

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA



جامعة باجي مختار  
- عنابة -

Année : 2019

*Faculté des sciences de l'ingénieur*

*Département de Génie Civil*

## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT 3<sup>ème</sup> Cycle LMD

---

### **BETONS RENFORCES DE FIBRES NATURELLES : REPOSE AU RETRAIT ET FISSURATION DANS LES BETONS ET MORTIERS**

---

Option

**Matériaux innovants et durabilités**

Par

**Meriem BOUTARFA**

Soutenue le 28/02/1019

**DEVANT LE JURY**

<b>Président</b>	<b>ARABI Nourredine</b>	<b>Pr</b>	<b>Université Badji Mokhtar - Annaba</b>
<b>Rapporteur</b>	<b>BELOUETTAR Redjem</b>	<b>Pr</b>	<b>Université Badji Mokhtar - Annaba</b>
<b>Examineur</b>	<b>BEHIM Mourad</b>	<b>Pr</b>	<b>Université Badji Mokhtar - Annaba</b>
<b>Examineur</b>	<b>BENOUIS Abdelhalim</b>	<b>Pr</b>	<b>Université 8 Mai 1945 - Guelma</b>
<b>Examineur</b>	<b>BELACHIA Mouloud</b>	<b>Pr</b>	<b>Université 20 Aout 1956 - Skikda</b>
<b>Invité</b>	<b>MAKRADI Ahmed</b>	<b>Pr</b>	<b>LIST - Luxembourg</b>

## Remerciements

---

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma profonde gratitude avant tout à Dieu qui nous a donné la vie, le courage et la force d'accomplir ce travail.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à mon encadreur le **Professeur BELOUETTAR Redjem** pour son suivi et ces conseils, sans oublier tous mes professeurs pour leurs aides précieuses ainsi que les techniciens et mes collègues de magister et doctorat pour l'aide morale et matérielle qu'ils m'ont apporté.

Ce travail de recherche a été réalisé au Laboratoire de Génie Civil de l'université Badji Mokhtar - Annaba sous la direction du *Pr DJEGHABA Kamel*. Merci également au Professeur *REDJEL Bachir*

Je remercie également mon Co-encadreur *Mr MAKRADI Ahmed* et *Mr BELOUETTAR Salim* qui m'ont bien accueilli au Centre de Recherche Public Henri Tudor - Luxembourg. Je tiens également à remercier toute l'équipe du département de Génie Civil : enseignants, personnels administratifs et techniques ; merci à messieurs *KHOUALDI Khair-Eddine* et *AKROUM Kamel* pour leurs aides durant les essais expérimentaux au laboratoire.

Mes remerciements vont également à tous mes amis et collègues doctorants (Ghania, Houria, zohra, Amina, Imene, Asma, Nadia, Yasmina, Tahar, Oussama, Adel, Walid, Miloud et Walid) et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Un très grand merci à mes « **Parents** » lumière de mon cœur qui sont la ressource de ma réussite et qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes différents choix. Un grand merci à mon mari « **BOUCHOUCHA Adel** » et ma petite fille « **Chahd** » qui m'ont toujours soutenu et encouragé pour finir ce travail. A mes adorables sœurs « **Amira, Saoussen et Samira** », mes aimables frères « **Abdel Karim et Saif eldine** », mes beaux-frères « **Anter, Aimen et Fahed** » et à toute ma famille. Mes remerciements vont également à mes beaux-parents.

Enfin mes remerciements vont aux responsables du département de Génie Civil l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, ainsi que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

AUTEUR :

**Meriem BOUTARFA**

**TITRE : BETON RENFORCES DE FIBRES NATURELLES : REPONSE AU RETRAIT ET FISSURATION DANS LES BETONS ET MORTIERS**

DIRECTEUR DE THESE :

**Pr. Redjem BELOUETTAR**

L'Algérie est parmi les pays, qui disposent d'extraordinaires ressources en fibres végétales malheureusement, leur valorisation dans les domaines pratiques, entre autres, dans les matériaux de construction est encore peu exploitée. L'objectif de ce travail consiste à apporter notre contribution à la valorisation des ressources locales en l'occurrence les fibres végétales d'Alfa, de palmier dattier et diss à faible coût et provenant d'une source renouvelable et de l'intégrer d'une façon rationnelle dans le domaine de la construction.

Le présent travail consiste à étudier l'effet de renforcement du mortier et béton avec trois types des fibres végétales : alfa, diss et palmier dattier, avec différentes longueurs (0.5, 1, 1.5, 2 cm) et pourcentages (0.5, 1, 1.5, 2 %) sur le comportement à l'état durci (essai de traction par flexion et de compression). Un traitement des fibres a été fait pour éliminer la cellulose qui cause le retard de prise. Le taux optimal et le traitement des fibres végétales sont choisis pour l'étude sur le comportement physico-mécanique et le retrait de dessiccation et endogène des mortiers et bétons.

Les résultats obtenus pour les mortiers et bétons renforcés par les différentes longueurs et taux de fibres végétales montrent qu'avec l'augmentation des longueurs de fibres et pourcentage, la résistance en flexion est améliorée et une diminution de la résistance en compression quel que soit le type de fibres utilisées, elles limitent la propagation du retrait endogène et de dessiccation au cours des jours, et la surface des fibres jouent un rôle très important sur ce phénomène.

La deuxième partie de l'étude est consacrée à déterminer la durabilité des fibres végétales et mortiers fibrés, une chute de la résistance des mortiers fibrés à 6 ans est due à la modification de la zone de transition autour de ces fibres, elle est plus poreuse et plus fissurée que le reste de la matrice.

L'analyse de la morphologie de la surface des fibres végétales qui ont subi un vieillissement accéléré dans NaOH et Ca(OH)<sub>2</sub> pendant 3 mois conduit à ce qui suit : la soude ne réagit pas de façon homogène tout au long des tiges et l'attaque est locale, mais l'attaque de Ca(OH)<sub>2</sub> semble diffuse et elle est relativement uniforme sur toute la longueur des fibres. Ceci qui entraîne leur fragilisation et réduit leur résistance en traction

Pour le vieillissement naturel des fibres végétales extraites d'un mortier âgé de 6 ans; les images ne montrent pas une dégradation sur la surface des fibres. Le ciment n'attaque pas la fibre mais modifie la zone de transition autour de celle-ci.

**Mots clé : Mortiers, Béton, Fibres végétales, Alfa, Palmier, Diss, Propriétés mécaniques, Retrait, Durabilité**

AUTHOR : **Meriem BOUTARFA**

**TITLE : REINFORCED CONCRETE OF NATURAL FIBERS: RESPONSE TO SHRINKAGE AND CRACKING IN CONCRETE AND MORTAR**

DIRECTOR OF THESIS : **Pr. Redjem BELOUETTAR**

---

Algeria is among the countries, which have extraordinary resources in plant fibers unfortunately; their valuation in the practical areas, among others, in building materials is still little exploited. The objective of this work is to contribute to the valorization of local resources in this case the plant fibers of Alfa, date palm and diss at low cost and from a renewable source and integrate it a rational way in the field of construction.

The present work consists of studying the reinforcing effect of mortar and concrete with three types of plant fibers: alfa, diss and date palm, with different lengths (0.5, 1, 1.5 and 2 cm) and percentages (0.5, 1, 1.5, and 2 %) on hardened behavior (flexural tensile and compression test). A fiber treatment was done to remove the cellulose that causes retardation. The optimal rate and the treatment of plant fibers are chosen for the study on the physico-mechanical behavior and the withdrawal of desiccation and endogenous mortars and concretes.

The results obtained for the mortars and concretes reinforced by the different lengths and levels of plant fibers show that with the increase of the fiber lengths and percentage, the flexural strength is improved and a decrease of the compressive strength whatever the type of fiber used, they limit the propagation of endogenous shrinkage and desiccation during the days, and the surface of the fibers play a very important role in this phenomenon.

The second part of the study is dedicated to determine the durability of fibers and fibrous mortars, a drop in the resistance of fiber-reinforced mortars at 6 years is due to the modification of the transition zone around these fibers, it is more porous and more cracked than the rest of the matrix.

The analysis of the surface morphology of plant fibers which have undergone accelerated aging in NaOH and Ca (OH) 2 for 3 months leads to the following: Soda does not react homogeneously throughout the stems and the attack is local, but the Ca (OH) 2 attack appears diffuse and is relatively uniform throughout the length of the fibers. This leads to their embrittlement and reduces their tensile strength

For natural aging of plant fibers extracted from a 6 year old mortar; the images do not show degradation on the surface of the fibers. The cement does not attack the fiber but modifies the transition zone around it.

**Keywords:** Mortars, Concrete, Vegetable fibers, Alfa, Palm, Diss Mechanical properties, Shrinkage, Durability

AUTHOR : **Meriem BOUTARFA**

**TITLE : REINFORCED CONCRETE OF NATURAL FIBERS: RESPONSE TO SHRINKAGE AND CRACKING IN CONCRETE AND MORTAR**

DIRECTOR OF THESIS : **Pr. Redjem BELOUETTAR**

---

Algeria is among the countries, which have extraordinary resources in plant fibers unfortunately; their valuation in the practical areas, among others, in building materials is still little exploited. The objective of this work is to contribute to the valorization of local resources in this case the plant fibers of Alfa, date palm and diss at low cost and from a renewable source and integrate it a rational way in the field of construction.

The present work consists of studying the reinforcing effect of mortar and concrete with three types of plant fibers: alfa, diss and date palm, with different lengths (0.5, 1, 1.5 and 2 cm) and percentages (0.5, 1, 1.5, and 2 %) on hardened behavior (flexural tensile and compression test). A fiber treatment was done to remove the cellulose that causes retardation. The optimal rate and the treatment of plant fibers are chosen for the study on the physico-mechanical behavior and the withdrawal of desiccation and endogenous mortars and concretes.

The results obtained for the mortars and concretes reinforced by the different lengths and levels of plant fibers show that with the increase of the fiber lengths and percentage, the flexural strength is improved and a decrease of the compressive strength whatever the type of fiber used, they limit the propagation of endogenous shrinkage and desiccation during the days, and the surface of the fibers play a very important role in this phenomenon.

The second part of the study is dedicated to determine the durability of fibers and fibrous mortars, a drop in the resistance of fiber-reinforced mortars at 6 years is due to the modification of the transition zone around these fibers, it is more porous and more cracked than the rest of the matrix.

The analysis of the surface morphology of plant fibers which have undergone accelerated aging in NaOH and Ca (OH) 2 for 3 months leads to the following: Soda does not react homogeneously throughout the stems and the attack is local, but the Ca (OH) 2 attack appears diffuse and is relatively uniform throughout the length of the fibers. This leads to their embrittlement and reduces their tensile strength

For natural aging of plant fibers extracted from a 6 year old mortar; the images do not show degradation on the surface of the fibers. The cement does not attack the fiber but modifies the transition zone around it.

**Keywords:** Mortars, Concrete, Vegetable fibers, Alfa, Palm, Diss Mechanical properties, Shrinkage, Durability

## العنوان: خرسانة مسلحة بالألياف الطبيعية: استجابة الانسحاب والتشققات في الخرسانة والملاط

الجزائر من بين البلدان التي لديها موارد غير عادية في ألياف الخضروات للأسف ، فإن تئمينها في المجالات العملية ، من بين أمور أخرى ، في مواد البناء لا يزال مستغلاً بشكل قليل. الهدف من هذا العمل هو المساهمة في تئمين الموارد المحلية في هذه الحالة ألياف نبات ألفا ونخيل التمر وحلها بتكلفة منخفضة ومن مصدر متجدد ودمجها مع طريقة عقلانية في مجال البناء.

يتكون العمل الحالي من دراسة التأثير المعزز للهاون والخرسانة بثلاثة أنواع من الألياف النباتية: ألحفا ، الديس ، نخيل التمر ، بأطوال مختلفة (0.5 ، 1 ، 1.5 ، 2 سم) والنسب المئوية (0.5 ، 1 ، 1.5 ، 2 %) على السلوك المتصلب (اختبار الشد الانضغاطي والضغط) ، وتم إجراء علاج من الألياف لإزالة السليلوز الذي يسبب التخلف. يتم اختيار المعدل الأمثل ومعالجة الألياف النباتية لدراسة السلوك الفيزيائي الميكانيكي وسحب الجفاف ومدافع الهاون والخرسانة الداخلية.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها عن الملاط والخرسانة المعززة بأطوال ومستويات مختلفة من الألياف النباتية أنه مع زيادة أطوال الألياف والنسبة المئوية ، يتم تحسين قوة الانحناء وانخفاض قوة الضغط مهما كانت نوع الألياف المستخدمة ، فهي تحد من انتشار الانكماش الداخلي والجفاف في أيام ، وسطح الألياف تلعب دورا هاما للغاية في هذه الظاهرة.

الجزء الثاني من الدراسة مخصص لتحديد متانة الألياف ومدافع الهاون الليفية ، ويعزى انخفاض مقاومة الملاط المقوى بالألياف في 6 سنوات إلى تعديل المنطقة الانتقالية حول هذه الألياف ، وهي أكثر قابلية للاختراق وأكثر تشققا من بقية المصفوفة.

تحليل التشكل السطحي للألياف النباتية التي خضعت لشيخوخة متسارعة في NaOH و  $Ca(OH)_2$  خلال 3 أشهر يؤدي إلى ما يلي: لا تتفاعل الصودا بشكل متجانس في جميع أنحاء السيقان و الهجوم محلي ، لكن هجوم  $Ca(OH)_2$  يبدو منتشرًا وموحّدًا نسبيًا طوال الألياف. هذا يؤدي إلى التقصف ويقلل من قوة الشد. للشيخوخة الطبيعية للألياف النباتية المستخرجة من هاون عمره 6 سنوات؛ الصور لا تظهر تدهور على سطح الألياف. الاسمنت لا يهاجم الألياف ولكنه يعدل المنطقة الانتقالية من حوله.

## كلمات البحث:

الملاط، الخرسانة، الألياف النباتية، الحلفاء، النخلة والديس، الخصائص الميكانيكية، الانسحاب، المتان

## Liste des matières

---

Remerciements .....	2
Résumé .....	3
Abstract .....	4
ملخص.....	5
Liste des matières.....	6
Liste des figures .....	13
Liste des tableaux .....	22
Notation.....	24
Introduction Générale.....	26

### CHAPITRE I

#### Recherche bibliographique

<b>I.1. Introduction</b> .....	29
<b>I.2.Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires</b> .....	29
I.2.1. Hydratation d ciment.....	29
I.2.1.1. Equations.....	29
I.2.1.2. Chaleur d'hydratation.....	31
I.2.2. Variations volumiques dues à l'hydratation.....	33
I.2.2.1. Le retrait endogène.....	33
I.2.2.1.1.Mécanismes.....	33
I.2.2.1.2. L'autodessiccation.....	34
I.2.2.1.3. Facteurs influents.....	34
I.2.2.1.3.a. Le rapport E/C .....	34
I.2.2.1.3.b.Effet de la concentration granulaire.....	35
I.2.2.2. Le retrait thermique.....	36
I.2.3.Conséquences de l'exposition aux conditions extérieures.....	36
I.2.3.1. Le retrait plastique.....	37
I.2.3.2. Le retrait de dessiccation.....	37
I.2.3.3. Le retrait de carbonatation .....	37
<b>I.3.Etats connaissance sur les fibres végétales</b> .....	38
I.3.1. Définition de la fibre végétale.....	38

## Liste des matières

---

I.3.2. Classification des fibres végétales.....	38
I.3.3. Structure physique.....	39
I.3.4. Structure chimique .....	41
I.3.4.1. Composition chimique.....	41
I.3.4.1.1. La cellulose.....	41
I.3.4.1.2. Les hémicelluloses.....	43
I.3.4.1.3. Les pectines.....	44
I.3.4.1.4. Les lignines.....	45
I.3.4.1.5. Les substances d'adcrustation.....	46
I.3.5. Propriétés mécaniques de la fibre végétale.....	47
I.3.6. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales.....	48
I.3.7. Utilisation des fibres végétales dans la construction.....	49
<b>I.4. Les caractéristiques de fibres végétales utilisées comme renfort de composite.</b>	<b>50</b>
I.4.1. La fibre d'Alfa( <i>Stipa Tenacissima</i> L).....	50
I.4.1.1. Généralités.....	50
I.4.1.2. Nomenclature.....	50
I.4.1.3. La morphologie de la plante.....	51
I.4.1.4. Composition chimique .....	52
I.4.2. Fibre de palmier dattier .....	53
I.4.2.1. Généralités.....	53
I.4.2.2. Types des fibres de palmier dattier.....	55
I.4.2.3. Composition chimique des fibres de palmier dattier.....	56
I.4.3. Fibres de Diss ( <i>ampélodesmos mauritanicus</i> ) .....	56
I.4.3.1. Généralités.....	56
I.4.3.2. Description de Diss ( <i>ampélodesmosmauritanicus</i> ).....	57
I.4.3.3. Nomenclature.....	57
I.4.3.4. Composition chimique des fibres de diss.....	57
<b>I.5. Les Composites.....</b>	<b>57</b>
I.5.1. Matériaux composites à base de fibres naturelles.....	58
I.5.1.1. Matrice polymère et fibres végétales.....	58
I.5.1.2. Matrice minérale et fibres végétales.....	60
I.5.1.3. Matrice cimentaire et fibres végétales.....	61
I.5.1.3.1. Potentiel et compatibilité des fibres avec le ciment.....	61



