (2002)] (figure 18) . C'est une plante dionique à reproduction allogame. Les palmiers mâles sont appelés communément dokkars ou pollinisateurs. La singularité du dattier tient au fait qu'il s'agit d'une herbe [Benchelah and Maka (2006)] géante qui s'élève à plus de 20 mètres de hauteur avec un stipe élancé plutôt qu'un vrai tronc, sans cerne de croissance, terminé par un unique bourgeon d'ou émerge un panache de longues feuilles pennées de 5 a 6 mètres de long.

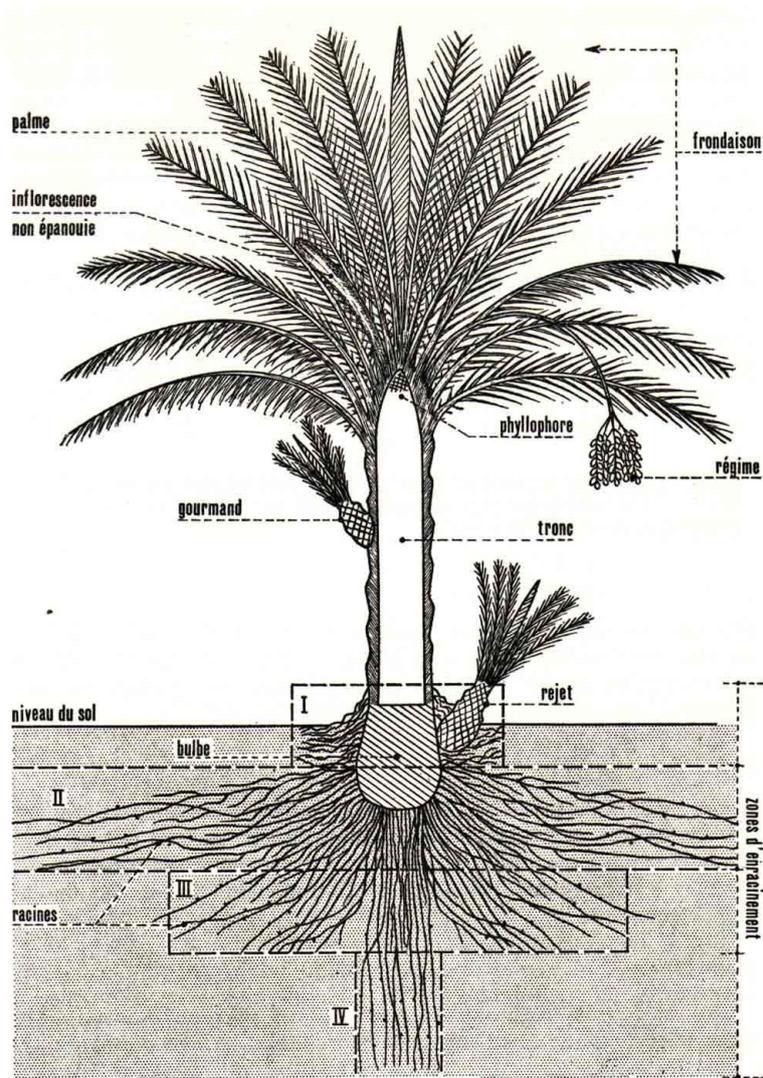
**a) Le stipe :** *Le Phoenix Dactylifera L* produit de nombreux rejets à la base d'un stipe principal qui peut atteindre plus de 20 mètres de hauteur et 30cm de diamètre qui de surcroit ne ramifie pas. Il est recouvert de sortes d'énormes écailles, en fait la base coupée des anciens pétioles, qui forment un motif typique du genre Phoenix [Munier (1973); Peyron (2000); Mazoyer (2002)].

**b) La couronne :** La couronne de *Phoenix Dactylifera L* se compose de 30 à 50 palmes (feuilles) pennées (figure 6), de plus de 4 mètres de longueur. Elles sont émises par le bourgeron terminal [Munier (1973)].

**c) Les palmes :** Les palmes sont des feuilles composées, pennées, insérées en hélice très rapprochée sur le stipe. En moyenne le palmier produit 12 à 15 palmes par an, par ailleurs, pour des raisons de toilettage autant de palmes peuvent être coupés [Agoudjil, Benchabane et al. (2011)]. La palme (figure 19) est composée de trois (3) parties à savoir :

- Le pétiole, de 50cm à plus d'un mètre de longueur, forme la base de la palme et couvert d'épines sur les cotés.
- Le rachis semi-cylindrique, épineux vers la base et dur.
- Les folioles dont les premières situées au dessus des épines sont plus longues que celles situées à l'extrémité supérieure de la palme [Munier (1973)]. Elles sont portées sur les deux cotés du rachis. De forme oblique pliée longitudinalement.

**d) La multiplication :** la multiplication du palmier dattier par graine ou multiplication sexuée ne permet pas la conformité variétale. Toutefois, on pense qu'elle est à l'origine de la plupart des cultivars ou clones actuels. Sa reproduction par graine étant infidèle, le recours à la multiplication végétative ou "djebbars" s'impose. Actuellement, la multiplication par le biais de la culture in vitro ouvre de nouvelles perspectives dans le cadre de la lutte contre le "Bayoud", l'introduction de nouveaux cultivars ou la préservation de ceux menacés de disparition.



**Figure 18.** Morphologie du palmier dattier [Munier (1973); Peyron (2000)].

Figure	Désignation		Références
<p>Figure 19. Représentation schématique de la palme adaptée de [Munier (1973); Peyron (2000)].</p>	(1)	Bassel- end	[Abdel-Rahman, Al-Juruf et al. (1988)]
	(2)	Spine Chouk سربة	[Barreveld (1993)] [Peyron (2000)] //
	(3)	Rachis Mid-rid Stalk ou stem	[Munier (1973); Peyron (2000)] [Iskanderani (2008)], [Barreveld (1993)] [Abdel-Rahman, Al-Juruf et al. (1988)]
	(4)	Leaflet or leaves	[Abdel-Rahman, Al-Juruf et al. (1988)], [Barreveld (1993)], [Tengberg (2012)]
	(5)	Distal end	[Abdel-Rahman, Al-Juruf et al. (1988)]
	(6)	Palme ou djerid Date palm frond, Leaf	[Peyron (2000)] [Abdel-Rahman, Al-Juruf et al. (1988)], [Al-Juruf, Ahmed et al. (1988)], [Al-Juruf, Ahmed et al. (1988)], [Ahmed, Al-Juruf et al. (1990)], [Nasser and Al-Mefarrej (2011)], [Tengberg (2012)] [Barreveld (1993)], [Tengberg (2012)]

Tableau 3. Nomenclature de la palme du palmier dattier

## 5 Conclusion

La biomasse végétale est une matière première, naturelle et de surcroît renouvelable servant à de multiples usages tout au long de l'existence humaine. Cependant, l'élan prit par les différentes activités agricoles et forestières s'est progressivement estompé avec l'avènement au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, de la révolution industrielle. L'épuisement inouï des ressources mondiale en pétrole et en gaz au regard du double objectif souligné et adopté à l'unanimité par les différents pays du monde lors de la COP 21 relatif au concept du développement durable et de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre que représente l'exploitation de ces ressources a conduit à porter un regard neuf sur les agroressources et à redécouvrir qu'elles pouvaient être éco-compatibles, sous certaines conditions, que les efforts de recherche-développement permettront de préciser.

Dans ce contexte, le palmier dattier génère, en Algérie, à lui seul une ressource naturelle, renouvelable estimée à plus de 252 millions de palmes engendrées par l'opération de toilettage annuelle. Cette ressource quant appellera bois de palmier dattier est considérée comme étant un déchet ligneux sans valeur ajoutée et ne trouve pas d'application dans le tissu industrielle national. Les déchets du bois de palmier dattier *Phoenix Dactylifera L* peuvent être classés en 04 types de fibres notamment :

- Le bois (stipe),
- les feuilles,
- la tige (rachis et pétiole),
- Les fibres de surface (leaf)

## Bibliographie

- Besset, J., "Bois et matériaux dérivés." Ed. Techniques de l'ingénieur **C 925**, 1-18.(1987)
- Abanto, F. S., "Comportement mécanique du bois d'érable à sucre en conditions d'humidité relative constantes et variables", Thèse de doctorat, Université de Laval, Québec (2011)
- John, M. J. and S. Thomas, "Biofibres and biocomposites." Carbohydrate polymers **71**, 343-364.(2008)
- Jebrane, M., "Fonctionnalisation chimique du bois par transesterification des esters d'enol", Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France (2009)
- Govin, A., "Aspects physico-chimiques de l'interaction bois - ciment. Modification de l'hydratation du ciment par le bois", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines & l'Université Jean Monnet, Saint Etienne, France (2004)
- Baley, C., "Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites." Ed. Techniques de l'ingénieur.(2004)
- Thiebaud, S., "Valorisation chimique des composés lignocellulosiques; obtention de nouveaux matériaux", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, France (1995)
- Bledzki. and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres." Prog. Polym. Sci. **24**, 221-274.(1999)
- Michaud, F., "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique: aptitude au postformage", Thèse de doctorat, Université de Laval, Canada (2003)
- Navi, P. and F. Heger, "Comportement thermo-hydrromécanique du bois: applications technologiques et dans les structures", Ed Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, France (2005).
- Sedan, D., C. Pagnoux, et al., "Interaction fibre de chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite." Matériaux & Techniques **95**, 133-142.(2007)
- John, M. J. and R. D. Anandjiwala, "Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites." Polymer Composites **29**, 187-207.(2008)
- Dittenber, D. B. and H. V. S. GangaRao, "Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure." Composites Part A **doi:10.1016/j.compositesa.2011.11.019**.(2012)
- Monties, B., "Les polymères végétaux - Polymères pariétaux et alimentaires non azotés", Ed Gautier-Villars, Paris (1980).
- Ragoubi, M., "Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France (2010)
- Sedan, D., "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite", Thèse de doctorat, Université de Limoges, France (2007)

- Reguant, J. and M. Rinaudo (1999). Etude bibliographique sur les matériaux issus de la biomasse végétale. Grenoble, Centre de recherches sur les macromolécules végétales - CNRS.
- Cheumani, Y., "Étude de la microstructure des composites bois/ciment par relaxométrie RMN du proton", Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé I & l'université Bordeaux 1, France (2009)
- Weiss, J. B., C, "les matériaux composites: structures, constituants, fabrication", Ed (1983).
- Almeida, G., "Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées", Thèse de doctorat, Université de Laval, Québec (2006)
- Chassagne, P., "Contribution à la prédiction des conséquences mécaniques des phénomènes thermo-hydrauliques couplés : Application au bois." Phd, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon (2006)
- Benmansour, N., "Etude des performances de produits renouvelables et locaux adaptés aux applications de l'isolation thermique dans le bâtiment", Mémoire de Magistère, Université de Batna, (2011)
- Barreveld, W. H., "Date Palm Products", Ed (1993).
- Peyron, G., "Cultiver le palmier-dattier", Ed Quae, (2000).
- Sahari, M. A., M. Barzegar, et al., "Effect of varieties on the composition of vates (*Phoenix dactylifera* L.) — Note." *Food Science and Technology International* **13**, 269-275.(2007)
- Raj Bhansali, R. (2010). Date palm cultivation in the changing scenario of Indian arid zones: Challenges and prospects. *Desert Plants: Biology and Biotechnology*. K. G. Ramawat. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag: 423-459.
- Agoudjil, B., A. Benchabane, et al., "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood." *Energy and Buildings* **43**, 491-497.(2011)
- Hadrami, I. and A. Hadrami (2009). Breeding Date Palm. *Breeding Plantation Tree Crops: Tropical Species*. P. M. P. S. Mohan Jain, Springer: 191-216.
- Alshuaibi, A., "The econometrics of investment in date production in Saudi Arabia." *The International Journal of Applied Economics and Finance* **5**, 177-184.(2011)
- Boukrouh, A. (2010). Algerian date 'Deglet Nour' to be labelled by Algerian authorities. *Echorouk*. Algiers. **Vol. 2889**: p. 4.
- Tengberg, M., "Beginnings and early history of date palm garden cultivation in the Middle East." *Journal of Arid Environments* "[doi:10.1016/j.jaridenv.2011.11.022](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.11.022)".(2012)
- Kwaasi, A., "Date palm and sandstorm borne allergens." *Clinical & Experimental Allergy* **33**, 419-426.(2003)
- Munier, P., "Le palmier-dattier", Ed Techniques agricoles et productions tropicales, (1973).
- Mazoyer, M., "Larousse agricole: le monde paysan au XXI<sup>e</sup> siècle", Ed (2002).
- Benchelah, A. C. and M. Maka, "Les dattes, de la préhistoire à nos jours." *Phytothérapie* **1**, 43-47.(2006)
- Abdel-Rahman, H., R. Al-Juruf, et al., "Physical, mechanical and durability characteristics of date palm frond stalks as reinforcement in structural concrete." *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* **10**, 175-181.(1988)
- Iskanderani, F. I., "Physical properties of particleboard panels manufactured from *Phoenix dactylifera*-L (date palm) mid-rib chips using ureaformaldehyde binder." *International Journal of Polymeric Materials* **57**, 979-995.(2008)
- Al-Juruf, R., F. Ahmed, et al., "Determination of the Thermal Conductivity of Date Palm Leaves." *Journal of Building Physics* **11**, 152-157.(1988)

## *Chapitre I*

- Al-Juruf, R. S., F. A. Ahmed, et al., "Development of heat insulation material using date palm leaves." *Journal of Thermal Insulation* **11**, 158-164.(1988)
- Ahmed, F. A., R. S. Al-Juruf, et al., "A homogeneous building material from date palm fronds." *Building and Environment* **25**, 183-187.(1990)
- Nasser, R. A. and H. A. Al-Mefarrej, "Midribs of Date Palm as a Raw Material for Wood-Cement Composite Industry in Saudi Arabia." *World Applied Sciences Journal* **15**, 1651-1658.(2011)

## CHAPITRE II

## Chapitre II

# Le ciment Portland

Le ciment Portland	35
1 Mortiers et bétons	37
2 Constituants du mortier	38
2.1 Le ciment	38
2.2 Granulats (sable)	38
2.3 Eau	39
2.4 Adjuvants	39
3 Le ciment Portland	39
3.1 Composition chimique du ciment Portland	40
3.2 Principe de fabrication du ciment Portland	41
3.3 Hydratation du ciment	42
3.4 Prise et durcissement du ciment	43
3.5 Cinétique d'hydratation	44
3.5.1 Les microscopies optique et électronique	44
3.5.2 La résonance magnétique nucléaire (RMN)	45
3.5.3 Analyse thermique	45
3.5.4 Analyse de la résistance mécanique	45
3.5.5 La mesure de la chaleur d'hydratation	45
3.6 Propriétés mécanique du ciment	46

*Chapitre II*

4 Conclusion	47
Bibliographie	48

L'utilisation de matériaux capables de lier entre eux différents constituants est très ancienne. En effet, les Egyptiens utilisaient du gypse impur calciné. De leur côté les Grecs et les Romains employaient du calcaire calciné puis apprirent plus tard à ajouter à la chaux et l'eau du sable, des pierres ou encore des fragments de tuiles réalisant ainsi les premiers bétons de l'histoire. Souvent employés comme synonymes, le béton et le ciment sont deux produits différents. Le ciment est une poudre grise ultrafine qui lie le sable et les pierres pour former une masse de béton. Autrement dit, le ciment est l'ingrédient clé du béton.

La qualité du ciment et son utilisation ont connu un déclin général durant le moyen âge et ce n'est qu'au XVIII<sup>e</sup> siècle qu'on réalise des avancées significatives.

- 1756, John Smeaton découvre que les chaux qui présentent les meilleures propriétés « hydrauliques » sont celles contenant des matières argileuses.
- 1796, James Parker développe le ciment « Roman » en calcinant certains gisements naturels de calcaire argileux.
- 1817, Louis Vicat met en évidence le rôle de l'argile et fabrique un ciment à partir d'un mélange intime de calcaire et d'argile.
- 1824, Joseph Aspdin fabrique et brevète une chaux hydraulique à laquelle il donne le nom de ciment Portland, car sa couleur, après prise, ressemble à la pierre de Portland.
- 1845, Issac Johnson observe que les morceaux trop cuits donnent, après mouture, un meilleur ciment. Il augmente la température de cuisson et donne naissance au véritable ciment Portland

## **1 Mortiers et bétons**

De par sa cohésion et sa résistance, le ciment (pâte) durci peut être utilisé seul. Cependant, pour des raisons économiques on y associe une certaine quantité de sable pour obtenir un mortier, et ou en addition avec des granulats de plus grandes dimensions pour obtenir du béton. Dans ce dernier cas, les granulats (agrégats) permettent de réduire le retrait du béton et dissipent la chaleur pendant le processus de durcissement.

D'une manière générale nous pouvons classer les différents produits à base de ciment en fonction de leurs rapports massiques ou volumiques des constituants. En utilisant les rapports « ciment/sable/granat/eau » nous pouvons représenter la pâte par 1/0/0/0,25, le mortier par 1/3/0/0,5.

## 2 Constituants du mortier

### 2.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, qui est défini comme étant une matière inorganique finement moulue (de moins d'1  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ ) [Cheumani (2009)] qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit aussi bien à l'air que sous eau liant ainsi les mélanges granulaires auxquels il est intégré. La réaction chimique entre la poudre de ciment et l'eau produit un minéral artificiel insoluble. Plus les grains de ciment sont fins, plus la réaction [Sedan (2007); Espinoza Herrera (2009)] s'opère rapidement. Il existe deux grandes familles de ciment :

- Les ciments Portland, constitués majoritairement de silice ( $\text{SiO}_2$ ) et de chaux ( $\text{CaO}$ ) sont utilisés principalement dans les bétons de bâtiment et les ouvrages de génie civil ;
- Les ciments alumineux qui se composent essentiellement d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et de chaux. Ils ont été développés au début du 20<sup>ème</sup> siècle par Bied [Sedan (2007)]. En raison de leur résistance aux attaques chimiques, de leur prise rapide ou de l'absence de chaux libre, ils sont utilisés en génie civil pour la confection de sols industriels, d'ouvrages d'assainissement ou des mises en service rapides, et dans la réalisation de réfractaires monolithiques utilisés dans l'industrie sidérurgique ou verrière.

### 2.2 Granulats (sable)

Les granulats sont des matériaux inertes, sables graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des mortiers et bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 mm et 125 mm dont l'origine peut être naturelle (roulés ou concassés), artificielle (schiste expansé, argile expansé, etc.) ou provenant de recyclage. Il est préférable qu'ils soient de forme cubique ou sphérique plutôt qu'aplatis ou feuilletés. De plus les granulats interviennent par leur origine (basalte, calcaire granit, etc.), et leurs caractéristiques chimiques.

Les spécifications auxquelles doivent satisfaire les granulats sont précisées dans la norme XP P 18-540 d'octobre 1997. Cette norme regroupe les caractéristiques que doivent présenter en général les granulats en fonction de chaque utilisation. Egalement, la norme XP P 18-540 clarifié les appellations des différentes classes granulaires, elle parle du sable tous granulats dont le diamètre du plus gros élément est inférieur à 6,3 mm.

La classe des granulats est définie par un tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en mm :

0,063 – 0,08 – 0,10 – 0,125 – 0,16 – 0,2 – 0,25 – 0,315 – 0,4 – 0,5 – 0,63 – 0,8 – 1 – 1,25 – 1,6 – 2 – 3,15 – 4 – 5 – 6,3 – 8 – 10 – 12,5 – 14 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125.

### **2.3 Eau**

Indispensable à l'hydratation du ciment, l'eau de gâchage contribue aussi à l'ouvrabilité du mortier. Elle doit être exempte d'impuretés nuisibles telles que les acides, les alcalins et les sels. L'eau ne doit pas être employée avec excès sous risque de diminuer les résistances mécaniques et la durabilité du mortier. En effet, un excès d'eau favorise les hétérogénéités, la ségrégation et le ressuage. En revanche un manque d'eau provoque la formation de nids de sable et augmentation du pourcentage du vide. La plasticité du mortier est évaluée par des essais d'affaissement.

### **2.4 Adjuvants**

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise actuellement d'une façon systématique, en faible quantité, pour améliorer les qualités des mortiers et bétons à l'état frais ou à l'état durci. Les adjuvants sont classés en trois grandes catégories suivant la norme NF EN 934-2, 2002 :

- Selon l'ouvrabilité : plastifiants réducteurs d'eau, super-plastifiants
- Selon les cinétiques de prise et de durcissement : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise.
- Adjuvants modifiant certaines propriétés du béton (entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse, etc.).

## **3 Le ciment Portland**

Il existe une grande variété du ciment, la norme Européenne EN 197-1 (tableau II.1) répertorie de manière précise la composition de base des ciments en les classant en cinq familles principales. Pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs des constituants qu'ils comportent.

**Tableau II. 1.** Différents types de Ciment Portland [Festa and Dreux (1998)]

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % des constituants	Teneur en constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment portland	95 à 100%		0 à 5%
CPJ-CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94%	6 – 20% de l'un quelconque, sauf dans les cas où le constituant est des fumés de silice auquel cas la proportion est limité à 10%. 21 – 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus.	0 à 5%
CPJ-CEM II/B		65 à 79%		
CHF-CEM III/A CHF-CEM III/B CLK-CEM III/C	Ciment de hauts fourneaux	35 à 64% 20 à 34% 5 à 19%	36 – 64% laitier haut fourneau 66 – 80% laitier haut fourneau 81 – 95% laitier haut fourneau	0 à 5%
CPZ – CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90%	10 – 35% de pouzzolane, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10% 36 – 55% comme ci-dessus.	0 à 5%
CPZ – CEM IV/B		45 à 64%		
CLC – CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64%	18 – 30% laitier haut fourneau et 18 – 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. 31 – 50% de chacun des deux constituants comme ci-dessus.	0 à 5%
CLC – CEM V/B		20 à 39%		

### 3.1 Composition chimique du ciment Portland

D'un point de vue minéralogique, le ciment est constitué de quatre phases considérées comme les principaux constituants issues de la combinaison chimique de la chaux (CaO) avec la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La composition minéralogique moyenne du ciment est donnée au tableau II.2.

**Tableau II. 2.** Composition minéralogique du Ciment Portland [Neville (2000); Sedan (2007); Cheumani (2009); Espinoza Herrera (2009)]

Désignation chimique	Formules	Abréviation cimentaire	Dénomination	Masse (%)
Silicate tricalcique	3CaO, SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	Alite	50-70
Silicate bicalcique	2CaO, SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	Bélite	10 à 25
Aluminate tricalcique	3CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	Aluminate tricalcique ou célite	0,5 à 13
Alumino-ferrite tétracalcique	4Ca.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	Ferrite	8

Outre les composés principaux indiqués au tableau II.2, il existe des composés mineurs tels que MgO, TiO<sub>2</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O [Neville (2000); Sedan (2007)]

- En chimie cimentaire, on utilise des notations abrégées pour décrire chaque oxydes notamment : C=CaO ; S=SiO<sub>2</sub> ; A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; H=H<sub>2</sub>O ;  $\bar{S}$ =SO<sub>3</sub>.

### **3.2 Principe de fabrication du ciment Portland**

La figure II.1 reprends schématiquement les différentes étapes de la fabrication du ciment portland, ce dernier est préparé à partir d'un mélange homogène de calcaire et d'argile dont les proportions sont respectivement 80% et 20% [Sedan (2007); Cheumani (2009)] en masse, cuit à une température qui avoisine 1450°C [Neville (2000)], température à laquelle le matériau fond partiellement jusqu'à former des nodules connus sous le nom de clinker dont la teneur massique est supérieure à 95% [Cheumani (2009)]. Le clinker est refroidi puis broyé en une poudre fine, opération au cours de laquelle on ajoute le gypse (3 à 5% en masse) dont le rôle est de réguler la prise. La couleur grise du ciment courant est due principalement à la présence d'oxydes de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et de manganèse (MnO<sub>2</sub>) [Espinoza Herrera (2009)]. Il est toutefois possible d'obtenir du ciment blanc en employant des matières premières très pauvres en ces oxydes [Cheumani (2009)].

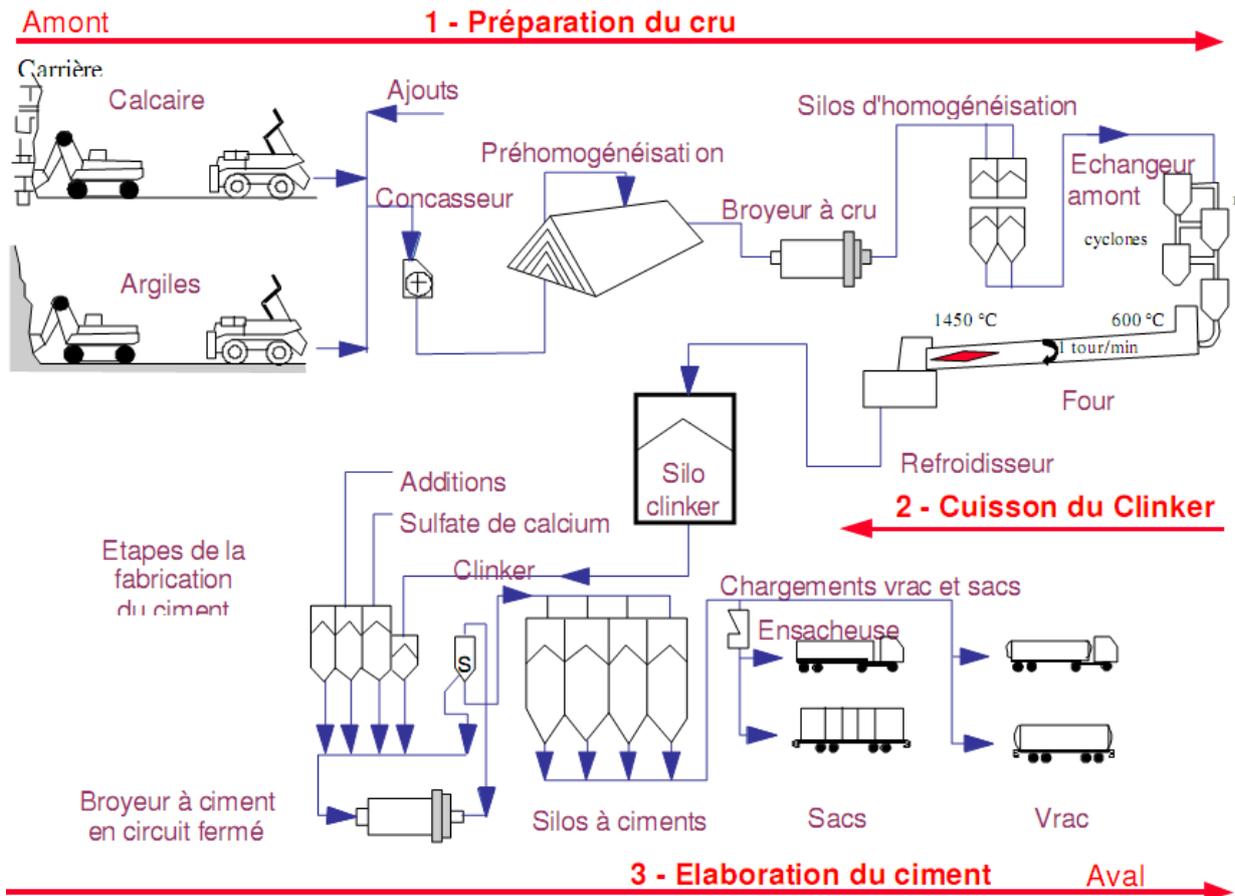
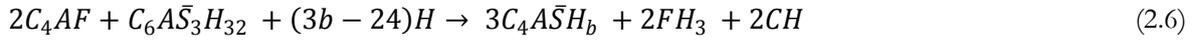
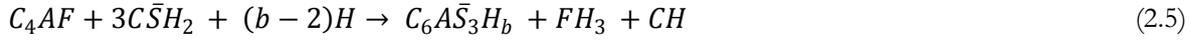
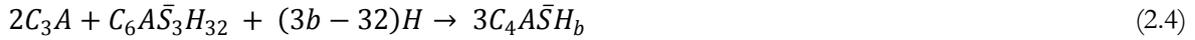


Figure.II. 1. Fabrication du ciment Portland [ANGLLET (2006)].

### 3.3 Hydratation du ciment

Par définition, le terme hydratation désigne l'ensemble des réactions chimiques qui se passent dès le début du gâchage entre chaque constituant du ciment et de l'eau. Ces réactions beaucoup plus complexes [Taylor (1997)], produisent une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés, stables avec formation de cristaux en aiguilles [Festa and Dreux (1998)] plus ou moins enchevêtrés produisant la prise. Chacune des phases du ciment à savoir : Alite ( $C_3S$ ), Bélite ( $C_2S$ ), Céliste ( $C_3A$ ), Ferrite ( $C_4AF$ ) a un rôle spécifique dans l'acquisition des différentes propriétés du ciment, elles réagissent à un temps et à un temps différents.





Ou a et b représentent respectivement les rapports C/S et H/S dans les silicates de calcium hydratés noté CSH.

L'hydratation des phases Alite ( $C_3S$ ) et Belite ( $C_2S$ ) produit de l'hydroxyde de calcium ou encore appelé Portlandite (CH) et des CSH. Le gypse est incorporé dans la composition du ciment de façon à ralentir le phénomène de prise rapide engendré par la vitesse élevée de l'hydratation du  $C_3A$ .

L'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) est responsable du phénomène de prise rapide qui conduit à la formation d'aluminates hydratés, sans que la tenue mécanique de l'ensemble soit satisfaisante. Pour ralentir ce phénomène le gypse est mélangé dans la composition du ciment. Ainsi, le sulfate contenu dans le gypse réagit avec les aluminates pour former du Tri-Sulfo-Aluminate de calcium (ettringite) qui précipite autour du ( $C_3A$ ) et empêche sa dissolution. Lorsque le gypse est entièrement consommé, l'ettringite se décompose pour former du Mono-Sulfo-Aluminate  $C_4A\bar{S}H_b$  ( $AF_m$ ).

Les CSH constituent la majeure partie de la phase liante de la pâte de ciment hydratée. Cependant la phase la plus soluble est la Portlandite (CH) qui maintient par son équilibre de solubilité le pH élevé de la solution interstitielle (pH variant approximativement entre 12 et 13).

### 3.4 Prise et durcissement du ciment

Au cours de l'hydratation du ciment, la pâte se rigidifie puis se durcit. Cependant, la prise du ciment n'est pas uniquement liée à la quantité d'hydrates formée. La structuration et la prise peuvent être caractérisées par deux processus fondamentaux : la coagulation et la rigidification. La coagulation correspond à la formation de contacts entre particules par interactions réversibles. Ce phénomène est principalement déterminé par la concentration en ions calcium présente en solution interstitielle. Une valeur minimale est nécessaire pour que la coagulation ait lieu. La rigidification des particules coagulées, phénomène irréversible, est assurée par la

formation d'hydrates au niveau de la zone de contact. A ce stade, la rigidité de la pâte est proportionnelle à la quantité d'hydrates précipitée.