## Liste des matières

I.5.2. Généralités sur les propriétés des composites de fibres végétales.....	64
I.5.2.1. Propriétés à l'état frais.....	64
I.5.2.1.1. Influence sur la prise.....	65
I.5.2.2. Propriétés mécaniques.....	66
I.5.3. Durabilité des composites de fibres végétales.....	68
I.5.3.1. Evolution des propriétés des composites de fibres végétales à long terme.....	69
I.5.3.2. Durabilité des fibres végétales en milieu alcalin.....	70
I.5.3.3. Phénomènes aux interfaces fibres/matrice.....	74
I.5.3.4. Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites renforcés par des fibres végétales.....	76
I.5.3.4.1. Traitement des fibres.....	76
I.5.3.4.1.1 Traitement chimique.....	77
I.5.3.4.1.1.a. Traitement à l'hydroxyde de sodium.....	77
I.5.3.4.1.1.b. Traitement à l'eau bouillante.....	78
I.5.3.4.1.1.c. Traitement à l'hydroxyde de calcium.....	79
I.5.3.4.1.1.d. Estérification.....	80
I.5.3.4.1.2. Traitement thermique.....	80
I.5.3.4.1.3. Traitement par enrobage minéral.....	80
I.5.3.4.1.4. Traitement par enrobage organique.....	82
I.5.3.4.1.4.a. Enrobage à l'huile de lin.....	82
I.5.3.4.1.4.b. Enrobage à la paraffine.....	83
I.5.3.4.1.4.c. Enrobage par un copolymère acrylique fluoré..	84
I.5.3.4.2. Modification de la matrice.....	84
<b>I.6. Conclusion.....</b>	<b>87</b>

## CHAPITRE II

### Caractérisation des matériaux utilisés

<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>90</b>
<b>II.2. Matériaux de base.....</b>	<b>90</b>
II.2.1. Ciment.....	90
II.2.2. L'eau de gâchage.....	90

## Liste des matières

II.2.3. Sable .....	91
II.2.4. Gros granulats.....	91
II.2.4.1. Les essais physiques.....	92
II.2.4.1.a. Masse Volumique Apparente.....	92
II.2.4.1.b. Masse Volumique Absolue.....	92
II.2.4.1.c. Equivalent de Sable.....	93
II.2.5. Les fibres naturelles.....	93
II.2.5.1. Fibres d’Alfa.....	93
II.2.5.2. Fibres de palmier dattier.....	94
II.2.5.3. Fibres de Diss.....	94
II.2.6. Traitement des fibres végétales.....	95
II.2.7. Préparation de l’échantillon de fibres végétales .....	95
<b>II.3. Caractéristiques physiques de fibres végétales .....</b>	<b>96</b>
II.3.1. Masse volumique apparente de fibres végétales.....	96
II.3.2. Masse volumique absolue de fibres végétales.....	96
II.3.3. Taux d’Humidité de fibres végétales.....	97
II.3.4. La cinétique d’absorption d’eau de fibres végétales.....	97
II.3.5. Saturation d’eau des fibres végétales.....	99
<b>II.4. Analyses morphologies et structures.....</b>	<b>100</b>
II.4.1. Observation microscopiques des fibres végétales.....	100
II.4.1.1. Observation microscopiques des fibres d’Alfa brute et traite.....	100
II.4.1.2. Observation microscopiques des fibres de palmier dattier brute et traite	101
II.4.1.3. Observation microscopiques des fibres de Diss brute et traite.....	102
II.4.2. Observation confocal de la rugosité de la surface des fibres végétales.....	103
<b>II.5. Caractéristique mécanique des fibres végétales .....</b>	<b>104</b>
II.5.1. Essai de traction directe sur les fibres végétales .....	104
<b>II.6. Conclusion.....</b>	<b>105</b>

## CHAPITRE III

### Méthodes et résultats expérimentaux

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>108</b>
<b>III.2. Formulation du mortier classique et mortier fibrés.....</b>	<b>108</b>

## Liste des matières

---

III.2.1. Composition du Mortier Classique.....	108
III.2.2. Composition du Mortier fibré.....	108
III.2.3. Caractérisation des mortiers à l'état frais.....	109
III.2.3.1. L'étalement a tables à secousse .....	109
III.2.4. Propriétés du mortier fibré à l'état durci.....	110
III.2.4.1. Densité du mortier durci .....	110
III.2.4.2. Résistance à la compression .....	110
III.2.4.3. Résistance à la traction par flexion .....	111
III.2.4.4. Déformations différées.....	111
III.2.4.4.1. Le retrait endogène.....	111
III.2.4.4.2. Le retrait de dessiccation.....	112
<b>III.3. Formulation du béton ordinaire et béton fibrés .....</b>	<b>113</b>
III.3.1. Formulation du béton témoin par la méthode de Dreux-Gorisse.....	114
III.3.2. Formulation du béton fibrés.....	116
<b>III.4. Procédure expérimentale.....</b>	<b>117</b>
III.4.1. Propriétés des bétons à l'état frais.....	117
III.4.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	117
III.4.2. Propriétés des bétons à l'état durci .....	118
III.4.2.1. Densité du béton durci.....	118
III.4.2.2. Résistance à la compression.....	118
III.4.2.3. Résistance à la traction par flexion.....	119
III.4.2.4. Déformations différées.....	120
III.4.2.4.1. Le retrait endogène.....	120
III.4.2.4.2. Le retrait de dessiccation.....	120
<b>III.5. Influence du pourcentage et la longueur des fibres végétales traité et non traité sur la résistance du mortier classique .....</b>	<b>121</b>
III.5.1. Propriétés mécaniques des mortiers de fibres non traités .....	121
III.5.1.1. Résistance à la compression .....	121
III.5.1.2. Résistance à la flexion .....	122
III.5.2. Propriétés mécaniques des mortiers de fibres traités .....	123
III.5.2.1. Résistance à la compression .....	123
III.5.2.2. Résistance à la flexion.....	125
<b>III.6. Conclusion .....</b>	<b>126</b>

## Liste des matières

<b>III.7. Influence de fibres végétales sur les propriétés du mortier</b> .....	126
III.7.1. Propriétés à l'état frais .....	126
III.7.1.1. Effet de fibres sur l'étalement à la table à secousses des mortiers.....	126
III.7.2. Propriétés à l'état durci.....	128
III.7.2.1. Effet de fibres sur la densité des mortiers durcis.....	128
III.7.2.2. Effet de la longueur et pourcentage de fibres végétales sur la résistance en compression des mortiers.....	129
III.7.2.3. Effet de la longueur et pourcentage de fibres végétales sur la résistance à la flexion des mortiers.....	131
III.7.3. Effet des fibres végétales sur le retrait de dessiccation et endogène des mortiers.....	132
III.7.3.1. Retrait de dessiccation.....	132
III.7.3.2. Retrait endogène.....	135
<b>III.8. Influence de fibres végétales sur les propriétés du béton ordinaire</b> .....	137
III.8.1. Propriétés à l'état frais .....	137
III.8.1.1. Effet de fibres sur l'ouvrabilité du béton .....	137
III.8.2. Propriétés à l'état durci .....	139
III.8.2.1. Effet de fibres sur la densité des bétons durcis.....	139
III.8.2.2. Effet de la longueur et pourcentage de fibres végétales sur la résistance en compression des bétons.....	141
III.8.2.3. Effet de la longueur et pourcentage de fibres végétales sur résistance à la traction par flexion des bétons .....	142
III.8.3. Effet des fibres végétales sur le retrait de dessiccation et endogène des bétons.....	144
III.8.3.1. Retrait de dessiccation.....	144
III.8.3.2. Retrait endogène.....	147
<b>III.9. Conclusion</b> .....	149

## CHAPITRE IV

### Durabilité des mortiers et des fibres végétales dans des différents milieux agressifs

<b>IV.1. Introduction</b> .....	153
---------------------------------	-----

<b>IV.2. Influence de Mode de conservation des éprouvettes sur le comportement mécanique des mortiers fibrés .....</b>	<b>153</b>
IV.2.1. Résistance à la traction par flexion des mortiers renforcés des fibres végétales avec des différents modes de conservation .....	153
IV.2.2 Résistance en compression des mortiers renforcés des fibres végétales avec des différents modes de conservation .....	156
<b>IV.3. Propriétés mécaniques des mortiers fibrés après vieillissement naturel.....</b>	<b>158</b>
IV.3.1. Résistance à la traction par flexion.....	159
IV.3.2. Résistance en compression.....	161
<b>IV.4. Vieillissement accéléré des fibres végétales dans une solution alcaline.....</b>	<b>164</b>
IV.4.1. Essai de traction directe des fibres végétales ayant subi un vieillissement accéléré dans le Na(OH) .....	164
IV.4.2. Essai de traction directe des fibres végétales ayant subi un vieillissement accéléré dans le Ca(OH) <sub>2</sub> .....	165
<b>IV.5. Observation MEB des fibres végétales vieillies.....</b>	<b>167</b>
IV.5.1. Observation MEB des fibres végétales ayant subi un vieillissement accéléré dans Na(OH).....	167
IV.5.2. Observation MEB des fibres végétales ayant subi un vieillissement accéléré dans Ca(OH) <sub>2</sub> .....	172
IV.5.3. Observation MEB des fibres végétales vieillies naturellement dans la matrice cimentaire.....	174
<b>IV.6. Conclusion. ....</b>	<b>176</b>
Conclusion Générale.....	180
Référence Bibliographique.....	186

## Liste des figures

Figure	Titre	Page
<b>Figure I.1</b>	Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment après le contact E/C.....	32
<b>Figure I.2</b>	Schéma illustrant la contraction le Chatelier.....	34
<b>Figure I.3</b>	Retrait endogène de la pâte et du mortier (même rapport E/C=0,35).....	35
<b>Figure I.4</b>	Retrait endogène du mortier (volume de la pâte = 57%) et du béton (volume de la pâte = 34%) pour un même rapport E/C=0,30.....	36
<b>Figure I.5</b>	Classification des fibres végétales selon l'origine.....	39
<b>Figure I.6</b>	structure générale d'une fibre naturelle.....	40
<b>Figure I.7</b>	Structure chimique de la cellulose.....	42
<b>Figure I.8</b>	Structure d'un type de xyloglucane.....	44
<b>Figure I.9</b>	Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique.....	44
<b>Figure I.10</b>	Formation d'un coude par la présence de rhamnose.....	45
<b>Figure I.11</b>	Formule chimique de l'alcool coumarylique, coniférylique et sinapylique.....	45
<b>Figure I.12</b>	Exemple de défaut structural sur une fibre de lin.....	47
<b>Figure I.13</b>	Illustrations de la plante d'Alfa à l'état brut.....	51
<b>Figure I.14</b>	Morphologie de la plante d'Alfa.....	52
<b>Figure I.15</b>	Présentation schématique d'un palmier dattier.....	54
<b>Figure I.16</b>	Schéma d'une palme de palmier dattier.....	54
<b>Figure I.17</b>	Herbe de Diss <i>Ampelodesmos mauritanicus</i> .....	56
<b>Figure I.18</b>	Classification schématique des différents types de composites.....	58
<b>Figure I.19</b>	Représentation schématique du comportement en flexion troispoints : (a) gypse pur (b) composite gypse-fibre de sisal.....	66
<b>Figure I.20</b>	Définition des grandeurs caractéristiques du comportement en flexion d'un composite fibré.....	68
<b>Figure I.21</b>	Comportement mécanique en flexion 3 points d'une matrice cimentaire renforcée par des fibres de chanvre brutes (FIB) et des fibres traitées avec une solution de soude (FIBNA), de chlorure d'aluminium (FIBAL) et de chaux (FIBCA) à 28 jours (A) Et après	

## Liste des figures

	12 mois de vieillissement nature (B).....	69
<b>Figure I.22</b>	Effet des cycles de vieillissement sur le comportement mécanique en flexion 3 points de ciment renforcé par des fibres de conifères.....	70
<b>Figure I.23</b>	Représentation schématique de la décomposition des fibres de sisal en milieu alcalin.....	73
<b>Figure I.24</b>	Absorption d'eau des fibres de lin avec ou sans traitement.....	78
<b>Figure I.25</b>	Temps d'écoulement au maniabilimètre de mortiers renforcés de fibres de lin brutes ou traitées.....	79
<b>Figure I.26</b>	Influence de recouvrements au ciment et à l'huile de lin sur la capacité d'absorption en eau de granulats de pulpe de betterave.....	82
<b>Figure I.27</b>	Comportement mécanique en flexion de composites à matrice cimentaire (A) et à matrice pouzzolanique sans hydroxyde de calcium (B) au jeune âge, et après 25, 50, 75 et cycles de vieillissement accéléré.....	86
<b>Figure II.1</b>	Sable utilisé.....	91
<b>Figure II.2</b>	Gros granulats .....	91
<b>Figure II.3</b>	Courbe granulométrique des granulats.....	92
<b>Figure II.4</b>	Fibres d'Alfa.....	94
<b>Figure II.5</b>	Fibres de folioles de palmier dattier.....	94
<b>Figure II.6</b>	Plante de Diss.....	95
<b>Figure II.7</b>	Fibres de palmier avant et après traitement.....	95
<b>Figure II.8</b>	Fibres d'Alfa avec les différentes longueurs .....	96
<b>Figure II.9</b>	Fibres de palmier dattier avec les différentes longueurs.....	96
<b>Figure II.10</b>	Fibres de dissavec les différentes longueurs .....	96
<b>Figure II.11</b>	Observation de la texture de la fibre d'Alfa à l'état brute(coupe transversale et longitudinale).....	100
<b>Figure II.12</b>	Observation de la texture de la fibre d'Alfa traité(coupe transversale et longitudinale).....	101
<b>Figure II.13</b>	Observation de la texture de la fibre de palmier brute(coupe transversale et longitudinale).....	101
<b>Figure II.14</b>	Observation de la texture de la fibre de palmier traité(coupe transversale et longitudinale).....	102
<b>Figure II.15</b>	Observation de la texture de la fibre de Diss brute(coupe transversale	

## Liste des figures

	et longitudinale).....	102
<b>Figure II.16</b>	Observation de la texture de la fibre de Diss traité(coupe transversale et longitudinale).....	103
<b>Figure II.17</b>	Image confocal de la surface des fibres végétales (a) fibre d'Alfa, (b) fibre de palmier et (c) fibre de Diss.....	103
<b>Figure II.18</b>	Montage utilisé pour l'essai de traction directe des fibres.....	104
<b>Figure II.19</b>	Force de traction directe des fibres végétales.....	105
<b>Figure III.1</b>	Essai d'étalement à la table à secousses.....	109
<b>Figure III.2</b>	Dispositif de rupture en compression.....	110
<b>Figure III.3</b>	Machine d'essai de compression.....	110
<b>Figure III.4</b>	Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion trois points.....	111
<b>Figure III.5</b>	Machine d'essai de flexion.....	111
<b>Figure III.6</b>	Dispositif de mesure de retrait en mode endogène pour éprouvette de 4x4x16 cm.....	112
<b>Figure III.7</b>	Dispositif de mesure des formations de retrait en mode dessiccation pour éprouvette de 4x4x16 cm.....	113
<b>Figure III.8</b>	Affaissement au cône d'Abrams.....	117
<b>Figure III.9</b>	Description d'essai de compression.....	119
<b>Figure III.10</b>	Description d'essai de traction par flexion.....	119
<b>Figure III.11</b>	Dispositif de mesure de retrait en mode dessiccation pour éprouvette de 7x7x28 cm.....	120
<b>Figure III.12</b>	Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibre d'Alfa avec différentes tailles des fibres.....	121
<b>Figure III.13</b>	Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibre de palmier dattier avec différentes tailles des fibres.....	122
<b>Figure III.14</b>	Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibre de Diss avec différentes tailles des fibres.....	122
<b>Figure III.15</b>	Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibre d'Alfa avec différentes tailles des fibres.....	122
<b>Figure III.16</b>	Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibre de palmier dattier avec différentes tailles des fibres.....	123



## Liste des figures

<b>Figure III.17</b>	Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibre de diss avec différentes tailles des fibres.....	123
<b>Figure III.18</b>	Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibre d'Alfa traité avec différentes tailles des fibres.....	124
<b>Figure III.19</b>	Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibre de palmier dattier traité avec différentes tailles des fibres.....	124
<b>Figure III.20</b>	Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibre de Diss traité avec différentes tailles des fibres.....	124
<b>Figure III.21</b>	Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibre d'Alfa traité avec différentes tailles des fibres.....	125
<b>Figure III.22</b>	Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibre de palmier dattier traité avec différentes tailles des fibres.....	125
<b>Figure III.23</b>	Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibre de diss traité avec différentes tailles des fibres.....	125
<b>Figure III.24</b>	Effet des longueurs des fibres végétales sur l'étalement du mortier avec un taux de 1% .....	127
<b>Figure III.25</b>	Effet des longueurs des fibres végétales sur l'étalement du mortier avec un taux de 2% .....	127
<b>Figure III.26</b>	Effet des longueurs des fibres végétales sur la densité du mortier avec un taux de 1% .....	128
<b>Figure III.27</b>	Effet des longueurs des fibres végétales sur la densité du mortier avec un taux de 2% .....	129
<b>Figure III.28</b>	Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales traités.....	130
<b>Figure III.29</b>	Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales traités.....	130
<b>Figure III.30</b>	Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales traités.....	131
<b>Figure III.31</b>	Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales traités.....	132