On l'observe généralement un temps de la prise du ciment entre 2 h et 6 h après le gâchage, bien que le temps de prise est affecté par différents facteurs comme la finesse du ciment, le rapport E/C initial [Bomble (1976)], la présence des matières organiques dans l'eau, la composition chimique (principalement la proportion de gypse), la température ambiante ainsi que la présence des adjuvants solubles [Festa and Dreux (1998); Espinoza Herrera (2009)]. La méthode normalisée pour la détermination du temps de prise est celle de l'aiguille de Vicat (norme NF EN 196-3), cet essai consiste à mesurer, à différentes échéances, l'enfoncement d'une aiguille de diamètre et de masse fixés dans une éprouvette de pâte de ciment de consistance normalisée. On obtient ainsi les temps de début et de fin de prise définis par des hauteurs normalisées d'enfoncement de l'aiguille. Toutefois, la variation de la température (courbe d'hydratation), de la conductance électrique, de la vitesse de propagation d'une onde sonore en fonction du temps permettent également d'obtenir ces informations [Beraldo (1994)]

### **3.5 Cinétique d'hydratation**

L'hydratation du ciment est un phénomène complexe au cours duquel les différentes phases du matériau s'hydratent selon des cinétiques très différentes. L'évolution de l'hydratation peut être déterminée par différentes méthodes, telles que :

#### **3.5.1 Les microscopies optique et électronique**

La démarche consiste à obtenir une image d'une section polie d'éprouvette du matériau en cours d'hydratation, à partir de laquelle on quantifie, par analyse d'image, la proportion de chaque phase en présence (ciment anhydre, hydrates, granulats, porosité, etc.) [Mounanga (2003)].

##### **3.5.1.1 La diffractométrie aux rayons X (DRX)**

L'analyse par diffractométrie aux rayons X (DRX) permet de quantifier le ciment non hydraté, ou par analyse d'images prises sur une section polie du matériau au microscope électronique à balayage [Kamen (2007)]. Mais cette méthode nécessite un temps conséquent et un grand nombre d'images pour pouvoir évaluer la proportion de chaque phase (ciment anhydre, hydrates, porosité...etc.).

### **3.5.2 La résonance magnétique nucléaire (RMN)**

La résonance magnétique nucléaire (RMN) s'adapte bien à l'étude des matériaux peu ou pas cristallisés. La RMN de la silice permet de quantifier les silicates anhydres et les C-SH présents dans l'échantillon. Alors que la RMN de l'aluminium permet de quantifier les différentes phases contenant de l'aluminium, le CA, ettringite et mono-sulfates de calcium hydraté [Mounanga (2003)].

### **3.5.3 Analyse thermique**

Le principe de l'analyse thermique consiste à suivre l'évolution de la masse d'un échantillon de matériau porté à une température suffisamment élevée pour provoquer sa déshydratation complète. L'analyse thermique recouvre la méthode de perte au feu donnant la quantité global d'eau liée et la thermogravimétrie contribue à quantifier chaque type [Loukili (1996); Loukili, Khelidj et al. (1999); Mounanga (2003)].

### **3.5.4 Analyse de la résistance mécanique**

La résistance mécanique est un indicateur direct du bon déroulement du processus assez complexe de l'hydratation. En effet, plusieurs chercheurs se sont intéressés aux corrélations existant entre ces différents indicateurs de l'hydratation. Les auteurs [Mindess, Young et al. (1978); Byfors (1980)] ont montré le lien quasi-linéaire entre la résistance en compression du béton et son degré d'hydratation.

### **3.5.5 La mesure de la chaleur d'hydratation**

Cette méthode exploite le caractère fortement exothermique du processus d'hydratation. Rigoureusement parlant, la chaleur d'hydratation n'est pas proportionnelle à la quantité de liant hydraté car elle est variable d'une phase de clinker à l'autre. L'expérience a montré qu'elle constitue un indicateur fiable de la progression de l'hydratation [Espinoza Herrera (2009)]. Parmi les méthodes mise en œuvre pour mesurer la chaleur d'hydratation les calorimétries adiabatique et semi-adiabatique. En effet, le matériau frais est introduit dans une enceinte relativement isolante d'un point de vue thermique et une sonde thermométrique plongée au sein du matériau enregistre l'évolution de sa température, de cette manière, on considère que l'hydratation du matériau cimentaire se caractérise par une seule réaction globale qui présente cinq phases (figure II.2). La connaissance de la capacité thermique du matériau et des déperditions thermiques (très faibles dans la configuration adiabatique et estimées par étalonnage de l'enceinte dans la configuration semi-adiabatique) donne accès à la chaleur d'hydratation du matériau. Notons que la calorimétrie semi-adiabatique fait l'objet d'une norme française NF P 15-435.

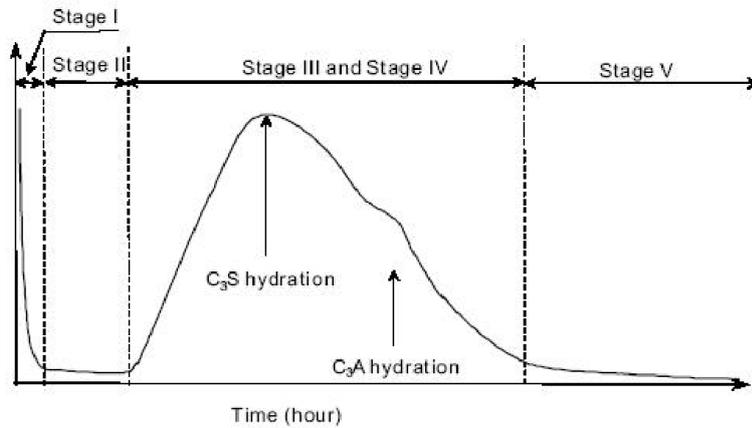


Figure.II. 2. Evolution du flux de chaleur durant l'hydratation du ciment Portland

### 3.6 Propriétés mécanique du ciment

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours, la norme spécifiant une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes :

Tableau II. 3. Caractéristiques mécaniques des ciments courants [Festa and Dreux (1998)]

Classe des ciments	Résistance à 2 jours [MPa]	Résistance minimale à 28 jours [MPa]	Résistance maximale à 28 jours [MPa]
32.5	-	≥32.5	≤52.5
32.5 R	≥13.5	≥32.5	≤52.5
42.5	≥12.5	≥42.5	≤62.5
42.5 R	≥20	≥42.5	≤62.5
52.5	≥20	≥52.5	-
52.5 R	≥30	≥52.5	-

## **4 Conclusion**

Les mortiers et bétons, mélange de plusieurs composants très différents dont les uns sont actifs et les autres inertes, présentent des caractéristiques qui sont fonction de celle de ces composants

Ce deuxième chapitre est consacré aux mortiers, plus précisément, à ses aux différents constituants à savoir le ciment portland, le sable, l'eau et les adjuvants. Nous avons passé en revue les caractéristiques intrinsèques de chacun des composants. Nous nous sommes attardés sur la matrice ciment portland car une fois en contact avec l'eau plusieurs phénomènes très complexes à l'image de l'hydratation se manifestent. Cette dernière est influencée par plusieurs facteurs dont nous aurons à les détaillés dans le chapitre les composites bois-ciment.

## Bibliographie

- Cheumani, Y., "Étude de la microstructure des composites bois/ciment par relaxométrie RMN du proton", Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé I & l'université Bordeaux 1, France (2009)
- Sedan, D., "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite", Thèse de doctorat, Université de Limoges, France (2007)
- Espinoza Herrera, R., "Panneaux en gypse et particules de bois renforcés avec du ciment Portland", **Thèse** de doctorat, Université Laval, (2009)
- Festa, J. and G. Dreux, "Nouveau guide du béton et de ces constituants", Ed Eyrolles, (1998).
- Neville, A. M., "Propriétés des bétons", Ed Eyrolles, (2000).
- ANGLET, L. C., "Compléments de cours." EDC MATERIAUX. (2006)
- Taylor, H. F. W., "Cement chemistry", Ed Thomas Telford Services Ltd, (1997).
- Bombed, J., "Prisométrie des pâtes de ciment-Rhéographe et prisomètre automatique CERILH." *Revue des Matériaux de Construction* 113-124. (1976)
- Beraldo, A. L., "Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite végétale-ciment à variation dimensionnelles limitées vis à vis des variations de l'humidité", Thèse de doctorat, Nancy 1, (1994)
- Mounanga, P., "Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge: hydratation, retraits, propriétés thermophysiques", Thèse de doctorat, Nantes, (2003)
- Kamen, A., "Comportement au jeune âge et différé d'un bfup écrouissant sous les effets thermomécaniques", Thèse de doctorat, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, (2007)
- Loukili, A., "Etude du retrait et du fluage de bétons à Ultra-Hautes Performances", Thèse de doctorat, E,N Nantes, (1996)
- Loukili, A., A. Khelidj, et al., "Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete." *Cement and Concrete Research* **29**, 577-584. (1999)
- Mindess, S., J. F. Young, et al., "Creep and drying shrinkage of calcium silicate pastes I. Specimen preparation and mechanical properties." *Cement and Concrete Research* **8**, 591-600. (1978)
- Byfors, J., "Plain concrete at early ages", Ed Cement-och betonginst., (1980).

## CHAPITRE III

## Chapitre III

# Composites bois – ciment (CBC)

Composites bois – ciment (CBC)	49
1 Généralités sur les matériaux composites	51
1.1 Définition	51
1.2 Marché des composites	52
2 Constituants des composites	53
2.1 Matrice	53
2.1.1 Matrices polymères	54
2.1.2 Matrices minérales	56
2.1.3 Matrices métalliques	56
2.2 Renfort	56
3 Les composites biomasse végétale ciment	57
3.1 Enjeux et intérêts des CBC	57
3.2 Caractéristiques de CBC.	58
3.2.1 Propriétés des CBC	58
3.3 Compatibilité bois – ciment	59
3.3.1 Evaluation de la compatibilité bois ciment	61
3.3.2 Traitement permettant d'améliorer la compatibilité bois ciment	63
4 Etat de l'art	65

*Chapitre III*

5 Conclusion	68
Bibliographie	69

Dans ce chapitre, nous allons décrire les composites d'une manière générale et les composites à renfort végétale en particulier. Les composites à base de bois représentent une gamme très diversifiée de produits que l'on peut classer selon leur format ou le niveau de déstructuration de la matière première. On constatera que le plus gros des travaux effectués dans le domaine des composites et plus précisément les composites bois – ciment (CBC) concernent la caractérisation mécanique de ces matériaux. Néanmoins, diverses difficultés inhérentes à l'élaboration de ce genre de matériaux subsistent au développement de ce type de produit, on citera les problèmes relatifs à l'adhésion des particules végétales avec le ciment, la compatibilité des particules avec la matrice cimentaire et de leur durabilité avec celle-ci.

L'utilisation des matériaux composites connaît un essor rapide. Unissant légèreté et résistance mécanique exceptionnelle, ces matériaux permettent en effet des applications toujours plus nombreuses dans des industries aussi importantes que la construction automobile, le génie civil et l'aéronautique [John and Thomas (2008)]. Si les premières générations de composites démontraient des propriétés qui étaient la somme des propriétés des constituants, les composites modernes permettent des synergies intéressantes pour satisfaire aux nouvelles exigences de conception, de fabrication, de résistance, de sécurité et de confort.

## **1 Généralités sur les matériaux composites**

### **1.1 Définition**

Le terme matériau composite évoque un matériau différent des matériaux macroscopiquement homogène. Il est défini par la norme AFNOR NF T50-100 comme étant un produit solide comportant au moins deux phases physique distinctes, composé d'un matériau de liaison (matrice) et d'un matériau sous forme granulé, fibreuse ou lamellaire (renfort) [Gay (2005)]. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau III.1 ci-dessous.

Tableau III.1. Exemple de matériaux composites [Gay (2005)]

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
<p>1. Composites à matrice organique</p> <p>Papier, carton Panneaux de particules Panneaux de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatiques Stratifiés</p> <p>Plastiques renforcés</p>	<p>Résine/charges/fibres cellulosiques Résine/copeaux de bois Résine/fibres de bois Résines souples/tissus Elastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre, carbone, etc. Résines/microsphères</p>	<p>Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sport, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples</p>
<p>2. Composites à matrice minérale</p> <p>Béton Composite carbone-carbone Composite céramique</p>	<p>Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibres de céramiques</p>	<p>Génie civil Aviation, espace, sport, biomédecine Pièces thermo-mécaniques</p>
<p>3. Composites à matrice métallique</p>	<p>Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone</p>	<p>Espace</p>

## 1.2 Marché des composites

Les statistiques récentes de la production mondiale des matériaux composites tous types confondus (figure III.1) rapportent qu'elle se compte en million de tonnes (7 à 8 Mt) [Bathias and Coll (2005)] et en forte progression.

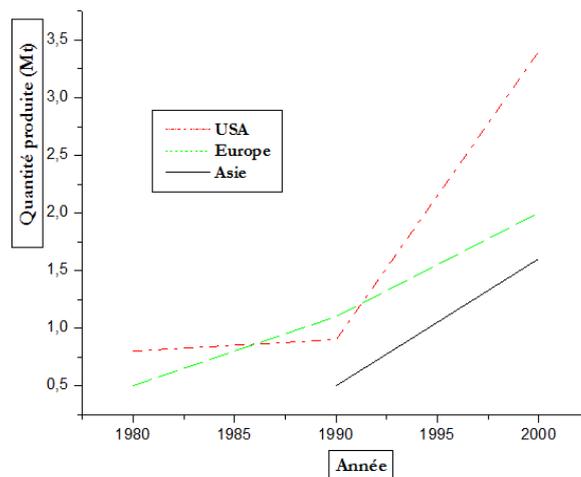


Figure.III. 1. Production mondiale des matériaux composites [Bathias and Coll (2005)].

Le marché Américain, de loin le plus important, représente 3,4Mt de la transformation mondiale de composites. Il est étalonné par l'Europe 2 Mt et l'Asie soit 1,6 Mt. La croissance du marché est plus forte en Asie qu'aux Etats-Unis.

## **2 Constituants des composites**

### **2.1 Matrice**

La matrice dans un composite sert de liant pour les éléments de renfort en assurent une protection contre divers facteurs (humidité, température etc.), et de répartir les contraintes. La matrice commande totalement la tenue chimique au solvant du composite, sa tenue thermique et sa tenue au feu [Bathias and Coll (2005)]. Les matrices usuellement utilisées dans l'élaboration de composites à base de fibres naturelles vont des thermoplastiques, tels le polypropylène (PP) qui est un polymère de grande diffusion, le polyéthylène téréphtalates (PET), les polyamides (PA) aux thermodurcissables tels que certain polyesters insaturés, les époxydes (adhésifs, résines d'enrobage, etc.) aux résines phénoliques (tenue au feu et à haute température).

L'incorporation des fibres végétales dans une matrice polymère existe depuis de nombreuses décennies. Il ressort de la littérature que les premiers biocomposites sont mis sur le marché en 1908 en associant une résine phénolique (ou de mélamine-formaldéhyde) au coton ou au papier ont été développés pour la réalisation industrielle de panneaux et de tubes à des fins électronique [Bledzki. and Gassan (1999); Sedan (2007)]. En 1896, également, on fabrique des sièges d'avion et des réservoirs de carburant en liant de fibres naturelles avec une faible teneur en polymères [Bledzki. and Gassan (1999)]. Au cours de l'année 1978, l'Inde avait conçu des maisons et un silo dans la localité de Madras à partir de polyester renforcé par des fibres de jute[Bledzki. and Gassan (1999); Sedan (2007)].

De nos jours, l'industrie automobile accorde une attention toute particulière quand au remplacement des renforts traditionnels par des fibres végétales, en effet, le constructeur automobile Mercedes-Benz, utilise pour son modèle « classe A », un composite renforcé par des fibres de lin et de sisal, destiné aux garnitures intérieures de portières, de dossiers de sièges, aux supports de moquette ou à l'habillage du coffre. Pour cette application, des non-tissés à base de fibres végétales et de fibres thermoplastiques sont transformés par compression en température (TRE Thermoplastique Renforcé Estampable) [Bledzki. and Gassan (1999); Sedan (2007); John and Thomas (2008)]. Pratiquement tous les constructeurs automobiles d'Allemagne (Daimler Chrysler, Mercedes, Volkswagen, Audi, BMW, Ford et Opel)) utilisent les biocomposites dans divers applications [John and Thomas (2008)].

## 2.1.1 Matrices polymères

### 2.1.1.1 Famille des résines thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des matériaux synthétiques constitués de polymères linéaires ou ramifiés. Les matériaux thermoplastiques ont la capacité d'être moulés et mis en forme une fois leur température suffisamment élevée (PP, PE, PVC). L'emploi des matrices thermoplastiques présentent un certains nombres d'avantages listés ci-dessous. Cependant sont utilisation ne s'est développé qu'à partir des années 1970.

- 1) Une facilité de conservation, sous forme de sous produits, à température ambiante sans limite de temps ;
- 2) Des cycles de transformations plus couts ;
- 3) Une meilleure tenue à l'impact et à la fatigue ;
- 4) La possibilité de réparation et de liaisons par soudage ;
- 5) Une potentialité de recyclage supérieure aux thermodurcissables.

Trois classes de matrices thermoplastiques se développent en parallèle:

- 1) Les polymères de grande diffusion sont principalement le polypropylène, seul ou sous forme de copolymère avec le polyéthylène. Ces produits sont à comparer aux polyesters insaturés car on obtient un bon compromis coût/performance. La tenue thermomécanique se situe entre 60 et 90°C sans renfort.
- 2) Les polymères techniques, dont les plus utilisés sont les polyamides et les polyesters thermoplastiques mais également les polyéthylméthacrylates, les polyacétates et les polycarbonates. La tenue thermomécanique se situe entre 60 et 120°C.
- 3) Les polymères hautes performances pour applications de type aéronautiques sont typiquement le PEEK, le PPS, le PEI, le PES. La tenue thermomécanique est de l'ordre de 140°C.

### 2.1.1.2 Famille des résines thermodurcissables

Les thermodurcissables englobent entre autres les polyesters, phénoliques, mélamines, silicones, polyuréthannes, époxydes. Ces résines dites réticulés représente 70% de l'ensemble de matériaux composites [Bathias and Coll (2005)]. Le choix du type de résine à incorporer dans le composite est conditionné par l'usage de ce dernier à savoir :

- Les résines époxydes pour les applications structurales ;
- Les résines vinylesters pour leur tenue à la corrosion ;
- Les résines phénoliques pour leur tenue au feu et les applications ablatives (absorption de chaleur par volatilisation de matière et formation de coke isolant).

Les résines thermoplastiques sont certes plus faciles à mettre en forme et à usiner, mais elles sont beaucoup moins résistantes que les thermodurcissables. Chaque polymère de ces deux groupes possède un ensemble de propriétés (tableau III.2) et de procédés de fabrication spécifiques.

**Tableau III. 2.** Propriétés mécaniques de quelques thermoplastiques et thermodurcissables adaptées de [Gay (2005)].

Matrices résineuses	$\rho$	$E$	$G$	$\nu$	$\sigma_{\text{rupture}}$	$A$	$\alpha$	$\lambda$	$C$	$T_{\text{max}}$
	kg/m <sup>3</sup>	Mpa	Mpa		Mpa	%	°C <sup>-1</sup>	W/m×°C	J/kg×°C	°C
<b>Thermodurcissables</b>										
Epoxyde	1200	4500	1600	0,4	130	2 (100°C) 6 (200°C)	11×10 <sup>-5</sup>	0,2	1000	90-200
Phénolique	1300	3000	1100	0,4	70	0,5	1×10 <sup>-5</sup>	0,3	1000	120-200
Polyester	1200	4000	1400	0,4	80	2,5	8×10 <sup>-5</sup>	0,2	1400	60-200
Vinyl-ester	1150	3300	//	//	75	4	5×10 <sup>-5</sup>	//	//	>100
Silicone	1100	2200		0,5	35	//	//	//	//	100-350
<b>Thermoplastiques</b>										
Polypropylène « PP »	900	1200	//	0,4	30	20-400	9×10 <sup>-5</sup>	//	330	70-140
Polysulfure de phénylène « PPS »	1300	4000	//		65	100	5×10 <sup>-5</sup>	//	//	130-250
Plyamide « PA »	1100	2000	//	0,35	70	200	8×10 <sup>-5</sup>	//	1200	170

### 2.1.2 Matrices minérales

- Carbure de silicium, carbone,

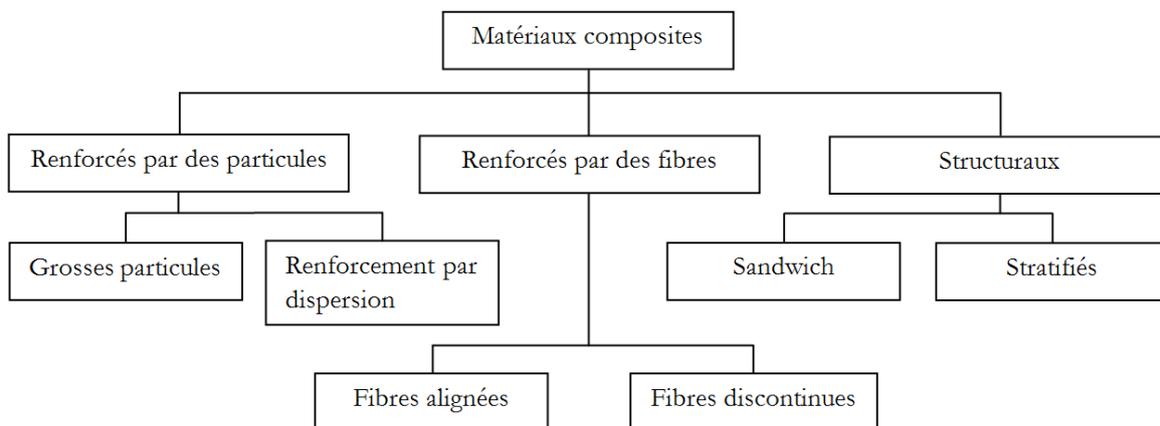
### 2.1.3 Matrices métalliques

- Alliages d'aluminium, de titane, eutectiques orientés.

## 2.2 Renfort

Le renfort est constitué de fibres (organiques ou inorganiques), possède divers architectures et apporte aux matériaux composites ses performances mécaniques. Le choix du renfort est très important. Il doit avoir de bonnes propriétés intrinsèques de résistance (module d'élasticité, géométrie, etc.), être compatible avec la matrice et doit aussi avoir un coût acceptable.

De nos jours, on trouve une variété de types de matériaux composites, la figure III.2 présente une classification schématique des matériaux composites [Sedan (2007); Ragoubi (2010)]. On peut distinguer trois (3) sortes de classes de renfort. Pour chaque catégorie de renfort, le composite qui en résulte possède ses propres caractéristiques mécaniques, thermiques etc.



**Figure.III. 2.** Classification des différents types de matériaux composites à base de fibres naturelles [Sedan (2007); Ragoubi (2010)].

### **3 Les composites biomasse végétale ciment**

Nous définirons pour composites biomasse végétale ciment ci après noté CBC, l'association d'un liant minéral, dans la présente étude le ciment, de granulats d'origine végétale et dans certain cas des additifs. Selon les proportions des différents constituants du mélange et la taille des granulats utilisés, nous obtiendrons une large gamme de composites CBC. Cependant, il ressort de la littérature que la terminologie en rapport avec ce sujet ne change pas en fonction de la taille et la dimension des constituants. On utilise de manière systématique le mot fibre pour désigner un fragment de bois.

#### **3.1 Enjeux et intérêts des CBC**

Les composites à renfort végétales constituent un nouvel enjeu face aux problèmes du recyclage des composites renforcés par des fibres synthétiques. A ce titre, les composites renforcés par des fibres végétales sont actuellement en forte expansion en raison de l'intérêt croissant que leur accorde l'industrie automobile, l'industrie du bâtiment et l'industrie agro alimentaire [John and Thomas (2008); Ragoubi (2010)]. Ces fibres présentent une excellente alternative d'un point de vue environnemental en raison de leur combustibilité beaucoup plus neutre en termes de dégagement de gaz nocifs ou de résidus solides [Thiebaud (1995); Michaud (2003); Baley (2004); Bentchikou, Hanini et al. (2007)]. Egalement à leur coût de revient beaucoup plus bas. Par ailleurs, la biodégradabilité du renfort végétale peut être considérée comme un avantage ou un inconvénient néanmoins, l'utilisation de ce type de matériau impose, par une conception réfléchie, de placer la structure en matériaux composites en dehors des conditions de biodégradabilité.

Le « pourquoi » aussi d'une utilisation de la biomasse végétale en l'occurrence le bois est lié aux problèmes de santé causés par l'emploi des fibres de l'amiante en particulier dans le bâtiment. En effet, les fibres d'amiante sont constituées de filaments très fins et très fragiles. Inhalées, elles se déposent dans les poumons et provoquent des maladies dont certaines, très graves, sont des cancers. Ces maladies se déclarent jusqu'à 30 ou 40 ans après une exposition aux poussières d'amiante. Toutes les variétés d'amiante sont classées comme substances cancérigènes avérées pour l'Homme.

Par ailleurs, les chercheurs [Thiebaud (1995); Michaud (2003); Baley (2004); Bentchikou, Hanini et al. (2007)] mettent en avant un avantage majeur, non négligeable, la disponibilité des constituants des CBC. En effet, les matières premières que sont la biomasse végétale et ciment sont disponibles sur place, par conséquent les usines peuvent être installées à proximité des ressources ce qui réduit considérablement les coûts de fabrication.

Le champ d'application ou l'utilisation des CBC dépend fortement des pratiques actuelles de constructions. Le produit doit exhiber un avantage sur les produits existant sur le marché. Nous pouvons trouver pour les CBC des applications externes (toitures planes, murs de maisons préfabriquées, planchers, murs antibruit, etc.), et des applications internes (cloison avec isolation thermique, phonique et résistance au feu ... etc.) [Dix (1989); Beraldo (1994); Matuana and Heiden (2004)]

## **3.2 Caractéristiques de CBC.**

Les auteurs [Moslemi and Pfister (1987); Dittenber and GangaRao (2012)] rapportent que les caractéristiques des CBC dépendent fortement de la ressource végétale utilisée. En effet, la biomasse végétale présente des différences au niveau de leurs propriétés intrinsèques d'une espèce à une autre d'un endroit à un autre ... etc. Ainsi il ressort de la littérature en relation à l'utilisation des ressources végétale dans une matrice ciment la complexité du sujet.

### **3.2.1 Propriétés des CBC**

La fabrication de panneaux composites avec bois et matériaux inorganiques a débutée en 1900 avec l'élaboration du panneau bois-magnésite [Beraldo (1994)], ces panneaux étaient connus sous les noms d'EXCELSOIR aux USA et HERAKLIT en Europe. Dans les années suivantes vers 1927 on entame la fabrication du panneau bois-ciment puis vers 1982 la fabrication des panneaux gypse - particules de bois [Moslemi and Pfister (1987); Espinoza Herrera (2009)]. Cependant, le volume de fabrication des panneaux composites bois-matériaux inorganiques est faible en comparaison avec les autres panneaux à base de bois avec liant synthétique.

Les propriétés de ce type de composites sont influencées significativement par le type de liant inorganique, la quantité de matériau en bois et par la masse volumique du panneau. Les matériaux inorganiques utilisés sont le ciment Portland, la magnésite et le gypse. Les composites CBC combinent les bonnes caractéristiques du bois et du matériel inorganique.

#### **3.2.1.1 Disponibilité de la matière végétale**

Le succès de la fabrication des CBC dépend fortement de la disponibilité de la ressource végétale. Théoriquement, nous pouvons fabriquer des CBC de n'importe quelle ressource végétale tel que le bambou, le lin, le chanvre le bois de palmier dattier... etc à l'exception du bois pourri. Toutefois, il faudra tenir compte des caractéristiques physico-chimiques et anatomiques de la biomasse végétale et du comportement de cette dernière vis-à-vis du ciment.

### **3.2.1.2 Faible masse volumique**

Avec une masse volumique faible comprise entre 400 et 1500 kg/m<sup>3</sup>, les CBC appartiennent à la famille des bétons légers. Une série de propriétés en découlent notamment une bonne isolation thermique et phonique, résistance mécanique ... etc [Beraldo (1994)].

### **3.2.1.3 Résistance aux agents biologiques**

Le milieu alcalin que procure le ciment une fois au contact de l'eau assure la protection de la biomasse végétale contre les attaques des champignons de pourriture et aux insectes xylophages [Moslemi and Pfister (1987)].

### **3.2.1.4 Bonne stabilité dimensionnelle**

Contrairement aux panneaux à base de résine, les CBC présentent une bonne stabilité dimensionnelle. Toutefois, elle reste insuffisante pour une utilisation extérieure sans produit protecteur.

### **3.2.1.5 Ouvrabilité**

Les composites bois ciment présentent une fluidité suffisante pour être pompés et injectés éventuellement sous pression. De plus, le CBC durci est plus facilement sciable qu'un béton normal. On peut travailler le CBC comme les panneaux conventionnels de bois [Moslemi and Pfister (1987)].

Lors de la fabrication des CBC on peut avoir à résoudre un certain nombre de problèmes : d'une part, un problème d'incompatibilité chimique très dépendante de l'espèce végétale employée d'autre part un temps de prise relativement long. Aussi une durabilité réduite du notamment à l'altération de la biomasse végétale [Moslemi and Pfister (1987); Hachmi, Moslemi et al. (1990); Beraldo (1994); Pacheco-Torgal and Jalali (2011)].

## **3.3 Compatibilité bois – ciment**

Nous définissons la compatibilité chimique entre le bois et le ciment le comportement particulier de chaque espèce végétale en présence du ciment. En effet, toutes les espèces ne réagissent pas favorablement aux matériaux inorganiques (faible niveau de compatibilité du bois avec le matériau inorganique).

La synthèse bibliographique [Weatherwax and Tarkow (1964); Lee, Hong et al. (1987); Hachmi and Moslemi (1989); Jorge, Pereira et al. (2004); Filho, Silva et al. (2009); Pacheco-Torgal and Jalali (2011); Dittenber and GangaRao (2012)] permet de signaler un certain

nombre de composés présentant un effet inhibiteur sur la prise du ciment. Nous citons les extractibles (sucres libres, les tanins) et les hémicelluloses.

Les sucres solubles dans l'eau, glucosides, composantes phénoliques, tanins et produits extractibles du bois inhibent l'hydratation du ciment, prolongeant la période de prise, diminuant la quantité et la taille des cristaux essentiels pour la résistance des matériaux inorganiques, c'est-à-dire, qu'ils ont un effet négatif sur la compatibilité entre le bois et le matériau inorganique. Plus la quantité d'extractibles est grande, l'incompatibilité du bois avec les matériaux inorganiques est grande. Généralement, les espèces avec une quantité égale ou supérieure à 7% d'extractibles solubles dans l'eau sont considérées comme des espèces incompatibles [Espinoza Herrera (2009)].

L'incompatibilité du ciment bois peut être le résultat de nombreux facteurs (figure III.3). Le type du ciment, la forme des particules de bois ... etc. le pH de la biomasse végétale a aussi un effet inhibiteur. Les extractibles acides avec un pH faible inhibe beaucoup moins la cristallisation du ciment que les extractibles alcalins avec un pH élevé. Cependant les bois acides pourraient diminuer le pH du mélange ciment eau causant un résultat défavorable à la prise du ciment. D'après les résultats rapportés par Hachmi, [Hachmi and Moslemi (1990)], les espèces qui présentent un pH inférieur à 3,9 et supérieur à 4,9 ne sont pas compatibles.

Par ailleurs, les résineux sont généralement plus compatibles que les feuillus. La teneur en hémicelluloses, 34% chez les feuillus et 28% chez les résineux, pourrait expliquer le phénomène.