## Liste des figures

<b>Figure III.32</b>	Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des mortiers.....	132
<b>Figure III.33</b>	Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des mortiers.....	133
<b>Figure III.34</b>	Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des mortiers.....	133
<b>Figure III.35</b>	Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des mortiers.....	133
<b>Figure III.36</b>	Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des mortiers.....	134
<b>Figure III.37</b>	Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des mortiers.....	134
<b>Figure III.38</b>	Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité un taux de 1% sur le retrait endogène des mortiers.....	135
<b>Figure III.39</b>	Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des mortiers.....	135
<b>Figure III.40</b>	Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 1% sur le retrait endogène des mortiers.....	136
<b>Figure III.41</b>	Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des mortiers.....	136
<b>Figure III.42</b>	Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 1% sur le retrait endogène des mortiers.....	136
<b>Figure III.43</b>	Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des mortiers.....	137
<b>Figure III.44</b>	Effet de pourcentage des fibres végétales sur l'affaissement du mortier.....	138
<b>Figure III.45</b>	L'affaissement des bétons avec 1% de fibres végétales traité.....	138
<b>Figure III.46</b>	L'affaissement des bétons avec 2% de fibres végétales traité.....	139
<b>Figure III.47</b>	La densité du béton durci avec 1 % de fibres végétales.....	140
<b>Figure III.48</b>	La densité du béton durci avec 2 % de fibres végétales.....	140
<b>Figure III.49</b>	Evolution de la résistance à la compression des bétons renforcés de 1% defibres végétales traités.....	141
<b>Figure III.50</b>	Evolution de la résistance à la compression des bétons renforcés de	

## Liste des figures

	2% de fibres végétales traités.....	142
<b>Figure III.51</b>	Evolution de la résistance à la flexion des bétons renforcés avec 1% de fibres végétales traités.....	143
<b>Figure III.52</b>	Evolution de la résistance à la flexion des bétons renforcés avec 2% de fibres végétales traités.....	143
<b>Figure III.53</b>	Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des bétons.....	144
<b>Figure III.54</b>	Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des bétons.....	144
<b>Figure III.55</b>	Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des bétons.....	145
<b>Figure III.56</b>	Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des bétons.....	145
<b>Figure III.57</b>	Effet de la longueur de Diss traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des bétons.....	145
<b>Figure III.58</b>	Effet de la longueur de Diss traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des bétons.....	146
<b>Figure III.59</b>	Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 1% sur le retrait endogène des bétons.....	147
<b>Figure III.60</b>	Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des bétons.....	147
<b>Figure III.61</b>	Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 1% sur le retrait endogène des bétons.....	148
<b>Figure III.62</b>	Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des bétons.....	148
<b>Figure III.63</b>	Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 1% sur le retrait endogène des bétons.....	148
<b>Figure III.64</b>	Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des bétons.....	149
<b>Figure IV.1</b>	Effet de mode de conservation et taux des fibres des mortiers de fibre d'Alfa traité sur la résistance à la flexion.....	155
<b>Figure IV.2</b>	Effet de mode de conservation et le taux des fibres des mortiers de fibre de Palmier sur la résistance à la flexion.....	155

## Liste des figures

<b>Figure IV.3</b>	Effet de mode de conservation et le taux des fibres des mortiers de fibre de Diss sur la résistance à la flexion.....	156
<b>Figure IV.4</b>	Effet de mode de conservation et taux des fibres des mortiers de fibre d'Alfa traité sur la résistance en compression.....	157
<b>Figure IV.5</b>	Effet de mode de conservation des mortiers de fibre de palmier traité sur la résistance en compression.....	158
<b>Figure IV.6</b>	Effet de mode de conservation des mortiers de fibre de Diss traité sur la résistance en compression.....	158
<b>Figure IV.7</b>	Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales à l'âge de 28 jours.....	159
<b>Figure IV.8</b>	Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales à l'âge de 6 ans.....	160
<b>Figure IV.9</b>	Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales à l'âge de 28 jours.....	160
<b>Figure IV.10</b>	Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales à l'âge de 6 ans.....	161
<b>Figure IV.11</b>	Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales à l'âge de 28 jours.....	162
<b>Figure IV.12</b>	Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales à l'âge de 6 ans.....	162
<b>Figure IV.13</b>	Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales à l'âge de 28 jours.....	163
<b>Figure IV.14</b>	Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales à l'âge de 6 ans.....	163
<b>Figure IV.15</b>	pH de la solution d'hydroxyde de sodium Na(OH).....	164
<b>Figure IV.16</b>	Vieillessement accéléré des fibres végétales dans le Na(OH).....	165
<b>Figure IV.17</b>	pH de la solution d'hydroxyde de calcium Ca(OH) <sub>2</sub> .....	166
<b>Figure IV.18</b>	Vieillessement accéléré des fibres végétales dans le Ca(OH) <sub>2</sub> .....	166
<b>Figure IV.19</b>	Observation MEB d'une coupe transversale avec un agrandissement de x300 et x400 de la fibre d'Alfa : (A) dans le NaOH, (B) à l'état brut.....	167
<b>Figure IV.20</b>	Observation MEB d'une coupe transversale avec un agrandissement de x600 de la fibre d'Alfa : (C) dans le Na OH,(D) à l'état	

## Liste des figures

	brut.....	168
<b>Figure IV.21</b>	Observation MEB d'une coupe transversale avec un agrandissement de x1200 de la fibre d'Alfa dans le Na OH.....	168
<b>Figure IV.22</b>	Observation MEB d'une coupe transversale avec un agrandissement de x1200 de la fibre d'Alfa l'état brut.....	169
<b>Figure IV.23</b>	Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x150 de la fibre d'Alfa : (E) dans le NaOH, (F) l'état brut.....	169
<b>Figure IV.24</b>	Observation MEB d'une coupe longitudinale de la fibre de Palmier dans le NaOH: (A) avec un agrandissement de x100, (B) avec un agrandissement de x150.....	170
<b>Figure IV.25</b>	Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x100 de la fibre de Diss : (A-B) dans le NaOH, (C) l'état brut .....	170
<b>Figure IV.26</b>	Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x150 de la fibre de Diss dans le NaOH.....	171
<b>Figure IV.27</b>	Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x100 de la fibre d'Alfa dans le CaOH <sub>2</sub> .....	172
<b>Figure IV.28</b>	Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x250 de la fibre d'Alfa dans le CaOH <sub>2</sub> .....	172
<b>Figure IV.29</b>	Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x100 de la fibre de palmier : (A) dans le CaOH <sub>2</sub> , (B) l'état brut.....	173
<b>Figure IV.30</b>	Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x150 de la fibre de palmier dans le CaOH <sub>2</sub> .....	173
<b>Figure IV.31</b>	Observation d'une coupe longitudinale de la fibre de Palmier dans le CaOH <sub>2</sub> : (A-B) avec un agrandissement de x100, (C) avec un agrandissement de x150.....	174
<b>Figure IV.32</b>	Observation d'une coupe longitudinale de la fibre d'Alfa plonger dans le mortier durant 6 ans : (A) avec un agrandissement de x80, (B) avec un agrandissement de x100 (C) avec un agrandissement de x250.....	175
<b>Figure IV.33</b>	Observation d'une coupe longitudinale de la fibre de Palmier plongé dans le mortier durant 6 ans : (A) avec un agrandissement de x80, (B) avec un agrandissement de x250.....	176

## Liste des figures

---

<b>Figure IV.34</b>	Observation d'une coupe longitudinale de la fibre de Diss plongé dans le mortier durant 6 ans : (A) avec un agrandissement de x80, (B) avec un agrandissement de x250.....	176
---------------------	--	-----

## Liste des tableaux

Tableaux	Titre	Page
<b>Tableau I.1</b>	Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales.....	47
<b>Tableau I.2</b>	Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles.....	48
<b>Tableau I.3</b>	Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales.....	49
<b>Tableau I.4</b>	Domaines d'application des fibres végétales.....	49
<b>Tableau I.5</b>	La répartition territoriale de la plante alfa.....	50
<b>Tableau I.6</b>	La composition d'Alfa.....	53
<b>Tableau I.7</b>	Les compositions chimiques de fibres de palmier.....	56
<b>Tableau I.8</b>	Classification scientifique de la plante Diss.....	57
<b>Tableau I.9</b>	Composition chimique de fibres végétales.....	57
<b>Tableau II.1</b>	Caractéristique du ciment.....	90
<b>Tableau II.2</b>	Composition chimique du ciment.....	90
<b>Tableau II.3</b>	Caractéristiques physique des granulats d'études.....	93
<b>Tableau II.4</b>	La masse volumique apparente des fibres utilisées.....	96
<b>Tableau II.5</b>	La masse volumique absolue des fibres utilisées.....	97
<b>Tableau II.6</b>	Taux d'humidité des fibres végétales utilisées.....	97
<b>Tableau II.7</b>	Absorption d'eau pour 1% des fibres végétales utilisées.....	98
<b>Tableau II.8</b>	Absorption d'eau pour 2% des fibres végétales utilisées.....	98
<b>Tableau II.9</b>	Saturation d'eau des fibres végétales utilisées.....	99
<b>Tableau II.10</b>	Composition chimique de fibres végétales.....	97
<b>Tableau II.11</b>	Force de traction et allongement des fibres d'Alfa, Palmier et de Diss.....	104
<b>Tableau III.1</b>	Composition des mortiers de fibres végétales.....	109
<b>Tableau III.2</b>	Composition des bétons de fibres de végétales.....	117
<b>Tableau III.3</b>	Effet de la longueur et pourcentage des fibres végétales sur l'étalement du mortier.....	126
<b>Tableau III.4</b>	Effet de la longueur et pourcentage des fibres végétales sur la densité du mortier.....	128
<b>Tableau III.5</b>	Effet de pourcentage et de la longueur des fibres végétales sur l'affaissement du béton.....	138

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau III.6</b>	Effet de pourcentage et de la longueur des fibres végétales sur la densité du béton.....	139
<b>Tableau IV.1</b>	Effet de mode de conservation sur la résistance à la flexion des éprouvettes renforcé de 1% des fibres végétales.....	154
<b>Tableau IV.2</b>	Effet de mode de conservation sur la résistance à la flexion des éprouvettes renforcé de 2% des fibres végétales.....	154
<b>Tableau IV.3</b>	Effet de mode de conservation sur la résistance en compression des éprouvettes renforcé de 1% des fibres végétales.....	156
<b>Tableau IV.4</b>	Effet de mode de conservation sur la résistance en compression des éprouvettes renforcé de 2% des fibres végétales.....	157
<b>Tableau IV.5</b>	Durabilité des mortiers de fibres végétales dans le temps sur la résistance à la flexion.....	159
<b>Tableau IV.6</b>	Durabilité des mortiers de fibres végétales dans le temps sur la résistance en compression.....	161
<b>Tableau IV.7</b>	Effet du temps de conservation des fibres végétales dans le <b>Na(OH)</b> sur la résistance à la traction.....	164
<b>Tableau IV.8</b>	Effet du temps de conservation des fibres végétales dans <b>Ca(OH)<sub>2</sub></b> le sur la résistance à la traction.....	167



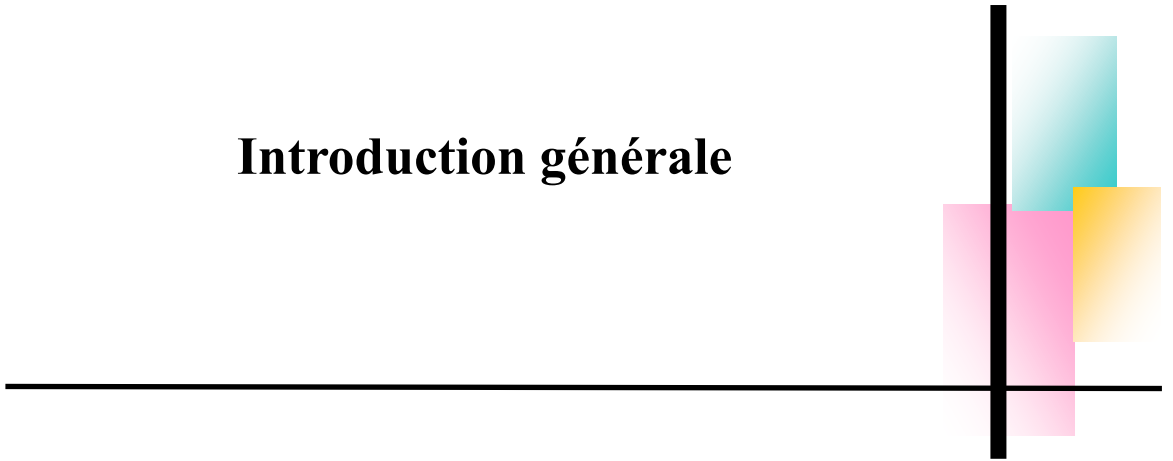
## Notation

---

Mté	Mortier témoin
MF Alfa	Mortier de fibres d'Alfa
MF Palmier	Mortier de fibres de palmier dattier
MF Diss	Mortier de fibres de Diss
MF Alfa T	Mortier de fibres d'Alfa traité
MF Palmier T	Mortier de fibres de palmier dattier traité
MF Diss T	Mortier de fibres de Diss traité
BF Alfa T	Béton de fibres d'Alfa traité
BF Palmier T	Béton de fibres de palmier traité
BF Diss T	Béton de fibres de Diss traité
R <sub>tf</sub>	Résistance à la traction par flexion
R <sub>c</sub>	Résistance en compression



## **Introduction générale**



Les matériaux à base de Ciments rétrécissent souvent en raison de la perte d'humidité et en raison de la dessiccation (consommation interne de l'eau libre du mélange disponible pour le processus l'hydratation continue). La perte rapide d'humidité mène naturellement à la réduction du volume avant même que le béton a gagné de la résistance. Ce rétrécissement volumétrique est fonction de la température, d'humidité, de vitesse de vent et de l'environnement de séchage. Les pressions capillaires induites se développent dans le béton causant ainsi des contraintes compressives internes et par conséquent des contraintes de traction. Si elles sont supérieures à la limite de traction, celles-ci peuvent induire des fissurations dans les bétons jeunes.

Dans une approche écologique, nous proposons l'utilisation des fibres naturelles dans les bétons afin de réduire la fissuration dues au rétrécissement. L'utilisation des fibres atténuent la fissuration de deux manières : d'abord elles permettent de réduire les contraintes globales de rétrécissement et abaisser les contraintes de traction principalement celles qui dépassent la résistance à la traction, et en second lieu, si les fissures se produisent, les fibres peuvent empêcher leurs propagation. Il est évident que selon le type de fibres utilisées, elles affectent les propriétés mécaniques du béton selon la fraction de volume utilisée dans un mélange et l'efficacité des fibres à éliminer la fissuration de retrait.

Les composites fibres végétales / matrice cimentaire s'inscrivent parfaitement dans cette démarche de développement durable, que ce soit pour valoriser des ressources naturelles renouvelables, ou, grâce à leur caractère partiellement biodégradable, pour limiter la production de déchets. Ce type de matériau a déjà fait l'objet de nombreuses études permettant d'analyser ses propriétés mécaniques, thermiques mais également acoustiques. La majorité de ces travaux ont porté sur la caractérisation mécanique, au sens général du terme. *[Sedan 2007]*

Plusieurs fibres naturelles ont été proposées comme substituant aux fibres classiques parmi lesquelles le chanvre, le lin, le jute (en Europe) ou encore le palmier dattier, l'alfa et le palmier nain (en Afrique). Nous nous intéresserons dans cette thèse aux fibres de palmier dattier qui constitue l'une des richesses végétales les plus abondantes au Algérie et qui de nos jours, restent peu exploitées. En effet, dans notre travail, nous nous sommes intéressés aux fibres végétales dans leur globalité, puis à la fibre de d'Alfa, Palmier dattier et de Diss en particulier. Cette dernière est l'une des ressources naturelles renouvelables, abondantes et

locales. Nous tenterons à travers cette thèse à valoriser ces déchets agricoles et leur utilisation comme renfort dans le mortier et le béton

Dans ce contexte, ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres :

- Le premier chapitre, composé de quatre parties, est consacré à l'étude bibliographique sur le ciment et ses mécanismes d'hydratation et au phénomène de retrait, ensuite poursuivre un état de l'art sur les fibres végétales et sur le potentiel et les enjeux des matériaux à base de fibres végétales. Troisième partie détaille les caractéristiques des fibres végétales utilisé comme renfort dans cette étude. La dernier partie décrit un état de l'art des composites à base des fibres végétaux, et la durabilité de celle-ci

- Le second chapitre rassemble les données sur la caractérisation des matériaux utilisés et les différentes techniques expérimentales utilisées ainsi que les moyens d'essais développent spécifiquement lors de ce travail.

- Le troisième chapitre se compose de deux parties. La première partie présente les protocoles expérimentaux qui concernent les méthodes de formulation des mortiers et des bétons d'étude et les résultats des essais expérimentaux qui caractérisent l'influence de la nature, traitement, la longueur ainsi que le taux des fibres végétales Alfa, Palmier et Diss sur les propriétés des mortiers à l'état durci, d'après ses résultats a choisi deux dosages optimal des fibres pour les essais suivants. Dans la seconde partie on présente une analyse des résultats de l'influence de la nature, traitement, la longueur ainsi que le taux des fibres végétales Alfa, Palmier et Diss qu'on a choisi dans la première partie sur le comportement physico-mécanique (masse volumique, affaissement, résistance en compression, résistance en traction par flexion et le retrait).

- Le quatrième chapitre expose l'étude menée sur l'impact du milieu alcalin sur les fibres végétales, et l'influence des modes de conservation des mortiers renforcés de fibres végétales. Des observations MEB ont été faites pour voir la durabilité des fibres dans un milieu alcalin.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale rassemblant une synthèse des résultats de l'influence des différents paramètres des fibres végétales sur le comportement physico-mécanique des mortiers et des bétons et sur la durabilité des mortiers et fibres végétales, une présentation des perspectives à envisager lors d'études complémentaires.



# **CHAPITRE I**

---

## **Recherche bibliographique**

---



## I.1. Introduction

La revue de documentation qui suit est divisée en trois parties. La première explique le comportement au jeune âge des matériaux cimentaires. Cette partie permet d'identifier les paramètres qui influencent l'hydratation ainsi que les variations volumétriques du béton.

La deuxième partie est consacrée à la présentation des différents types de fibres végétales utilisées pour renforcer les composites, leurs caractéristiques et leurs applications, en particulier fibres végétales d'Alfa, Palmier dattier et de Diss utilisées pour cette étude. Et nous allons présenter une analyse bibliographique qui synthétise les travaux de recherches effectués sur les bétons et mortier de fibre végétales et leurs influences sur le comportement des bétons. Dans la troisième et la dernière partie nous allons aborder les travaux de recherches réalisés pour évaluer la durabilité des fibres végétales dans les différents milieux alcalins et la durabilité des fibres dans la matrice cimentaire.

## I.2. Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires

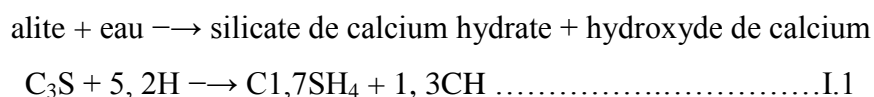
### I.2.1. Hydratation du ciment

#### I.2.1.1. Equations [Bedard 2009]

Lorsque le ciment portland est mélangé avec de l'eau, il se produit plusieurs réactions chimiques qui sont plus ou moins rapides. Ces réactions font intervenir les différents constituants du ciment. Ce dernier est composé de quatre phases minéralogiques principales qui représentent 90% ou plus de la masse du ciment : le C<sub>3</sub>S, le C<sub>2</sub>S, le C<sub>3</sub>A et le C<sub>4</sub>AF.

Le silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S) est la phase la plus abondante du ciment. Elle représente entre 50 et 70% de la masse du ciment [Bjøntegaard 1999]. Le silicate tricalcique est aussi appelé alite.

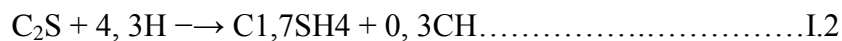
Lorsque celui-ci réagit avec l'eau, la réaction chimique est très rapide et les produits de la réaction durcissent rapidement. L'alite est en grande partie responsable de la prise et de la résistance initiale du béton. En général, plus la teneur en alite d'un béton de ciment portland est élevée, plus la résistance initiale est grande. L'équation de la réaction chimique est la suivante :



Les deux produits de la réaction chimique sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de l'hydroxyde de calcium (CH). Les C-S-H forment la phase la plus abondante de la pâte de

ciment hydraté. Les C-S-H sont en fait une famille de produits mal cristallisés et ce sont eux qui contribuent à la résistance du matériau. Le CH, quant à lui, est communément appelé de la portlandite. C'est une phase cristalline soluble qui représente environ 20% du volume de la pâte. La deuxième phase du ciment anhydre est appelé bélite qui est en fait du silicate bicalcique (C<sub>2</sub>S). Elle constitue entre 15 et 30% de la composition du ciment [Bjøntegaard 1999]. Tout comme l'alite, la bélite produit des CSH et du CH lorsqu'elle réagit avec l'eau. La réaction chimique est par contre beaucoup plus lente que celle de l'alite. La bélite contribue en grande partie à la résistance d'enveloppée au-delà d'une semaine. L'équation de la réaction chimique entre la bélite et l'eau est la suivante :

bélite + eau → silicate de calcium hydraté + hydroxyde de calcium



L'aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) est la troisième phase du ciment. Elle constitue entre 5 et 10% de la composition du ciment [Bjøntegaard 1999]. Lors de la réaction chimique, le C<sub>3</sub>A libère une grande quantité de chaleur durant les premières minutes de l'hydratation et il contribue légèrement à l'accroissement de la résistance initiale du matériau. La réaction chimique est plus compliquée que celle de l'alite et de la bélite puisqu'elle se réalise en deux étapes. Premièrement, le C<sub>3</sub>A réagit avec l'eau et le gypse pour former de l'étringite (AFt). Une fois l'étringite formée, celle-ci réagit avec le C<sub>3</sub>A toujours disponible pour former des monosulfoaluminates de calcium (ou AFm). Les deux équations chimiques sont les suivantes :

Etape 1 :

aluminate tricalcique + gypse + eau → étringite



Etape 2 :

aluminate tricalcique + étringite + eau → monosulfoaluminate de calcium



La dernière phase principale du ciment est l'aluminoferrite tétracalcique (C<sub>4</sub>AF).

C'est le produit qui résulte de l'utilisation des matières premières contenant du fer et de l'aluminium pour abaisser la température de la clinkérisation pendant la fabrication du ciment. L'hydratation du C<sub>4</sub>AF est initialement assez rapide, mais elle s'arrête rapidement et

contribue très peu à la résistance mécanique du béton. La plupart des effets de couleur du béton sont dus au C4AF. La réaction chimique est la suivante :

Aluminoferrite tétracalcique + hydroxyde de calcium + eau → aluminoferrite de calcium hydraté



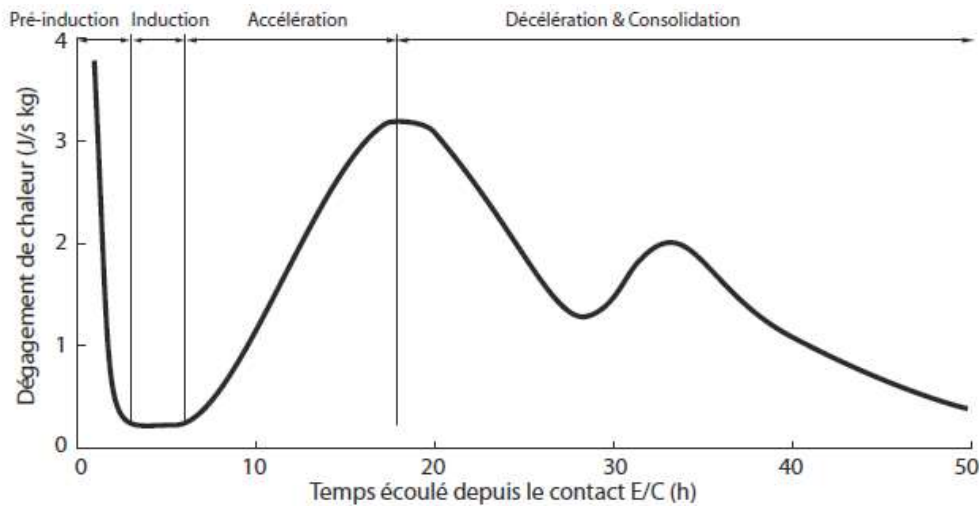
### I.2.1.2. Chaleur d'hydratation [Bedard 2009]

La réaction chimique entre le ciment et l'eau est très exothermique, c'est-à-dire qu'elle dégage beaucoup de chaleur. Les deux phases minéralogiques principalement responsables de la quantité de chaleur dégagée sont le C3A et le C3S. La finesse, la teneur en ciment et la température de cure sont également d'autres facteurs qui peuvent influencer la quantité de chaleur produite.

Même si la réaction chimique dure très longtemps, la chaleur est principalement libérée pendant les premières heures suivant le contact de l'eau avec les grains de ciment. La température que le béton peut atteindre dépend principalement de l'épaisseur de la pièce coulée ainsi que des conditions d'isolation. Dans le cas d'ouvrages de petites dimensions comme une dalle de béton à faible épaisseur, le dégagement de chaleur ne cause pas de problème véritable puisque la chaleur est vite dissipée dans l'environnement.

Dans le cas d'ouvrages massifs, tels les barrages, l'augmentation de la chaleur peut causer des problèmes majeurs. Si la température ne se dissipe pas rapidement, des contraintes de traction peuvent apparaître en surface et endommager sérieusement l'ouvrage. C'est donc un problème avec lequel les ingénieurs de la pratique doivent composer. Tel que mentionné dans la section précédente, l'hydratation du ciment est un procédé qui implique plusieurs phases minéralogiques. Étant donné que la vitesse de réaction varie selon les composantes, le processus d'hydratation se fait en cinq différentes étapes : la pré-induction, l'induction (période dormante), l'accélération, la décélération et la consolidation. La Figure I.1 présente les cinq étapes ainsi qu'un exemple de courbe du dégagement de chaleur en fonction du temps écoulé depuis le contact E/C [Gardner]. Tout dépendamment de la phase minéralogique, le dégagement de chaleur peut changer d'intensité.





**Figure 1.1** : Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment après le contact E/C [Bedard 2009]

La première étape de pré-induction correspond à la dissolution du C3S et du C3A dans la solution interstitielle. Plusieurs espèces ioniques ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$ ) sont en solution à ce moment. Cette phase dure quelques minutes et elle est accompagnée d'une forte élévation de la température. Lors de cette étape, il y a formation d'une mince couche d'hydrates (épaisseur  $\approx 1$  nm) qui sert de protection pour les grains de ciment. Cette mince couche nuit à la dissolution ultérieure des grains, ce qui entraîne la phase d'induction [Gardner]. Sur la Figure I.1, on remarque que durant la seconde étape (induction), la chaleur d'hydratation est constante et très faible. La dissolution des composants du ciment se produit toujours, mais elle se déroule à un rythme beaucoup plus lent. C'est durant cette période que le béton est maniable. Elle est de durée très variable et dépendante des ajouts utilisés dans le béton, certains d'entre eux permettent d'accélérer ou de retarder la prise. La période d'accélération est celle où la réaction chimique est la plus forte. Les concentrations en ions  $\text{Ca}_2^+$  et  $\text{OH}^-$  sont devenues très importantes et cela a comme effet de favoriser la précipitation de la portlandite ( $\text{CaOH}_2$ ).

Ce phénomène serait responsable de l'éclatement de la couche d'hydrates qui s'est formée durant la période de pré-induction. Une fois cette couche disparue, les réactions chimiques peuvent se poursuivre. Cette étape est également caractérisée par la précipitation des C-S-H. Elle correspond au début de la prise du béton [Gardner].

La période de décélération débute après que la chaleur d'hydratation a atteint un maximum. Il y a de moins en moins de grains de ciment anhydre, ce qui provoque une diminution de la chaleur d'hydratation. Durant cette période, il y a, une fois de plus, formation d'une couche d'hydrates en surface des grains. Etant donné qu'il y a beaucoup de C-S-H qui se sont formés, la diffusion de l'eau vers les grains de ciment anhydre est ralentie. L'intensité des réactions chimiques est donc limitée.

La dernière étape est celle de la consolidation. Elle correspond à l'hydratation des derniers grains de ciment anhydre. Cette période peut durer des dizaines d'années. La quantité de chaleur dégagée est à son plus bas.

### **I.2.2. Variations volumiques dues à l'hydratation**

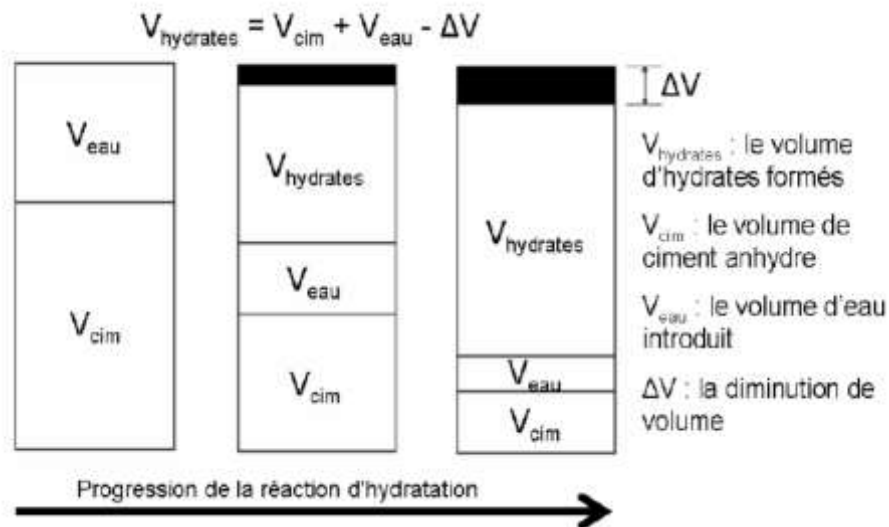
Lorsqu'un échantillon est protégé de toute dessiccation, on parle alors de conditions endogènes, il subit des variations volumiques uniquement liées à la réaction d'hydratation. Celles-ci sont principalement de deux natures, une est d'origine chimique et l'autre est un processus purement physique. [Monge 2007]

#### **I.2.2.1. Le retrait endogène**

##### **I.2.2.1.1. Mécanismes**

**La contraction Le Chatelier** : C'est au début du siècle dernier, qu'Henri Le Chatelier mit en évidence la célèbre contraction qui porte désormais son nom. Lors de la réaction d'hydratation du ciment, le volume des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes de ciment anhydre et de l'eau consommée. Cette diminution globale est de l'ordre de 8 à 10 % pour une pâte de ciment et elle est aussi bien due à des phénomènes entraînant plutôt une contraction (hydratation du C3S ou du C2S) qu'un gonflement (C3A et gypse formant de l'étringite ou du monosulfoaluminate) [Barcelo 2001].

Notons que cette diminution de volume absolu (qui prend seulement en compte les volumes des phases liquides et solides) ne se traduit pas systématiquement par une diminution de volume apparent de l'éprouvette [Tazawa 1995], mais par un gonflement parfois comme la constate Le Chatelier. En effet, si l'échantillon est placé dans l'eau, la diminution de volume absolu peut être compensée par la pénétration de celle-ci dans les capillaires Figure I.2.



**Figure I.2** : Schéma illustrant la contraction le Chatelier [Monge 2007]

**I.2.2.1.2. L'autodessiccation** : La conséquence physique de ces mécanismes chimiques (hydratation et contraction Le Chatelier) est appelée auto dessiccation. Elle se produit dans des conditions isothermes et sans échange hydrique entre l'éprouvette et le milieu extérieur. Rapidement, la rigidification du squelette d'hydrates s'oppose à la contraction et crée une dépression de l'eau dans les pores qui provoque un changement de phase liquide=vapeur, c'est l'auto dessiccation [Hua 1992]. Le réseau gazeux ainsi formé conduit à la création d'interfaces liquide=gaz qu'on appelle plus communément ménisques, synonymes de tensions capillaires. Il en résulte la mise en compression du squelette solide qui provoque un retrait.

### I.2.2.1.3. Facteurs influents

#### I.2.2.1.3.a. Le rapport E/C

Est un paramètre clé dans la résultante des déformations causées par le retrait endogène. Plus ce rapport est faible, plus l'amplitude et la cinétique de ce retrait sera importante. A contrario, les mortiers et bétons à fort rapport E/C ne subissent quasiment pas de déformations de retrait endogène mais un gonflement dans les premiers instants de l'hydratation.

L'hypothèse généralement avancée pour expliquer une telle différence de comportement est que la diminution d'humidité relative interne causée par l'auto dessiccation est non seulement plus rapide mais plus intense lorsque la porosité est fine. La théorie de Kelvin Laplace prédit alors une réduction de la taille des ménisques, donc des dépressions capillaires plus

importantes qui conduisent à un retrait plus conséquent. D'après [Mounanga 2003], la température a également un effet important sur la cinétique et l'amplitude des déformations endogène, notamment sur la contraction Le Chatelier.

On rajoutera que dans les bétons traditionnels ainsi que dans les mortiers à fort rapport E/C, les déformations endogènes sont négligeables devant celles induites lors du séchage [Davis 1940].

#### I.2.2.1.3.b. Effet de la concentration granulaire

L'influence de la concentration de granulats sur le retrait a été étudiée par plusieurs chercheurs : [Baron 1971] a montré que le retrait d'un béton est de 6 à 10 fois plus petit que celui de la pâte de ciment correspondante. [Tazawa 1995], ont montré que le retrait dépend de la fraction volumique de la pâte de ciment dans la matrice cimentaire. En effet, l'augmentation de la fraction volumique des granulats provoque une diminution de la fraction de la pâte dans la même section, et donc une diminution du retrait. Les études de [Holt 2001] ont montré que le retrait d'une pâte de ciment est supérieur au retrait d'un mortier qui est lui-même supérieur au retrait d'un béton (Figure I.3 et Figure I.4).

Il faut cependant noter que, la comparaison de la déformation absolue d'une pâte de ciment et d'un mortier n'est pas significative. En effet, partant du principe que les granulats sont très peu déformables, il est évident que l'augmentation de la fraction granulaire dans l'échantillon diminue le retrait endogène absolu exprimé en  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Nous proposons dans la suite de notre étude, d'exprimer la déformation par g de ciment anhydre initialement présent dans l'échantillon.