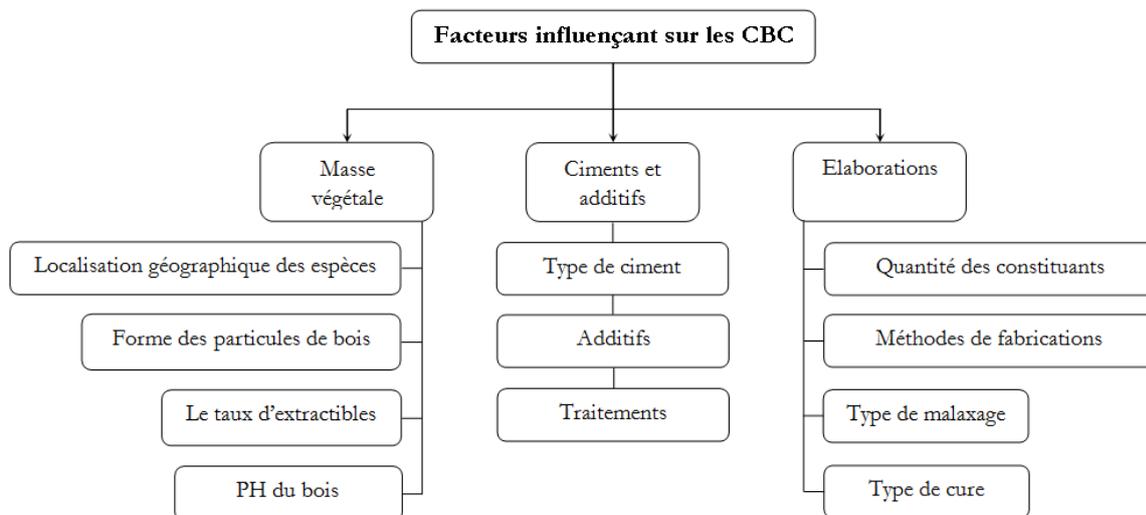


Figure.III. 3. Facteurs influençant la prise du ciment.

D'autres travaux ont soulignés aussi l'importance que peut avoir la période d'abattage sur la prise du ciment du fait des variations des teneurs en sucres libres au cours de l'année. Les auteurs Biblis et al [Biblis and Lo (1968)] rapportent que le temps de prise du mélange contenant ciment bois d'aubier de « southern pine » coupé au printemps est plus important que celui observé avec le même bois scié en hiver. Cette augmentation du retard de prise est attribuée aux sucres présents en plus grande quantité dans la sève de printemps. Les mêmes résultats sont enregistrés par [Weatherwax and Tarkow (1964)] quatre années auparavant.

Les teneurs en sucres et en produits inhibiteurs évoluent lors du stockage du bois. A titre d'exemple pour le hêtre, la teneur en sucres passe de 0,2% lorsqu'il est peu protégé à 0,1% lorsqu'il sèche à l'air libre sous abris [Beraldo (1994)]. [Valenzuela (1989)] a conclu que si la teneur en sucres est réduite de façon importante après 3 mois de stockage, une réduction de la teneur en tanins est en revanche plus délicate à obtenir durant la même période. De son côté a affirmé que les CBC sont d'autant plus résistant que le bois a subi un vieillissement naturel car certain constituants du bois sont éliminés par les eaux de pluie.

### **3.3.1 Evaluation de la compatibilité bois ciment**

La réaction chimique du ciment avec l'eau est une réaction exothermique qui peut être affectée par le bois [Govin (2004); Sedan (2007); Cheumani (2009); Espinoza Herrera (2009)]. C'est pour cette raison que la compatibilité du bois avec le ciment est généralement exprimée par les paramètres de la chaleur d'hydratation du ciment en fonction du temps [Espinoza Herrera (2009)]. Chaque espèce de bois a une réaction différente quand elle est mélangée avec le ciment. On trouve différents temps et différentes températures d'hydratation selon l'espèce. Sur la base de ces caractéristiques, plusieurs chercheurs ont mis des méthodes de calcul de la compatibilité du bois avec le ciment, une des technique, consiste à mesurer au cours de l'hydratation, l'évolution de la température des composites et de calculer l'indice inhibiteur [Cheumani (2009); Espinoza Herrera (2009)]. De nombreuses équations, établies à partir de la température maximale atteinte dans le composite et dans le ciment pure et à partir du temps pour atteindre ces températures, ont ainsi été proposées pour comparer les différents types de bois.

$$I = \left[ \left( \frac{t_2 - t_2'}{t_2} \right) \left( \frac{T_2' - T_2}{T_2'} \right) \left( \frac{S' - S}{S'} \right) \right] \times 100 \quad (3.1)$$

**Avec :**

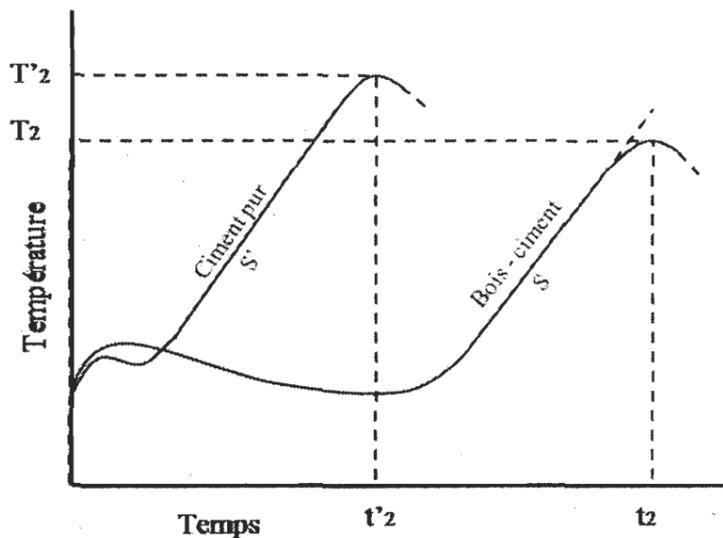
$I$  = Indice inhibiteur (%). Plus  $I$  est faible l'espèce est compatible.

$T'_2$  = température maximale du ciment pur - eau ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_2$  = température maximale du mélange ciment - bois - eau ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t'_2$  = temps pour arriver à  $T'_2$  (h),  $t_2$  = temps pour arriver à  $T_2$  (h)

$S'$  = pente maximale température/temps du ciment pur - eau ( $\Delta T/\Delta t$ ) ( $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )

$S$  = pente maximale température/temps du mélange ciment- bois - eau ( $\Delta T/\Delta t$ ) ( $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )



**Figure.III. 4.** Courbe typique de l'hydratation du ciment pure et mélangé avec le bois[Espinoza Herrera (2009)]

D'après [Moslemi and Lim (1984)] (Eq 3.1), les espèces avec de faibles indices inhibiteurs sont les plus compatibles.

De point de vue d'autres chercheurs [Sandermann and Kohler (1964)], les espèces qui présentent des températures maximales supérieures à  $60^{\circ}\text{C}$  sont classés comme espèces compatibles, au dessous de  $50^{\circ}\text{C}$  sont classés comme espèces incompatibles. Dans l'intervalle de température de  $50$  à  $60^{\circ}\text{C}$ , les espèces sont dites des espèces compatibles intermédiaires.

Selon [Hachmi, Moslemi et al. (1990)] l'évaluation de la compatibilité entre le bois et le ciment par la mesure de la température maximale ( $T'_2$ ) (Fig. III.4) présente des incertitudes car l'harmonisation de la classification des espèces diffère d'un laboratoire à un autre. De ce fait, ils introduisent une nouvelle méthode de calcul. Ils proposent d'utiliser un facteur de compatibilité ( $Ca$ ) (Eq 3.2).

Ce facteur (Ca) dépend de la surface sous la courbe de température d'hydratation du mélange ciment bois et celle du ciment pur.

$$Ca = \left[ \frac{A_{WC}}{A_C} \right] \times 100 \quad (3.2)$$

Avec :

Ca = Facteur de compatibilité (%).

- Compatible :  $Ca > 68\%$
- Modérément compatible :  $28 \leq Ca < 68\%$
- Incompatible :  $Ca < 28\%$

$A_{WC}$  = Surface sous la courbe d'hydratation bois ciment ( $\text{cm}^2$ )

$A_C$  = Surface sous la courbe d'hydratation ciment pur ( $\text{cm}^2$ )

D'une manière indirecte, l'évaluation et la comparaison des propriétés mécaniques des composites peuvent également nous renseigner sur la compatibilité du bois et du ciment [Cheumani (2009)]. [Miller, Moslemi et al. (1989)] ont corrélé positivement les propriétés mécaniques du CBC à la quantité et qualité des cristaux du ciment responsables d'assurer la liaison entre le bois et le ciment. Les essais mécaniques couramment utilisés pour caractériser les composites bois – ciment sont l'essai de flexion trois points et l'essai de compression. Cependant, la résistance en compression est la seule caractéristique mécanique qui donne une image globale de la qualité des matériaux cimentaires [Neville (2000)]. En résumé, plus les bois sont compatibles avec le ciment et meilleurs sont les performances mécaniques des composites qui en résultent.

A noter que d'autres techniques de caractérisation des ciments ont occasionnellement été utilisées pour étudier l'influence du bois sur la matrice ciment : la diffraction des rayons X, l'analyse thermogravimétrique, la microscopie électronique à balayage MEB et la porosimétrie par intrusion mercure MIP.

### **3.3.2 Traitement permettant d'améliorer la compatibilité bois ciment**

Afin de rendre compatible certaines des espèces végétales vis-à-vis du ciment ou bien d'améliorer leur compatibilité plusieurs méthodes sont développées au fil des recherches. Ces méthodes peuvent être corrélées à la biomasse végétale ou bien à la matrice cimentaires.

Toutefois, il faut tenir compte de l'aspect économique du traitement en faisant appel à des techniques fiables et simple.

### **3.3.2.1 Traitement de la fibre végétale**

#### ***3.3.2.1.1 Extraction et lavage de la biomasse végétale par une solution aqueuse***

Nous pouvons utiliser une eau chaude seule [Moslemi and Lim (1984)] en solution aqueuse mélangée à un alcool ou un sel soluble

#### ***3.3.2.1.2 Traitement thermique***

En traitons le bois au delà de 180°C, on élimine l'eau et certains produits volatils mais on provoque une dégradation thermique des hémicelluloses conduisant à un bois dit rétifé ou torréfié. Le bois torréfié perd son hygroscopicité par suite d'une élimination à 80% des pentosanes du bois. Le bois séchés ou torréfiés conduisent à des CBC possédant des propriétés mécaniques améliorées.

#### ***3.3.2.1.3 Traitement de la surface***

Les traitements chimiques ont certainement été les plus étudiés dans le monde. L'objectif de ce type de traitement est de remplacer les groupements hydroxyles, fortement hydrophiles et responsables du gonflement du bois, par des groupements hydrophobes. Divers produits ont été utilisés dont l'oxyde de butylène qui permet de réduire le gonflement des panneaux de particules de bois de 50% et l'absorption d'eau de 25% [Govin (2004)]. L'anhydride acétique réduit ces deux caractéristiques respectivement de 85% et 50%.

Cependant, la tendance actuelle est à la minéralisation des matières cellulosiques. Cette méthode consiste à imprégner à sec les granulats de bois d'une solution minérale en vue de créer une barrière interdisant, au moins temporairement, les échanges physico-chimiques du bois avec le milieu extérieur. La solution peut contenir du chlorure de calcium, de la pâte de chaux avec du silicate de soude. Par ailleurs, les particules ou fibres peuvent encore être traité par des substances telles que l'hydroxyde de sodium NaOH d'une concentration moyenne 6% appliqué pendant 10 à 30 minutes, également l'hydroxyde de potassium [Dittenber and GangaRao (2012)] est une autre solution.

#### ***3.3.2.1.4 Mise en œuvre d'accélérateurs***

Une autre approche consiste à éliminer les substances responsables des problèmes d'inhibition en trempant le bois dans une solution d'hydroxyde de sodium. Par ailleurs, des accélérateurs

de prise comme le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) ou le sulfate d'aluminium  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  peuvent également être incorporés à la pâte de ciment pour accroître sa vitesse de durcissement.

### **3.3.2.2 Traitement de la matrice ciment**

L'ajout de sels en faibles quantité permet de favoriser la prise et le durcissement et d'accroître les caractéristiques mécaniques initiales du composite. Pour améliorer les propriétés de la matrice deux principaux traitements ont été considérés :

- L'ajout d'un minéral de granulométrie adaptée
- La carbonatation de la matrice par l'intermédiaire de l'anhydride carbonique ou d'un carbonate.

## **4 Etat de l'art**

Les fibres naturelles comme éléments de renfort dans les matériaux composites ont fait l'objet de nombreuses études durant les dernières décennies. Il ressort de la littérature en rapport avec ce sujet que même si le concept n'est pas nouveau, il n'est pour l'instant pas appliqué à l'échelle industrielle; la majorité des produits connexes reste inexploitée, à l'exception des sciures qui sont mises à profit comme combustibles.

Les premiers travaux relatifs à l'incorporation des fibres végétales issues de bois de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) remontent à 1983 [Al-Juruf, Ahmed et al. (1983)]. Dans un premier temps Al-Juruf et al [Al-Juruf, Ahmed et al. (1988)] ont mesuré la conductivité thermique des feuilles de palmier dattier, ils rapportent une conductivité thermique de l'ordre de 0.12 à 0.210 W/mk, ce qui indique clairement que les feuilles sèchent non traitées ont un énorme potentiel pour l'élaboration d'un produit isolant destiné à l'habitat. Mélangées à d'autres additifs (charges) minérale (ciment et gypse) et organiques (colles) suivant un protocole mis en place par Al-juruf et al [Al-Juruf, Ahmed et al. (1988)], l'étude conclue que les composites à matrice minérale ne correspondent pas aux objectifs fixés car ils se fissurent lors même du séchage. Par ailleurs, mélangeant colles diverses et palmes déchiquetées pour 1:4 de la masse, la conductivité thermique est de 0,227 à 0,353 W/mk.

Abdel-Rahman et al [Abdel-Rahman, Al-Juruf et al. (1988)] on examiné la possibilité d'utiliser la tige (rachis) (figure 2) de la palme du palmier dattier comme renfort dans une matrice cimentaire. Ils procèdent en deux étapes, caractérisation anatomique et des propriétés mécaniques de la tige, puis, le comportement du renfort dans un milieu relativement humide

sans traitement chimique. Les résultats obtenus démontrent que le bois de palmier dattier est un matériau hygroscopique. En effet, cette caractéristique le rend sensible à l'humidité et à la température. Ce facteur influence radicalement ces dimensions et ces propriétés mécaniques d'où, il faut une maîtrise totale du taux d'humidité pour pouvoir utiliser ce matériau dans une matrice quelconques.

Dans les trois cas, les auteurs n'ont pas mis en place un protocole de fabrication. En effet, dans une autre approche, AL-SULAIMAN [Al-Sulaiman (2002)]-[Al-Sulaiman (2003)] normalise la fabrication des composites à base de fibres de palmier dattier en introduisant des normes de fabrication comme l'autoclaving méthode ou press moulds avec contrôle de température. L'auteur a choisi une matrice thermdurcissable répartie sur deux types de résines à savoir une résine phénolique (formaldéhyde) et une résine biphénole. Il en résulte que les deux produits présentent de bonnes caractéristiques thermiques entre 0,16 à 0,20W/mk pour la résine biphenole et de l'ordre de 0,17 à 0,24 W/mk pour la résine phénole, sachant que ni la longueur ni la direction des fibres n'affect la conductivité thermique. Par contre le biphenole présente de meilleures caractéristiques mécaniques.

Quant au travail de [Mourad (2013)] qui s'est intéressé au développement d'un nouveau biocomposite constitué de fibres naturelles dispersées dans une matrice gypse, en vue de l'utiliser comme isolant thermique dans les panneaux solaire (et/ou bâtiment) tenant compte des critères techniques et économiques pour l'application choisie. Les propriétés thermiques et mécaniques de ce biocomposite sont déterminées expérimentalement. A cet effet, l'influence de la taille et de la teneur en FBPD sur les propriétés thermophysiques et mécaniques des composites ont été étudiées. Parallèlement à ce travail expérimental, un modèle mathématique basé sur la méthode des éléments finis est introduit afin de prédire la conductivité thermique des matériaux hétérogènes.

Par ailleurs, la littérature fait état de nombreux travaux portés sur l'élaboration des composites à différentes matrices et renforts similaires aux fibres de palmiers dattiers. Thiebaud [Thiebaud (1995)] a pu développer à partir des déchets végétaux en l'occurrence le bois de chêne un nouveau matériau thermoplastique sans matrice d'origine pétrochimique. La démarche préconisée est le traitement chimique du bois, plus précisément l'estérification avec le chlorure d'octanoyle. Les conditions opératoires les plus favorables déterminées conduisent à un gain de poids du bois de 87% et un taux d'ester de 60%.

Espinoza-Herrera [Espinoza-Herrera (2009)] a procédé à l'élaboration de panneaux à base de particules de bois et de matrices inorganique (gypse et ciment Portland) qui combinent les

bonnes caractéristiques de chaque composantes. Deux types de panneaux sont mis à jour, le premier est fabriqué avec 53% de liant inorganique en l'occurrence le gypse, 22% de particule de bois (pin gris) et 25% d'eau. Le deuxième panneau présente la même structure en ajoutant du ciment en proportion 70:30 de la masse sèche en poudre. Les propriétés physiques et mécaniques des panneaux obtenus sont testées selon la norme ASTM D 1037 en évaluant : le gonflement en épaisseur, la dilatation linéaire, l'absorption d'eau, la masse volumique, la résistance à la flexion, la cohésion interne, la dureté et la résistance à l'arrachement des vis, en éprouvettes sèches et saturées par immersion dans l'eau. Egalement, la conductivité thermique a été déterminée selon la norme ASTM C 518 et la détermination de la dégradation thermique a été faite par analyses thermogravimétrique (TGA). Les résultats ont été comparés avec un panneau en gypse commercial "Placoplâtre". Toutes les caractéristiques étaient améliorées par la présence du ciment Portland.

Egalement, Sedan et al [Sedan, Pagnoux et al. (2007)] ont incorporés des fibres de chanvre dans une matrice cimentaire. Les auteurs ont remarqué que cette constitution confère des propriétés intéressantes aux composites. Leurs travaux sont axés spécialement sur l'interface et la compréhension des mécanismes d'interactions entre les fibres et la matrice cimentaire afin de mieux appréhender le comportement mécanique du composite. Les conclusions qui ressortent de cette étude indiquent que les fibres de chanvre semblent capables de fixer une quantité importante de calcium sur leur surface. Cette fixation des ions  $Ca^{2+}$  par les pectines du chanvre inhibe la croissance des hydrates de silicate de calcium et est probablement responsable des retards de prise observés dans les pâtes de ciment. Il en résulte une amélioration des propriétés mécaniques du composite. Ces composites possèdent une grande souplesse ainsi qu'une plus grande résistance en flexion que le ciment seul.

De leur côté, Bahloul et al [Bahloul, Bourzam et al. (2009)]avaient exploité les fibres d'alfa, mélangées avec un mortier de ciment portland CPJ 45. Les essais conclus que pour une fraction volumique de 1%, le composite présente une bonne consistance. Sachant que les fibres d'alfa sont très flexibles et ont un pouvoir hydrophile très élevé. Les testes mécanique qu'a subit ce composite en l'occurrence l'essai de compression confirme l'hypothèse déjà avancée que pour un pourcentage élevé de fibre végétale la résistance diminue. Par ailleurs, pour une conductivité thermique  $k = 0,8 \text{ W/mk}$ , le composite fait office d'un bon isolant thermique.

Savastona et al [Savastano Jr, Warden et al. (2000)] qui avaient utilisé du sisal, des copeaux de bananier ou encore de l'eucalyptus afin de renforcer un composite à matrice cimentaire rapportent que les performances mécanique optimale en flexion est de 20 MPa. Ils observent

également une chute du module de flexion pour tous les mélanges, Par exemple, pour les composites renforcés par l'eucalyptus, ce module varie de 23,5 GPa pour une pâte de ciment à environ 8,3 GPa (comportement évalué à 28 jours), par ailleurs, le béton de chanvre affiche une résistance mécanique entre 0,25 et 1,15 MPa [Cerezo (2005)].

## **5 Conclusion**

L'objectif principal de ce travail est d'étudier la faisabilité d'élaborer des composites bois – ciment sans compactage en associant des particules végétales issues du bois de palmier dattier (Rachis et Pétiole) avec du ciment portland destinés à améliorer l'isolation thermique des enveloppes extérieurs des bâtiments. Dans un premier temps, on met en place une méthode de formulation en substituant le sable dans le cas des mortiers puis le ciment dans le cas d'étude sur pâtes, Puis afin de valider la méthode mise en place, on procède à divers essais à l'état frais et durcis. À l'état frais, des mesures de l'affaissement ont été réalisées sur l'ensemble des échantillons. À l'état durci on mesure la résistance à la flexion ainsi qu'à la compression sur des éprouvettes âgées de 14, 21 et 28 jours. L'étude, a été complétée par des analyses calorimétriques (semi adiabatique), du temps de prise (vicat) et microscopiques (MEB), également, l'ajout d'accélérateur de prise comme le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ).

# Bibliographie

- John, M. J. and S. Thomas, "Biofibres and biocomposites." *Carbohydrate polymers* **71**, 343-364.(2008)
- Gay, D., "Matériaux composites", Ed Paris (2005).
- Bathias, C. and Coll, "Matériaux composites", Ed Paris (2005).
- Bledzki. and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres." *Prog. Polym. Sci.* **24**, 221-274.(1999)
- Sedan, D., "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite", Thèse de doctorat, Université de Limoges,(2007)
- Ragoubi, M., "Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1,(2010)
- Thiebaud, S., "Valorisation chimique des composés lignocellulosiques; obtention de nouveau matériaux", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique,Toulouse (1995)
- Michaud, F., "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique: aptitude au postformage", Thèse de doctorat, Université de Laval,Canada (2003)
- Baley, C., "Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites." Ed. Techniques de l'Ingénieur.(2004)
- Bentchikou, M., S. Hanini, et al., "Elaboration et étude d'un mortier composite à matrice minérale et fibres cellulose: application à l'isolation thermique en bâtiment." *Canadian Journal of Civil Engineering* **34**, 37-45.(2007)
- Dix, R. (1989). The principles of cement-bonded particleboard manufacture. Proceedings 2th. International Conference on Fiber and Particleboards Bonded with Inorganic Binders. Moscow, ID, USA.
- Beraldo, A. L., "Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite végétale-ciment à variation dimensionnelles limités vis à vis des variations de l'humidité", Thèse de doctorat, Nancy 1,(1994)
- Matuana, L. M. and P. A. Heiden (2004). Wood composites. Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Wiley Online Library. **12**: 521-546.
- Moslemi, A. and S. C. Pfister, "The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels." *Wood and fiber science* **19**, 165-175.(1987)
- Dittenber, D. B. and H. V. S. GangaRao, "Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure." *Composites Part A* **doi:10.1016/j.compositesa.2011.11.019**.(2012)
- Espinoza Herrera, R., "Panneaux en gypse et particules de bois renforcés avec du ciment Portland", **Thèse** de doctorat, Université Laval,(2009)
- Hachmi, M., A. Moslemi, et al., "A new technique to classify the compatibility of wood with cement." *Wood science and technology* **24**, 345-354.(1990)
- Pacheco-Torgal, F. and S. Jalali, "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review." *Construction and Building Materials* **25**, 575-581.(2011)
- Weatherwax, R. and H. Tarkow, "Effect of wood on setting of Portland cement." *Forest products journal* **14**, 567-570.(1964)
- Lee, A. W., Z. Hong, et al., "Effect of cement/wood ratios and wood storage conditions on hydration temperature, hydration time, and compressive strength of wood-cement mixtures." *Wood and fiber science* **19**, 262-268.(1987)

- Hachmi, M. H. and A. Moslemi, "Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives." *Forest products journal* **39**.(1989)
- Jorge, F., C. Pereira, et al., "Wood-cement composites: a review." *Holz als Roh-und Werkstoff* **62**, 370-377.(2004)
- Filho, R. D. T., F. d. A. Silva, et al., "Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates." *Construction and Building Materials* **23**, 2409–2420.(2009)
- Hachmi, M. H. and A. Moslemi (1990). Effect of wood pH and buffering capacity on wood-cement compatibility.
- Biblis, E. and C.-F. Lo, "Effect on the setting of southern pine-cement mixtures." *Forest Prod. J* **18**, 28-34.(1968)
- Valenzuela, W., "Contribution à la détermination de l'aptitude des essences forestières pour la fabrication de panneaux de fibro-ciment", Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique (1989)
- Govin, A., "Aspects physico-chimiques de l'interaction bois - ciment. Modification de l'hydratation du ciment par le bois", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines & l'Université Jean Monnet, Saint Etienne, France (2004)
- Cheumani, Y., "Étude de la microstructure des composites bois/ciment par relaxométrie RMN du proton", Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé I & l'université Bordeaux 1, France (2009)
- Moslemi, A. and Y. Lim, "Compatibility of southern hardwoods with Portland cement." *Forest products journal* **34**, 22-26.(1984)
- Sandermann, W. and R. Kohler, "Studies on mineral-bonded wood materials. IV. A short test of the aptitudes of woods for cement-bonded materials." *Holzforschung* **18**, 53-59.(1964)
- Miller, D., A. Moslemi, et al., "The use of fly ash in wood-cement composites." *Forest products journal* **39**, 34-38.(1989)
- Neville, A. M., "Propriétés des bétons", Ed Eyrolles, (2000).
- Al-Juruf, R., F. Ahmed, et al., "Development of New Building Materials Using Date Palm Fronds." research proposal submitted to KACST.(1983)
- Al-Juruf, R., F. Ahmed, et al., "Determination of the Thermal Conductivity of Date Palm Leaves." *Journal of Building Physics* **11**, 152.(1988)
- Al-Juruf, R. S., F. A. Ahmed, et al., "Development of heat insulation material using date palm leaves." *Journal of Thermal Insulation* **11**, 158-164.(1988)
- Abdel-Rahman, H., R. Al-Juruf, et al., "Physical, mechanical and durability characteristics of date palm frond stalks as reinforcement in structural concrete." *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* **10**, 175-181.(1988)
- Al-Sulaiman, F. A., "Mechanical properties of date palm fiber reinforced composites." *Applied Composite Materials* **9**, 369-377.(2002)
- Al-Sulaiman, F. A., "Date palm fibre reinforced composite as a new insulating material." *International Journal of Energy Research* **27**, 1293-1297.(2003)
- Mourad, C., "Métrologie et modélisation des transferts dans les composites naturels à faible coût pour l'isolation thermique dans les panneaux solaires", Thèse de doctorat, Université de Batna 2,(2013)
- Thiebaud, S., "Valorisation chimique de composés lignocellulosiques: obtention de nouveaux matériaux", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse (1995)
- Espinoza-Herrera, R., "Panneaux en gypse et particules de bois renforcés avec du ciment Portland", Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada (2009)
- Sedan, D., C. Pagnoux, et al., "Interaction fibre de chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite." *Matériaux & Techniques* **95**, 133-142.(2007)
- Bahloul, O., A. Bourzam, et al. (2009). Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment (cas de l'alfa). 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran.
- Savastano Jr, H., P. Warden, et al., "Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites." *Cement and Concrete Composites* **22**, 379-384.(2000)

Cerezo, V., "Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique", Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon,(2005)

# PARTIE 2

## ETUDE EXPERIMENTALE

## CHAPITRE IV

## Chapitre IV

# Matériaux et méthodes expérimentales

Matériaux et méthodes expérimentales	72
1 Matériaux	73
1.1 Le bois de palmier dattier	73
1.1.1 Composition chimique du bois de palmier dattier	75
1.1.2 Masse volumique réelle du bois de palmier dattier	76
1.1.3 Conductivité thermique du bois de palmier dattier	77
1.1.4 Le ciment	78
1.1.5 Le sable	79
1.1.6 L'eau	79
2 Méthodes expérimentales	79
2.1.1 Etude sur mortier	79
2.1.2 Etude sur pâte	81
3 Caractérisations	84
3.1.1 Temps de prise	84
3.1.2 Propriétés morphologique	85
3.1.3 Propriétés thermiques	86
3.1.4 Propriétés mécaniques	86
Bibliographie	88

Notre travail expérimental a porté sur l'étude et le développement des composites bois ciment à base de particules de bois de palmier dattier issue du pétoile, partie base de la palme. Cette deuxième partie est fragmentée en deux grandes études à savoir une étude sur le mortier à base des particules de bois de palmier et autre étude sur les pâtes ciments à base des mêmes particules.

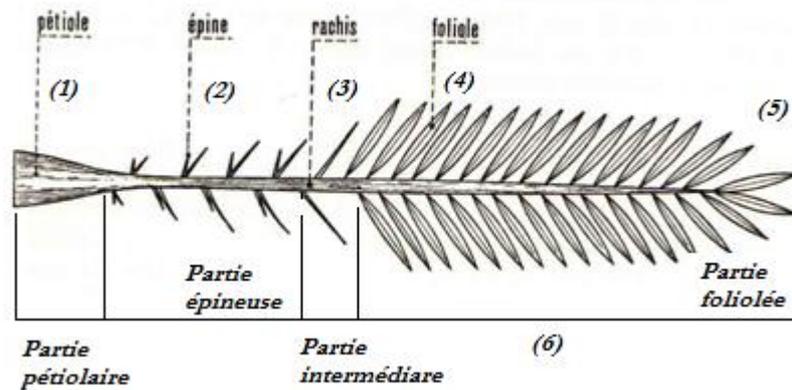
Cette partie du manuscrit rapporte les caractéristiques des CBC étudiées également les facteurs expérimentaux contrôlés. Elle expose les différentes méthodes et techniques expérimentales utilisées ainsi que les analyses théoriques et expérimentales menées afin de valider la méthode de formulation proposée. Elle propose, par ailleurs l'application adéquate dans le bâtiment du produit développé.

## **1 Matériaux**

### **1.1 Le bois de palmier dattier**

Les palmeraies Algériennes arborent un effectif de plus de 18,7 millions de palmiers [Boukrouh (2010)] et de 800 variétés qui couvrent plus de 169 361 ha [Agoudjil, Benchabane et al. (2011)] essentiellement localisées dans les zones de la partie sud-est du pays (Biskra, El Oued, Ouargla, Ghardaïa et Adrar). Pour des raisons de toilettage annuel, la maintenance des palmiers dattier génère plus de 335 000 t/an de déchets lignocellulosiques non valorisés. Le palmier dattier est une monocotylédone de la famille des Palmacées genre Phoenix [Munier (1973)]. La singularité du dattier tient au fait qu'il s'agit d'une herbe [Benchelah and Maka (2006)] géante qui s'élève à plus de 20 mètres de hauteur avec un stipe élancé plutôt qu'un vrai tronc, sans cerne de croissance, terminé par un unique bourgeon d'où émerge un panache de longues feuilles pennées de 5 à 6 mètres de long.

Nous nous intéressons dans notre travail à la partie renouvelable du palmier dattier en l'occurrence la palme (figure IV.1).



(1) Bassel- end, (2) Spine, (3) Mid-rid Stalk ou stem, (4) Leaflet or leaves, (5) Distal end, (6) Date palm frond et Leaf.