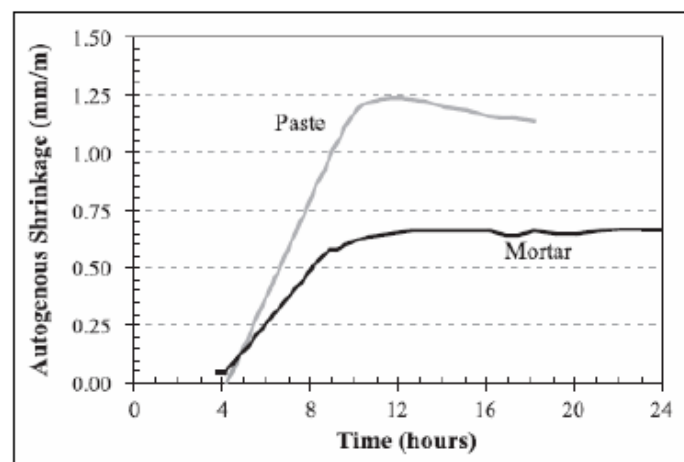
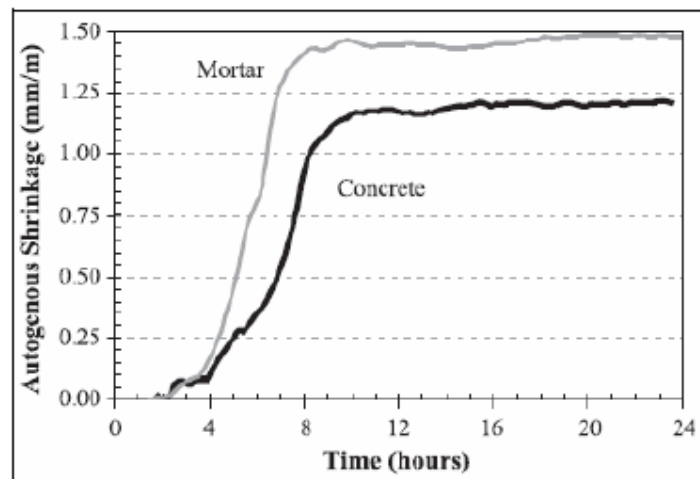


Figure I.3 : Retrait endogène de la pâte et du mortier (même rapport E/C=0,35) [Holt 2001].



**Figure I.4 :** Retrait endogène du mortier (volume de la pâte = 57%) et du béton (volume de la pâte = 34%) pour un même rapport E/C=0,30. [Holt 2001].

### I.2.2.2. Le retrait thermique

Le retrait thermique est dû à un gradient thermique important entre le cœur d'une structure, où régné une température élevée et la peau exposée à l'air ambiant. Par conséquent, il est d'autant plus important que la pièce (pile de pont, barrage, bloc de fondation etc.) est massive. La réaction d'hydratation exothermique est la cause inévitable de montée en température du béton ou du mortier, mais on peut également invoquer les conditions climatiques ainsi que les traitements thermiques qui sont parfois effectués sur les ouvrages. Toutefois, la réaction d'hydratation produit suffisamment de chaleur pour induire des montées en température allant jusqu'à 80°C au cœur d'une pièce en béton. Des fissures apparaissent lorsque la contraction opérée en peau et opposée à la dilatation au centre de la pièce, engendre des contraintes dépassant la limite en traction du béton. Par ailleurs, ce problème se pose d'autant plus dans le cas des reprises de bétonnage pour lesquelles la contraction est gênée par la rigidité de la pièce déjà coulée et cause une fissuration localisée plus profonde mais également plus espacée. Pour les structures en couches minces de mortier, ce type de retrait est négligeable devant ceux présentés par la suite. [Monge 2007]

### I.2.3. Conséquences de l'exposition aux conditions extérieures

Lorsque l'on soumet un échantillon aux conditions climatiques externes (température et humidité relative principalement), des échanges thermiques, hydriques et chimiques se produisent entre celui-ci et le milieu extérieur. Ces échanges sont la cause de variations

volumiques conséquentes de l'échantillon provoquant parfois la fissuration à plusieurs échelles (micro ou macro) de l'élément. [Monge 2007]

### **I.2.3.1. Le retrait plastique**

Le retrait plastique est le premier à se manifester car il a lieu avant la prise. Il est la conséquence d'une différence de flux entre l'eau évaporée à la surface du béton et l'eau ressuée, particulièrement pendant la période de pré-prise lorsque le matériau est encore déformable et que le flux d'eau ressuée diminue fortement. La contraction du solide provoque une fissuration peu profonde en surface. De nombreux paramètres influencent la cinétique et l'amplitude de ce retrait, citons par exemple la contraction Le Chatelier, le ressuage, le taux d'évaporation ou la taille des pores [Turcry 2004]. Ce retrait peut assez facilement être évité en protégeant la surface du béton de tout séchage brutal avant la prise.

### **I.2.3.2. Le retrait de dessiccation**

Le retrait de dessiccation ou retrait de séchage est la conséquence directe de l'évaporation de l'eau vers l'extérieur du matériau. Il est donc entièrement dépendant des conditions en température, vent et humidité relative extérieure. L'évaporation de l'eau sous forme vapeur et sa diffusion au travers de la structure va quant à elle, dépendre de la distribution de la taille des pores et de leur connectivité au sein du matériau, mais également de la dimension de l'échantillon et de la taille de la surface exposée au séchage. [Monge 2007]

### **I.2.3.3. Retrait de carbonatation:**

Retrait de carbonatation est un phénomène très récemment reconnu. Le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère réagit en présence de l'eau avec du ciment hydraté. L'hydroxyde de calcium est converti en carbonate de calcium, et aussi certains composés du ciment d'autres sont décomposés. Une telle décomposition complète de composé de calcium dans le ciment hydraté est chimiquement possible, même à la basse pression du dioxyde de carbone dans atmosphère normale. Carbonatation pénètre au-delà de la surface exposée du béton que très lentement.

Le taux de pénétration du dioxyde de carbone dépend aussi de la teneur en humidité du béton et de l'humidité relative du milieu ambiant. La carbonatation est accompagnée par une augmentation du poids du béton et par le retrait. Retrait de carbonatation est probablement

causée par la dissolution des cristaux d'hydroxyde de calcium et le dépôt de carbonate de calcium à sa place. Comme le nouveau produit est moins en volume que le produit remplacé, le rétrécissement a lieu.

La carbonatation du béton entraîne également une résistance accrue et une perméabilité réduite, probablement parce que l'eau libérée par la carbonatation favorise le processus d'hydratation et de carbonate de calcium réduit les vides dans la pâte de ciment. Comme l'ampleur du retrait de carbonatation est très faible par rapport au retrait de séchage terme de long, cet aspect n'est pas de grande importance. Mais carbonatation réduit l'alcalinité du béton qui donne un revêtement de protection pour le renforcement contre la rouille. Si la profondeur de carbonatation atteint jusqu'à renforts en acier, l'acier devient responsable de la corrosion.

### **I.3. Etats connaissance sur les fibres végétales**

#### **I.3.1. Définition de la fibre végétale [Yahiaoui 2011]**

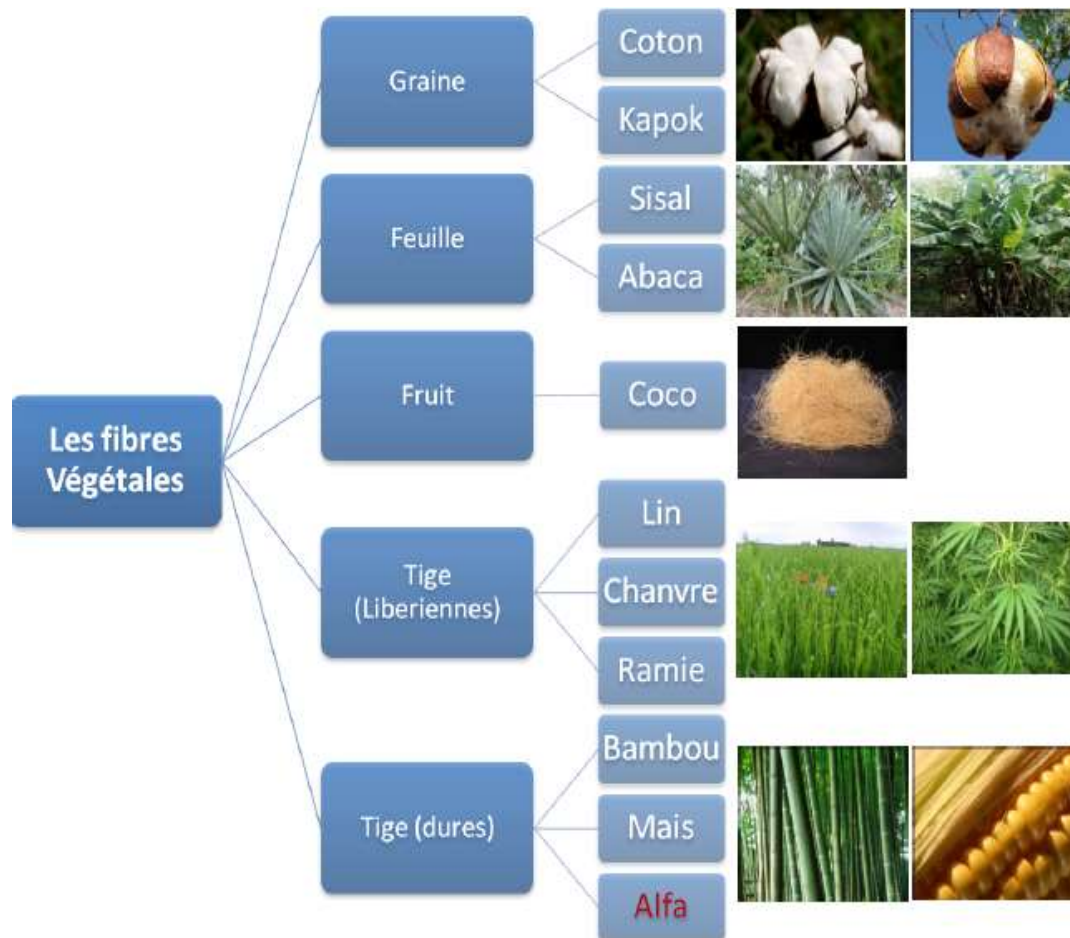
Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [[Nenonene 2009], [Michaud 2003]].

#### **I.3.2. Classification des fibres végétales**

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres:

- Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (Kénafe, jute, lin, ramie), et de feuilles (Sisal, abace, paille de graminée) [Nenonene 2009]
- Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigide provenant de matériels ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénafe, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) [Michaud 2003]
- Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libérienne, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs

d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine. et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues [Nenonene 2009]



**Figure I.5** : Classification des fibres végétales selon l'origine [Dallel 2012]

### I.3.3. Structure physique

Les fibres végétales sont des expansions cellulaires assimilables à un matériau composite renforcé par des fibrilles de cellulose. La matrice est principalement composée d'hémicellulose et de lignine. L'ensemble est couvert en général avec des cires et des impuretés [Dallel 2012]

Les fibrilles cellulosiques sont disposées tout au long de la longueur des fibres, et présentent une structure multicouche complexe, avec une paroi primaire très mince qui entoure une couche secondaire plus épaisse. Cette structure est très similaire à celle de fibres de bois.

La paroi cellulaire primaire (externe) est généralement très mince ( $<1 \mu\text{m}$ ) et très élastique, elle se laisse détendre et déformer. Elle peut ainsi suivre l'augmentation de taille de la cellule en croissance. Les micro-fibrilles contiennent une proportion de cellulose de 8 à 14%, et forment un maillage lâche, un arrangement dit en structure dispersée [Dallel 2012]



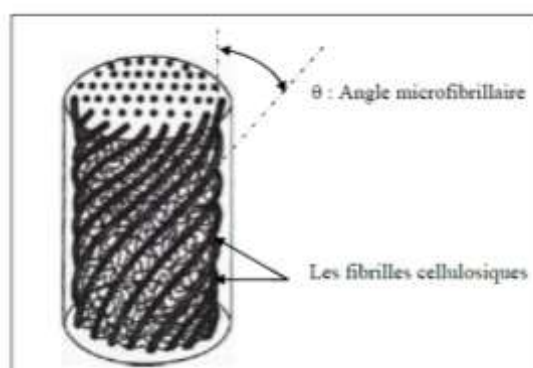
La couche secondaire contient la proportion majeure de cellulose et est constituée des trois couches distinctes (S1, S2 et S3). Celle du milieu (également connue comme couche S2) étant de loin la plus épaisse et la plus importante dans la détermination des propriétés mécaniques. Des études ont précisé que dans cette couche, les micro-fibrilles de cellulose sont parallèles mais disposées en hélice suivant un angle nommé angle micro-fibrillaire (MFA). L'angle micro-fibrillaire et la teneur en cellulose [Dallel 2012]

Un examen (MEB et/ou MET) des parois cellulaires effectué à différentes échelles montre que celles-ci sont composées de:

- Macro-fibrilles de 0,5  $\mu\text{m}$  de diamètre
- Micro-fibrilles de 10 à 30 nm de diamètre
- Fibrilles élémentaires appelées micelles de 3,5 à 5 nm de diamètre (une micelle est constituée d'environ 50 à 100 macromolécules de cellulose) [Dallel 2012]

Les micro-fibrilles sont séparées par des espaces interfibrillaires dont les largeurs sont d'environ 10 nm. Les fibrilles élémentaires sont espacées par des espaces intermicellaires.

Contrairement aux fibres chimiques, qui présentent un diamètre constant et une surface quasiment lisse et uniforme tout au long du filament, les fibres végétales ont des irrégularités importantes au niveau de la finesse, nous observons donc des zones parfois plus fines ou plus grosses que le reste de la fibre. Il est également très fréquent de voir de nombreux défauts présents à la surface et dans le volume d'une fibre végétale. Certains sont produits durant la croissance de la plante, mais le procédé d'extraction peut engendrer également des défauts (genoux, noeuds, dislocation). Ces défauts sont répartis de façon hétérogène sur la longueur d'une fibre et jouent un rôle important dans la détermination de son comportement mécanique [Dallel 2012]



**Figure I.6 :** structure générale d'une fibre naturelle [Dallel 2012]

### **I.3.4. Structure chimique**

Hormis l'eau qui reste la molécule indispensable pour la survie de n'importe quelle espèce végétale, les cellules végétales se composent principalement de polymères à base de sucre (glucides) qui sont combinés avec de la lignine et d'autres produits d'extraction en quantités moindres. La composition chimique varie d'une plante à une autre et dépend de l'espèce, de l'âge de la plante, des conditions climatiques, de la composition du sol et de la méthode d'extraction utilisée. Les fibres végétales se composent principalement de la cellulose, d'hémicellulose, de la lignine, de la pectine et des cires. Leurs proportions déterminent l'ensemble des propriétés de fibres. Structure chimique Hormis l'eau qui reste la molécule indispensable pour la survie de n'importe quelle espèce végétale, les cellules végétales se composent principalement de polymères à base de sucre (glucides) qui sont combinés avec de la lignine et d'autres produits d'extraction en quantités moindres. La composition chimique varie d'une plante à une autre et dépend de l'espèce, de l'âge de la plante, des conditions climatiques, de la composition du sol et de la méthode d'extraction utilisée. Les fibres végétales se composent principalement de la cellulose, d'hémicellulose, de la lignine, de la pectine et des cires. Leurs proportions déterminent l'ensemble des propriétés de fibres.

*[Dallel 2012]*

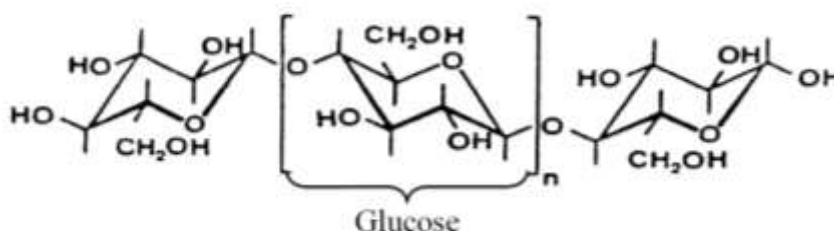
#### **I.3.4.1. Composition chimique**

La biomasse végétale est constituée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de la paroi végétale. Dans le cas de la tige de chanvre, au sein de sa paroi quatre composés majoritaires se distinguent: la cellulose, les hémicelluloses, les pectines et la lignine.*[Sedan 2007]*

##### **I.3.4.1.1. La cellulose**

La cellulose est un polymère qui existe à l'état naturel et qui est particulièrement important puisqu'il est le constituant principal de la masse végétale. L'extraction de la cellulose de coproduits agricoles et forestiers a déjà fait l'objet d'un grand nombre d'études. Cette extraction est préférentiellement appelée « enrichissement en cellulose » car la matière obtenue est enrichie en cellulose plutôt que d'être constituée de cellulose pure. Présente à l'état presque pur (>90%) dans la fibre de coton, elle est aussi, avec la lignine, l'un des constituants essentiels du bois.

D'un point de vue chimique, la cellulose est une molécule formée de longues chaînes dont le motif de base est le glucose (Figure I.7). Les molécules cycliques de glucose adoptent la conformation « chaise », qui est plus stable que la conformation « bateau ».



**Figure I.7:** Structure chimique de la cellulose [Sedan 2007]

Le nombre de monomères de glucose, ou degré de polymérisation (DP), varie selon l'espèce végétale. Il est par exemple de 26500 pour l'algue valonia, de 10000 pour le coton ou le bouleau, de 9000 pour le chanvre, le lin et la ramie, ou encore de 8000 pour l'épicéa. La cellulose I (ou cellulose "native") correspond à la cellulose existant à l'état naturel. Sa masse molaire est de l'ordre de  $1,5 \text{ à } 2,0 \cdot 10^6 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  ; les traitements qu'elle subit pour son extraction réduisent sensiblement cette valeur. Dans la cellulose pure, la structure moléculaire est presque parfaitement régulière car elle ne contient de défauts que dans une unité sur mille environ. Le centre de ces micro-fibrilles est très cristallin tandis que les chaînes de surface sont de nature plus désordonnée et constituent des zones paracristallines. Ces zones, ainsi que les défauts de cristallinité qui surviennent lors de la biosynthèse de la cellulose, forment la phase amorphe de la cellulose. Les micro-fibrilles de cellulose sont donc constituées de zones cristallines parfaitement ordonnées et de zones amorphes, au contraire, totalement désordonnées.