**Figure.IV. 1.** Représentation schématique de la palme.

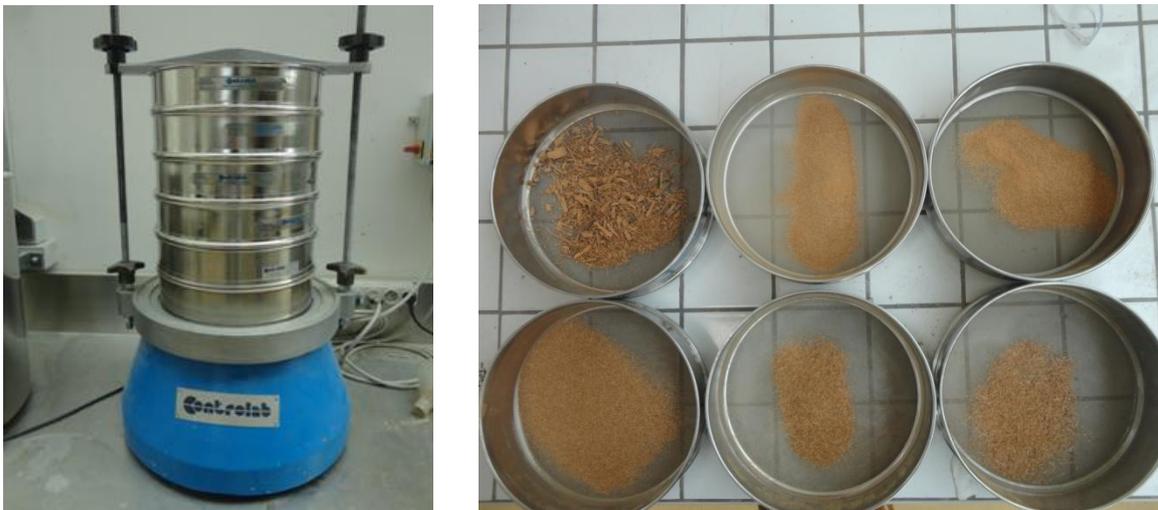
Les palmes sont récupérées de la localité d'El hadjeb, une des oasis que compte la wilaya de Biskra. Les palmes récoltées (figure IV.2) sont originaire d'un palmier de 25 ans d'âge. Elles sont débarrassées des feuilles, dépoussiérées puis découpées et conservés à l'air libre à température ambiante au laboratoire. Dans un premier temps, les palmes sont préalablement broyées à l'unité de bois de Bejaia suivant un procédé industriel de deux étapes à savoir un pré broyage et un broyage, les coupeaux récupérées sont stockées dans des sacs en plastique.



**Figure.IV. 2.** Palmes (palmier dattier) sans valeur ajoutée - Biskra (Algérie).

Dans un deuxième temps, les coupeaux obtenus sont mis à séché dans une étuve à  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à stabilisation de la masse puis re-broyés à l'aide d'un vibrobroyeur pour obtenir la granulométrie souhaitée. Les particules passant à travers le tamis de 0,4 mm et retenues par le

tamis 0,08 mm (figure IV.3) seront utilisées pour l'élaboration de nos composites bois ciment. Ce choix granulaire est préférable du point de vue malaxage afin d'éviter de voir apparaître des amas (mélange non homogène) qui infecteront négativement le comportement mécanique du matériau, de réduire le taux d'absorption des particules qui est corrélé à la surface spécifique de ces dernières et d'avoir ainsi une surface de contact bien meilleure avec la matrice cimentaire. Par ailleurs, l'étude préliminaire sur la granulométrie (0,4/0,8 mm) des particules issues du broyage industriel nous obligent à changer de gamme en passant au plus fin pour cause de ségrégation due à la densité dans cet état du bois de palmier dattier.



**Figure.IV. 3.** Tamisage après broyage des copeaux de bois de palmier.

### **1.1.1 Composition chimique du bois de palmier dattier**

Il est rapporté dans des études antérieures [Agoudjil, Benchabane et al. (2010); Agoudjil, Benchabane et al. (2011); Almi, Benchabane et al. (2015); Almi, Lakel et al. (2015)] la composition chimique des déchets du bois de palmier dattier, le pétiole en occurrence. Les éléments Oxygène et Carbone sont les plus dominants dans la composition chimique du bois de palmier dattier. Néanmoins, le bois de palmier dattier regroupe, à différentes concentrations, d'autres éléments chimiques comme le chlore, le magnésium, le calcium, etc.

### 1.1.2 Masse volumique réelle du bois de palmier dattier

La masse volumique du bois de palmier dattier en particules fines est mesurée suivant une méthode volumique. Cette méthode consiste à résoudre le système d'équations (Eq 4.1) de sorte que le volume total du mortier formulé occupe  $1\text{ m}^3$ , Sachant que la masse volumique de ciment et du sable sont fournies par le fabricant et que les particules de bois de palmier sont totalement sèches.

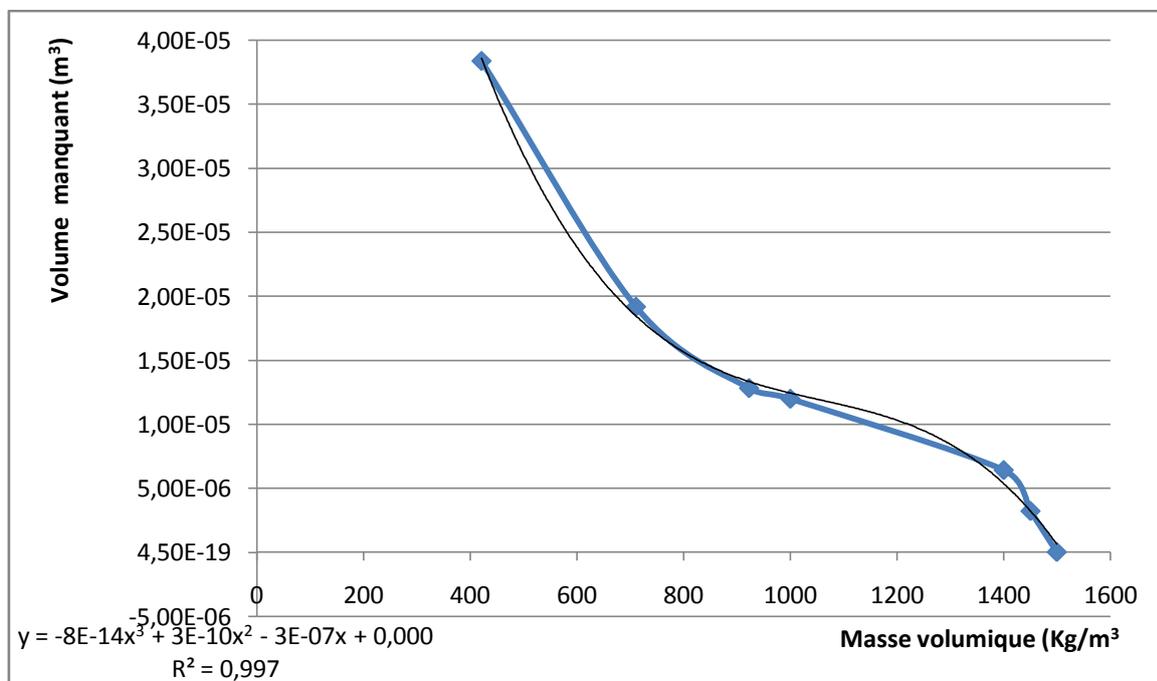
$$\begin{cases} V_C + V_S + V_E + V_B = 1\text{ m}^3 \\ V_C + V_E = 0,484\text{ m}^3 \\ S = 2C \\ V_B = x \end{cases} \quad (4.1)$$

**Avec :**

$V_c =$  Volume de ciment ;  $V_s =$  Volume de sable ;  $V_e =$  Volume de l'eau ;  $V_b =$  Volume de bois.

$S =$  Sable ;  $C =$  Ciment ;  $x =$  pourcentage de substitution 4%.

A L'aide d'un pied à coulisse, nous mesurons la hauteur manquante pour remplir complètement le moule 40X40X160mm, puis nous calculons le volume de ce dernier. Nous traçons l'évolution de la masse volumique en fonction du volume maquant (figure IV.4). Cet essai nous permet de rapporter que la masse volumique du bois de palmier dattier réduit en particule est de  $1500\text{ kg/m}^3$ .

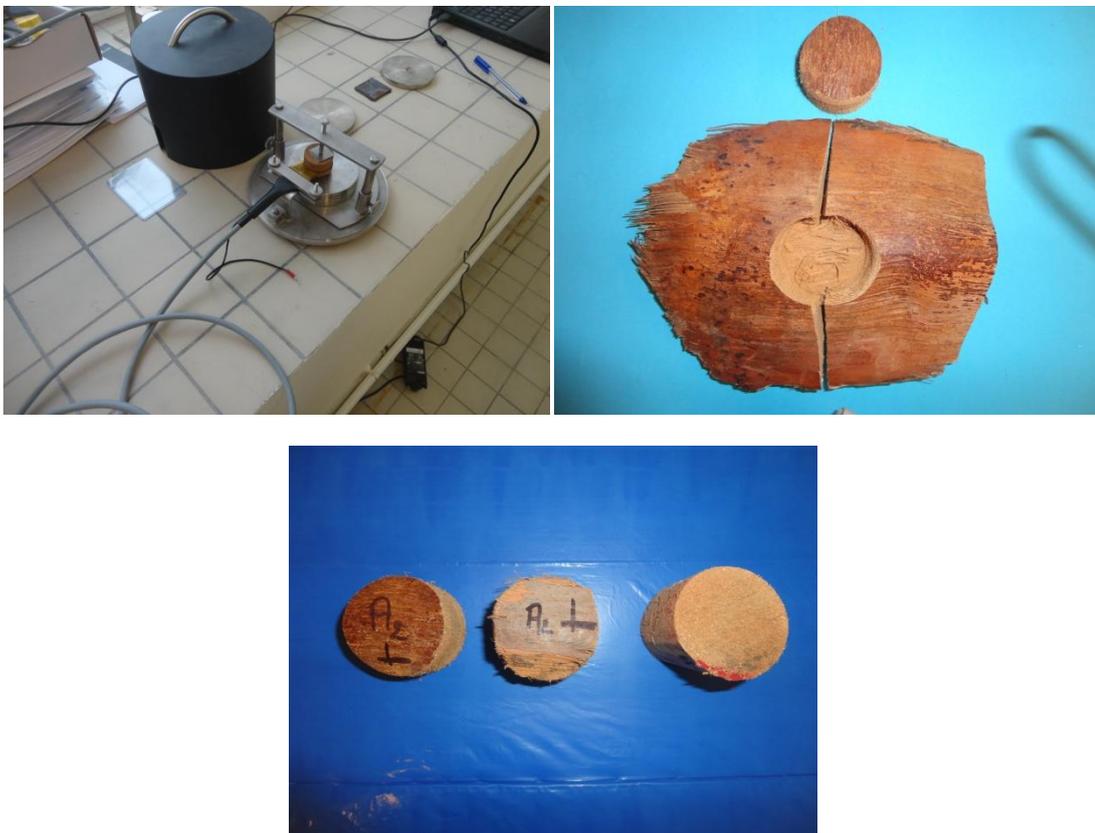


**Figure.IV. 4.** Mesure de la masse volumique des particules de bois de palmier dattier.

Dans cette étude, nos composites bois-ciment sont confectionnés sur la base de la masse volumique réelle du bois de palmier dattier qui est de l'ordre de  $1500 \text{ kg/m}^3$  (tableau IV.1). En effet, les récents travaux [Al-Mana, Ed-Hamady et al. (1996); Kriker, Bali et al. (2008)] rapportent des valeurs similaires à la masse volumique réelle obtenue, qui est corrélée positivement à l'état physique du bois.

### **1.1.3 Conductivité thermique du bois de palmier dattier**

La campagne de mesure de la conductivité thermique du bois de palmier dattier est réalisée sur des échantillons pris de la partie pétiolaire à l'aide de la méthode dite hot disk (figure IV.5). Les échantillons sont travaillés de sorte à obtenir une surface plane qui permet de placer une sonde en sandwich entre deux échantillons. Les résultats sont rapportés en tableau IV.1.



**Figure.IV. 5.** Mesure de la conductivité thermique de bois de palmier dattier.

D'autre part, la conductivité thermique du bois de palmier dattier est étudiée par [Agoudjil, Benchabane et al. (2011)]. Les auteurs rapportent une conductivité thermique  $\lambda = 0,083 \text{ W/m.K}$ .

**Tableau IV. 1.** Comparaison des propriétés thermo-physiques du bois de palmier dattier.

$\lambda$ (W/m K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		Références
	Apparente	Réelle	
0,083 ± 0,003	254 ± 1	-	[Agoudjil, Benchabane et al. (2011)]
0,061 ± 0,006	258 ± 1	1500 ± 1	Cette étude
-	-	1390	[Al-Mana, Ed-Hamady et al. (1996)]
-	-	1300 - 1450	[Kriker, Bali et al. (2008)]

Les résultats des deux études sur la conductivité thermique du bois de palmier dattier rapportent une faible conductivité thermique. Au regard des autres matériaux de même nature à l'image du sisal ( $\lambda = 0.070$  W/m.K) [Kalaprasad, Pradeep et al. (2000)], du chanvre ( $\lambda = 0.115$  W/m.K) [Behzad and Sain (2007)] et des fibres du bananier ( $\lambda = 0.117$  W/m. K) [Paul, Boudenne et al. (2008)] le bois de palmier dattier est un bon candidat pour le développement d'isolant thermique.

#### 1.1.4 Le ciment

Le ciment utilisé pour nos formulations est le ciment portland CEM I 52,5 N (**Annexe 1**) qui répond aux exigences de la norme EN 197-1. Le détail de sa composition chimique est donné dans le tableau IV.2. Il acquiert une résistance mécanique moyenne à la compression à 28 jours de 61,3 MPa, présente une masse volumique de 3 130 Kg/m<sup>3</sup> et une surface Blaine de 3 590 cm<sup>2</sup>/g pour un début de prise de 165 minutes.

**Tableau IV. 2.** Compositions chimiques du ciment utilisé.

Compositions chimiques (%)	
Éléments	Teneur (%)
SiO <sub>2</sub>	20,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,35
TiO <sub>2</sub>	0,25
MnO	0,02
CaO	63,67
MgO	3,88
SO <sub>3</sub>	2,80
K <sub>2</sub> O	0,69
Na <sub>2</sub> O	0,14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,31

S-	<0,02
Cl-	0,02
Perte au feu	1,63
Insolubles CEN	0,39
Na <sub>2</sub> O éq, actif	0,58

### 1.1.5 Le sable

On utilise du sable normalisé CEN conforme aux exigences des normes EN 196-1 et ISO 679 : 2009, sa masse volumique est de 2 640 kg/m<sup>3</sup> (**Annexe 2**). Il est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1 350 ± 5 g.

### 1.1.6 L'eau

L'eau de gâchage utilisée pour la formulation des composites bois – ciment est l'eau de robinet dont la masse volumique est de 1 000 kg/m<sup>3</sup>.

## 2 Méthodes expérimentales

### 2.1.1 Etude sur mortier

#### 2.1.1.1 Formulations

On procédera à l'élaboration du composite en résolvant le système d'équations (Eq 4.2), on néglige le volume de l'air occlus. Les différents paramètres relatifs au rapport sable – ciment et au volume de pâte ( $V_p$ ) ont fait l'objet d'une campagne de mesure préliminaire. Notre démarche consiste à substituer le sable à raison de quatre taux volumiques (1, 2, 3, et 4%) par les particules de bois de palmier dattier afin d'obtenir des composites résistants et isolants.

$$\begin{cases} V_C + V_S + V_E + V_B = 1 \text{ m}^3 \\ V_C + V_E = 0.501 \text{ m}^3 \\ S = 2C \\ V_B = x \end{cases} \quad (4.2)$$

**Avec :**

$V_c =$  Volume de ciment ;  $V_s =$  Volume de sable ;  $V_e =$  Volume de l'eau ;  $V_b =$  Volume de bois.

$S =$  Sable ;  $C =$  Ciment ;  $x =$  pourcentage de substitution.

La résolution du système précédent donne lieu aux quantités dans le tableau IV.3.

**Tableau IV. 3.** Formulations des composites bois – ciment [kg/m<sup>3</sup>]

	Masse volumique [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>M<sub>0</sub></b>	<b>M<sub>1</sub></b>	<b>M<sub>2</sub></b>	<b>M<sub>3</sub></b>	<b>M<sub>4</sub></b>
Ciment	3,13	649	636	623	610	597
Sable	2,64	1 297	1 271	1 245	1 219	1 193
Eau	1,00	292	297	301	305	309
Bois	1,50	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>
E/C [-]	-	0,45	0,47	0,48	0,50	0,52
B/C [-]	-	0,000	0,024	0,048	0,074	0,101

$E =$  Eau ;  $C =$  Ciment ;  $B =$  Bois ;  $V_p =$  Volume de pâte

Le mortier sans bois de palmier dattier est qualifiée de référence et notée (M<sub>0</sub>) et c'est à ces propriétés et performances qu'ont été comparées celles des quatre autres compositions, le tableau IV.3 regroupe les différents constituants du composite correspondant à 1m<sup>3</sup> du matériau pour différentes teneurs en particules.

### 2.1.1.2 Préparation des mortiers à base de bois

Les différents mortiers ont été fabriqués en ajustant un protocole inspiré de la norme NF EN 196-1, Le malaxage s'effectue à l'aide d'un malaxeur de 5 litres et dure 2 minutes répartie comme suit :

- 1- Versement des matériaux solides dans la cuve du malaxeur, du plus fin au plus grossier (ciment, bois, sable)
- 2- Malaxer à sec à petite vitesse pendant 5s pour homogénéisation,
- 3- Ajouter l'eau et malaxer pendant 30s à petite vitesse,
- 4- Racler le fond de la cuve pendant 30s,
- 5- Malaxer à grande vitesse pendant 60s.

Le mélange est ensuite versé dans des moules prismatiques de dimension 40\*40\*160 cm en caoutchouc imprégnés au préalable d'une fine couche de l'huile de décoffrage puis recouvert d'un film plastique pour garder un milieu endogène. Les éprouvettes sont démoulées après 13 jours et conservées à l'air libre à  $20^{\circ}\pm 2$  °C pendant toute la durée de la cure. Elles sont, systématiquement, retournées quotidiennement.

## 2.1.2 Etude sur pâte

Afin de comprendre les phénomènes qui interviennent dans nos composites mortiers – bois, on élabore de nouveaux composites sans sable dit pâtes de mortiers correspondantes formulées sur la base des mortiers – bois précédant.

### 2.1.2.1 Formulation

L'étude de l'influence de la substitution de ciment portland par le bois de palmier dattier dans une pâte a été réalisée sur des éprouvettes à raison de cinq taux volumique de substitution à savoir (2, 4, 6, 8 et 10%). Les quantités nécessaires à la formulation de nos composites passent par la résolution du système d'équation (Eq 4.3).

$$\begin{cases} V_c + V_e + V_b = 1m^3 \\ E/C = y \\ V_b = x \end{cases} \quad (4.3)$$

**Avec :**

$V_c =$  Volume de ciment ;  $V_e =$  Volume de l'eau ;  $V_b =$  Volume de bois.

$x =$  Pourcentage de substitution (2, 4, 6, 8, 10%) ;  $y = 0,30 ; 0,32 ; 0,35 ; 0,38 ; 0,41$  et  $0,44$ .

Le rapport E/C (y) est récupéré des mortiers – bois déjà élaborés, ce dernier est conditionné par le volume de pâte des mortiers qui dans ce cas précis  $V_p = 0.501$  m<sup>3</sup> pour E/C=0,45, néanmoins, on n'a revu ce rapport à la baisse (E/C = 0,30) pour l'apparition d'une pellicule d'eau à la surface du matériau dès la première heure du moulage, un phénomène inévitable selon Garica [Escalante-Garcia and Sharp (2000)] dès lors qu'on dépasse cette valeur, il en résulte une altération des caractéristiques du matériau à l'état frais et à l'état durci [Josserand (2002)], la même conclusion est soulignée par Mounagua [Mounanga (2003)]. Par ailleurs, ce rapport est évolutif (figure IV.6) en fonction du dosage en particules de bois de palmier dattier afin de prendre en considération ce que ces dernières absorbent. En effet, les recherches

menées par [Simatupang (1979)] et par [Moslemi and Pfister (1987)] sur l'incorporation de la biomasse végétale dans une matrice minérale en l'occurrence le ciment, démontrent clairement qu'il faut réajuster la quantité d'eau incorporée de tel sort à tenir compte du taux de saturation des particules de bois dans le mélange afin d'assurer une maniabilité correcte (figure IV.7). Différentes conditions d'hydratation et différentes proportions **bois : ciment : eau** [Ahmed, Al-Juruf et al. (1990); Bentchikou, Hanini et al. (2007)] peuvent donner différentes classifications de compatibilité car ce ratio (E/C) a un effet direct sur l'hydratation du ciment, l'excès d'eau peut diminuer la température maximale et augmenter le temps de prise du ciment [Espinoza Herrera (2009)]. Egalement, la campagne de mesure préliminaire entreprise donne sur la détermination d'un taux maximal de substitution du ciment par les particules de bois de palmier dattier. Cette valeur permet d'avoir un dosage important en particule de bois tous en respectant le critère de maniabilité.

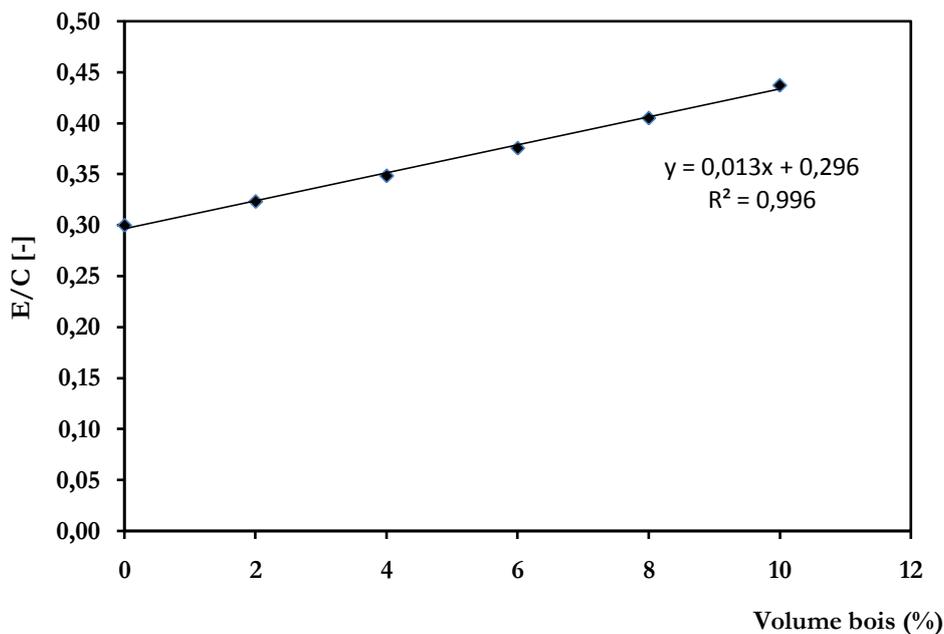


Figure.IV. 6. Evolution du rapport E/C en fonction du volume bois.

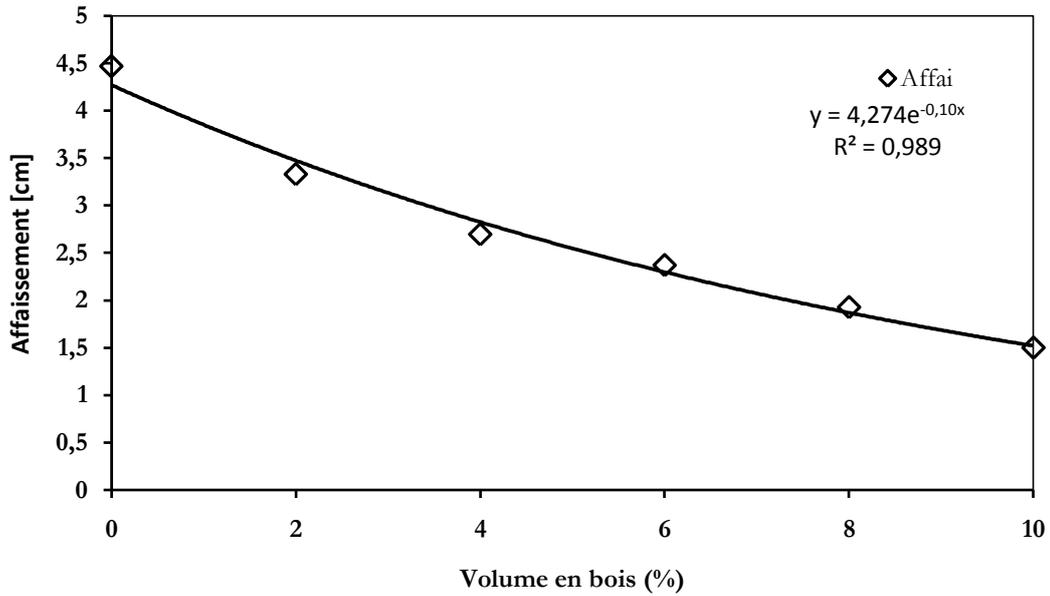


Figure.IV. 7. Affaissement des pâtes bois – ciment en fonction du dosage en bois.

La pâte sans bois de palmier dattier est qualifiée de référence et notée ( $P_0$ ) et c'est à ces propriétés et performances qu'ont été comparées celles de cinq autres compositions, le tableau IV.4 regroupe les différents constituants du composite correspondant à  $1m^3$  du matériau pour différentes teneurs en particules.

Tableau IV. 4 Formulations des composites bois – ciment [ $kg/m^3$ ]

	Masse volumique [ $g/cm^3$ ]	$P_0$	$P_2$	$P_4$	$P_6$	$P_8$	$P_{10}$
Ciment	3,13	1 608	1 519	1 432	1 348	1 266	1 186
Eau	1,00	483	492	499	507	513	519
Bois	1,50	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>150</b>
E/C [-]	-	0,30	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44
B/C [-]	-	0,00	0,02	0,04	0,07	0,09	0,13
Aff [cm]	-	4,47	3,33	2,70	2,37	1,93	1,50
Ecart type	-	0,38	0,50	0,40	0,32	0,32	0,26

$E = Eau$  ;  $C = Ciment$  ;  $B = Bois$  ;  $Aff = Affaissement$  ;  $V_p = Volume de pâte$

### **2.1.2.2 Préparation des pâtes bois ciment**

Les pâtes des différentes formulations ont été fabriquées en malaxant le ciment avec le bois et de l'eau. Le malaxage s'effectue à l'aide d'un malaxeur de 5 litres (conforme à la norme NF EN 196-1) et dure 3 minutes réparties en deux séquences de 90 secondes, la première à vitesse lente (140 tr. min<sup>-1</sup>) et la seconde à vitesse rapide (285 tr. min<sup>-1</sup>). Entre ces deux séquences, le malaxage est arrêté 30 secondes afin de racler les bords et le fond de la cuve. Le mélange est ensuite versé dans des moules prismatiques de dimension 40\*40\*160 cm en caoutchouc imprégnés au préalable d'une fine couche de l'huile de décoffrage puis recouvert d'un film plastique pour garder un milieu endogène. Les éprouvettes sont démoulées après 12 jours et conservées à l'air libre à 20°±2 °C pendant toute la durée de la cure. Elles sont, systématiquement, retournées quotidiennement.

Les différents (essais thermiques, mécaniques, perte en masse) sont réalisés à différents âges à savoir 14, 21 et 28 jours à une humidité relative supérieure à 50% jusqu'au moment de l'essai. À l'état frais, la consistance des mortiers a été mesurée au mini cône (h=150 mm, d=100 mm) suivant la norme ASTM C 1437-07 [ASTM C1437 (2007)].

## **3 Caractérisations**

### **3.1.1 Temps de prise**

L'essai normalisé utilisé pour détecter la prise des matrices cimentaires est l'essai à l'aiguille Vicat (norme NF EN 196-3) (figure IV.8). Il consiste à mesurer, à différentes échéances, l'enfoncement d'une aiguille de diamètre et de masse fixés dans une éprouvette de pâte de ciment de consistance normalisée. On obtient ainsi les temps de début et de fin de prise définis par des hauteurs normalisées d'enfoncement de l'aiguille.



**Figure.IV. 8.** Test de prise Vicat des pâtes bois – ciment en fonction du dosage en bois.

### **3.1.2 Propriétés morphologique**

À l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB), on entreprend d'examiner la microstructure de bois de palmier dattier. Les échantillons ont été découpés de la partie pétiolaire de la palme imprégnés dans de la résine sous vide, polis après 24h de séchage aux conditions de laboratoire, montés sur le port échantillons, recouverts d'or et observés à l'aide du contraste topographique (SEI) du MEB (figure IV.9).



**Figure.IV. 9.** Préparation des échantillons de bois.

### 3.1.3 Propriétés thermiques

Les mesures de la conductivité thermique des éprouvettes de CBC à base de bois de palmier dattier se fait à l'aide de la méthode dite fil chaud [Coquard, Baillis et al. (2006)] (figure IV.10). La méthode consiste à placer une sonde en sandwich entre deux éprouvettes. Les mesures sont effectuées à différentes échéances 14, 21 et 28 jours. Cette méthode transitoire est la méthode classique des mesures de la conductivité thermique des matériaux isolants. La méthode consiste à placer une sonde à chocs thermiques en sandwich entre deux échantillons à caractériser. La sonde produit localement un échauffement faible du matériau (quelques degrés au-dessus de la température ambiante) et de mesurer cette élévation de température au cours du temps (durée de quelques minutes). Par un traitement mathématique de ce signal intégré dans le logiciel fourni, l'identification de la conductivité thermique est réalisée.

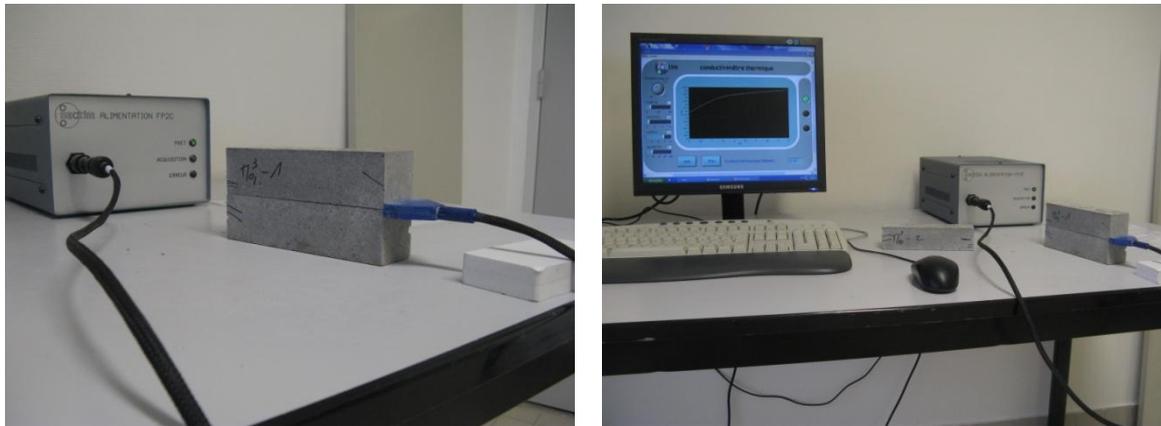


Figure.IV. 10. Mesure de la conductivité thermique par la méthode fil chaud.

### 3.1.4 Propriétés mécaniques

Pour chaque échéance (14, 21 et 28 jours) et pour chaque formulation, trois éprouvettes sont rompues en flexion trois points et les six morceaux d'éprouvettes obtenus sont ensuite testés en compression. Pour chaque composite étudié, la valeur de résistance à la compression est une moyenne de six résultats d'essais de compression. Les essais de flexion trois points et de compression ont été effectués, respectivement, sur un appareil de type INSTRON modèle 5567 d'une capacité 30 kN avec une vitesse de charge de 50 N/s conformément à la norme NF EN 1015-11, 2000 et INSTRON type SCHENK à asservissement hydraulique d'une capacité de 3200 kN, assistée par ordinateur, les essais sont réalisés à une vitesse de contrainte de 10 N/min.

L'éprouvette de section  $A$  [ $\text{mm}^2$ ] ( $b \times h$ ) (figure IV.11), repose sur deux appuis simples distants de  $l$  (100 mm) est chargée au centre  $F$  [ $\text{N}$ ], La contrainte normale de traction  $R_f$  [ $\text{MPa}$ ] appliquée sur la section prismatique sera déterminée par l'équation (Eq 4.4).