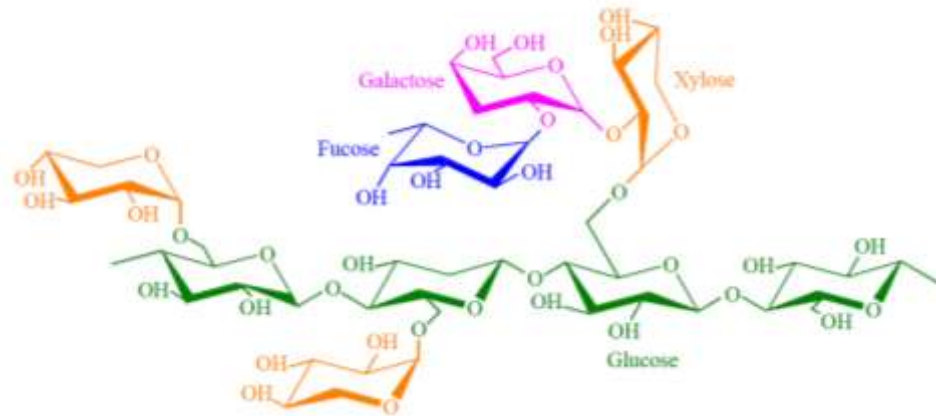
Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogène qui se développent entre les chaînes. Malgré la présence multiple de groupements fonctionnels hautement réactifs que sont les hydroxyles, la cellulose réagit difficilement. Les interactions moléculaires intercaténares sont fortes et assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs car la rupture de ces interactions est le préalable à toute réaction. La cellulose n'est pas hydrosoluble mais est fortement hydrophile, propriété qui est à l'origine, pour les fibres exploitées, de leur grand confort en tant que fibres textiles.

Dans les conditions normales d'utilisation, elle peut contenir jusqu'à 70% d'eau plus ou moins liée. Le remplacement d'une partie des interactions inter-chaines par des liaisons hydrogènes entre la cellulose et l'eau provoque une plastification du matériau et donc une diminution de ses caractéristiques mécaniques. Alors que la contrainte à la rupture des fibres de cellulose très cristalline peut atteindre 700 MPa à sec, elle peut perdre jusqu'à 30% de sa valeur en atmosphère humide. Toujours grâce à une grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. Comme tous les polymères qui contiennent de l'oxygène dans la chaîne principale, la cellulose est sensible à l'hydrolyse (fonction cetal ou acetal qui permet cette hydrolyse). En milieu acide par exemple, la coupure des chaînes est aléatoire et, à partir de la cellulose native ( $DP \approx 104$ ), sont obtenus progressivement des espèces de degré de polymérisation inférieur puis des oses bien identifiés, jusqu'au glucose. [Sedan 2007]

#### **I.3.4.1.2. Les hémicelluloses**

A l'état natif, la cellulose est mélangée à des hémicelluloses qui sont également des polysaccharides, mais ramifiées et contenant des unités saccharidiques de structures moléculaires diverses. Les hémicelluloses sont par définition les polysaccharides solubles dans l'eau et pouvant être extraits de la paroi des cellules végétales par des solutions alcalines. Ce sont des polysaccharides amorphes, de masse moléculaire plus faible que celle de la cellulose. Elles sont composées de sucres neutres : xylose, arabinose, galactose, glucose, mannose, et d'acides uroniques.

Dans leur état naturel, elles ont un degré de polymérisation compris entre 200 et 300 et leur structure dépend de l'espèce végétale. Ces hémicelluloses ont en effet une structure chimique très différente selon l'origine végétale, le type cellulaire, la localisation dans la paroi ou bien encore l'âge des tissus. Parmi les hémicelluloses les plus communes dans la paroi des cellules du bois, se trouvent les familles des xylanes, des mannanes et des galactanes. Ce sont des polysaccharides dont la chaîne principale est constituée respectivement de xylose, de mannose et de galactose. Ces chaînes peuvent être soit ramifiées par le greffage d'autres unités de sucres ou des groupements acétyles, soit entrecoupées par l'incorporation de sucres dans la chaîne linéaire.

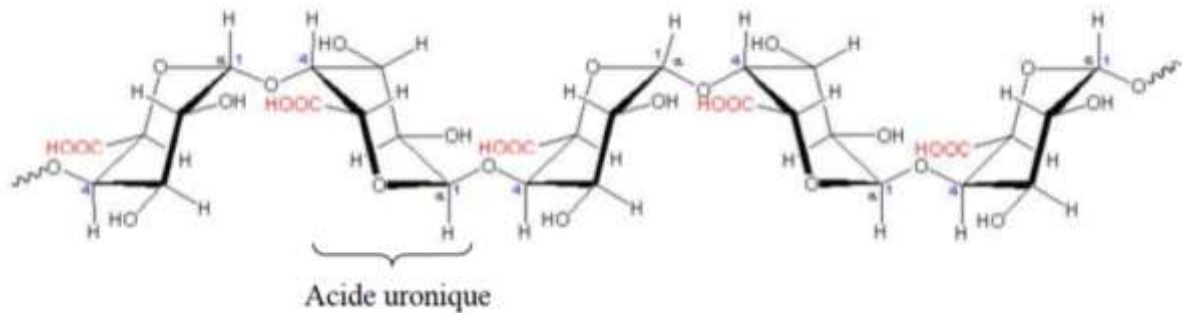


**Figure I.8:** Structure d'un type de xyloglucane. [Sedan 2007]

La classe d'hémicelluloses la mieux étudiée correspond aux xyloglucanes (Figure I.8). Ils sont constitués d'une chaîne de glucose et de courtes chaînes latérales de xylose, galactose et fucose. Les hémicelluloses constituent une classe de polymères très variés (de nombreux monomères et de nombreux branchements différents), et ont par conséquent une structure mal définie. [Sedan 2007]

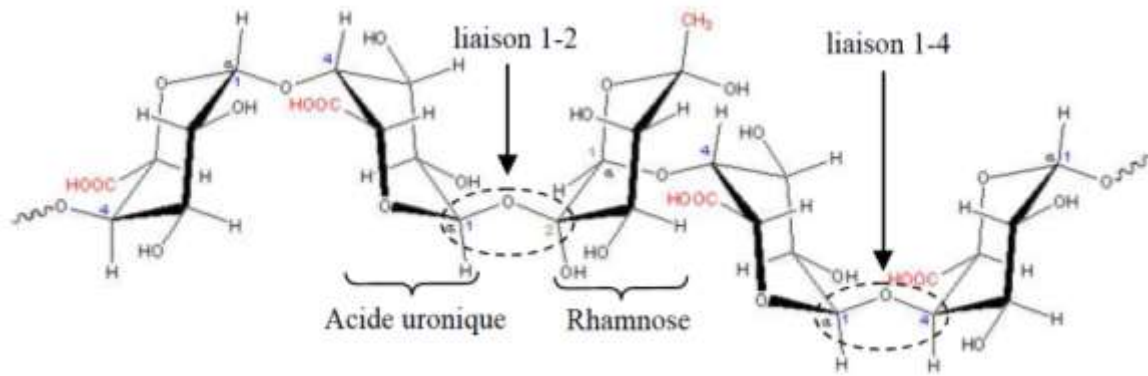
#### I.3.4.1.3. Les pectines

Les pectines sont des polymères de polysaccharides acides, composées d'une chaîne principale d'acide uronique lié en Figure I.8 (Figure I.9).



**Figure I.9:** Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique. [Sedan 2007]

Régulièrement, des molécules de rhamnose s'intercalent entre ces monomères par des liaisons 1-5 et 1-7. Certaines de ces unités rhamnose portent des chaînes latérales composées d'oses neutres parmi lesquels le galactose et l'arabinose sont les plus abondants. Ce type de liaison entre les molécules d'acide uronique et de rhamnose forme des coudes (Figure I.10). La macromolécule de pectines ressemble à un zigzag. Cet agencement lui confère des propriétés particulières.



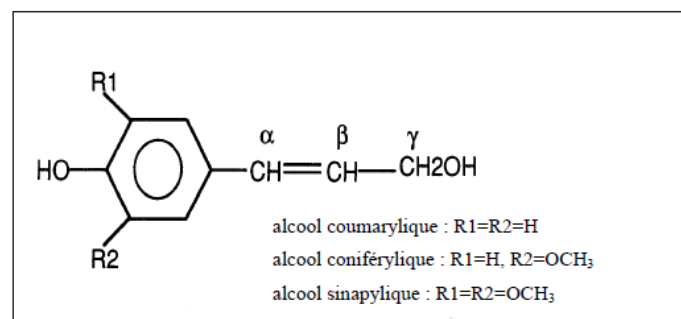
**Figure I.10:** Formation d'un coude par la présence de rhamnose. [Sedan 2007]

Pour compléter la composition chimique des pectines, il faut préciser qu'il existe des ramifications au niveau des acides uroniques comme au niveau du rhamnose par des molécules (ex : galactane, arabinane, etc.). Cette grande hétérogénéité fait qu'il faut parler des pectines plutôt que de la pectine. Il s'agit donc de molécules complexes.

Les molécules de pectine possèdent des fonctions carboxyles qui les dotent d'une capacité à échanger des ions. Dans le cas de la paroi végétale, ces ions sont surtout le calcium provenant de la circulation apoplasmique. Ces ions bivalents ont la capacité de former des ponts calciques entre deux groupements carboxyles de deux molécules adjacentes de pectines. [Sedan 2007]

#### I.3.4.1.4. Les lignines

La lignine ou « les lignines » sont des polymères tridimensionnels provenant de la polymérisation radicalaire de trois alcools phénylpropénoïques [Sakakibara 1991] dont la structure dépendant de l'espèce végétale est indiquée sur la figure I.11, l'alcool coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique.



**Figure I.11:** Formule chimique de l'alcool coumarylique, coniférylique et sinapylique. [Sedan 2007]

Les proportions des différents monomères varient selon l'espèce végétale et la localisation au sein de la paroi. En effet, la nature de la lignine dans les différentes parties d'une même plante peut être différente.

La structure de la lignine n'est pas encore totalement identifiée. La lignine contribue à la résistance mécanique des parois des cellules de la plante et confère une résistance aux agents pathogènes. A cause de son caractère plutôt hydrophobe, la lignine entraîne une résistance à l'eau et contrôle aussi le transport des solutions ainsi que la teneur en eau des plantes. Enfin, elle participe à la cohésion des fibres dans la partie boisée (ou chènevotte). [Sedan 2007]

#### **I.3.4.1.5. Les substances d'adcrustation**

Les substances d'adcrustation sont des substances qui se situent à l'extérieur de la paroi végétale, elles ont pour rôle de minimiser les échanges d'eau et de gaz dans le but de protéger la plante. Parmi ces substances : les cires qui forment un dépôt sur ou dans la cuticule, on parle alors de cire supracuticulaire ou de cire intracuticulaire. Ce sont des esters d'acide gras et d'alcool gras à longue chaîne, autrement dit des cérides qui sont les constituants majeurs des cires (ruches d'abeilles, ...). Leur présence n'est pas constante sur les végétaux. Les cires sont totalement hydrophobes, et totalement imperméable à l'eau et aux gaz, limitant ainsi la transpiration des plantes. Autre type de ces substances : la cutine qui se dépose sur l'épiderme, formant un film protecteur, appelé la cuticule.

La cutine correspond à l'assemblage d'hydroxyacides tels que l'acide palmitique, l'acide stéarique et l'acide oléique. Elle possède une structure en maillage tridimensionnel qui procure à la molécule une insolubilité dans les solvants hydrophobes, et ceci bien qu'elle soit constituée d'acide gras. La cuticule est légèrement perméable aux gaz et imperméable à l'eau, mais tout en restant mouillable. Elle permet ainsi de ralentir la transpiration des végétaux et de les préserver contre des pertes d'eau excessives. En temps sec le réseau se resserre, entraînant une imperméabilité totale [Dallel 2012]

Le Tableau I.1 donne la composition chimique et les proportions en pourcentage de chaque substance

**Tableau I.1** : Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales[Dallel 2012]

Fibre	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Pectine	Cire
Coton	85-90	5,7	0,7-1,6	0-1	0,6
Lin	71	18,6-20,6	2,2	2-3	1,7
Chanvre	70-74	17,9-22,4	3,7-5,7	0,9	0,8
Jute	61,1-71,5	13,6-20,4	12-13	0,2	0,5
Ramie	68,6-76,2	13,1-16,7	0,6-0,7	1,9	0,3
Sisal	66-78	10-14	10-14	10	2
Coco	32-43	0,15-0,25	40-45	3-4	-
Alfa	45	24	24	5	2

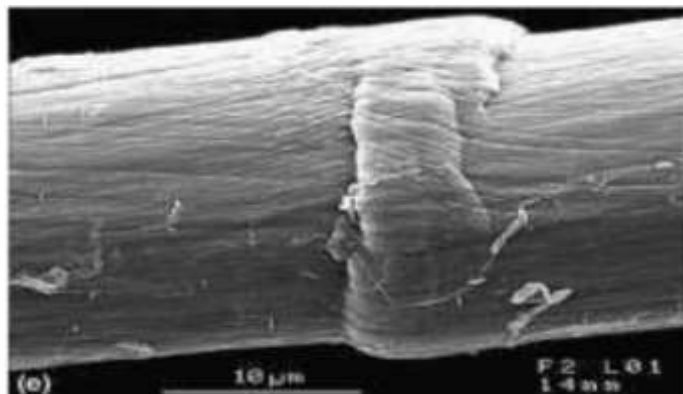
### I.3.5. Propriétés mécaniques de la fibre végétale

Il est très difficile de présenter un tableau qui répertorie toutes les propriétés des fibres lignocellulosiques. La grande variabilité constitutive et anatomique de la fibre végétale implique une variabilité de leurs propriétés mécaniques.

La faiblesse de la masse volumique des fibres végétales (1,2 à 1,5 g/cm<sup>3</sup>) confère à ces matériaux des propriétés mécaniques spécifiques intéressantes. Les fibres longues ont des contraintes en traction plus faibles que les fibres courtes, du fait que les premières ont de plus grandes probabilités de contenir des défauts de formation.

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

Les fréquents défauts structuraux (Figure I.12)observés de la surface des fibres sont des conséquences de la grande variabilité de morphologie, de composition chimique, de structure et de comportement mécanique spécifique de ces fibres.

**Figure I.12**: Exemple de défaut structural sur une fibre de lin[Yahiaoui 2011].



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

Si la sollicitation de la fibre est plus forte, la déformation de celle-ci entre dans une phase irréversible qui peut se poursuivre jusqu'à la rupture. Un angle micro fibrillaire élevé suppose une déformation élastique plus importante pour une sollicitation de la fibre en traction faible [Yahiaoui 2011].

Le tableau I.2 ci-dessous présente les propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec certaines fibres de renforcement conventionnelles

**Tableau I.2:** Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles [Yahiaoui 2011]

Fibre	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Allongement (%)	Résistance à la traction (Mpa)	Module de Young (Gpa)
<b>Coton</b>	1,5-1,6	7,0 -8,0	287-597	5.5-12.6
<b>Jute</b>	1,3	1,5 -1,8	393-773	26.5
<b>Lin</b>	1,5	2,7 – 3,2	345-1035	27.6
<b>Chanvre</b>	-	1,6	690	-
<b>Ramie</b>	-	3,6-3,8	400-938	61.4-128
<b>Sisal</b>	1,5	2,0-2,5	511-635	6.4-22.0
<b>Coco</b>	1,2	30,0	175	4.0-6.0
<b>Verre E</b>	2,5	2,5	2000-3500	70.0
<b>Verre S</b>	2,5	2,8	4570	86.0
<b>Aramide</b>	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63.0-67.0
<b>Carbone</b>	1,4	1,4-1,8	4000	230.0-240.0

### I.3.6.Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres naturelles ce sont des biocomposites agrosourcés qui présentent comme tous les matériaux composites de notre planète des avantages qui favorisent leur utilisation dans plusieurs domaines d'application (Civil et Militaire). Ces matériaux verts montrent aussi des inconvénients qui limitent leur utilisation si aucune amélioration n'a été appliquée sur la fibre brute. Le tableau 1.3 indique les principaux avantages et les inconvénients des fibres végétales. [Achour 2017]

**Tableau I.3 :** Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales

Avantages	Inconvénients
Faible densité et faible coût	Absorption d'eau
Facile à recycler et biodégradables	Faible stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de CO <sub>2</sub>	Mauvaise tenue en vieillissement
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Faible résistance au feu (200 à 230 °c max)
Absence de résidus après incinération	Fibres anisotropes
Ressource renouvelable, Non abrasives pour les outillages	Variation de qualité en fonction de lieu de croissance de la météo ...
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Bonne propriétés d'isolation thermique et acoustique	Renfort discontinu
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	

**I.3.7. Utilisation des fibres végétales dans la construction**

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques.

L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des ciments est relativement récente. En effet, beaucoup de recherches sont en cours dans le but d'arriver à substituer les fibres d'amiante par les fibres végétales. Actuellement, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les dalles et la production des tuiles et des dallages de parking ainsi que le renforcement du plâtre [Khenfer 1990].

Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polymère, de carbone et d'acier est de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines et spécialement dans la fabrication des panneaux et dans la restauration et la réparation des ouvrages anciens endommagés.

Le tableau suivant résume les domaines d'application des fibres

**Tableau I.4:** Domaines d'application des fibres végétales

Produits de construction	Infrastructure	Automobile	Divers
- Planchers	- Trottoirs	- Panneaux intérieurs	- Palettes
- profilés de portes et de fenêtres.	- Dignes	- Garnitures de toit	- Tables de pique-nique
- Clôtures	- Signalisations routières	- Panneaux de sièges	- Equipement de jeux publics
- Bardage	- Isolations phoniques.	- Tablettes arrière	
- Garde de corps.		- Planchers de camion	
- Panneaux décoratifs			

## I.4. Les caractéristiques des fibres végétales utilisées comme renfort de composite

### I.4.1. La fibre d'Alfa

#### I.4.1.1. Généralités [Eva Rogge 2010]

Le nom latin d'alfa est (*Stipa Tenacissima L.*), le nom anglais est *EspartograssouEsparto*, figure I.13 la plante est une graminée et est un membre de la famille des herbes. C'est une plante permanente qui ne disparaît pas pendant l'hiver et qui pousse indépendamment formant des nappes. Grâce à la faible consommation d'eau, l'alfa est endémique dans la région méditerranéenne d'ouest, une région plutôt sèche.

La répartition territoriale est montrée dans le Tableau I.5. Chaque année la quantité d'alfa poussant diminue à cause d'actions humaines telles que l'exploitation irrationnelle, le surpâturage, les incendies, etc.

La plante a un intérêt écologique, économique et social. L'alfa n'a en effet pas besoin d'insecticides ni de pesticides nuisibles à l'environnement et elle consomme très peu d'eau. La récolte et la transformation actuelle pour applications papetières offrent des emplois aux habitants de la région, ainsi diminuant le taux de chômage et améliorant le niveau de vie. Le jour où des applications textiles deviendront disponibles, de nouveaux marchés pourront se développer, comme c'était le cas lors de l'industrialisation des fibres de bambou dans les années 2000.

**Tableau I.5 :** La répartition territoriale de la plante alfa

Pays	superficie (ha)
Algérie	4.000.000
Maroc	3.186.000
Tunisie	600.000
Libye	350.000
Espagne	300.000
Portugal	peu

#### I.4.1.2. Nomenclature [Dallel 2012]

Nom vulgaire: L'alfa, en anglais Esparto

Nom scientifique: *Stipa tenacissima L.*

Classification :

Règne: *Plantae*

Sous règne : *Tracheobionta*

Super Division : *Spermatophyta*

Division: *Magnoliophyta*

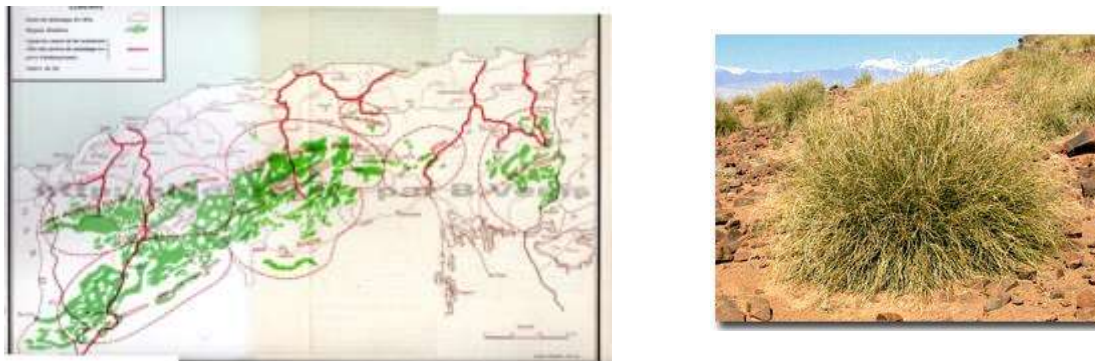
Classe: *Liliopsida*

Ordre: *Poales*

Famille: *Poaceae*

Genre: *Stipa L.*

Espèce: *Stipa tenacissima L.*



**Figure I.13** : Illustrations de la plante d'Alfa à l'état brut

La floraison a lieu à partir de la fin du printemps et durant tout l'été. Cette espèce est hermaphrodite (présentant les 2 sexes sur la même fleur). La pollinisation se fait de manière entomogame c'est-à-dire que le pollen est véhiculé par des insectes, et la dissémination des graines se fait par anémochorie (le mode de dispersion des graines des végétaux se faisant grâce au vent).alfatières.

#### **I.4.1.3. La morphologie de la plante**

La plante est plutôt une grande herbe dure au lieu d'une plante « normale » avec une grande tige avec des ramifications et des feuilles. Par contre, beaucoup de tiges poussent en forme de cercle (du vue d'en haut) en se partageant la même racine. Les tiges peuvent atteindre une hauteur d'un mètre, et les racines une profondeur de plus d'un mètre. Entre les deux se trouve le rhizome (Figure I.14). Les racines sont très ramifiées avec beaucoup de noeuds où de nouvelles racines secondaires commencent. De cette façon, l'alfa est bien ancré dans le sol, ce qui est nécessaire dans les régions où elle pousse. Ces régions se trouvent à la frontière du

désert où le sol de sable n'est pas un sol dur. Donc des racines ramifiées sont nécessaires pour pouvoir y tenir et croître.

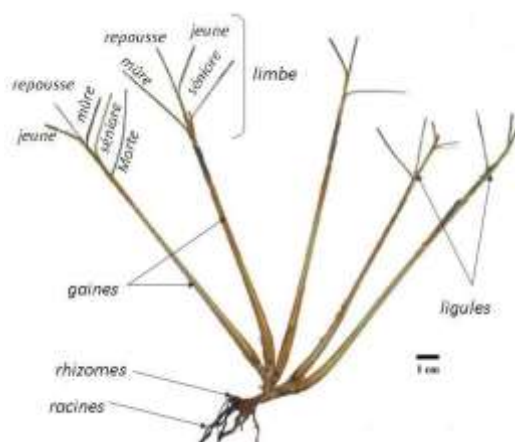
En même temps, le fait que l'alfa stabilise bien le sable et le sol avec ses racines, donne une fonction importante de cette plante, c'est-à-dire elle sert à arrêter la désertification et à éviter l'érosion éolienne. Grâce à sa présence, le vent déplace peu le sable.

De plus, les tiges ou bien les feuilles proches du sol sont velues et cireuses. Quand le vent souffle et transporte le sable et la poussière de sable, ces parties velues peuvent capter ces particules et ainsi arrêter la désertification d'une deuxième façon.

Les cires limitent l'évaporation et cela est la raison pour laquelle l'alfa peut résister à des températures élevées et consomme peu d'eau.

L'alfa fleurit normalement de début mai jusqu'à fin juin. L'alfa « mûre » est récoltée manuellement de juillet jusqu'à novembre.

Elle est capable de résister à une grande variation de température pendant la nuit des températures de  $-20^{\circ}\text{C}$  ont été mesurées, mais pendant la journée en été la température peut atteindre les  $40^{\circ}\text{C}$  [Eva Rogge 2010].



**Figure I.14 :** Morphologie de la plante d'Alfa [Dallel 2012]

#### I.4.1.4. Composition chimique

Tout d'abord il est intéressant de connaître la répartition des différents composants de l'alfa.

O. Akchiche, et al, [Akchiche 2007] ont publié des résultats d'analyses chimiques. Ils ont trouvé 74.5% hydrocarbures, parmi lesquelles la cellulose, l'hémicellulose et les pectines, et 18.5% de lignine. Les taux des composants varient selon la source :

**Tableau I.6 :** La composition d'Alfa [Eva Rogge 2010]

Matière	[8] (%)	[6] (%)	[7] (%)	[9] (%)
Cellulose	43,81	45	45	47,63
Lignine	18,76	23	24	17,71
Cendres	4,66	2	2	5,12
Silica	1,76	-	-	-
Hémicellulose	28,4	25	24	22,15
Cires	-	5	5	
Extraction et autres	2,61	-	-	7,39
Somme (%)	100	100	100	100

## I.4.2. Fibre de palmier dattier

### I.4.2.1. Généralités

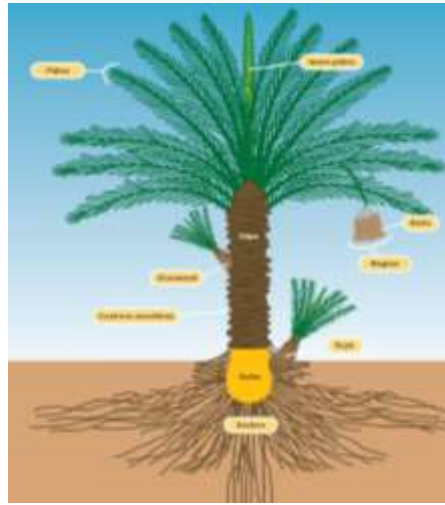
Le palmier dattier (*Phoenix L. Dactylifera*) connu depuis l'antiquité, était considéré par les égyptiens comme un symbole de fertilité, représenté par les carthaginois sur les pièces de monnaies et les monuments, et utilisé par les grecs et les latins comme ornement lors des célébrations triomphales. Dans la tradition chrétienne, les feuilles représentent un symbole de paix et rappellent l'entrée de Jésus dans Jérusalem. Le terme générique est un nom antique déjà cité par Théophraste, utilisé par les grecs pour dénommer les plantes de ce genre. Celui-ci dérive de phoenix= phénicien, car ce serait justement les phéniciens qui auraient diffusé cette plante. [Adil 2011]

Le palmier dattier est typiquement cultivé dans les oasis sahariennes. Celui originaire d'Afrique du Nord, est amplement cultivé de l'Arabie jusqu'au Golfe Persique, où il forme la végétation caractéristique des oasis. Il est cultivé en outre aux Canaries, dans la Méditerranée septentrionale et dans la partie méridionale des Etats-Unis. C'est une plante sensible au froid, qui pousse sur des terrains de n'importe quelle nature, pourvu qu'ils soient fertiles et bien drainés. Dans les régions à climat doux, il est cultivé en plein air, en position ensoleillée, utilisé surtout comme plante ornementale pour son allure élancée et son feuillage.

Il existe plus de 2600 espèces de palmiers. On pourrait croire que c'est un arbre qui possède un tronc alors que c'est un monocotylédone qui ne contient pas de bois ni de tronc mais possède un stipe. De plus, c'est une plante dioïque contenant donc des palmiers mâles et des palmiers femelles. Le palmier a un tronc très élancé, haut jusqu'à 30 m, couvert de manière visible par les gaines des feuilles tombées. Les feuilles, réunies en un nombre de 20 à 30 maximums, forment une couronne apicale clairsemée (Figure I.14). Elles sont pennées,

longues jusqu'à 6m; les feuilles supérieures sont ascendantes, les basales recourbées vers le bas, avec des segments coriaces, linéaires, rigides et piquants, de couleur verte. [Adil 2011]

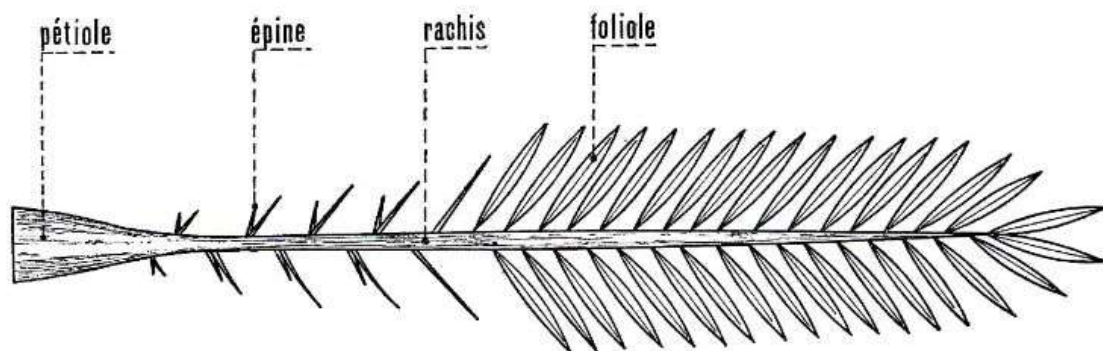
Le palmier dattier se constitue principalement de 10 parties à savoir Figure I.15 :



**Figure I.15:** Présentation schématique d'un palmier dattier [Adil 2011]

- *Palme* : La palme ou « Djérid » est une feuille pennée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis qui s'étend au pétiole. Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues. Le pétiole (Kornaf) est dur et relativement rigide [Peyron 2000].

Chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partir de bourgeon et perd un nombre similaire de palmes par dessèchement [Peyron 2000] et [Munier 1973].



**Figure I.16:** Schéma d'une palme de palmier dattier [Abdelouahed 2005].

- *Régime de dattes* : Un régime de dattes (ou spécule) est la partie qui supporte les fruits du palmier. On parle aussi de régime pour les bananes. Il est accroché au palmier par la hampe, qui est d'ailleurs tellement résistante qu'elle doit être sciée pour être décrochée. Il peut

contenir plus de 1000 fruits, Le palmier devra être âgé d'au minimum 7 ans avant de produire des dattes.

- *Dattes* : Ces fruits sont des baies de forme ovale de 3 cm de long. La chaire très sucrée entoure la graine. Récoltées en automne, leur couleur varie du rouge lumineux au jaune lumineux selon les variétés; elles seront ensuite séchées au soleil. Un palmier dattier peut produire de 10 jusqu'à 100 kg par an.

- *Gourmand* : Un gourmand est une branche secondaire qui se développe sur la branche principale d'une plante. Il faut généralement les supprimer car comme leur nom l'indique, ils sont gourmands et épuisent inutilement la plante. On retrouvera ce cas notamment sur les tomates, ou il est indispensable de les retirer pour avoir de bons fruits.

- *Stipe* : Le stipe rappelle le tronc des arbres mais est en fait composé de fibres végétales des anciennes feuilles. Son diamètre peut varier légèrement selon les conditions climatiques.

- *Cicatrices annulaires* : On a l'impression que le palmier a un «tronc recouvert d'écailles». Ces cicatrices annulaires correspondent au point d'attache de la feuille ancienne une fois le pétiole (support de la feuille) tombé. Elles permettent au grimpeur de s'y accrocher pour atteindre les dattes.

- *Rejet* : Le rejet est une jeune pousse du végétal, qu'il est possible de planter pour obtenir un nouveau palmier. Celui-ci sera choisi par l'homme parmi une sélection des meilleurs palmiers.

- *Bulbe* : Se situant à la base du stipe, le bulbe constitue la réserve du palmier. De là part le système racinaire d'où émergent les racines primaires courtes de moins d'un mètre, et longues de plus de 20 mètres.

- *Racines* : Elles sont nombreuses et profondes jusqu'à 20 mètres ; elles sont capables d'aspirer des centaines de litres d'eau par jour.

#### **I.4.2.2. Types des fibres de palmier dattier**

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant quatre types de fibre [Abdelouahed 2005]:

- fibres de bois de tronc.
- fibres de feuilles au niveau des pédoncules.
- fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe).
- fibres de surface autour de son tronc ou de bases de palmes (pétiole)



### I.4.2.3. Composition chimique des fibres de palmier dattier

D'après les références, les compositions chimiques de fibres de palmier sont regroupées dans le tableau I.7.

**Tableau I.7** : Les compositions chimiques de fibres de palmier[Abdelouahed 2005]

Fibre	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Pectine (%)	Graisses (%)	Référence
<b>Coton</b>	85-90	5,7	0,5-1,6	5,7	0,6	[1, 8, 10]
<b>Noix de coco</b>	32-46	0,15-0,3	40-45	4	-	[1, 10]
<b>Jute</b>	64,4-84	12-20	12-13	0,2	0,5	[1, 8, 10]
<b>Lin</b>	64,1-81	16,7-20,6	2-3	0,9-1,8	1,5	[1, 8, 10]
<b>Chanvre</b>	68-92	15-22	10	0,9	0,8	[1, 10]
<b>Ramie</b>	68,6-76,2	13,1-16	0,6-0,7	1,9-2	0,3	[1, 8, 10]
<b>Sisal</b>	65,8	12	9,9	0,8-2	2	[1, 8, 10]
<b>Palmier</b>	32-35,8	24,4-28,1	26,7-28,7	-	7	[13, 14]

### I.4.3. Fibres de Diss (*Ampélodesmos mauritanicus*)

#### I.4.3.1. Généralités

La fibre Diss (*Ampélodesmos mauritanicus*), est une herbe vivace. Il existe en abondance à l'état sauvage sur le pourtour du bassin méditerranéen et l'Asie occidentale et au sud-ouest de l'Amérique du Nord. Il est utilisé auparavant dans la réalisation des habitations anciennes en raison de ses qualités mécaniques et hydriques et en tant que fibre pour la fabrication de tapis. [Bourahli 2014]



**Figure I.17** :Herbe de Diss *Ampélodesmos mauritanicus*[Sellami 2015]

#### I.4.3.2. Description de Diss (*ampélodesmos mauritanicus*)

Graminée vigoureuse aux longues feuilles linéaires persistantes, vert foncé, sont décoratives toute l'année. Les inflorescences très hautes au-dessus de la touffe sont d'abord vert-jaune en

mai, puis dorées en automne. Cette graminée se plaît au soleil et pousse mieux dans des sols sableux, caillouteux ou argileux qui sont modérément humides. Sa hauteur peut atteindre 3 mètres environ (Figure I.17). L'utilisation de cette herbe dans les composites permet de préserver les ressources non renouvelables et d'ouvrir de nouveaux marchés.