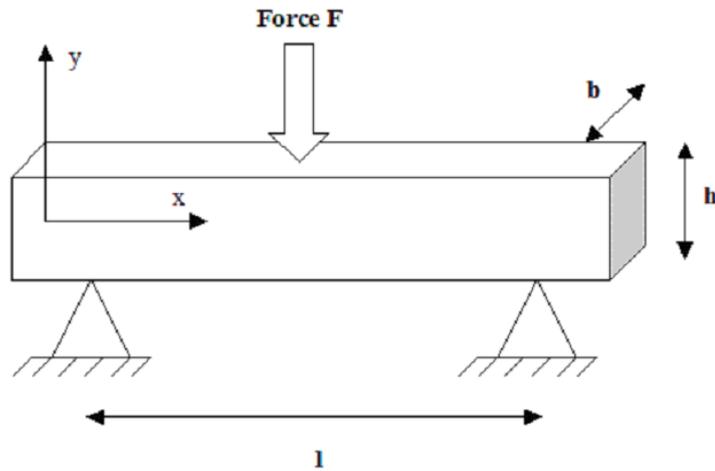


Figure.IV. 11. Schéma du montage de flexion 3 points.

$$R_f = \frac{1,5Fl}{bh^2} \quad (4.4)$$

La contrainte de compression  $R_c$  [ $\text{MPa}$ ] est calculée suivant l'équation (Eq 4.5).

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (4.5)$$

Avec  $F_c$  [ $\text{N}$ ] charge à la rupture,

## Bibliographie

- Boukrouh, A. (2010). Algerian date 'Deglet Nour' to be labelled by Algerian authorities. *Echorouk*. Algiers. **Vol. 2889**: p. 4.
- Agoudjil, B., A. Benchabane, et al., "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood." *Energy and Buildings* **43**, 491-497.(2011)
- Munier, P., "Le palmier-dattier", Ed Techniques agricoles et productions tropicales, (1973).
- Benchelah, A. C. and M. Maka, "Les dattes, de la préhistoire à nos jours." *Phytothérapie* **1**, 43-47.(2006)
- Agoudjil, B., A. Benchabane, et al., "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood." *Energy and Buildings* **43**, 491-497.(2010)
- Almi, K., A. Benchabane, et al., "Potential utilization of date palm wood as composite reinforcement." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 0731684415588356.(2015)
- Almi, K., S. Lakel, et al., "Characterization of Date Palm Wood Used as Composites Reinforcement." *Acta Physica Polonica A* **127**, 1072-1074.(2015)
- Kalaprasad, G., P. Pradeep, et al., "Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low-density polyethylene composites reinforced with sisal, glass and intimately mixed sisal/glass fibres." *Composites Science and Technology* **60**, 2967-2977.(2000)
- Behzad, T. and M. Sain, "Measurement and prediction of thermal conductivity for hemp fiber reinforced composites." *Polymer Engineering & Science* **47**, 977-983.(2007)
- Paul, S. A., A. Boudenne, et al., "Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **39**, 1582-1588.(2008)
- Al-Mana, F., M. Ed-Hamady, et al., "Improving root development on ground and aerial date palm offshoots." *Principes* **40**, 179-181.(1996)
- Kriker, A., A. Bali, et al., "Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates." *Cement & Concrete Composites* **30**, 639-648.(2008)
- Escalante-Garcia, J. and J. Sharp, "The effect of temperature on the early hydration of Portland cement and blended cements." *Advances in cement research* **12**, 121-130.(2000)
- Josserand, L., "Ressuage des bétons hydrauliques", Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris (2002)

- Mounanga, P., "Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge: hydratation, retraits, propriétés thermophysiques", Thèse de doctorat, Université de Nantes,(2003)
- Simatupang, M., "The water requirement of manufactured cement-bonded particleboard." *Holz als Roh-und Werkstoff* **37**, 379-382.(1979)
- Moslemi, A. and S. C. Pfister, "The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels." *Wood and fiber science* **19**, 165-175.(1987)
- Ahmed, F. A., R. S. Al-Juruf, et al., "A homogeneous building material from date palm fronds." *Building and Environment* **25**, 183-187.(1990)
- Bentchikou, M., S. Hanini, et al., "Elaboration et etude d'un mortier composite a matrice minerale et fibres cellulosiques: application a l'isolation thermique en batiment." *Canadian Journal of Civil Engineering* **34**, 37-45.(2007)
- Espinoza Herrera, R., "Panneaux en gypse et particules de bois renforcés avec du ciment Portland", **Thèse** de doctorat, Université Laval,(2009)
- ASTM C1437, "standard test method for flow of hydraulic cement mortar."(2007)
- Coquard, R., D. Baillis, et al., "Experimental and theoretical study of the hot-wire method applied to low-density thermal insulators." *International journal of heat and mass transfer* **49**, 4511-4524.(2006)

## CHAPITRE V

# Chapitre V

## Résultats et discussions

Résultats et discussions	90
1 Analyse morphologique	91
2 Etude sur mortier	92
2.1.1 Analyse thermique	92
2.1.2 Analyse du comportement mécanique	95
3 Conclusion	99
4 Etude sur pâte ciment	100
4.1.1 Propriétés thermique	100
4.1.2 Analyse du comportement mécanique	102
5 Conclusion	105
Bibliographie	107

La méthode de formulation et pour les mortiers et pour les pâtes ciment au préalable définie dans le chapitre précédent, nous nous intéressons aux caractérisations morphologique et thermomécaniques des CBC réalisés à base de ciment portland et des particules issues du broyage de bois de palmier dattier le pétiole en l'occurrence.

## 1 Analyse morphologique

L'image MEB de la figure V.1 est obtenue d'un échantillon prélevé de la partie pétiolaire d'un bois de palmier dattier. Nous observons sur la figure V.1(a) une surface poreuse constituée d'un ensemble de différentes formes de fibres dispersés dans une matrice constituée majoritairement d'hémicellulose et de lignine.

Nous pensons que les fibres denses, de faibles périmètres, soutiennent la structure du pétiole et jouent le rôle de fibres porteuses. La morphologie de ce type de fibres est rapportée dans les travaux de [Agoudjil, Benchabane et al. (2010)]. Les auteurs rapportent que ces fibres sont constituées d'un assemblage de fibrilles (qui ne sont pas visibles à l'échelle de la figure V.1(a), dont la partie centrale de chaque fibrille, appelée le lumen, est creuse [Besset (1987); Thiebaud (1995); Bledzki and Gassan (1999); Michaud (2003); Navi and Heger (2005); Sedan (2007); Sedan, Pagnoux et al. (2007); John and Thomas (2008); Jebrane (2009)].

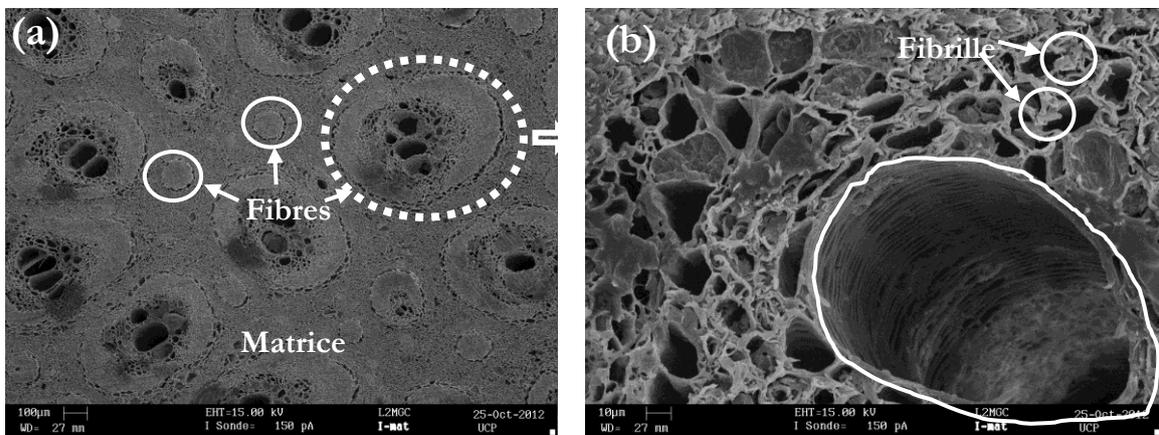


Figure.V. 1. Images au microscope électronique à balayage d'un pétiole.

En revanche, la figure V.1(b) montre la structure d'un deuxième type de fibres dont la structure de base est similaire au premier type. Cette fibre est constituée d'un faisceau de fibrilles et de quelques lumens de volume plus important. Ceci, confère au bois de palmier dattier une masse volumique apparente très faible Tableau IV. 1.

## 2 Etude sur mortier

Nous confectionnons des échantillons de mortiers-bois de palmier dattier à différentes teneurs de particules de bois à savoir 0, 1, 2, 3, et 4%. Nous rapportons des résultats thermiques et mécaniques à différents âge 14 jours, 21 jours et à maturations (28 jours).

### 2.1.1 Analyse thermique

La figure V.2 illustre la variation de la conductivité thermique des composites fabriqués avec du bois de palmier dattier pour différentes concentrations volumique. On remarque que pour tous les échéanciers (14, 21 et 28 jours), la conductivité thermique du composite diminue en fonction du dosage en particules de bois de palmier dattier, cette diminution s'accroît des lors quand atteint 4% du volume total du mélange ce qui engendre un gain non négligeable de l'ordre de 75% (figure V.3).

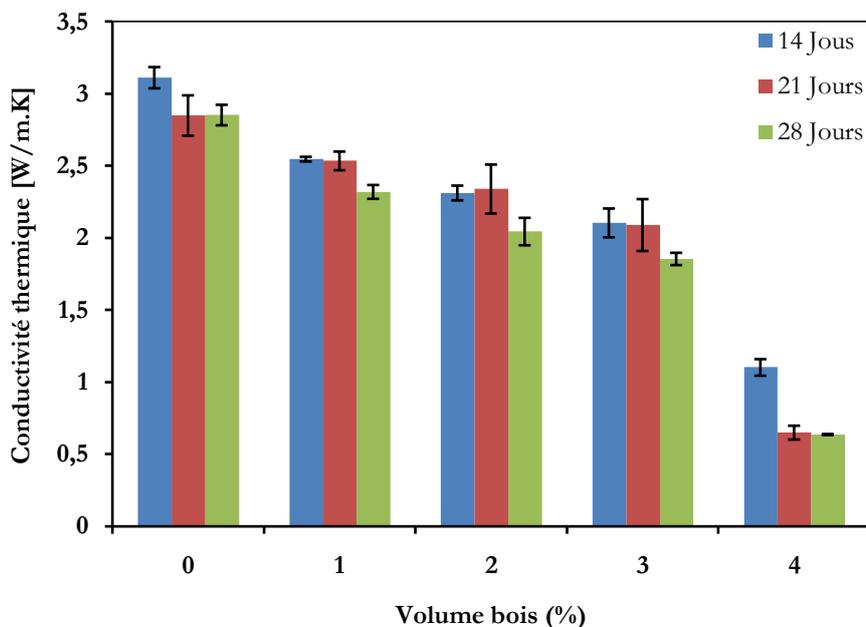
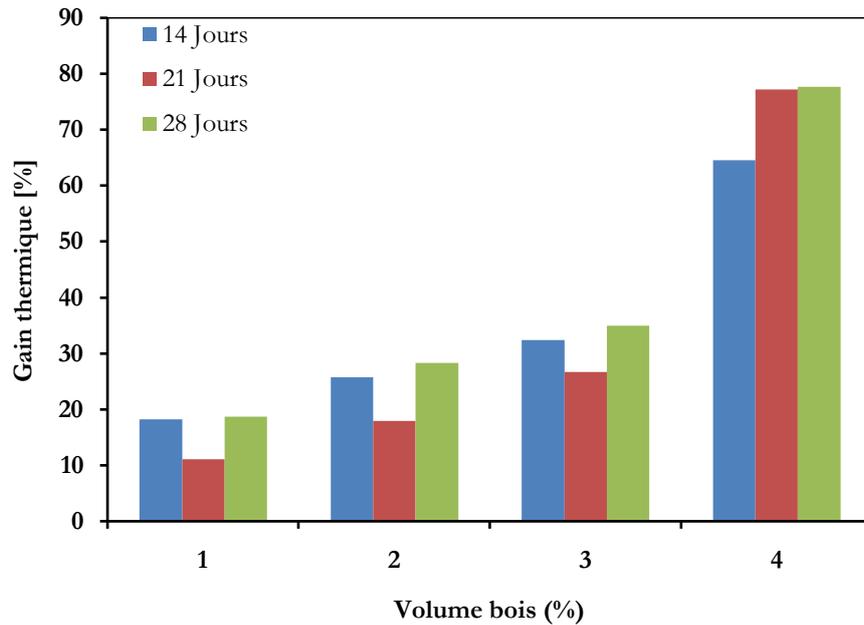


Figure.V. 2. Conductivité thermique des mortiers à base de bois de palmier dattier.



**Figure.V. 3.** Gain thermique des mortiers à base de bois de palmier dattier.

Ce gain thermique constaté pour les différentes formulations est dû à l'importante différence des conductivités thermiques des constituants employés à l'image des particules de bois de palmier, néanmoins, l'humidité relative de nos éprouvettes peut affecter la conductivité thermique du composite. En effet, la conductivité thermique de l'eau est 25 fois supérieure à celle de l'air, le séchage du composites qui est reflété par la perte en masse qui s'accompagne d'une revalorisation de la densité et l'hydratation permanente de nos échantillons laissent place à l'apparition de pores ce qui se traduit par une conductivité thermique plus faible du composite.

Par ailleurs, la méthode de formulation mise en place intervient à la fois sur le rapport E/C (figure V.4) et la quantité du ciment incorporée dans le mélange (figure V.5), cette dernière diminue en fonction du dosage en particules de bois de palmier. Ce manque de ciment (70 Kg) entre la référence ( $M_0$ ) et le composite (tableau 2) à 4% ( $M_4$ ) intervient sur la conductivité thermique du matériau, un résultat rapporté notamment par demirboga [Demirboga (2003)] en mettant en évidence que la conductivité thermique des bétons est corrélée positivement avec le dosage en ciment. En effet, la conductivité thermique est d'autant plus importante que le dosage en ciment est grand.

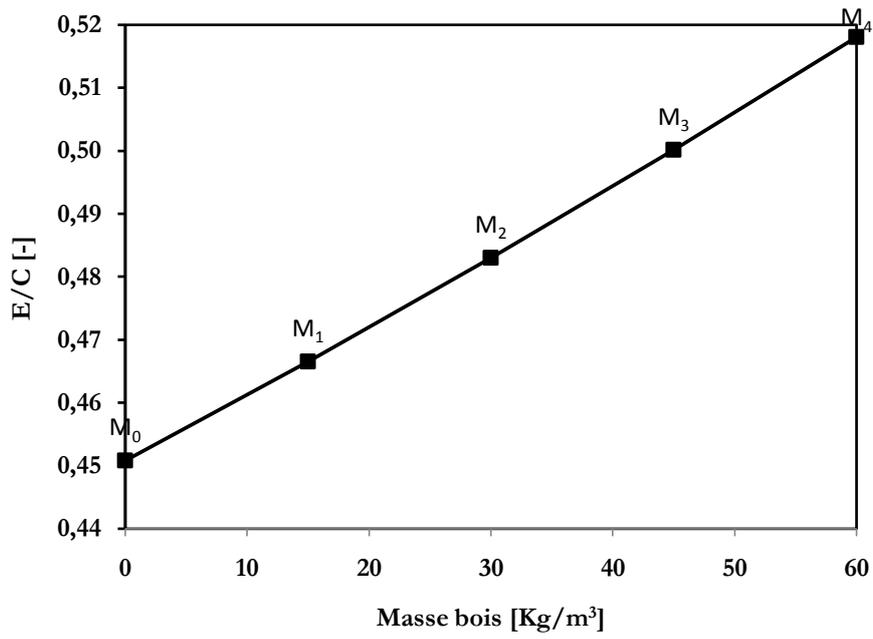


Figure.V. 4. Evolution du rapport E/C des CBC développés.

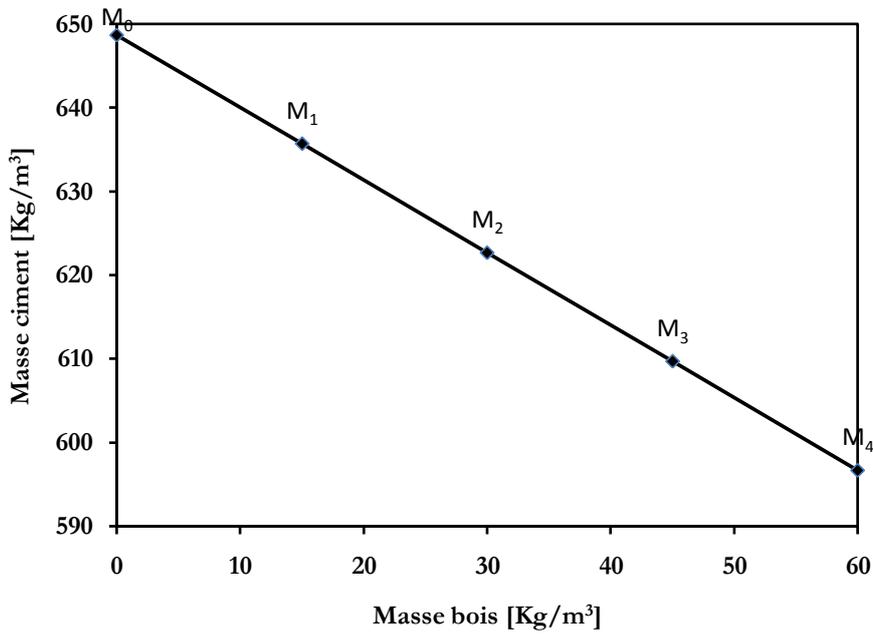


Figure.V. 5. Evolution de la quantité de ciment dans CBC.

Le tableau V.1 illustre une comparaison de la conductivité thermique de nos matériaux composites (mortier – bois de palmier dattier) ainsi que de la densité à d'autres composites qui contiennent des particules végétales destinés à améliorer l'isolation thermique des habitations. Ces valeurs indiquent que notre matériau qui présente une densité importante par rapport à d'autres produits est un bon isolant. Il est à noter que les densités des différentes particules ajoutées au mélange c'est des densités apparentes et non pas réelles qui est notre cas.

**Tableau V. 1.** Comparaison de la conductivité thermique et de la densité des composites mortiers – bois de palmier dattier à d'autres matériaux.

Composites	Conductivité (W/mK)	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Références
M <sub>3</sub> - M <sub>4</sub>	1,86 - 0,64	1970 - 1780	Cette étude
M <sub>0</sub>	2,85	2306	Cette étude
Gypse/bois de palmier dattier (10% masse)	0,15 - 0,17	753	[Chikhi, Agoudjil et al. (2013)]
Ciment-filler-sable-bois (10-100% masse)	0,80 - 0,65		[Bederina, Marmoret et al. (2007)]
Mortier – fibre de coco (10% masse)	0,65	1502	[Khedari, Suttisonk et al. (2001)]
Mortier – fibre de coco (15% masse)	0,54	1464	[Khedari, Suttisonk et al. (2001)]
Mortier – fibre de Durion (10% masse)	0,79	1832	[Khedari, Suttisonk et al. (2001)]

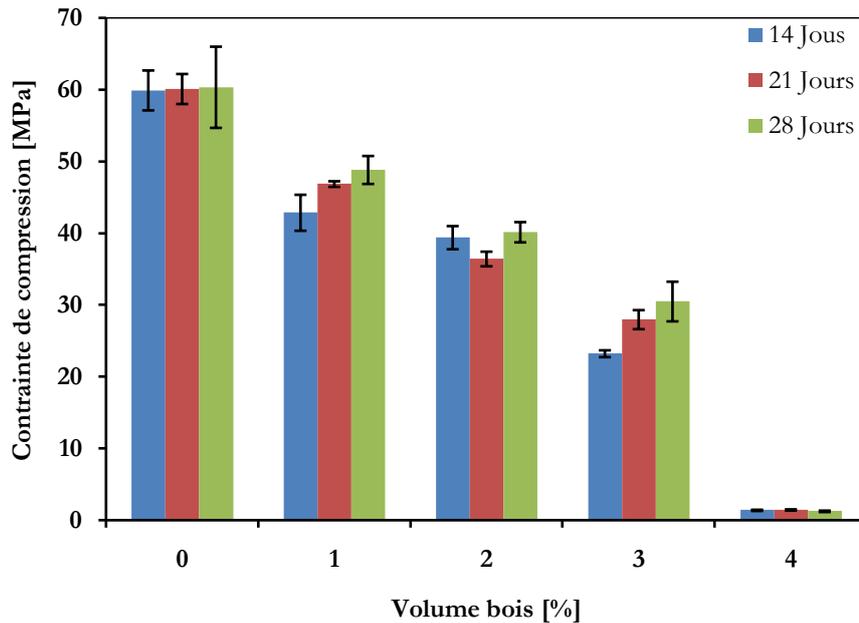
La conductivité thermique de nos composites dépend de plusieurs paramètres à savoir le rapport E/C, âge du composites, proportion de bois, quantité de ciment, humidité relative de nos matériaux et méthode de formulations

## 2.1.2 Analyse du comportement mécanique

La substitution du sable par les particules de bois de palmier dattier affecte sensiblement le comportement mécanique (flexion – compression) de nos composites. Notre objectif est la validation de la méthode de formulation adoptée et le développement d'un matériau isolant.

### 2.1.2.1 Résistance à la compression

La figure V.6 représente l'évolution de la résistance mécanique en compression des différentes formulations mortiers – bois en fonction de leur âge (14, 21 et 28 jours). Il est à constater que les valeurs de contrainte en compression est maximale à 28 jours et diminuent en fonction du taux de substitution du sable par les particules de bois de palmier dattier.



**Figure.V. 6.** Contraite de compression des composites mortiers - bois.

Pour à taux volumique de substitution allant de 0 à 4%, la résistance à la compression à 28 jours varie de 60,38 MPa, pour le mortier de référence ( $M_0$ ), à 1,25 MPa ( $M_4$ ) ; soit une réduction considérable de l'ordre de 97%, parallèlement, elle est de 49% en moyenne pour la formulation à 3% de bois. Cette chute brutale de la résistance mécanique à la compression relative à la formulation à 4% de substitution d'une part, liée au taux élevé de particules de bois de palmier dattier ( $60 \text{ Kg/m}^3$ ) qui inhibite le processus d'hydratation du ciment. A 28 jours le composite n'a pas encore atteint sa maturité, selon Mounanga [Mounanga (2003)] il est préférable, à ce stade de parler d'âge équivalent. D'autre part, l'augmentation de la porosité introduite par les particules de bois explique également la diminution de la résistance en compression mesurée dans les CBC par rapport au mortier de référence. Ces phénomènes sont observés d'une manière générale lorsque des particules, fibres granulatés végétaux sont injectés dans des matrices minérales (ciment, gypse)[Khedari, Suttisonk et al. (2001); Khorami and Ganjian (2011); Chikhi, Agoudjil et al. (2013)].

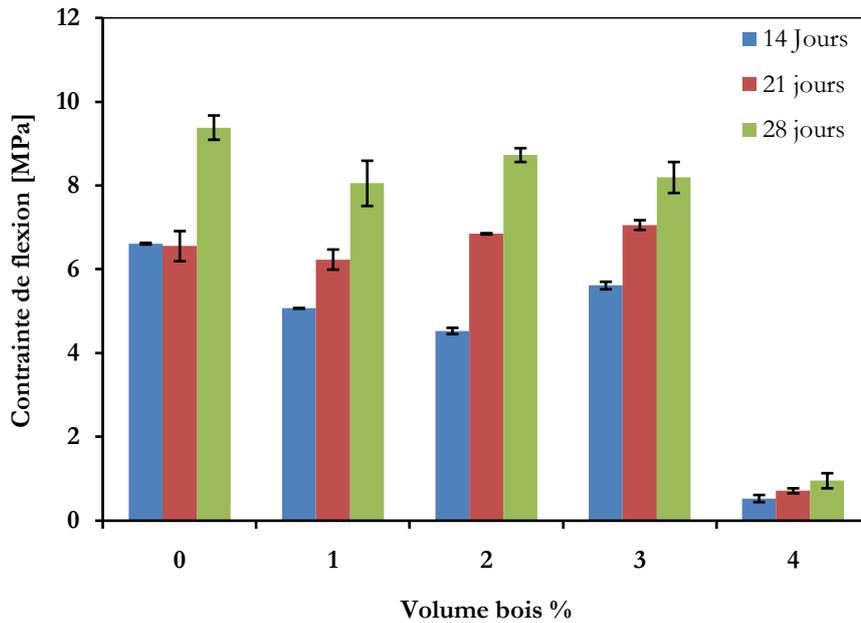
**Tableau V. 2.** Comparaison de la résistance à la compression des composites mortiers – bois de palmier dattier à d’autres matériaux.

Composites	Rc [MPa]	Références
M <sub>3</sub>	30,51	Cette étude
M <sub>0</sub>	60,38	Cette étude
Gypse-bois de palmier dattier (1,2% masse)	8,2	[Chikhi, Agoudjil et al. (2013)]
Béton –fibre de palmier dattier (2% masse)	20	[Kriker, Debicki et al. (2005)]
Ciment-filler-sable-bois (10% masse)	10,6	[Bederina, Marmoret et al. (2007)]
Mortier – fibre de coco (10% masse)	7,96	[Khedari, Suttisonk et al. (2001)]

Ces résultats démontrent que pour un certain taux de substitution (3%), le composite bois ciment résultant présente une compatibilité acceptable au regard d’un traitement chimique ou l’ajout d’adjuvants.

### 2.1.2.2 Résistance à la flexion

La figure V.7 présente l’évolution de la contrainte de flexion à 14, 21 et 28 jours en fonction des taux de substitution volumique (1, 2, 3 et 4%). La contrainte de flexion est d’autant plus importante que le taux de substitution est important, elle est ultime à 28 jours pour toutes les formulations, elle varie de 9,39 MPa pour le mortier de référence (M<sub>0</sub>) à 0,96 MPa pour le mortier à 4% de fraction volumique dans les mêmes conditions d’essai (température et âge), Contrairement à la littérature, ce composite ne présente pas de courbe type et caractéristique du comportement ductile (3 paliers spécifiques) de ce genre de matériaux renforcés par des fibres végétales, il présente cependant un comportement linéaire et fragile (figure V.8) typique de mortier sans ajout.



**Figure.V. 7.** Contrainte de flexion des composites mortiers - bois.

La résistance en flexion de notre matériau semble fragile telles des mortiers sans particules végétales, lors de la rupture les particules de bois de palmier dattier ne reprennent pas la charge se qui traduit une mauvaise adhésion à l'interface particules –matrice [Sedan (2007)], néanmoins, avec 3% de fraction volumique de substitution qui correspond à 8,20 MPa en comparaison 4 MPa pour [Khorami and Ganjian (2011)] avec 4% en fibre, notre matériau offre de correcte performance mécanique.

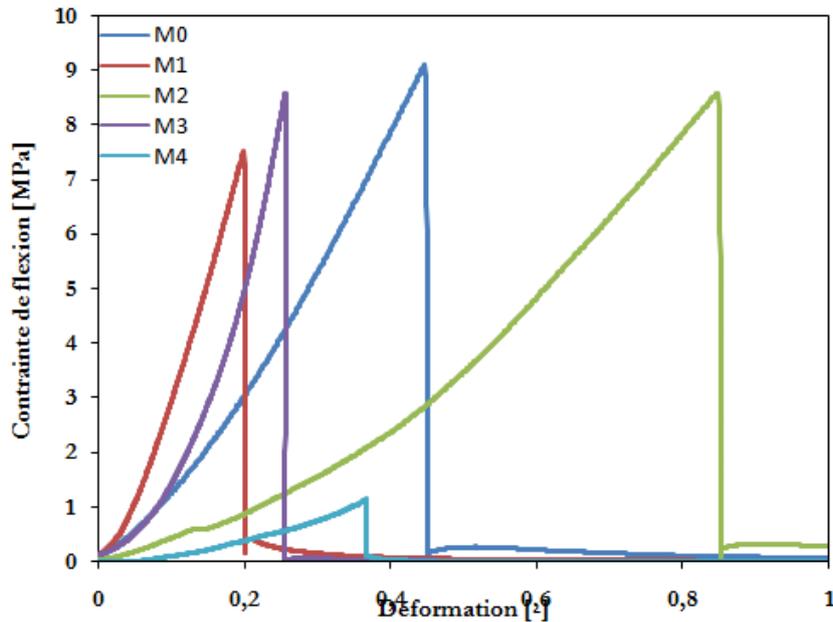


Figure.V. 8. Courbe contrainte de flexion – déformation à 28 jours

### 3 Conclusion

De point de vue caractérisation thermique, la conductivité thermique du composite diminue en fonction de la teneur en particules de bois de palmier dattier. Les valeurs obtenues sur les composites CBC à 28 jours notamment pour la teneur en particule de bois à 4 % ( $\lambda = 0,64 \text{ W/m.K}$ ) est assez satisfaisante comparée à d'autres matériaux à base fibres végétales l'image du Mortier – fibre de coco ( $\lambda = 0,65 \text{ W/m.K}$ ). Par ailleurs, la conductivité thermique de nos composites dépend de plusieurs paramètres à savoir le rapport E/C, âge du composites, quantité de ciment, humidité relative de nos matériaux.

Le résultat des essais de compression démontrent que le CBC réagit d'une manière conventionnelle. En effet, la contrainte de compression diminue en fonction de la teneur du composite en particules de bois de palmier dattier. Cependant, pour un certaine teneur en particules (3%), le composite bois ciment résultant présente une contrainte assez importante ( $R_c = 30,51 \text{ MPa}$ ) comparé à d'autres produits de même type ciment-filler-sable-bois ( $R_c = 10,6 \text{ MPa}$ ).

En revanche, nous gagnons en contrainte de flexion. En effet, les résultats montrent une franche augmentation de la contrainte en fonction de la teneur de bois jusqu'à une teneur limite de 3% qui représente une contrainte de ( $R_f = 8,2$  MPa). Ce résultat reflète un bon transfert de charge entre la matrice et le renfort végétale dû notamment à la granulométrie des particules de bois. Indirectement nous affirmons qu'avec cette teneur le bois de palmier dattier est compatible dans ses conditions avec le ciment portland.

## 4 Etude sur pâte ciment

Cinq types de composite "bois de palmier dattier – ciment" contenant différentes teneurs en particules de bois de palmier dattier : 2, 4, 6, 8 et 10 % du volume total, ont été confectionnés suivant une méthode de formulation et un protocole définis précédemment. Leurs propriétés thermiques et mécaniques sont mesurées à différent âge 14 jours, 21 jours et 28 jours. Les résultats sont comparés à d'autres matériaux de la littérature.

### 4.1.1 Propriétés thermique

La figure V.9 illustre la variation de la conductivité thermique des composites fabriqués avec du bois de palmier dattier à différentes concentrations volumiques (0% à 10%). La conductivité thermique du composite bois-ciment diminue en fonction de la teneur en particules du bois de palmier dattier.

La figure V.9 montre que la conductivité thermique passe de  $\lambda = 0,96$  à  $0,24$  W/mK pour une teneur de bois allant de 0 à 10% respectivement, avec un gain thermique positif de l'ordre de 75%. Au regard des quantités du bois ( $\lambda = 0,061$  W/m.K) et de ciment ( $\lambda = 0,5$  à  $1,3$  W/m.K) injectées dans le mélange, pour un volume constant du matériau, la quantité du ciment diminue en fonction du dosage en particules de bois qui a un impact direct sur la conductivité thermique du composite. En effet, la conductivité thermique est d'autant plus importante que le dosage en ciment est important [Demirboga (2003)]. Ce résultat est vérifié quelque soit le type de la biomasse injectée dans une matrice minérale [Bentchikou, Hanini et al. (2007); Espinoza Herrera (2009)]

D'autre part, l'humidité relative du composite dépend de la teneur importante en particules du bois de palmier. Une fois les particules du bois sèchent, leur volume baisse en donnant lieu à l'apparition de nouveaux pores, dans une structure déjà poreuse, ce qui explique la diminution de la conductivité thermique du composite bois-ciment.

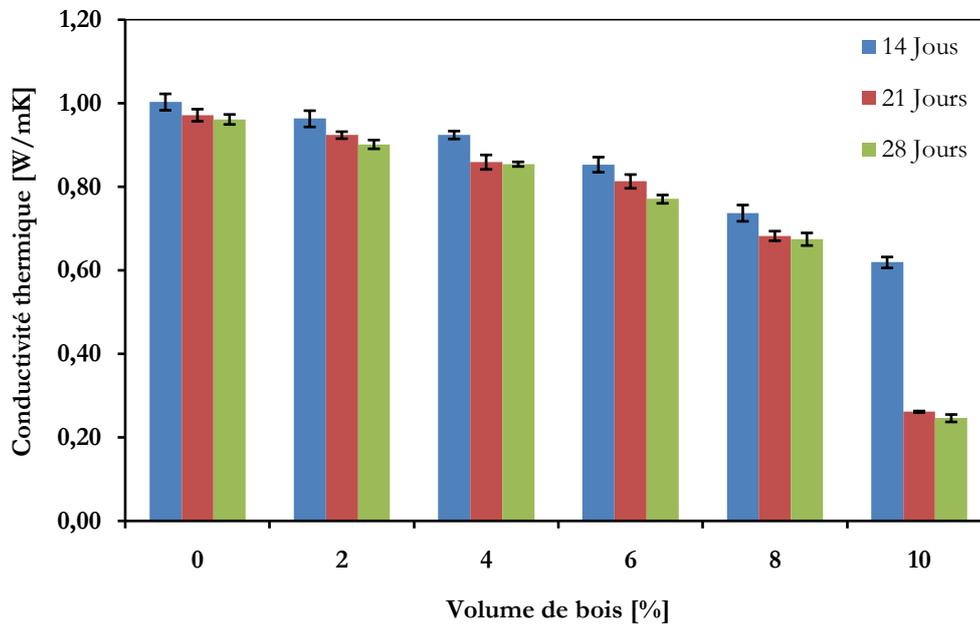


Figure.V. 9. Conductivité thermique des pâtes de mortiers correspondantes.

Le tableau V.3 illustre une comparaison qualitative de la conductivité thermique de différents composites à base de bois. On rapport dans la présente étude que pour une teneur de 0 à 10% de particules du bois on obtient respectivement une conductivité thermique de 0,96 à 0,24 W/m.K pour une densité de 2102 à 1378 kg/m<sup>3</sup>. On note également que les valeurs des conductivités thermiques pour une teneur en particule de 2 à 10 %, correspondantes à 0,67 à 0,24 W/m.K, s'apparentent à celles des bétons légers conformément à la norme ASTM C109/C 109-95 et rapporté par [Neville (2000)].

Tableau V. 3. Comparaison de la conductivité thermique et de la densité des composites bois- ciment à d'autres matériaux.

Composites	Conductivité (W/mK)	Référence
P10 - P8	0,24 – 0,67	présente étude
P0	0,96	présente étude
Gypse/bois de palmier dattier (10 % masse)	0,15 - 0,17	[Chikhi, Agoudjil et al. (2013)]
Ciment-filler-sable-bois (10-100 % masse)	0,80 - 0,65	[Bederina, Marmoret et al. (2007)]
Ciment-argile-bois (30 % masse)	0,20	[Bouguerra, Amiri et al. (2001)]

## 4.1.2 Analyse du comportement mécanique

### 4.1.2.1 Compression

Les essais de résistance mécanique à la compression pour les différentes formulations ont été faits à différents âge à savoir 14, 21 et 28 jours, Les résultats (résistance à la compression et module d'Young) pour chaque échéance sont présentés aux tableaux V.4 et V.5 respectivement la figure V.10' et figure V.11.

**Tableau V. 4.** Résultats des essais de compression des CBC.

Formules		$P_0$	$P_2$	$P_4$	$P_6$	$P_8$	$P_{10}$
Contrainte de compression [MPa]	E/C [-]	0,3	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44
	14 Jours	68,54	61,89	46,41	49,47	36,23	1,65
	<i>Ecart type</i>	5,06	0,98	2,74	1,52	1,96	0,17
	21 Jours	60,58	68,09	55,93	57,19	42,74	2,54
	<i>Ecart type</i>	3,29	1,52	1,65	0,95	1,50	0,18
	28 Jours	55,08	64,87	58,57	56,12	45,34	2,75
	<i>Ecart type</i>	18,30	2,34	2,54	0,55	0,31	0,12

La figure ci-dessus représente l'évolution de la résistance mécanique en compression des différentes formulations bois – ciment à en fonction de leur âge (14, 21 et 28 jours), Il est à constater que les valeurs de contrainte en compression pour toutes les compositions présentent une légère variation en fonction de l'âge, par ailleurs, les résultats obtenus démontrent que la résistance à la compression diminue en fonction du taux de substitution du ciment par les particules de bois de palmier dattier, un constat typique de ce genre de matériaux.

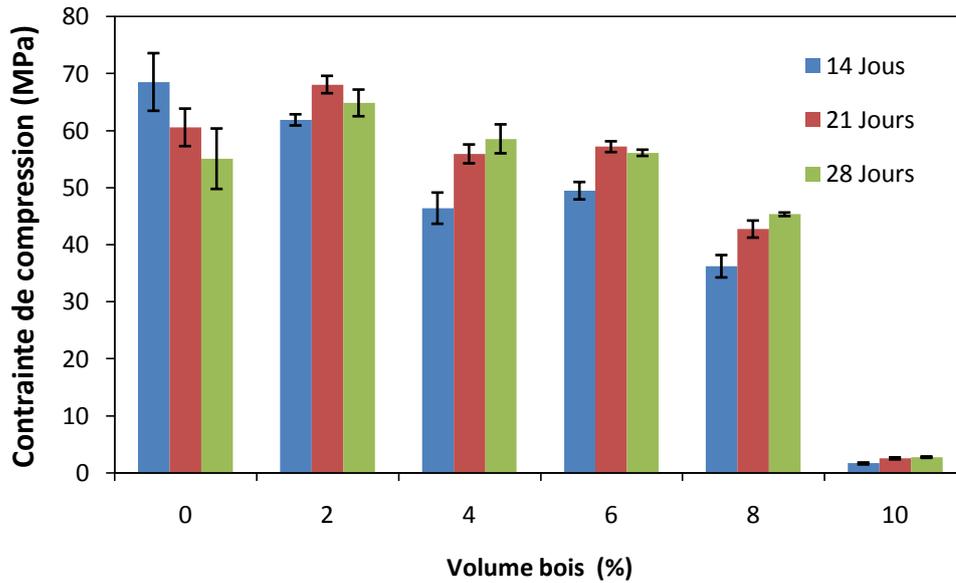


Figure.V. 10. Contrainte de compression pâtes – bois.

Pour une composition allant de 0 à 10%, la résistance à la compression à 28 jours varie de 77,96 MPa, pour la pâte de référence ( $P_0$ ), à 2,75 MPa ( $P_{10}$ ) ; soit une réduction considérable de l'ordre de 96,38%, parallèlement, elle de 45% en moyenne pour la formulation à 8% de bois,

Cette chute brutale de la résistance mécanique à la compression relative à la formulation à 10% de substitution est liée à l'augmentation de la porosité en raison d'une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau en fonction de la composition en bois.

Tableau V. 5. Module d'Young

Formules		$P_0$	$P_2$	$P_4$	$P_6$	$P_8$	$P_{10}$
sModule de Young [MPa]	E/C [-]	0,3	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44
	14 Jours	34,03	33,62	25,28	29,03	17,81	-
	<i>Ecart type</i>	2,91	0,80	0,55	1,14	1,01	-
	21 Jours	37,06	42,29	35,14	24,61	24,29	-
	<i>Ecart type</i>	1,96	0,68	0,71	0,43	0,85	-
	28 Jours	26,22	35,91	38,75	32,23	24,06	-
	<i>Ecart type</i>	13,48	0,48	1,73	0,34	0,21	-

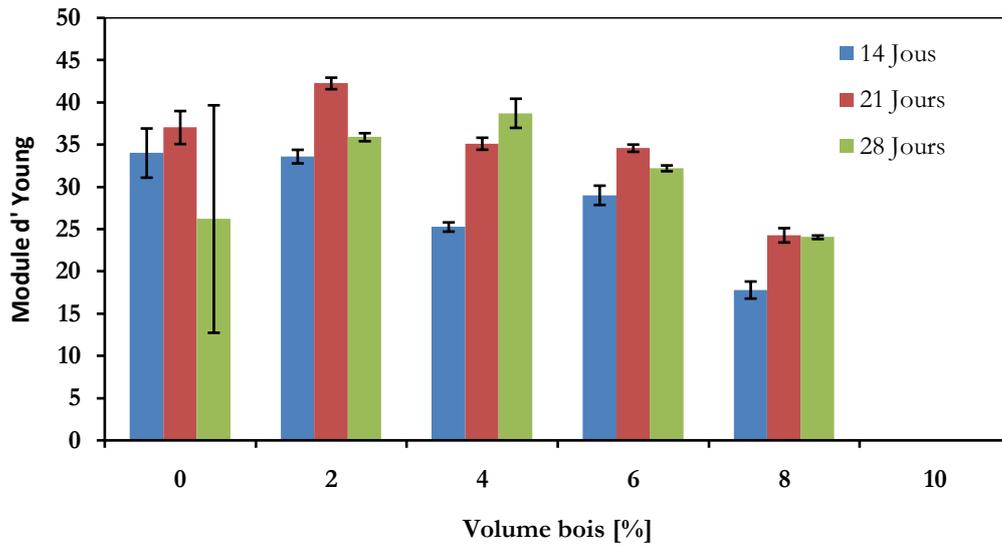


Figure.V. 11. Module d'Young pâtes – bois.

Toutefois, ces résultats démontrent que pour un certain taux de substitution (8%), le composite bois ciment résultant présente une compatibilité acceptable au regard d'un traitement chimique ou l'ajout d'adjuvants,

#### 4.1.2.2 Flexion

Les différents résultats en flexion sont donnés dans le tableau ci-dessous

Formules		$P_0$	$P_2$	$P_4$	$P_6$	$P_8$	$P_{10}$
Contrainte de flexion [MPa]	E/C [-]	0,3	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44
	14 Jours	2,14	2,63	3,17	3,84	5,15	0,57
	<i>Ecart type</i>	0,02	0,27	0,06	0,09	0,10	0,01
	21 Jours	2,52	2,63	3,17	3,84	5,15	0,57
	<i>Ecart type</i>	0,00	0,27	0,06	0,09	0,10	0,01
	28 Jours	2,29	2,31	2,58	3,42	9,04	1,25
	<i>Ecart type</i>	0,04	0,02	0,23	0,16	0,25	0,03

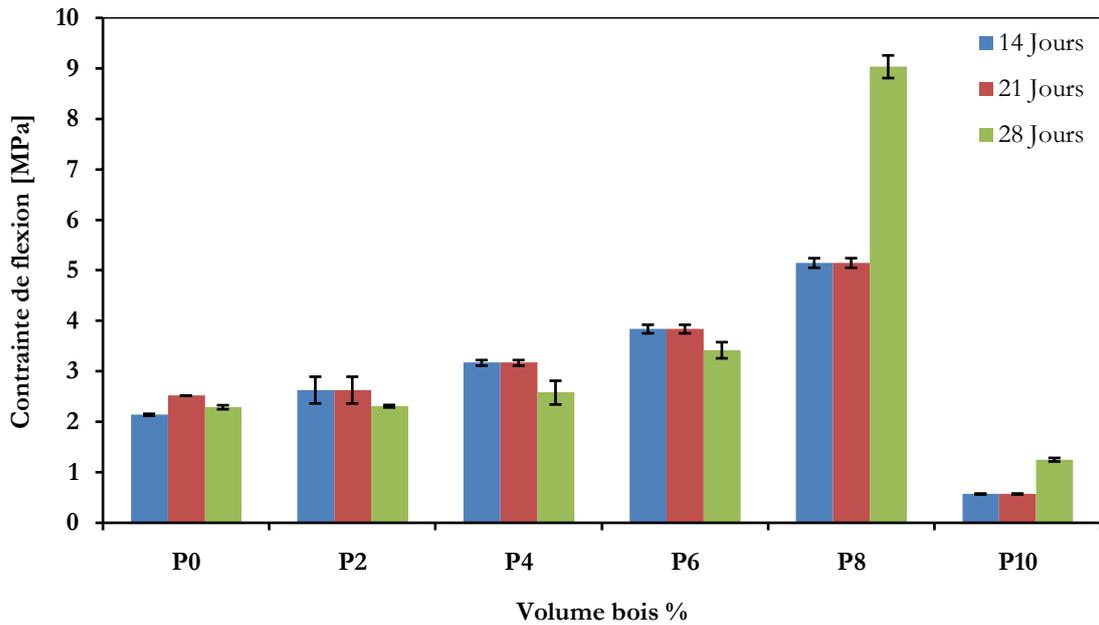


Figure.V. 12. Contrainte de flexion, pâtes ciment bois à 14, 21 et 28 jours.

## 5 Conclusion

De point de vue caractérisation thermique, les valeurs obtenues sur les composites bois-ciment de 28 jours, notamment pour la teneur en particule de bois à 10 % qui correspond à 0,24 W/m.K, s'apparentent à celles des bétons légers conformément à la norme ASTM C109/C 109-95.

En parallèle, les essais de compression sur les composites bois-ciment à maturation ont révélés un comportement très particulier notamment pour les teneurs en particules 2, 4, 6 et 8%. Ce résultat n'adhère pas à ceux de la littérature où nous rapportons une diminution de la contrainte de compression en fonction de la teneur en particules de bois. Pour la présente étude, la diminution de la contrainte n'est significative qu'au-delà de la teneur de 8%. Ainsi, conformément à la norme ASTM C 109/ C 109-95, le composite bois (à 8% en teneur)-ciment, développé au cours de cette étude, pourra être utilisée dans le domaine de bâtiment, notamment, le recouvrement des murs.

Les essais de flexion ont confirmé l'analyse et la discussion développée dans la partie essais de compression. Ces essais ont montré un gain en propriétés mécaniques correspondant au composite bois (8%)-ciment dû principalement à une bonne adhésion à l'interface particules de bois de palmier dattier – ciment qui est traduit par un transfert de charge matrice – particules plus efficaces.

# Bibliographie

- Agoudjil, B., A. Benchabane, et al., "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood." *Energy and Buildings* **43**, 491-497.(2010)
- Besset, J., "Bois et matériaux dérivés", Ed (1987).
- Thiebaud, S., "Valorisation chimique des composés lignocellulosiques; obtention de nouveau matériaux", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, France (1995)
- Bledzki and J. Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres." *Prog. Polym. Sci.* **24**, 221-274.(1999)
- Michaud, F., "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique: aptitude au postformage", Thèse de doctorat, Université de Laval, Canada (2003)
- Navi, P. and F. Heger, "Comportement thermo-hydrromécanique du bois: applications technologiques et dans les structures", Ed Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, France (2005).
- Sedan, D., "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite", Thèse de doctorat, Université de Limoges, France (2007)
- Sedan, D., C. Pagnoux, et al., "Interaction fibre de chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite." *Matériaux & Techniques* **95**, 133-142.(2007)
- John, M. J. and S. Thomas, "Biofibres and biocomposites." *Carbohydrate polymers* **71**, 343-364.(2008)
- Jebrane, M., "Fonctionnalisation chimique du bois par transesterification des esters d'enol", Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France (2009)
- Demirboga, R., "Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar." *Energy and buildings* **35**, 189-192.(2003)
- Chikhi, M., B. Agoudjil, et al., "Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation." *Energy and Buildings* **66**, 267-273.(2013)
- Bederina, M., L. Marmoret, et al., "Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling." *Construction and Building Materials Fracture, Acoustic Emission and NDE in Concrete (KIFA-4)* **21**, 662-668.(2007)

- Khedari, J., B. Suttisonk, et al., "New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity." *Cement and Concrete Composites* **23**, 65-70.(2001)
- Mounanga, P., "Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge: hydratation, retraits, propriétés thermophysiques", Thèse de doctorat, Université de Nantes,(2003)
- Khorami, M. and E. Ganjian, "Comparing flexural behaviour of fibre - cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus." *Construction and Building Materials* **25**, 3661-3667.(2011)
- Kriker, A., G. Debicki, et al., "Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate." *Cement and Concrete Composites* **27**, 554-564.(2005)
- Bentchikou, M., S. Hanini, et al., "Elaboration et etude d'un mortier composite a matrice minerale et fibres cellulosiques: application a l'isolation thermique en batiment." *Canadian Journal of Civil Engineering* **34**, 37-45.(2007)
- Espinoza Herrera, R., "Panneaux en gypse et particules de bois renforcés avec du ciment Portland", **Thèse** de doctorat, Université Laval,(2009)
- Neville, A. M., "Propriétés des bétons", Ed Eyrolles, (2000).
- Bouguerra, A., A. A. M. A. Amiri, et al., "Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique." *International Communications in Heat and Mass Transfer* **28**, 1065-1078.(2001)
- Bouguerra, A., A. A. M. A. Amiri, et al., "Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique." *International Communications in Heat and Mass Transfer* **28**, 1065-1078.(2001)

## CHAPITRE VI

## Chapitre VI

# Le marché de l'isolation thermique en Algérie

Le marché de l'isolation thermique en Algérie	108
1 Le paysage énergétique Algérien	110
2 Isolation thermique dans le bâtiment	113
3 Réglementation thermique	114
3.1 Réglementation thermique Algérienne	114
4 Critères de choix des isolants	115
4.1 Propriétés thermiques	115
4.2 Propriétés techniques	115
4.3 Propriétés environnementales	115
4.4 Propriétés économiques	116
4.5 Qualité de l'isolant	116
5 Isolants traditionnels en Algérie	116
5.1 Isolant polymère	116
5.2 Isolants minéraux	118
5.3 Isolants d'origine végétale	118

5.3.1	Panneaux de fibres de bois	119
5.3.2	Laine de cellulose	119
5.3.3	Le liège expansé	119
5.3.4	Le chanvre	119
6	Les paramètres de calculs économiques de l'isolation	119
6.1	Le coût de l'isolant	120
6.2	Epaisseur de l'isolant	120
6.3	La durée de vie de l'isolant	120
	Bibliographie	125

Dans ce dernier chapitre, nous nous intéressons au marché local de l'isolation thermique. Cette étude est le point de jonction entre l'étude théorique, le développement au laboratoire des CBC et les besoins réels du marché local. Dans un premier temps, nous chiffrons la consommation nationale en énergie puis, dans un deuxième temps, nous rappellerons les formules et les paramètres de calculs techniques et économiques du matériau isolant.

## 1 Le paysage énergétique Algérien

L'Algérie jouit sur la scène internationale en général et sur le continent Africain en particulier d'une position relativement enviable en matière de ressources énergétiques, le Pétrole et le Gaz. Les réserves en énergie fossile dont dispose l'Algérie suffiront à court terme aux besoins propres du pays. Cependant, à l'horizon 2020, l'Algérie risquerait de ne plus disposer de réserves gazo-pétrolière pour couvrir ses besoins internes et d'exporter. Outre la raréfaction et l'épuisement des ressources fossiles, l'Algérie fait face à une fluctuation du prix. Un drame pour un pays pour lequel les hydrocarbures représentent 33 % du produit intérieur brute, 98 % des ressources en devises et deux tiers du budget de l'Etat [Touloum, Younsi et al. (2016)]. Long temps considérée comme illusoire, la consommation nationale (Figure VI.1) a enregistré une croissance à deux chiffres pour passer de 13900 tep en 1980 à 30000 tep en 2000 et à plus de 53000 tep en 2013 représentant ainsi 36% de la production nationale [MEM (2004); MEM (2011); MEM (2014); MEM (2015); MEM (2016)] (Tableau VI.1).

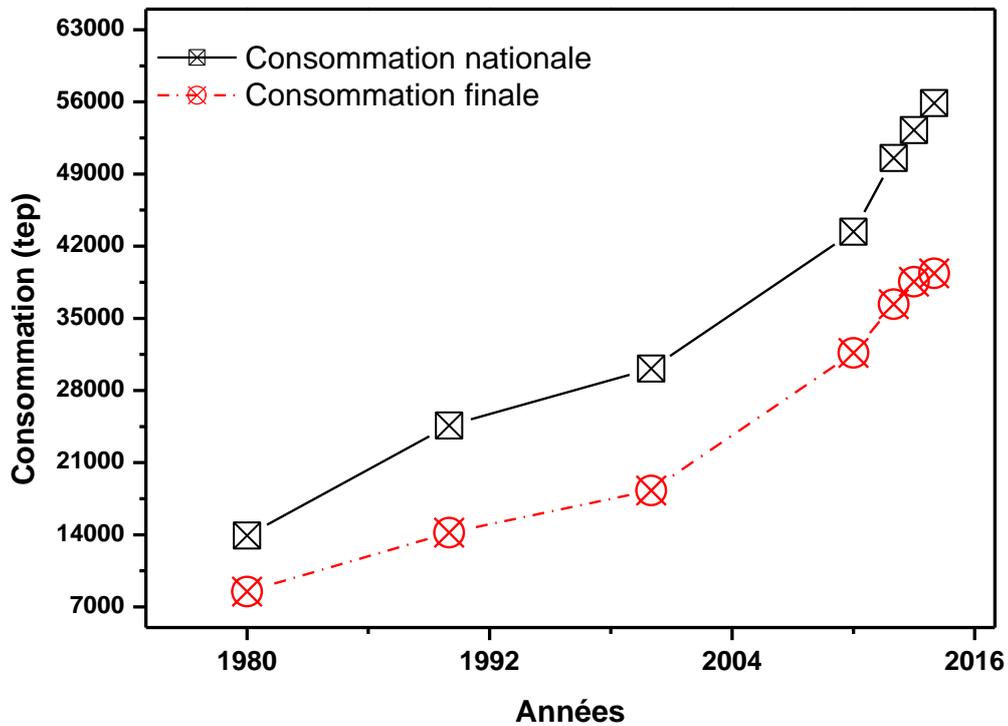
**Tableau VI.1.** Consommation nationale d'énergie en Algérie de 1980 – 2014.

Année	Consommation nationale (Tep)	Consommation finale par secteur (tep)			Total	Evolution Ménage
		Industrie & BTP	Transport	Ménage et autre		
1980	13917	2609	2598	3286	8493	38,69%
1990	24591	3874	4384	5942	14200	41,85%
2000	30115	4457	4654	9189	18300	50,21%
2010	43400	8019	11215	12415	31650	39,23%
2012	50557	7939	13371	15068	36377	41,42%
2013	53268	8229	13889	16425	38543	42,61%
2014	55882	8168	14600	16600	39368	42,17%
2015	58270	8820	15500	18140	42460	42,72%

**Avec :**

tep : tonne équivalent pétrole unité de comptage d'énergie ;

1 tep = 11.626 KWh = 7.33 baril de pétrole = 2.2 tonne de bois sec.



**Figure.VI. 1.** Evolution de la consommation énergétique en Algérie 1980-2013.

- Consommation nationale comprend tous les usages, la consommation non énergétique, l'industrie énergétiques y compris les pertes et la consommation finale
- Consommation finale est ventilée en trois principaux secteurs :
  - 1- Industrie et BTP dont :
    - Sidérurgie
    - Chimie
    - Matériaux de construction
  - 2- - Transport,
  - 3- - Ménages et autres consommateurs.

La hausse de la demande énergétique nationale de l'Algérie est due notamment à une forte croissance démographique, plus de 40,4 millions d'habitants au 1 janvier 2016[ONS (2017)]. Par ailleurs l'Algérie a enregistré ces dernières décennies un regain de dynamisme de l'activité

économique engendrant une amélioration du niveau de vie de la population et du confort qui en découle, d'ailleurs le secteur de l'habitat enregistrerait un taux de croissance moyenne de l'ordre de 7,7 % soit une consommation de 94 795 GWh à l'horizon 2023 [Roumadi (2014)]. Cette évolution, nous interpelle sur la nécessité d'un changement de cap énergétique ainsi que le comportement des usagers en les incitants mais aussi la branche tertiaire dans son ensemble à utiliser des équipements énergétiquement performants (éclairage, appareils de froid, climatiseurs, chauffages ... etc.).

La structure de dépense énergétique par secteur d'activité (figure VI.2) montre qu'en matière d'appréhension et de traitement de la consommation, le secteur des ménages et autres constitue une priorité dans l'élaboration de la stratégie et des programmes de maîtrise d'énergie. La dépense énergétique du secteur des ménages est légitimée par une aspiration de plus en plus grandissante au confort des maisons (chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire.. etc.).

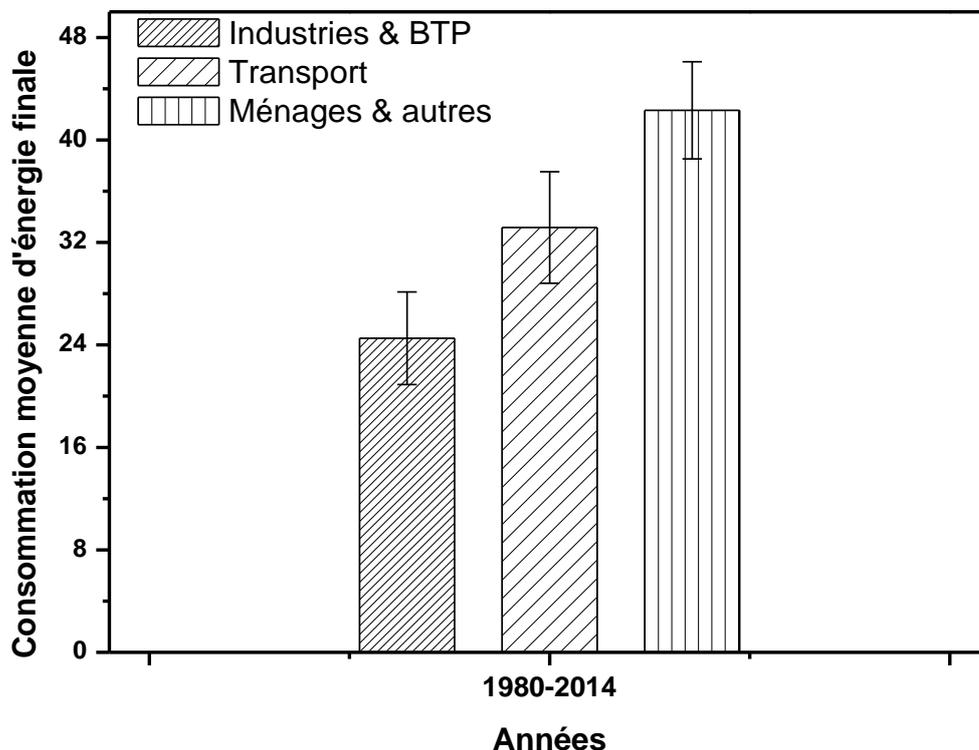


Figure.VI. 2. Consommation moyenne d'énergie finale moyenne en Algérie entre 1980-2014.

## 2 Isolation thermique dans le bâtiment

La consommation excessive d'énergie dans le bâtiment, plus de 41 % en moyenne d'énergie finale, nécessite de trouver des solutions très rapidement. Ces solutions doivent être en adéquation avec le coût d'acquisition et les facilités techniques à la pose du produit. Dans le bâtiment (figure VI.3), la déperdition d'énergie, consommée pour le chauffage et climatisation, est due essentiellement à la chaleur traversant l'enveloppe du bâtiment. En effet, les déperditions d'énergie se localisent à plusieurs endroits du bâtiment : mur, toit, sol, fenêtre, plancher... L'origine est la très mauvaise ou l'inexistence d'isolation thermique avec l'extérieur.



**Figure.VI. 3.** Echanges thermiques avec l'extérieur d'une maison individuelle.

Dans le bâtiment, les murs (enveloppe) représentent 20% à 25% [Gallauziaux and Fedullo (2010)] des déperditions thermiques enregistrées. Trois possibilités s'offrent à l'usage pour limiter ces déperditions murales notamment l'isolation thermique par l'intérieure, l'isolation thermique par l'extérieure et l'isolation répartie. Dans le cas d'isolation thermique par l'intérieure les déperditions thermiques sont limitées en recouvrant les éléments de maçonnerie du bâtiment d'une ou plusieurs couches d'isolant. L'isolation thermique par l'intérieure, très répandue en France, est souvent accompagnée d'une isolation des combles pour traiter les déperditions par la toiture.

L'isolation thermique par l'extérieur est beaucoup développée dans les pays du nord de l'Europe. Elle est considérée comme la plus efficace parce qu'elle permet d'éliminer presque tous les ponts thermiques responsables de 10 à 40 % des déperditions totale d'un bâtiment.

Une autre solution technique qui permet à la fois de traiter les déperditions au niveau des murs et des ponts thermiques est l'isolation répartie. Le principe de l'isolation répartie consiste à conserver le bénéfice des dispositifs de chauffage le plus longtemps possible grâce à la performance de l'inertie thermique de l'air. Elle repose principalement sur une maçonnerie en béton cellulaire ou en brique isolante de terre cuite dotée d'un réseau d'alvéoles. Les propriétés isolantes de ces matériaux reposent sur une forte présence d'air. Le matériau, ayant en même temps la fonction porteuse et la fonction isolante, permet de construire un mur extérieur à « isolation répartie » [Nguyen (2013)]. La déperdition au niveau du pont thermique reste basse en raison de la capacité isolante du mur. L'intérêt de l'isolation répartie conduit à imaginer des éléments structurels des bâtiments au niveau du mur et en même temps au niveau du plancher. Cela exige un matériau ayant une bonne performance mécanique avec des propriétés d'isolation thermique améliorées.

### **3 Réglementation thermique**

La réglementation thermique est un ensemble de lois visant à la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment, ceci pour assurer le confort des occupants du bâtiment et réduire les émissions de polluants locaux et globaux et diminuer les charges d'exploitation des locaux (notamment le chauffage).

Les enjeux de la réglementation thermique sont économiques pour réduire la facture énergétique. Enjeux environnementaux pour réduire l'effet de serre dans le cadre des accords de Rio15 16 et du protocole de Kyoto. Enjeux sociaux pour assurer un meilleur confort des personnes. Les économies d'énergie ont pour objectif une stabilisation du niveau des émissions de CO<sub>2</sub> à celui de 1990 à l'horizon 2008-2012.

#### **3.1 Réglementation thermique Algérienne**

La loi Algérienne sur la maîtrise de l'énergie, en tant que loi cadre, se distingue surtout par l'énoncé du principe d'introduction de réglementations spécifiques qui établiront des exigences et des normes nationales d'efficacité énergétique appliquées aux bâtiments neufs. Les

dispositions relatives aux normes d'efficacité énergétique visent à garantir un développement structurel de la maîtrise de l'énergie en Algérie, grâce notamment à la promotion de techniques et technologies efficaces.

La loi cadre, décret exécutif n° 2000-90 du 24 avril 2000 portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs définie dans son 1<sup>er</sup> article la maîtrise de l'énergie comme étant l'ensemble des mesures et des actions mises en œuvre en vue de l'utilisation rationnelle de l'énergie, du développement des énergies renouvelables et de la réduction de l'impact du système énergétique sur l'environnement.

Les caractéristiques d'isolation thermique dans les bâtiments neufs doivent répondre à l'une au moins des deux conditions ci-après :

- La déperdition calorifique calculée pour la période d'hiver doivent être inférieures à une limite appelée « déperdition de référence » ;
- Les apports calorifiques calculée pour la période d'été doivent être inférieurs à une limite appelée « apport de référence ».

Par ailleurs, les valeurs de référence relatives aux déperditions et aux apports calorifiques concernant les bâtiments neufs à usage d'habitation sont fixées dans des documents techniques réglementaires (D.T.R.) approuvés par arrêté du ministre chargé de l'habitat.

## **4 Critères de choix des isolants**

Lors d'un choix de matériau d'isolation, il est intéressant, dans une démarche d'éco fabrication, de ne pas limiter ses critères de choix aux seules performances thermiques du matériau. Le choix d'un isolant devrait se faire sur la base des critères décrits ci-dessous.

### **4.1 Propriétés thermiques**

Elles sont généralement décrites par les propriétés telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique.

### **4.2 Propriétés techniques**

Le comportement au feu, le comportement à l'humidité, le type de mise en œuvre, la stabilité dans le temps, etc.

### **4.3 Propriétés environnementales**

Coût énergétique de la production, du transport, risques pour la santé, etc. Ces propriétés sont décrites par des notions telles que l'éco-bilan : le calcul d'un indice intégrant l'impact

environnemental du matériau aux différents stades de sa vie. Différents indicateurs existent, qui se distinguent par la prise en compte ou non de certains aspects difficilement quantifiables et par des pondérations différentes.

#### **4.4 Propriétés économiques**

Coût du matériau et de sa mise en œuvre en rapport avec le type d'utilisation et les performances à atteindre.

#### **4.5 Qualité de l'isolant**

Bien que la faible conductivité thermique des matériaux constitue une caractéristique importante pour distinguer les matériaux isolants, cela ne suffit pas de généraliser leurs applications dans tous les domaines. Le choix de tel isolant pour une telle application nécessite une attention particulière des propriétés intrinsèques des matériaux isolants et de l'environnement d'application.

### **5 Isolants traditionnels en Algérie**

Les trois grandes catégories d'isolant conventionnel du marché local sont les isolants minéraux, les laines minérales, les isolants à base de polymère et les fibres cellulosiques.

#### **5.1 Isolant polymère**

Les isolants de type polymériques sont fabriqués à partir de matériaux pétrochimiques et coûtent environ deux fois plus chers que les isolants minéraux. Ils se divisent en deux grandes catégories: le polystyrène et le polyuréthane. Auparavant, une forte utilisation de chlorofluorocarbones (CFC) en tant qu'agent gonflant dominait le marché. Aujourd'hui, les CFC sont remplacés par les hydrochlorofluorocarbones (HCFC), et certains de ces isolants ne contiennent plus du tout de ce type de composés.

Les isolants en polystyrène sont les plus récents produits découlant de la pétrochimie et se subdivisent en deux catégories : le polystyrène expansé et extrudé. La matière première dans la production de l'un ou l'autre de ces produits est la résine de styrène. Le styrène entrant dans la production du polystyrène expansé (PSE) est obtenu, entre autres, à partir de fibres de bouteilles de plastique recyclées. La proportion de matière recyclée entrant dans le procédé est de deux pourcent [Norris (1999)]. Le plastique est de type polyéthylène téréphtalate (PET). Les producteurs reçoivent la matière première sous forme de billettes de styrène expansible, mélangées à un agent gonflant qui permet au produit de prendre 30 fois son volume d'origine [Dupuy (2011)]. Le PSE est produit en liant les granules pour créer un panneau rigide de mousse plastique. Le panneau à haute densité est plus résistant à l'humidité et peut être utilisé

à l'extérieur des murs de fondation, dans les sols secs et sablonneux. Il doit toutefois être protégé des solvants, des scellants et ne doit pas être exposé au soleil. Le matériau n'est pas ignifuge, a tendance à fondre lorsqu'il est exposé aux flammes et doit ainsi être recouvert d'un protecteur contre le feu. L'isolant PSE est difficile à manipuler mais présente une durée de vie de plus de 50 ans.

Efficace sous terre, les panneaux de polystyrène extrudé (XPS) sont constitués de fines alvéoles fermées contenant un mélange d'air et de gaz réfrigérants, des HCFC. 0,62 tonne de polystyrène et 0,075 tonne d'additif est nécessaire à la production d'une tonne de XPS [Papadopoulos and Giama (2007)]. Ces panneaux ne doivent pas être exposés au soleil ni aux solvants mais peuvent servir de pare air et parfois même de pare-vapeur. Ils ne sont pas ignifuges et doivent alors être recouverts d'un matériau résistant au feu.

L'autre catégorie d'isolant de polymère est le panneau de polyuréthane. Fabriqué à partir de résines fossiles et d'agents chimiques, il résulte d'un moussage d'un composé de polyols et de catalyseurs, tel que l'isocyanate. L'agent gonflant utilisé est le Méthylène diisocyanate. Cet agent, un HCFC, est une substance appauvrissant la couche d'ozone. Sa valeur isolante provient en partie du fait que le produit contient de fines alvéoles fermées remplies de HCFC au lieu d'air, puisque ce gaz a une faible conductivité thermique. Un risque de perte du gaz réfrigérant à l'intérieur de la résidence demeure au fil du temps.

Certains des produits de polyuréthane sont giclés. Dans ces cas, la mousse de polyuréthane ne contient pas de HCFC et est alors complètement gonflée à l'eau, créant alors du CO<sub>2</sub> résiduel. Récemment, est aussi apparu sur le marché la mousse de polyuréthane giclée composée de plastiques recyclés à 40 % et de produit à base de soya, une matière première dite recyclable. Ce nouveau produit est formulé pour ne contenir aucune substance appauvrissant la couche d'ozone et sert de pare-air et de pare-vapeur. Peu de données sont présentement disponibles concernant l'inventaire du cycle de vie du produit. La pose de ce type d'isolant peut s'avérer difficile. Le produit est soit giclé dans le comble à isoler, soit posé sous forme de panneaux. Matériau ignifuge, cet isolant ne doit pas être exposé au soleil ni à l'eau.

## 5.2 Isolants minéraux

Produits faciles à obtenir à faible coût, les isolants minéraux nommés aussi laine minérale, se subdivisent en deux catégories : la laine de roche et la fibre de verre. Ces isolants peuvent être fabriqués sous forme de matelas ou de rouleaux. Dans ce cas, ils sont faciles à poser dans les murs et les entre toits et ils ne s'affaissent pas. Ignifuges, ils peuvent servir de pare-air en diminuant l'infiltration de l'air de 41 % par rapport à un bâtiment non isolé [Dupuy (2011)]. Les isolants minéraux peuvent aussi être posés en vrac. À ce moment, la fibre est hachée pour ensuite être injectée ou versée dans la cloison.

Les trois principales matières premières utilisées dans la production de la laine de roche sont les roches siliceuses (diabase) ou la lave de type basaltique dans une proportion de 60 %, la chaux (15 %) et les scories de hauts-fourneaux provenant entre autres de la production de ciment (25 %) [Jensen (2009)]. 35 grammes de bois, 777 grammes de minerais vierges et 226 grammes de minerais récupérés sont nécessaires à la production d'un kilogramme de laine minérale [Schmidt, Jensen et al. (2004)].

Ces matières premières, fondues à 1600 °C puis filées, sont liées par plusieurs produits chimiques qui comptent pour huit pourcent du total des matières utilisées dans la fabrication de cet isolant. Il s'agit de phénol et d'urée formaldéhyde. Ils servent, entre autres, à limiter la production de poussières lors de la production et de la pause [Jensen (2009)]. Ces produits sont mélangés dans un réacteur avec un catalyseur, qui est récupéré lors de l'étape de production, c'est-à-dire lorsque l'ammoniaque et le silane sont ajoutés au mélange. Le tout est alors cuit dans un haut-fourneau avant d'être polymérisé, coupé et emballé [Schmidt, Jensen et al. (2004)].

## 5.3 Isolants d'origine végétale

Les isolants d'origines végétales sont de plus en plus utilisés dans le domaine d'isolation et cela grâce à leurs caractéristiques intéressantes et leurs disponibilité. Pinto et al. [Pinto, Paiva et al. (2011)] ont étudié les propriétés d'isolation d'un mur conçu d'un matériau isolant d'origine naturel (Epis de maïs) mélangé avec de la terre. Ces murs ont été utilisés par les Tabique (ancien peuple du Portugal) comme isolant extérieur de leurs maisons. [Pinto, Paiva et al. (2011)] déduisent que ces murs possèdent des propriétés thermiques très intéressantes. Une synthèse bibliographique de quelques isolants d'origine naturelle est apportée par Jelle et al [Jelle (2011)].

Parmi les matériaux isolants disponibles, nous trouvons :

### **5.3.1 Panneaux de fibres de bois**

Ils sont obtenus à partir du défilage de chute de bois résineux. Généralement, ces chutes sont transformées en pâte par adjonction d'eau, puis coulées, laminées et séchées pour produire des panneaux auto-agglomérés de diverses formulations, densité, profilage et épaisseurs. Ils sont utilisés comme isolant ou comme panneaux techniques complémentaires d'isolation. Ils sont difficilement combustibles.

### **5.3.2 Laine de cellulose**

Elle provient du papier recyclé. Le papier est défibré et réduit en flocons, puis stabilisé par incorporation de divers agents de texture et ignifugeants, variables selon les fabricants. La laine de cellulose se présente en panneaux isolants texturés ou en panneaux d'agencement. Elle est auto-extinguible.

### **5.3.3 Le liège expansé**

Le liège est réduit en granules puis expansé à la vapeur à haute température (300°C). L'aggloméré est ensuite découpé selon les épaisseurs désirées. Le degré d'isolation du liège expansé est principalement dû à la présence de l'air dans ces cellules intérieures. Il se présente en granules, en panneaux ou en éléments composites préfabriqués. Il est difficilement combustible.

### **5.3.4 Le chanvre**

Les particules issues de la partie centrale de la tige (chènevotte) qui sont entourées par les fibres longues (filasse) sont soumises à un traitement d'imprégnation par les silicates. Il existe plusieurs présentations : en granules de chènevotte, en granules et fibres longues (chanvre entier) ou en fibres longues seules (laine de chanvre). Il est difficilement inflammable.

## **6 Les paramètres de calculs économiques de l'isolation**

Il existe quelques facteurs et/ou paramètres technico-économiques qui doivent être pris en considération afin d'évaluer l'étude économique de l'isolation, à savoir : le coût de l'isolant, sa durée de vie et le coût de l'énergie.

## 6.1 Le coût de l'isolant

Il est évident que le prix de l'isolant est un facteur important qui entre en jeu dans l'investissement et le calcul économique d'un projet d'études d'isolation thermique. En dehors de toutes considérations techniques, on a tendance à s'intéresser aux prix des isolants dans le but d'économiser les dépenses occasionnées par l'isolation. Généralement, le coût de l'isolant est calculé pour le prix du m<sup>3</sup>.

Pour une paroi considérée, le coût de l'isolant relatif à une durée de vie de l'isolation estimée à «*tv* ans », le coût annuel attribué à l'isolant est donc donné par la relation [Ballot and Duminil (1981)] suivante:

$$C_{Isol,annuell e} = \frac{e_{is} S C_m}{\tau_v} \quad (6.1)$$

**Avec :**

$C_m$ : Prix du m<sup>3</sup> de l'isolant en Dinars Algérien (DA).

$\tau_v$  : Durée de vie de l'isolant en Années.

$S$  : Surface en m<sup>2</sup>

## 6.2 Epaisseur de l'isolant

Il existe plusieurs formules et méthodes proposées par beaucoup d'auteurs pour estimer l'épaisseur de l'isolant. Certaines méthodes sont en fonction de quelques paramètres alors que d'autres utilisent un grand nombre de paramètres. Dans notre étude, nous nous limiterons à aborder la méthode de calcul qui découle directement de la loi de Fourier.

## 6.3 La durée de vie de l'isolant

La durée de vie de l'isolant constitue un facteur principal pour estimer l'amortissement de l'isolation ainsi que la construction entière. La durée de vie est variable suivant l'isolant; elle peut varier en fonction des défauts de fabrication, des imperfections de pose, des conditions d'utilisation (compatibilité des matériaux, températures d'utilisations, etc.), et des matières premières de fabrication. Dans de bonnes conditions d'utilisation, un bon isolant garde son pouvoir isolant, son efficacité thermique et ses performances techniques jusqu'à quinze ans d'utilisation.

## Bibliographie

- Touloum, F., A. Younsi, et al., "Formulation of a composite of date palm wood-cement." *Journal of Applied Engineering Science & Technology* **2**, 57-63.(2016)
- MEM (2004), "Evolution rétrospective du bilan énergétique national Algérien de 1980 à 2004", <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=bilan-des-realizations-2>
- MEM (2011), "Bilan énergétique national de l'année 2010", <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=bilan-des-realizations-2>
- MEM (2014), "Bilan énergétique national de l'année 2013",
- MEM (2015), "Bilan énergétique national de l'année 2014",
- MEM (2016), "Bilan énergétique national de l'année 2015", <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=bilan-des-realizations-2>
- ONS (2017), "Population et Démographie au 1 janvier 2016", <http://www.ons.dz/-Population-et-Demographie-html>
- Roumadi, M. (2014). L'inévitable hausse des prix de l'énergie. *El Watan*.
- Gallauziaux, T. and D. Fedullo, "Le grand livre de l'isolation", Ed Eyrolles, (2010).
- Nguyen, L. H., "Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées: approche expérimentale et modélisation numérique", Thèse de doctorat, Cergy-Pontoise, Paris (2013)
- Norris, G., "Life Cycle Inventory Analyses of Building Envelope Materials: Update and Expansion", Ed Athena sustainable materials Institute, (1999).
- Dupuy, G., "Habitat sain et écologique: l'impact de l'habitat sur la santé et l'environnement", Ed Éditions Québecor, (2011).
- Papadopoulos, A. M. and E. Giama, "Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building." *Building and Environment* **42**, 2178-2187.(2007)
- Jensen, A. A., "Risk assessment of boron in glass wool insulation." *Environmental Science and Pollution Research* **16**, 73-78.(2009)
- Schmidt, A. C., A. A. Jensen, et al., "A comparative life cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax." *The International Journal of Life Cycle Assessment* **9**, 53-66.(2004)
- Pinto, J., A. Paiva, et al., "Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material." *Energy and Buildings* **43**, 1985-1990.(2011)

## *Chapitre VI*

Jelle, B. r. P., "Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions" "Properties, requirements and possibilities." *Energy and Buildings* **43**, 2549-2563.(2011)

Ballot, G. and M. Duminil, "Isolation frigorifique: guide théorique et pratique:(titre antérieur: Guide pratique de l'isolation frigorifique)", Ed Pyc Œdition, (1981).

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES



Les objectifs principaux du présent travail expérimental étaient d'étudier la possibilité d'utiliser les déchets du bois de palmier dattier, type Phoenix Dactilyfera (L) comme renfort dans une matrice cimentaire à travers la mise en place d'une méthode de formulation et d'un protocole de fabrication puis, la validation de la méthode de formulation par les essais thermo-physiques et mécaniques. Nous avons confectionné des échantillons à différents teneurs volumiques en bois de palmier dattier à savoir 0, 1, 2, 3, et 4% dans le cas des mortiers-bois et 0, 2, 4, 6, 8 et 10% dans le cas des pâtes ciment équivalentes.

Il ressort de cette étude que le bois de palmier dattier comme élément de renfort présente une faible conductivité thermique ( $\lambda = 0,061 \pm 0,006 \text{ W/m K}$ ). Par ailleurs, nous rapportons une masse volumique réelle de bois de palmier dattier de ( $\rho = 1500 \pm 1 \text{ kg/m}^3$ ).

De point de vue morphologique, il a été établi que le bois de palmier dattier contient deux types de fibres, de différents périmètres, dispersés dans une matrice constituée majoritairement d'hémicellulose et de lignine. Le premier type se présente comme des fibres denses, fibres porteuses de faibles périmètres, qui servent à soutenir la structure du pétiole et par conséquent la palme. Le deuxième type est d'une structure de base similaire au premier type. Ces fibres sont constituées, également d'un faisceau de fibrilles et de quelques lumens mais, de volume plus important, ce qui confère au bois de palmier dattier une masse volumique apparente très faible.

## **1 Etude mortier**

De point de vue caractérisation thermique, la conductivité thermique du composite diminue en fonction de la teneur en particules de bois de palmier dattier. Les valeurs obtenues sur les composites CBC à 28 jours notamment pour la teneur en particule de bois à 4 % ( $\lambda = 0,64 \text{ W/m.K}$ ) est assez satisfaisante comparée à d'autres matériaux à base fibres végétales l'image du Mortier – fibre de coco ( $\lambda = 0,65 \text{ W/m.K}$ ). Par ailleurs, la conductivité thermique de nos composites dépend de plusieurs paramètres à savoir le rapport E/C, âge du composites, quantité de ciment, humidité relative de nos matériaux.

Le résultat des essais de compression démontrent que le CBC réagit d'une manière conventionnelle. En effet, la contrainte de compression diminue en fonction de la teneur du composite en particules de bois de palmier dattier. Cependant, pour un certaine teneur en particules (3%), le composite bois ciment résultant présente une contrainte assez importante ( $R_c = 30,51 \text{ MPa}$ ) comparé à d'autres produits de même type ciment-filler-sable-bois ( $R_c = 10,6 \text{ MPa}$ ).

En revanche, nous gagnons en contrainte de flexion. En effet, les résultats montrent une franche augmentation de la contrainte en fonction de la teneur de bois jusqu'à une teneur limite de 3% qui représente une contrainte de ( $R_f = 8,2$  MPa). Ce résultat reflète un bon transfert de charge entre la matrice et le renfort végétale dû notamment à la granulométrie des particules de bois. Indirectement nous affirmons qu'avec cette teneur le bois de palmier dattier est compatible dans ses conditions avec le ciment portland.

## **2 Etude pâtes ciment équivalentes**

De point de vue caractérisation thermique, les valeurs obtenues sur les composites bois-ciment de 28 jours, notamment pour la teneur en particule de bois à 10 % qui correspond à 0,24 W/m.K, s'apparentent à celles des bétons légers conformément à la norme ASTM C109/C 109-95.

En parallèle, les essais de compression sur les composites bois-ciment à maturation ont révélés un comportement très particulier notamment pour les teneurs en particules 2, 4, 6 et 8%. Ce résultat n'adhère pas à ceux de la littérature où nous rapportons une diminution de la contrainte de compression en fonction de la teneur en particules de bois. Pour la présente étude, la diminution de la contrainte n'est significative qu'au-delà de la teneur de 8%. Ainsi, conformément à la norme ASTM C 109/ C 109-95, le composite bois (à 8% en teneur)-ciment, développé au cours de cette étude, pourra être utilisée dans le domaine de bâtiment, notamment, le recouvrement des murs.

Les essais de flexion ont confirmé l'analyse et la discussion développée dans la partie essais de compression. Ces essais ont montré un gain en propriétés mécaniques correspondant au composite bois (8%)-ciment dû principalement à une bonne adhésion à l'interface particules de bois de palmier dattier – ciment qui est traduit par un transfert de charge matrice – particules plus efficaces.

Le retour d'expérience de ces deux dernières décennies d'efforts en matière de construction met en relief la nécessité absolue de concilier l'aspect quantitatif et le côté qualitatif, microclimat plus agréable, des habitations. Une situation qui laisse entrevoir de réelles opportunités génératrices d'économies d'énergie, d'innovation et de contributions fortes à l'atteinte des objectifs ambitieux que l'Algérie s'est fixée lors de la COP 21. Face à ces enjeux nationaux et internationaux, les biomatériaux de types matrices minérales et renfort végétal offrent une réelle solution tout en préservant l'environnement et ouvrant de nouvelles perspectives d'emploi.

Les perspectives d'études seront orientées vers une valorisation complète des quatre types des déchets issue du palmier notamment le pétiole, le rachis, les feuilles et le lif. Cette perspective constitue sûrement le défi à engager pour les études sur les composites bois de palmier dattier

## Formulation of a composite of date palm wood-cement

### Formulation d'un composite bois de palmier dattier-ciment

Farid Touloum<sup>1</sup>, Akli Younsi<sup>2</sup>, Abdelhak Kaci<sup>2</sup>, Adel Benchabane<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Energétique et Matériaux (LGEM), Université de Biskra, B.P. 145 R.P. 07000, Biskra, Algeria

<sup>2</sup> Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, L2MGC, Université de Cergy-Pontoise, France

Received 10 February 2015

Revised 14 June 2016

Accepted 20 October 2016

Published online: 27 October 2016

#### Keywords

Date palm wood

Phoenix Dactylifera (L)

Insulator material

Wood - cement composites

**Abstract:** This work reports the results of an experimental study on the incorporation of wood waste date palm reduced in particles for the manufacture of wood – cement composites. These materials are cheaper than the conventional insulator material and environmental friendly. Five types of wood – cement composites with various concentrations of the wood particles, ie. 2, 4, 6, 8 and 10% of total volume, were made according to defined protocol and mix design. Their thermal and mechanical properties were measured and compared to other conventional materials. The obtained results show that the thermal conductivity is positively correlated to the content of particles in the mixture. The compressive strength of composites decreases where the content of particles increase. However, taking account of the ASTM C 109 / C109-95 standard, the wood – cement composite contained 10% of wood particles, considered as lightweight concrete, could be used as non-structural material in construction.

© 2016 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license.

**Résumé:** Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'incorporation des déchets de bois de palmier dattier réduits en particules pour la fabrication de composites bois-ciment, des matériaux à moindre coût de revient et à faible impact environnemental et de surcroît, thermiquement isolants. Cinq types de composite "bois de palmier dattier – ciment" contenant différentes teneurs en particules de bois de palmier dattier : 2, 4, 6, 8 et 10 % du volume total, ont été confectionnés suivant une méthode de formulation et un protocole définis. Leurs propriétés thermiques et mécaniques ont ensuite été mesurées à maturation et comparées à d'autres matériaux de la littérature. Les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique est corrélée positivement à la teneur en particules dans le mélange et que la résistance à la compression diminue en fonction de la teneur en particules. Toutefois, selon la norme ASTM C 109/ C109-95, le composite à 10 % de particules, assimilé à un béton léger, pourrait être utilisé comme matériau de construction non structural.

**Mots clés :** palmier dattier, Phoenix Dactylifera (L), fibre végétale, isolation thermique, bio-matériaux

## 1. Introduction

Les derniers bouleversements que connaît le paysage énergétique algérien laissent entrevoir une révision éminente de la politique énergétique du pays. En effet, à l'horizon 2019, l'Algérie risquerait de ne plus disposer de réserves gazo-pétrolières pour couvrir ses besoins internes et d'exporter. Un drame pour un pays pour lequel les hydrocarbures représentent 33 % du produit intérieur brut, 98 % des ressources en devises et deux tiers du budget de l'Etat (Roumadi 2014). La hausse de la demande énergétique du pays n'est nullement motivée par un regain de dynamisme de l'activité économique mais, plutôt par la seule consommation des ménages (Fig.1) (APRUE 2009).

D'ailleurs le secteur de l'habitat enregistrerait un taux de croissance moyenne de l'ordre de 7,7 % soit une consommation de 94 795 GWh à l'horizon 2023 (Roumadi 2014). Cette dépense énergétique est légitimée par une amélioration du niveau de vie de la population et de surcroît au confort qui en découle. Environ 80% de la dépense énergétique nationale dans ce secteur est lié au chauffage et/ou à la climatisation afin de maintenir une température ambiante agréable dans les habitations, souvent,

pas isolées thermiquement. Ce constat alarmant conduit à porter un regard nouveau et objectif sur la nécessité d'isoler thermiquement les habitations. Dans cette optique, le biomatériau de type matrice minérale et renfort végétal offrent une réelle solution tout en préservant l'environnement, ouvrant de perspective d'un marché de l'emploi en décadence et de surcroît obtenir des produits à moindre coût de revient. Dans la présente étude, nous utilisons le ciment portland comme matrice et les déchets annuels du bois de palmier dattier comme renfort.

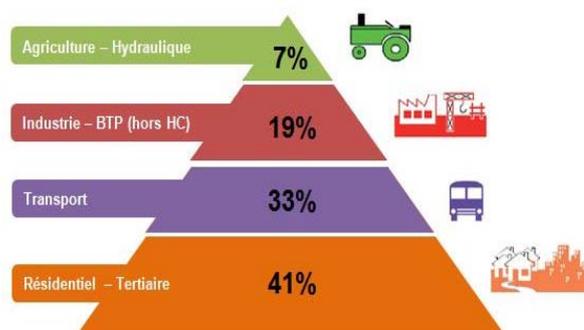


Fig. 1. Consommation d'énergie finale en Algérie (APRUE 2009).

✉ Corresponding author. E-mail address: [farid.touloum@gmail.com](mailto:farid.touloum@gmail.com)

Le palmier dattier (*Phoenix Dactylifera L*), est une monocotylédone de la famille des Palmacées genre Phoenix (Munier 1973). Localisées dans les zones de la partie sud-est du pays (Biskra, El-Oued, Ouargla, Ghardaïa et Adrar), l'Algérie compte plus de 18,7 millions de palmiers (Boukrouh 2010) réparties sur une surface de 169361 ha (Touloum et al. 2012). Pour des raisons de maintenance annuelle, les palmeraies génèrent plus de 335 000 t/an de déchets lignocellulosiques (pétiole et rachis) non valorisés (Fig.2).

Il est rapporté dans une étude antérieure (Agoudjil et al. 2011b; Almi et al. 2015a; Almi et al. 2015b) la composition chimique des déchets du bois de palmier dattier, le pétiole en l'occurrence. Les éléments Oxygène et Carbone sont les plus dominants dans la composition chimique du bois de palmier dattier. Néanmoins, le bois de palmier dattier regroupe, à différentes concentrations, d'autres éléments chimiques comme le chlore, le magnésium, le calcium, etc.

La conductivité thermique du bois de palmier dattier est de  $\lambda = 0,083$  W/m.K rapportée par Agoudjil et al. 2011b. En effet, le bois de palmier dattier présente une faible conductivité thermique qui le place comme un bon candidat pour le développement d'isolant thermique au regard aux autres matériaux de même nature à l'image du sisal ( $\lambda = 0,070$  W/m.K) (Kalaprasad et al. 2000), du chanvre ( $\lambda = 0,115$  W/m.K) (Behzad et al. 2007) et des fibres du bananier ( $\lambda = 0,117$  W/m. K) (Paul et al. 2008).

Par ailleurs, l'association de fibres végétales comme éléments de renfort à une matrice cimentaire fait l'objet de nombreux travaux (Abdel-Rahman et al. 1988; Al-Juruf et al. 1988b; Bentchikou et al. 2007; Besset 1987; Bledzki. et al. 1999; Chikhi et al. 2013; Espinoza Herrera 2009; Hofstrand et al. 1984; John et al. 2008; Khedari et al. 2001; Kriker et al. 2008; Kriker et al. 2005; Sedan et al. 2007). Les performances du bio-composite tirent profit des avantages de la fibre et de la matrice. Les travaux menés par (Abdel-Rahman et al. 1988; Al-Juruf et al. 1990; Al-Juruf et al. 1988a; Al-Juruf et al. 1988b) avaient pour objectifs de caractériser, en terme de disponibilité et de caractéristiques thermo physiques, les feuilles du bois de palmier dattier ainsi que leur utilisation dans des matrices minérales.



Fig. 2. Palmes (palmier dattier) sans valeur ajoutée - Biskra (Algérie).

Les auteurs rapportent que le bois de palmier dattier offre une réelle opportunité pour le développement de nouveaux matériaux et d'enrichir la panoplie des matériaux composites. Depuis une dizaine d'années, un engouement particulier s'est formé autour de l'utilisation des différentes parties du palmier dattier dans une matrice minérale (Ahmed et al. 1990; Alawar et al. 2009; Iskanderani 2008; Kriker et al. 2005; Nasser et al. 2011) dont l'objectif principal est de caractériser le comportement mécanique.

L'objectif de ce travail est d'explorer dans un premier temps, la possibilité d'utiliser le bois de palmier dattier comme renfort dans une matrice cimentaire. Par la suite, mettre en place une méthode de formulation d'un produit destiné au secteur de l'habitat, qui permettra d'allier une résistance mécanique acceptable à une très bonne résistance thermique.

## 2. Programme expérimental

### 2.1. Matériaux

Les composites bois-ciment développés dans cette étude ont été préparés à base du ciment Portland CEM I 52,5 N conforme aux exigences de la norme NF EN 197-1. Ses principales propriétés physico-chimiques sont données dans le tableau 1.

Le bois utilisé dans la confection des différents composites provient de la localité d'El-Hadjeb (Biskra). Il a été préparé comme suit : les déchets de palmes préalablement séchés à l'air ambiant, ont été débarrassés de leurs feuilles, dépoussiérés, puis étuvés à  $103 \pm 2$  °C jusqu'à stabilisation de la masse.

À l'issue de l'étuvage, le bois a été broyé puis tamisé selon la norme NF P 18-560. Les particules de bois choisies pour cette étude sont celles qui sont passées au tamis de 0,4 mm et retenues au tamis 0,08 mm. Une telle classe granulaire éviterait la formation d'éventuels amas de matière qui risqueraient d'altérer les propriétés et performances des composites fabriqués. Ce choix permettrait par ailleurs de réduire le taux d'absorption d'eau par le bois et d'améliorer la surface de contact avec la matrice cimentaire.

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques du ciment Portland CEMI 52,5 N.

<i>Caractéristiques physiques</i>	
Masse volumique [g/cm <sup>3</sup> ]	3,13
Surface spécifique Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	3590
<i>Composition [%]</i>	
Clinker	97
Gypse	3
<i>Compositions chimiques [%]</i>	
CaO	63,67
SiO <sub>2</sub>	20,23
MgO	3,88
SO <sub>3</sub>	2,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,35

Conformément aux résultats rapportés par (Agoudjil et al. 2011b), les mesures de la conductivité thermique de nos échantillons ainsi que la masse volumique apparente sont très proches (tableau 2). Dans cette étude, nos composites bois-ciment ont été confectionnés sur la base de la masse volumique réelle du bois de palmier dattier qui est de l'ordre de 1500 kg/m<sup>3</sup>. En effet, les récents travaux (AlMaadeed et al. 2014; Kriker et al. 2008) rapportent des valeurs similaires à la masse volumique réelle obtenue, qui est corrélée positivement à l'état physique du bois.

Six composites bois-ciment ont été formulés avec différentes teneurs en bois (volume de bois rapporté au volume total du composite) : 0, 2, 4, 6, 8 et 10 % (tableau 3). Les composites sont notés Pi où l'indice « i » est la teneur en bois.

## 2.2. Protocoles expérimentaux

Les échantillons de forme prismatique 40×40×160 (mm) sont fabriqués conformément à la norme NF EN 196-1. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées à l'air libre à 20°±2 °C pendant toute la durée de la cure. Les éprouvettes sont retournées quotidiennement. À l'état frais, la consistance des composites bois-ciment a été mesurée au mini-cône (h=150 mm, d=100 mm) suivant la norme ASTM C 1437-07 (ASTM C1437 2007).

À l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage (MEB), on a examiné la microstructure de bois de palmier dattier. Les échantillons ont été découpés de la partie pétiolaire de la palme, imprégnés dans la résine sous vide, après 24h de séchage aux conditions de laboratoire, montés sur le port échantillons, recouverts d'or et observés à l'aide du contraste topographique (SEI) du MEB.

La mesure de la conductivité thermique ( $\lambda$ ) des éprouvettes aux conditions de laboratoire (50% RH, 20°C) à l'aide de la méthode du fil chaud (Coquard et al. 2006) est à 28 jours. Cette méthode transitoire est la méthode classique des mesures de la conductivité thermique des matériaux isolants. La méthode consiste à placer une sonde à chocs thermiques en sandwich

**Tableau 2.** Comparaison des propriétés thermo-physiques du bois de palmier dattier.

$\lambda$ (W/m K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		Référence
	Apparente	Réelle	
0,083 ±0,003	254 ± 1	-	Agoudjil et al. 2011b
0,061 ±0,006	258 ± 1	1500 ± 1	Cette étude
-	-	1390	AlMaadeed et al. 2014
-	-	1300-1450	Kriker et al. 2008

**Tableau 3.** Formulations pour 1 m<sup>3</sup> de composite bois-ciment.

	P <sub>0</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>8</sub>	P <sub>10</sub>
Ciment (C) [kg]	1 608	1 519	1 432	1 348	1 266	1 186
Eau (E) [kg]	483	492	499	507	513	519
Bois (B) [kg]	0	30	60	90	120	150
E/C [-]	0,30	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44
Volume de bois [m <sup>3</sup> ]	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
Affaissement [cm]	4,5	3,4	2,7	2,4	1,9	1,5

entre deux échantillons à caractériser. La sonde produit localement un échauffement faible du matériau (quelques degrés au-dessus de la température ambiante) et de mesurer cette élévation de température au cours du temps (durée de quelques minutes). Par un traitement mathématique de ce signal intégré dans le logiciel fourni, l'identification de la conductivité thermique est réalisée.

Les essais de flexion trois points ont été effectués à 28 jours sur un appareil de type NSTRON modèle 5567 d'une capacité 30 kN. La vitesse de charge est de 50 N/s conformément à la norme NF EN 1015-11, 2000.

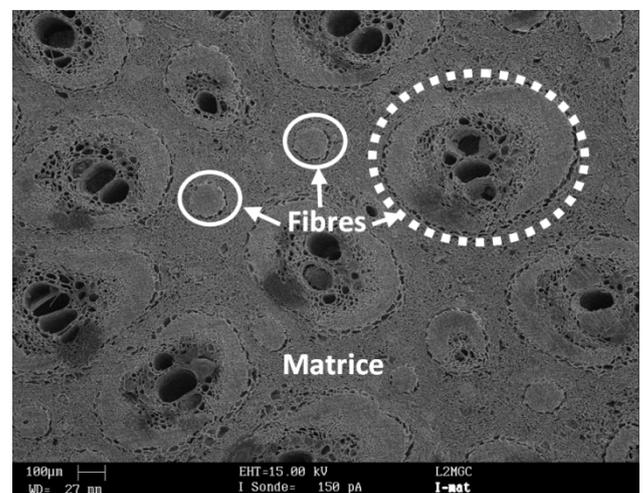
Les essais de compression ont été effectués, également à 28 jours sur un appareil INSTRON type SCHENK (assistée par ordinateur) à asservissement hydraulique d'une capacité de 3200 kN. Les essais sont réalisés avec une charge de 10 N/min dont les valeurs rapportées sont des moyennes.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Morphologique du bois de palmier dattier

L'image MEB de la figure 3 est obtenue d'un échantillon prélevé de la partie pétiolaire d'un bois de palmier dattier. Nous observons sur la figure 3 une surface poreuse constituée d'un ensemble de différentes formes de fibres dispersés dans une matrice constituée majoritairement d'hémicellulose et de lignine.

Nous pensons que les fibres denses, de faibles périmètres, soutiennent la structure du pétiole et jouent le rôle de fibres porteuses. La morphologie de ce type de fibres est rapportée dans les travaux de (Agoudjil et al. 2011b; Agoudjil et al. 2011a). Les auteurs rapportent que ces fibres sont constituées d'un assemblage de fibrilles (qui ne sont pas visibles à l'échelle de la figure 3, dont la partie centrale de chaque fibrille, appelée le lumen, est creuse (Besset 1987; Bledzki et al. 1999; Jebrane 2009; John et al. 2008; Michaud 2003; Navi et al. 2005; Sedan et al. 2007; Thiebaud 1995). Les fibres moins denses sont constituées d'un faisceau de fibrilles et de quelques lumens de volume plus important. Ceci, confère au bois de palmier dattier une masse volumique apparente très faible (tableau 2).



**Fig. 3.** Image au microscope électronique à balayage d'un pétiole.

### 3.2. Consistance du composite bois-ciment

Les résultats d'affaissement au mini-cône donnés dans le tableau 3 démontrent que la consistance est d'autant plus ferme que la teneur en bois dans le composite est élevée. Cela pourrait être expliqué, d'une part, par le fait que les particules de bois perturbent l'empilement primaire des grains de ciment en remplissant les pores et favorisant ainsi le maintien. D'autre part, par l'absorption d'une partie d'eau de gâchage par les particules de bois.

### 3.3. Conductivité thermique du composite bois-ciment

La figure 4 illustre la variation de la conductivité thermique des composites fabriqués avec du bois de palmier dattier à différentes concentrations volumiques (0 à 10%). La conductivité thermique du composite bois-ciment diminue en fonction de la teneur en particules du bois de palmier dattier. La figure 4 montre que la conductivité thermique passe de  $\lambda=0,96$  à  $0,24\text{W/mK}$  pour une teneur de bois allant de 0 à 10% respectivement, avec un gain thermique positif de l'ordre de 75%. La conductivité thermique du composite bois-ciment dépend fortement, d'une part, des conductivités thermiques de ses principaux constituants injectés dans le mélange pour un volume constant notamment le bois ( $\lambda = 0,061 \text{ W/m.K}$ ) et le ciment ( $\lambda = 0,5$  à  $1,3 \text{ W/m.K}$ ) (Mounanga 2003). La quantité du ciment diminue en fonction du dosage en particules de bois qui a un impact direct sur la conductivité thermique du composite. En effet, la conductivité thermique est d'autant plus importante que le dosage en ciment est important (Demirboga 2003). Ce résultat est vérifié quelque soit le type de la biomasse injectée dans une matrice minérale (Bentchikou et al. 2007; Espinoza Herrera 2009).

D'autre part, de l'humidité relative du composite qui dépend de la teneur en eau des particules du bois de palmier. Une fois les particules du bois sèchent, leur volume baisse en donnant lieu à l'apparition de nouveaux pores, dans une structure déjà poreuse, ce qui explique la diminution de la conductivité thermique du composite bois-ciment.

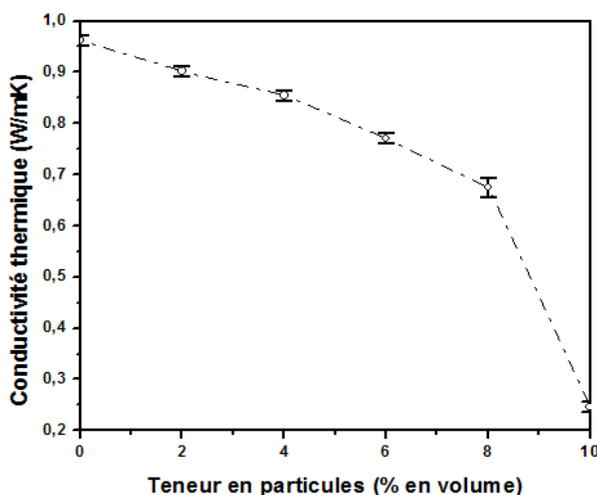


Fig. 4. Conductivités thermiques des composites bois-ciment en fonction de la teneur en particules de bois de palmier dattier.

Le tableau 4 illustre une comparaison qualitative de la conductivité thermique de différents composites à base de bois. On rapporte dans la présente étude que pour une teneur de 0 à 10% de particules du bois on obtient respectivement une conductivité thermique de  $0,96$  à  $0,24 \text{ W/m.K}$  pour une densité de  $2102$  à  $1378 \text{ kg/m}^3$ . On note également que les valeurs des conductivités thermiques pour une teneur en particule de 2 à 10%, correspondantes à  $0,67$  à  $0,24 \text{ W/m.K}$ , s'apparentent à celles des bétons légers conformément à la norme ASTM C109/C 109-95 et rapporté par (Neville 2000).

### 3.4. Comportement mécanique du composite bois-ciment

#### 3.4.1. Contrainte de compression

L'incorporation des particules végétales dans une matrice cimentaire affecte sensiblement les performances mécaniques du composite résultant. La figure 5 représente l'évolution de la contrainte de compression des différentes formulations (2, 4, 6, 8 et 10%) du composite bois-ciment à 28 jours.

Le comportement en compression à 28 jours du composite bois-ciment est très particulier notamment pour les teneurs en particules 2, 4, 6 et 8%. Dans ce cas, nous remarquons une contrainte en compression plus importante, ou du même ordre pour la teneur de 8% de particules, comparée à la formule de référence. Ces résultats ne correspondent pas aux résultats

Tableau 4. Comparaison de la conductivité thermique et de la densité des composites bois-ciment à d'autres matériaux.

Composites	Conductivité (W/mK)	Référence
P <sub>10</sub> - P <sub>8</sub>	0,24 - 0,67	présente étude
P <sub>0</sub>	0,96	présente étude
Gypse/bois de palmier dattier (10 % masse)	0,15 - 0,17	Chikhi et al. 2013
Ciment-filler-sable-bois (10-100 % masse)	0,80 - 0,65	Bederina et al. 2007b
Ciment-argile-bois (30 % masse)	0,20	Bouguerra et al. 2001

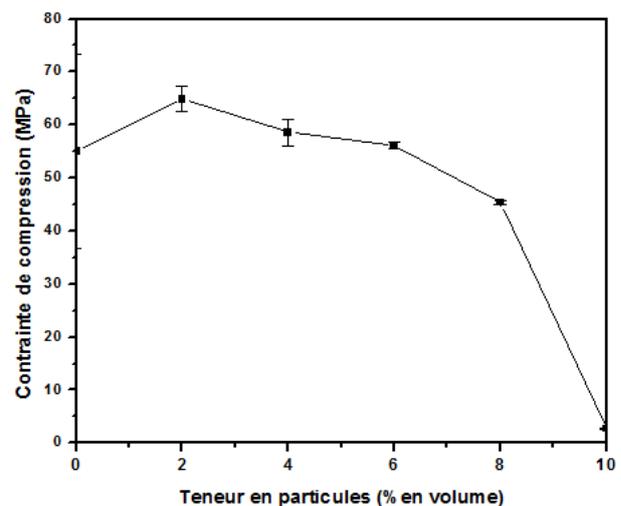


Fig. 5. Contrainte de compression du composite bois de palmier dattier et ciment (CBC) à 28 jours.

publiés par Bederina et al. 2007b et Kriker et al. 2005 (tableau 5) qui rapportent habituellement une diminution de la contrainte en fonction de la teneur en particules de bois. Pour la présente étude, la diminution de la contrainte en compression n'est significative qu'au-delà de la teneur de 8% pour passer au-dessous de celle de la formule de référence. Nous pensons que le comportement en compression constaté entre 2 et 8% de teneur en particules de bois de palmier dattier est dû notamment à l'occupation des pores, naturellement présents dans les matériaux cimentaires, par les particules de bois. Ce phénomène est favorisé par la granulométrie fine des particules de bois qui est dans l'intervalle de 0,4 à 0,8mm. De plus, l'eau de gâchage absorbée initialement par les particules de bois assure une hydratation continue des grains de ciment portland (Bentchikou et al. 2007).

Par ailleurs, au-delà d'une teneur supérieure à 8% en particules de bois de palmier, le composite bois-ciment perd en contrainte de compression à cause de la structure poreuse du tissu végétal du bois. En effet, cette structure permet au bois d'absorber par capillarité une quantité d'eau. Une fois l'eau consommée par hydratation du ciment ou par évaporation (séchage), nous assistons à l'apparition d'une porosité non négligeable dans le composite. De plus, nous pensons que la perte en contrainte de compression, par rapport à la formule de référence, est due également à l'incompatibilité chimique du ciment avec les particules de bois de palmier dattier. Ce phénomène commun aux composites bois-ciment engendre une altération du processus d'hydratation du ciment dû aux produits extractibles contenus dans le bois. Ces extractibles sont de faibles poids moléculaires (localisés dans le lumen, les canaux résinifères, la lamelle moyenne et les espaces intercellulaires) et solubles dans l'eau (Hofstrand et al. 1984 ; Navi et al. 2005). Les auteurs (Hofstrand et al. 1984 ; Hachmi et al. 1989 et Moslemi et al. 1987 ; Espinoza Herrera 2009) rapportent qu'au-delà d'un certain taux d'extractibles estimé à 7%, la période de prise est prolongée en diminuant la quantité et la taille des cristaux essentiels à la résistance des matériaux inorganiques. On a estimé, dans un travail antérieur, le taux d'extractibles du bois de palmier, utilisé dans la présente étude, au tour de 7% de la masse totale (pétiole et rachis). Nous pensons que l'augmentation de la teneur en particules au-delà de 8% engendre une augmentation remarquable des extractibles, par conséquent le composite bois-ciment sera moins résistant.

**Tableau 5.** Comparaison qualitative de la résistance à la compression des composites bois-ciment à d'autres matériaux.

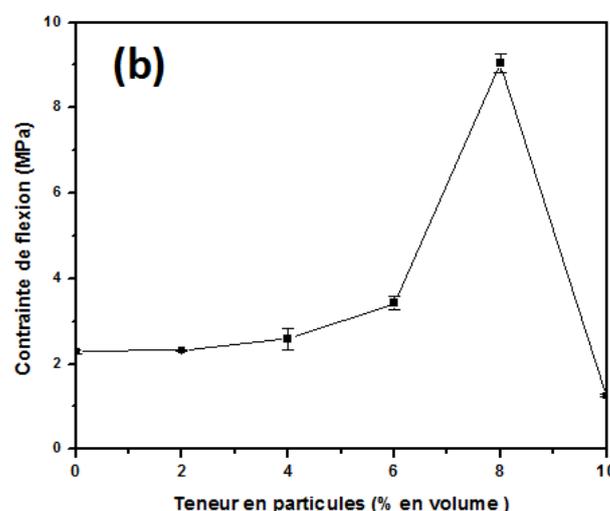
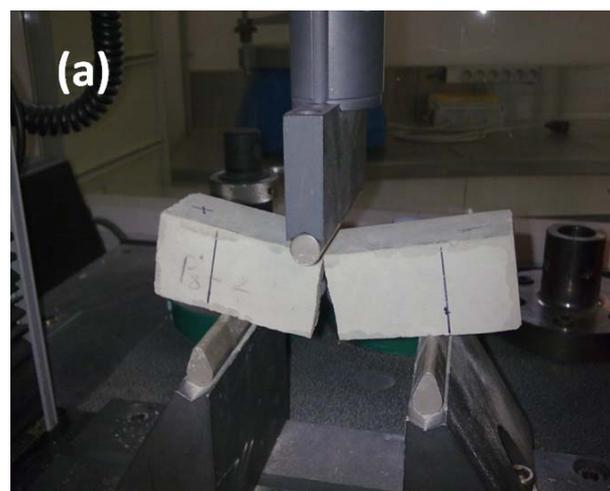
Composites	Rc [MPa]	Références
P <sub>0</sub>	55,08	présente étude
P <sub>8</sub>	45,34	présente étude
Gypse-bois de palmier dattier (1,2% masse)	8,2	Chikhi et al. 2013
Béton –fibre de palmier dattier (2% masse)	20	Kriker et al. 2005
Ciment-filler-sable-bois (10% masse)	10,6	Bederina et al. 2007b
Mortier – fibre de coco (10% masse)	7,96	Khedari et al. 2001

Tenant compte des récents travaux de (Bederina et al. 2007a; Bederina et al. 2007b; Chikhi et al. 2013; Khedari et al. 2001; Kriker et al. 2005) et conformément à la norme ASTM C 109/ C 109-95, le composite bois (à 8% en teneur) ciment, développé au cours de cette étude, pourra être utilisé dans le domaine de bâtiment, notamment au recouvrement des murs.

### 3.4.2. Contrainte de flexion

L'allure de la courbe de résistance en flexion est présentée dans la figure 6. Jusqu'à 8% de teneur en particules de bois de palmier dattier, nous observons une augmentation progressive de la résistance en flexion pour atteindre une valeur maximale de 9,04 MPa. Au-delà de cette valeur, la contrainte diminue rapidement.

A titre comparatif avec les résultats de la littérature, la résistance en flexion du composite (8%) est plus importante que celle rapportée par Sedan 2007 pour une teneur volumique de 16% de fibres de chanvre dans une matrice similaire. Cependant, elle est moins importante que celle rapportée par Savastano Jr et al. 2000 en utilisant des fibres de sisal, des coupeaux de bananier ou encore de l'eucalyptus également dans une matrice cimentaire. Les auteurs rapportent une résistance en flexion de l'ordre de 20MPa pour une teneur massique de 12%.



**Fig. 6.** a) Montage en flexion 3 points. b) Contrainte de flexion du composite bois de palmier dattier et ciment à 28 jours.

Dans le cas de la présente étude, le gain en propriétés mécaniques observé sur le composite bois (8%)-ciment est dû principalement à une bonne adhésion à l'interface particules de bois de palmier dattier ciment qui est traduit par un transfert de charge matrice - particules plus efficaces. Ceci confirme l'analyse et la discussion développées dans la partie essais de compression.

#### 4. Conclusion

Dans ce travail expérimental, nous avons étudié la possibilité d'utiliser les déchets de bois de palmier dattier, le pétiole et le rachis, comme renfort dans une matrice cimentaire. De plus, nous avons mis en place une méthode de formulation des composites bois-ciment. La morphologie, les propriétés thermiques, physiques et mécaniques ont été étudiées sur des échantillons à différentes teneurs volumiques en bois (0, 2, 4, 6, 8 et 10%).

De point de vue morphologique, il a été établi que le bois de palmier dattier contient deux types de fibres, de différents périmètres, dispersés dans une matrice constituée majoritairement d'hémicellulose et de lignine. Le premier type se présente comme des fibres denses, fibres porteuses de faibles périmètres, qui servent à soutenir la structure du pétiole et par conséquent la palme. Le deuxième type est d'une structure de base similaire au premier type. Ces fibres sont constituées, également d'un faisceau de fibrilles et de quelques lumens mais, de volume plus important, ce qui confère au bois de palmier dattier une masse volumique apparente très faible.

De point de vue caractérisation thermique, les valeurs obtenues sur les composites bois-ciment de 28 jours, notamment pour la teneur en particule de bois à 10 % qui correspond à 0,24 W/m.K, s'apparentent à celles des bétons légers conformément à la norme ASTM C109/C 109-95 et rapporté par (Neville 2000).

En parallèle, les essais de compression sur les composites bois-ciment à maturation ont révélés un comportement très particulier notamment pour les teneurs en particules 2, 4, 6 et 8%. Ce résultat n'adhère pas à ceux de la littérature où nous rapportons une diminution de la contrainte de compression en fonction de la teneur en particules de bois. Pour la présente étude, la diminution de la contrainte n'est significative qu'au-delà de la teneur de 8%. Ainsi, conformément à la norme ASTM C 109/ C 109-95, le composite bois (à 8% en teneur)-ciment, développé au cours de cette étude, pourra être utilisée dans le domaine de bâtiment, notamment, le recouvrement des murs.

Les essais de flexion ont confirmé l'analyse et la discussion développée dans la partie essais de compression. Ces essais ont montré un gain en propriétés mécaniques correspondant au composite bois (8%)-ciment dû principalement à une bonne adhésion à l'interface particules de bois de palmier dattier – ciment qui est traduit par un transfert de charge matrice – particules plus efficaces.

Outre les valeurs écologiques, l'épuisement des ressources fossiles et de gravissimes atteinte à la santé, l'Algérie doit

instaurer des mesures dans le domaine de l'isolation thermique des bâtiments afin de limiter la surconsommation énergétique des ménages en valorisant et développant des matériaux isolants de surcroît locaux à base des déchets ligno-cellulosiques.

#### References

- Abdel-Rahman, H.H., R.S. Al-Juruf, F. Ahmed & I. Alam (1988) Physical, mechanical and durability characteristics of date palm frond stalks as reinforcement in structural concrete. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 10(3) : 175-181.
- Agoudjil, B., A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos & M. Fois (2011) Caractérisation thermophysique du bois de palmier dattier en vue de son utilisation en isolation thermique dans l'habitat, *Congrès Français de Thermique; Énergie solaire et thermique, Perpignan* 171-176.
- Agoudjil, B., A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos & M. Fois (2011) Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. *Energy and Buildings* 43(2): 491-497.
- Ahmed, F.A., R.S. Al-Juruf, H.H. Abdel-Rehman & I.A. Alam (1990) A homogeneous building material from date palm fronds. *Building and Environment* 25(2): 183-187.
- Al-Juruf, R., F. Ahmed, H. Abdel-Rahman & I. Alam (1990) Development of New Building Materials Using Date Palm Fronds. *Building and Environment* 25: 183-187.
- Al-Juruf, R., F. Ahmed, I. Alam & H. Abdel-Rahman (1988) Determination of the Thermal Conductivity of Date Palm Leaves. *Journal of Building Physics* 11(3): 152-157.
- Al-Juruf, R.S., F.A. Ahmed, I.A. Allam & H.H. Abdel-Rehman (1988) Development of heat insulation material using date palm leaves. *Journal of Thermal Insulation* 11(3): 158-164.
- Alawar, A., A.M. Hamed & K. Al-Kaabi (2009) Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B: Engineering Natural fiber composites* 40(7): 601-606.
- AlMaadeed, M.A., Z. Nogellova, M. Micusik, I. Novak & I. Krupa (2014) Mechanical, sorption and adhesive properties of composites based on low density polyethylene filled with date palm wood powder. *Materials & Design* 53: 29-37.
- Almi, K., A. Benchabane, S. Lakel, A. Kriker (2015) Potential utilization of date palm wood as composite reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 34(15): 1231-1240.
- Almi, K., S. Lakel, A. Benchabane, A. Kriker (2015) Characterization of date palm wood used as composites reinforcement. *Acta Physica Polonica A* 127(4): 1072-1074.
- APRUE (2009) Consommation Énergétique Finale de l'Algérie, Chiffres clés année 2007. APRUE.
- ASTM C1437, 2007. standard test method for flow of hydraulic cement mortar.
- Bederina, M., L. Marmoret, K. Mezreb, M. Khenfer, A. Bali & M. Quéneudec (2007) Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling. *Construction and Building Materials* 21(3): 662-668.
- Behzad, T. & M. Sain (2007) Measurement and prediction of thermal conductivity for hemp fiber reinforced composites. *Polymer Engineering & Science* 47(7): 977-983.
- Bentchikou, M., S. Hanini, K. Silhadi & A. Guidoum (2007) Elaboration et étude d'un mortier composite à matrice minérale et fibres cellulosiques: application à l'isolation thermique en bâtiment. *Canadian Journal of Civil Engineering* 34(1): 37-45.
- Besset, J. (1987) Bois et matériaux dérivés, *Techniques de l'Ingénieur*, C925 - C926 pp.

- Bledzki, J. Gassan (1999) Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science* 24(2): 221-274.
- Bouguerra, A., A.A.M.A. Amiri & M.B. Diop (2001) Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 28(8): 1065-1078.
- Boukrouh, A. (2010) Algerian date 'Deglet Nour' to be labelled by Algerian authorities, Echorouk, Algiers, pp. p. 4.
- Chikhi, M., B. Agoudjil, A. Boudenne & A. Gherabli (2013) Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation. *Energy and Buildings* 66: 267-273.
- Coquard, R., D. Baillis & D. Quenard (2006) Experimental and theoretical study of the hot-wire method applied to low-density thermal insulators. *International journal of heat and mass transfer* 49(23-24): 4511-4524.
- Demirboga, R. (2003) Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar. *Energy and buildings* 35(2): 189-192.
- Espinoza Herrera, R. (2009) Panneaux en gypse et particules de bois renforcés avec du ciment Portland. Thèse de doctorat, Université de Laval, Canada.
- Hachmi, M.H. & A. Moslemi (1989) Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. *Forest products journal* 39(6): 55-58.
- Hofstrand, A.D., A.A. Moslemi & J.F. Garcia (1984) Curing characteristics of wood particles from nine northern rocky mountain species mixed with Portland cement. *Forest products journal* 34(2): 57-61.
- Iskanderani, F.I. (2008) Physical properties of particleboard panels manufactured from Phoenix dactylifera-L (date palm) mid-rib chips using ureaformaldehyde binder. *International Journal of polymeric materials and polymeric materials* 57(10): 979-995.
- Jebrane, M. (2009) Fonctionnalisation chimique du bois par transesterification des esters d'enol, thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France, pp. 155.
- John, M.J. & S. Thomas (2008) Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers* 71(3): 343-364.
- Kalaprasad, G., P. Pradeep, G. Mathew, C. Pavithran & S. Thomas (2000) Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low-density polyethylene composites reinforced with sisal, glass and intimately mixed sisal/glass fibres. *Composites Science and Technology* 60(16): 2967-2977.
- Khedari, J., B. Suttisonk, N. Pratinthong & J. Hirunlabh (2001) New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites* 23(1): 65-70.
- Kriker, A., A. Bali, G. Debicki, M. Bouziane & M. Chabannet (2008) Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cement & Concrete Composites* 30(7): 639-648.
- Kriker, A., G. Debicki, A. Bali, M. Khenfer & M. Chabannet (2005) Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composites* 27(5): 554-564.
- Michaud, F., (2003) Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique: aptitude au postformage. université de Laval, Canada.
- Moslemi, A. & S.C. Pfister (1987) The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. *Wood and fiber science* 19: 165-175.
- Mounanga, P. (2003) Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge: hydratation, retraits, propriétés thermophysiques. Nantes.
- Munier, P., 1973. *Le palmier-dattier*.
- Nasser, R.A. & H.A. Al-Mefarrej (2011) Midribs of Date Palm as a Raw Material for Wood-Cement Composite Industry in Saudi Arabia. *World Applied Sciences Journal* 15(12): 1651-1658.
- Navi, P. & F. Heger (2005) Comportement thermo-hydrromécanique du bois: applications technologiques et dans les structures. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, France.
- Neville, A.M. (2000) *Propriétés des bétons*. Eyrolles, 806 pp.
- Paul, S.A., A. Boudenne, L. Ibos, Y. Candau, K. Joseph & S. Thomas (2008) Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39(9): 1582-1588.
- Roumadi, M. (2014) L'inévitable hausse des prix de l'énergie, El Watan. Alger.
- Savastano Jr, H., P.G. Warden & R.S.P. Coutts (2000) Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. *Cement and Concrete Composites* 22(5): 379-384.
- Sedan, D. (2007) Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques. Université de Limoges, France 137.
- Sedan, D., C. Pagnoux, A. Smith & T. Chotard (2007) Interaction fibre de chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite. *Matériaux & Techniques* 95(2): 133-142.
- Thiebaud, S. (1995) Valorisation chimique des composés lignocellulosiques; obtention de nouveaux matériaux. Thèse, Institut National Polytechnique, Toulouse, France.
- Touloum, F., A. Benchabane & A. Kaci (2012) Valorisation des fibres naturelles de renfort pour matériaux composites., Huitièmes Journées de Mécanique, Ecole Militaire Polytechnique, Alger.

## ANNEXE I



# Ciments Calcia

Italcementi Group

Direction Industrielle  
et Technique

Les Technodes  
B.P. 01  
78931 Guerville cedex

Direction Commerciale  
Assistance

et Prescription Clients  
Tél. : 01 34 77 78 81  
Fax : 01 30 98 73 50

Version du : 22/01/2007

N° certificat CE : 0333-CPD-5202

Fiche produit de

**Villiers au Bouin**  
**CEM I 52,5 N CE CP2 NF**

## Caractéristiques physiques et mécaniques

Compression en MPa				Retrait en $\mu\text{m/m}$ à 28j	eau pâte pure en %	Début de prise en mn	Chaleur en J/g à 41h	Surface Blaine en $\text{cm}^2/\text{g}$	Masse Volumique en $\text{g}/\text{cm}^3$	Stabilité en mm	Maniabilité sur mortier CEN en s
1j	2j	7j	28j								
18.1	31.7	48.5	61.3	580	27.9	165	351	3590	3.13	1.0	

Composition élémentaire (%)		Constituants (%)		Caractéristiques des constituants		
Perte au feu	1.63	<b>Principaux</b>		<b>Nature</b>	<b>Caractéristiques</b>	
SiO <sub>2</sub>	20.23	Clinker (K) de Villiers au Bouin	98.0	<b>Clinker (K) Villiers</b>	CaO/SiO <sub>2</sub>	3.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.29	Laitier (S)			MgO (%)	4.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.35	Cendres (V)			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.78
TiO <sub>2</sub>	0.25	Calcaire (L)			Insoluble (%)	nd
MnO	0.02	Fumées de silice (D)			C3S (%)	66.9
CaO	63.67	<b>Secondaires</b>			C2S (%)	10.7
MgO	3.88	Calcaire (L)			C3A (%)	8.4
SO <sub>3</sub>	2.80	Fines de cru (F)	2.0		C4AF (%)	7.6
K <sub>2</sub> O	0.69	<b>Total</b>	100.0	<b>Laitier (S)</b>	Laitier vitreux (%) (CAO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	
Na <sub>2</sub> O	0.14	<b>Sulfate de calcium</b>			CAO+MgO+SiO <sub>2</sub> (%)	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31	Gypse	4.4		PF (%)	
S-	< 0.02	Anhydrite			CaO réactive (%)	
Cl-	0.02	<b>Additifs</b>			SiO <sub>2</sub> réactive (%)	
Insoluble CEN	0.39	Agent de mouture			CaCO <sub>3</sub> (%)	
Na <sub>2</sub> O éq. actif	0.58	Cloter F5903 (AXIM)	0.027		Adsorption bleu méthylène (g/100g)	
		Agent réducteur			TOC (%)	
Colorimétrie (L)	63.16	Sulfate de fer	0.30		SiO <sub>2</sub> amorphe (%)	
					PF (%)	
					Aire massique BET (m <sup>2</sup> /kg)	

## Mouture

Broyeur(s)	1
------------	---

## Stockage

Silo(s)	cf plan de silotage
---------	---------------------

Points de vente	Vrac	Sac
Usine de Villiers au Bouin	Oui	Oui



Siège social :  
Rue des Technodes  
78930 Guerville  
Tél. : 01 34 77 78 00  
Fax : 01 34 77 79 06

SAS au capital de 593 836 525 €  
Siren 654 800 689 RCS Versailles

Valeurs moyennes année 2006 données à titre indicatif.

## ANNEXE II



# Société Nouvelle du Littoral

**SABLE NORMALISE CEN CERTIFIE  
CONFORME EN 196-1**

**SABLE NORMALISE ISO  
CONFORME ISO 679**

**Méthodes d'essais des ciments**  
Sable pour mesure des résistances mécaniques

## 1- CARACTERISTIQUES

Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun  $1\ 350 \pm 5$  g.

Les livraisons se font à l'unité carton de 20 sachets pesant 27.5 kg et sur palette de 2 à 45 cartons, protégés par une housse en polyéthylène (transport routier) ou en carton renforcé (transport maritime).

## 2- CONTROLES

La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 (§ 5) et ISO 679 : 2009 (§ 5).

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	$99 \pm 1$
0.16	$87 \pm 5$
0.50	$67 \pm 5$
1.00	$33 \pm 5$
1.60	$7 \pm 5$
2.00	0

Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d'humidité et des contrôles de résistances mécaniques, selon les exigences des normes EN 196-1 (§ 11) et ISO 679 : 2009 (§ 11).

## 3- CONFORMITE

La conformité à la norme est contrôlée par le L.E.M.V.P. (Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris), 4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy - 75014 PARIS

Le certificat de conformité à la norme Européenne est délivré par l'AFNOR (Association Française de Normalisation), 11 Rue Francis de Pressensé – 93571 La Plaine Saint Denis Cédex.



Siège Social & Usine : Z.A – BP 9 – 11370 LEUCATE (France)  
Tél : 33 (0) 4 68 40 14 05 Fax : 33 (0) 4 68 40 92 72 • Internet : [www.s-n-l.fr](http://www.s-n-l.fr) – e.mail [contact@s-n-l.fr](mailto:contact@s-n-l.fr)

N° 3-11/09-F