#### I.4.3.3. Nomenclature

Le tableau I.8 regroupe la classification scientifique de la plante :

**Tableau I.8** : Classification scientifique de la plante Diss. [Bourahli 2014]

Genre	Espèce	Sous-famille	Famille	Ordre
Ampelodesmos	Mauritanicus	Stipoideae	Poaceae	Poales

#### I.4.3.4. Composition chimique des fibres de diss

Le Tableau II.10 donne la composition chimique et les proportions en pourcentage de chaque substance (cellulose, lignine, hémicelluloses, pectine et cire) des fibres végétales

**Tableau I.9** : Composition chimique de fibres végétales [Yahiaoui 2011]

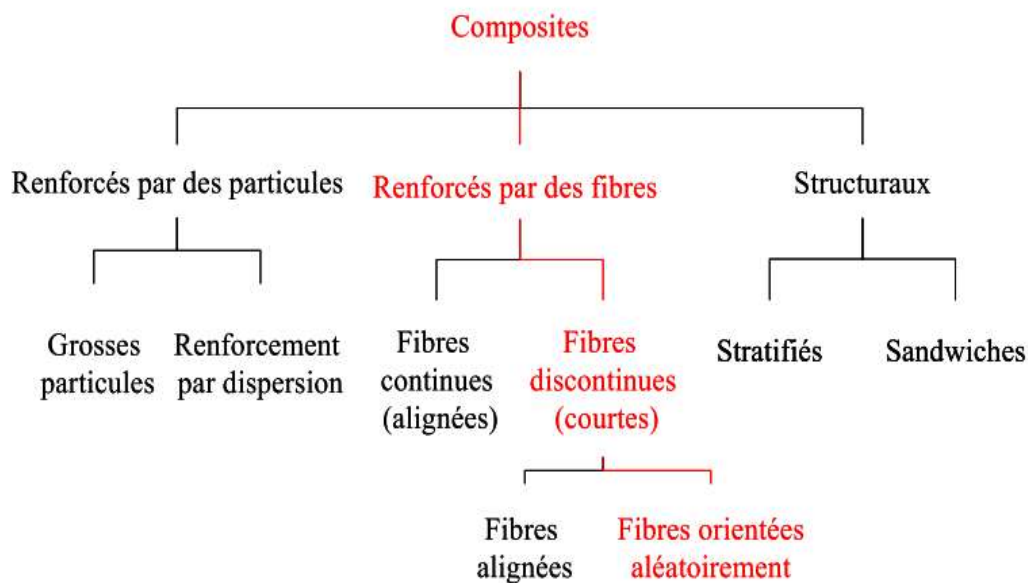
Constituant de la fibre de Diss		%
<b>Matières sèches</b>		91.8
<b>Matières minérales</b>		11.4
<b>Matières organiques</b>		80.3
<b>Composition de la matière organique</b>	Constituants extractibles (cire, graisse)	12.10
	pectine	11.85
	lignine	16.80
	Hémicellulose	15.15
	Cellulose	44.10

### I.5. Les Composites

Un composite correspond à l'association de matériaux élémentaires aux caractéristiques complémentaires, en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants, pris isolément, ne permettent pas d'atteindre. Légèreté et résistance mécanique ou fragilité et ténacité peuvent ainsi être associées. Un des constituants peut remplir la fonction de matrice tandis que l'autre, immergé dans le premier, joue un rôle de renfort. Dans ce type de composite, la matrice (organique ou inorganique) est continue et enrobe une phase distincte, le renfort, qui se

présente sous forme de particules ou de fibres plus ou moins longues [Gay 1987], [Aliprandi 1989] (cité par [Sedan 2007]).

Le domaine des composites est vaste et ceux-ci peuvent être divisés en trois types. La figure I.18 présente une classification schématique des matériaux composites [Callister 2001]. Nous y distinguons trois catégories principales : les composites renforcés par des particules, les composites renforcés par des fibres et les composites structuraux. Chacune de ces catégories se divise en au moins deux sous catégories.



**Figure I.18:** Classification schématique des différents types de composites [Callister 2001].

### I.5.1. Matériaux composites à base de fibres naturelles

Parmi les matériaux composites, nous distinguons ceux à matrice polymérique et ceux à matrice minérale. Nous nous attarderons plus spécialement sur les matrices à base de matériaux de grande diffusion, comme « le ciment ». Dans un premier temps, nous allons présenter les enjeux liés à l'utilisation de fibres naturelles.

#### I.5.1.1. Matrice polymère et fibres végétales

Les composites à matrice polymérique (CMP) sont généralement constitués d'une matrice de résine (substance macromoléculaire formée par polymérisation ou polycondensation) et d'un renfort de fibres. Les matrices communément utilisées dans l'élaboration de composites à fibres naturelles vont des thermoplastiques, tels le polypropylène et le polyéthylène [Hua

1987]et[Van de Weyenberg 2006], aux thermodurcissables tels le polyester [Albuquerque 1999], [Devi 1997], [Mwaikambo 1999]. (Cité par [Sedan 2007]).

Si nous assistons à un regain d'intérêt pour l'utilisation des fibres végétales comme renforts, cette application existe depuis de nombreuses décennies. En 1908, par exemple, des composites associant une résine phénolique au coton ou au papier ont été développés pour la réalisation industrielle de panneaux et de tubes pour l'électronique. Au cours des années trente, le Celoron (marque Tufnof), constitué de tissu de coton imprégné de résine phénolique, permettait la réalisation d'engrenages et de cames à longue durée de vie. Utilisable dans l'eau, ce matériau a été employé pour la fabrication de paliers d'arbres d'hélice, de pièces d'accastillage pour voiliers (joues de poulies, poupées de winch...) ou dans des disjoncteurs de centrales électriques. Ces produits sont encore aujourd'hui disponibles. En Inde, en 1978, des maisons et un silo ont été conçus à Madras à partir de polyester renforcé par des fibres de jute. Pendant des décennies, les fibres issues des déchets textiles ont renforcé le matériau synthétique de la carrosserie de la « Trabant » en Allemagne de l'Est. Pal [Pal 1984], quant à lui, présente la réalisation de barques par moulage au contact, en Inde ; la coque est renforcée par des fibres de verre (en extérieur) et de jute. L'entreprise Mercedes-Benz, enfin, 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).

L'utilisation de ce matériau s'inscrit dans une démarche d'éco-conception. Des granulés thermoplastiques (polypropylène, par exemple) renforcés par des fibres naturelles végétales ont été développés pour être utilisés dans différents domaines (cosmétique, automobile, horticulture, électroménager, mobilier urbain, outillage...). En effet, la faible densité, le faible coût, la disponibilité et l'aptitude au recyclage de ces fibres encouragent le développement de nouvelles applications dans les composites. Les études techniques disponibles suggèrent que ces fibres ont un réel avantage concurrentiel face aux fibres de verre [[Sterzynski 1995], [Mieck 1995], [Joshi 2004]](cité par [Sedan 2007]). Cependant, les fibres naturelles possèdent une absorption d'humidité élevée, qui peut être un problème majeur. Enfin, l'insertion de fibres hydrophiles dans une matrice hydrophobe n'est pas simple.

Plusieurs études dans le passé ont déjà tenté de modifier les propriétés de surface des fibres de cellulose afin d'améliorer leur adhésion avec une matrice polymérique. Des méthodes variées comme les traitements corona [Belgacem 1994], plasma [Felix 1994], alcalin [Bisanda 1991], thermique [Sapieha 1989], la greffe par copolymérisation [Felix 1991] et [Maldas 1989], le traitement avec des silanes [Mieck 1995] et [Felix 1994] ou encore avec d'autres produits chimiques [Raj 1988], [Zadorecki 1985] et [Hua 1987] ont permis d'améliorer la compatibilité des fibres avec la matrice. Cependant, certaines de ces méthodes posent les inconvénients d'utiliser des équipements et/ou des produits chimiques onéreux.

Les fibres naturelles possèdent donc un fort potentiel de développement comme agent de renfort dans les matrices polymères [Joseph 1993] et [Herrera 1997]. L'ensemble de ces études montre également que l'adhésion entre les fibres et la matrice joue un rôle primordial sur les propriétés mécaniques du composite. Il est donc indispensable de connaître les interactions chimiques de surface entre les différents constituants des composites avant de pouvoir réaliser une caractérisation mécanique de l'ensemble. (Cité par [Sedan 2007]).

### **I.5.1.2. Matrice minérale et fibres végétales**

Dans le domaine de l'habitat, le torchis est considéré comme le premier matériau composite de l'histoire. Il est composé d'une matrice plastique (terre) et de renforts (fibres végétales). C'était le matériau de construction des habitations dès le néolithique. Les Celtes l'ont utilisé pour construire les murs de leurs maisons. Le torchis est une technique de construction du type ossature-remplissage. Traditionnellement, l'ossature porteuse principale est constituée de solives en bois, complétée par un clayonnage à base de bois, qui sont de petits morceaux de bois de châtaignier appelés fuseaux, joncs, roseaux ou bambous. Ces fuseaux sont enroulés d'un mélange de terre à l'état plastique auquel sont souvent ajoutées des fibres végétales ou animales. Seule l'ossature joue un rôle structurel. Le mélange en torchis ne détient pas de fonction porteuse. En Europe, le torchis a été remplacé par la technique de la terre-paille qui n'utilise pas de clayonnage. En Amérique latine, de nombreuses constructions humbles sont encore construites avec du torchis sur un clayonnage de bambou ("bahareque" en Colombie). Malheureusement, sous les tropiques, un insecte qui propage la terrible maladie de Chagas se développe dans les murs de torchis et condamne toute promotion de cette technique dans les zones de basse altitude où cet insecte peut prospérer. Enfin, en France, les chantiers dits d'éco-

conception connaissent un essor considérable lié à une prise de conscience des problèmes environnementaux. Un de ces chantiers. [Sedan 2007].

Enfin, les fibres végétales telles le chanvre sont utilisées dans le bâtiment et la construction : la fibre pour l'isolation et la chènevotte (partie boisée du chanvre) en mélange avec des chaux ou des liants spécifiques pour confectionner des mortiers, des bétons de chanvre, ou des briques de chanvre. Les bétons de chanvre permettent de réguler l'hydrothermie et de garantir un confort d'isolation thermique. Une précision doit être apportée sur la désignation « béton de chanvre » qui correspond en fait à des mélanges de type chaux-chènevotte. Ils sont faciles à utiliser et apportent une correction acoustique. La chènevotte peut être exploitée dans tous les domaines de la construction : chapes de ragréage, murs, doublages, cloisons, isolation de toiture et enduits. [Sedan 2007].

### **I.5.1.3. Matrice cimentaire et fibres végétales**

Depuis l'antiquité, les fibres naturelles ont été utilisées comme renfort dans diverses applications (habitation, poteries...). Cependant, c'est seulement ces vingt dernières années qu'elles suscitent un engouement dans le secteur des composites à base cimentaire, que ce soit dans le domaine du bâtiment ou en science des matériaux [Canovas 1992].

#### **I.5.1.3.1. Potentiel et compatibilité des fibres avec le ciment**

Les fibres végétales comme le sisal, le jute, le lin, le chanvre ou encore le bambou, et les fibres de bois ont été utilisées comme renforts des matrices cimentaires dans les pays en voie de développement, dans le secteur du bâtiment. La résistance en flexion de ces matrices fragiles, telles les mortiers ou les pâtes de ciment, peut être considérablement améliorée grâce aux propriétés mécaniques des fibres (résistance en traction élevée) [Okino 2004], [Savastano 2000] et [Andonian 1979]. De plus, une modification notable dans le comportement du matériau est observée une fois que la matrice s'est rompue : passage d'un comportement fragile à un comportement composite [Toledo Filho 2003], [Cabrillac 1992]. Les études publiées sur ces composites portent essentiellement sur leur comportement mécanique. D'une manière générale, les auteurs expriment le taux de renforcement en masse et non en volume. Cité par [Sedan 2007].

Andonian et al. [*Andonian 1979*] ont étudié les propriétés mécaniques de composites renforcés par des fibres de cellulose, en fonction de leur fraction massique. Leurs résultats indiquent une amélioration de la résistance en flexion avec l'augmentation de la teneur en fibres. Ils observent ainsi une résistance maximale en flexion trois points de 26,8 MPa pour une teneur massique en fibres de 6%. Pour des fractions massiques légèrement supérieures (8 à 10%), aucune évolution de la résistance en flexion n'est observée. Le module d'Young quant à lui diminue avec l'augmentation du taux de fibres.

Ledhem et al [*Ledhem 1996*] ont examiné l'effet d'addition de copeaux de bois au composite (ciment + argile). La résistance à la compression du composite diminue avec l'augmentation du taux de copeaux de bois, alors que la résistance en traction augmente avec l'évolution du taux de copeaux de 0 à 10% en masse. Cette augmentation peut être expliquée par le fait que les copeaux jouent le rôle de fibres dans la matrice. En plus, l'isolation thermique du composite est améliorée et ses variations dimensionnelles mieux maîtrisées.

Savastona et al [*Savastano 2000*] ont utilisé du sisal, des copeaux de bananier, ou encore de l'eucalyptus afin de renforcer un composite à matrice cimentaire. Les essais mécaniques indiquent une performance optimale pour une fraction massique d'environ 12%, avec une résistance en flexion d'environ 20 MPa et une énergie à rupture de 1,0 à 1,5 kJ/m<sup>2</sup>. 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 pour une teneur massique de 12% en eucalyptus (comportement évalué à 28 jours).

Agarwal [*Agarwall 1995*] a étudié l'effet de la teneur en fibres de bagasse sur les propriétés de composites à base cimentaire. Il observe alors, tout comme les travaux abordant ce thème de recherche, qu'il existe une teneur en fibres optimale. En effet, la résistance en flexion de ces matériaux évolue d'environ 4,5 MPa pour le ciment seul à 9 MPa pour un composite contenant 16% en masse de fibres. Au-delà de cette teneur en fibres, la résistance à la flexion chute. Une diminution de la maniabilité des pâtes avec une hausse de la teneur en fibres dans les mélanges, que l'auteur attribue à une augmentation de l'absorption en eau par ces derniers est également observée.

Blankenhorn et al. [Blankenhorn 1999] ont travaillé sur des composites contenant des fibres de papier recyclé, de feuillus ainsi que de résineux. La résistance à la flexion est plus élevée que pour le ciment pur. Le composite avec les fibres de feuillus donne les meilleurs résultats de résistance à la flexion. Cela s'explique par le fait que ces fibres sont plus longues que les autres. Ces résultats sont confirmés par d'autres études : les ciments renforcés par des fibres courtes développent de plus faibles résistances que ceux renforcés par des fibres longues [Coutts 1995]. Cependant, avec l'adjonction de fibres, la résistance à la compression du composite diminue par rapport au ciment pur.

Dans une autre étude, Blankenhorn et al. [Blankenhorn 1994] indiquent une amélioration des propriétés mécaniques du composite, par modification de la matrice cimentaire, et par utilisation du malaxage par cisaillement à grande vitesse. Pour modifier les propriétés de la matrice, les auteurs proposent différents types de ciment. L'utilisation des ciments alcalinisés améliore la maniabilité de la pâte cimentaire et diminue ses délais de prise. L'addition de fumée de silice (en remplacement d'une partie du ciment) améliore également la maniabilité et augmente la résistance à la flexion (évolution de 15,2 MPa à 22,8 MPa avec l'addition de 6% en masse de fumée de silice). De plus, l'ajout de fumée de silice diminue l'alcalinité de la matrice et donc diminue le degré de dégradation des fibres de bois. Cet aspect a été étudié en détail par Govin [Govin 2004]. Les fibres qui contiennent de grande quantité de lignine sont plus sensibles au milieu alcalin de la matrice cimentaire que les fibres contenant une quantité de lignine négligeable. Govin explique ce phénomène par le fait que les lignines et les hémicelluloses sont plus réactives que la cellulose à l'attaque alcaline qui provoque leur dégradation chimique cité par [Sedan 2007].

Si la fonction de ces fibres dans une matrice ciment est de réaliser et maintenir la résistance et la ductilité du composite, des modifications de la surface des fibres peuvent s'avérer nécessaires afin d'améliorer leur durabilité dans un milieu cimentaire très alcalin.

Le traitement des fibres de sisal avec des agents tels que le silicate de sodium, le sulfure de sodium, le sulfate de magnésium, des composés à base de cuivre ou de fer ainsi que des sels de baryum et de sulfure a été étudié par Gram [Gram 1983]. Cependant, aucun d'entre eux n'a amélioré la durabilité des fibres dans la matrice cimentaire. L'imprégnation des fibres avec des agents hydrophobes a également été envisagée. Excepté les acides stéarique et formique, qui entraînent un retard du recouvrement des fibres par le ciment, tous les autres traitements



(acétate de polyvinyle, huile de silicone, goudron, latex ou asphalte) n'ont pas empêché la minéralisation de la fibre [Gram 1983]. L'imprégnation des fibres de sisal avec des composants organiques dérivés du bois, comme les tanins ou les huiles végétales, a été étudiée par Canovas [Canovas 1992]. Cet auteur indique une légère diminution dans le procédé d'enrobage par la matrice cimentaire, mais la dégradation de la fibre n'est pas complètement évitée cité par [Sedan 2007].

La réduction de l'alcalinité de la matrice par l'utilisation de matériaux pouzzolaniques a été reportée dans plusieurs études [Gram 1983, [Toledo Filho 1997], [John 1990], [Berhane 1999] (cité par [Sedan 2007]). Les matériaux étudiés incluaient les ciments alumineux et les ciments Portland modifiés par l'ajout de fumée de silice, de cendres ou de pouzzolanes naturelles comme la pierre ponce ou la diatomite. Le remplacement de 45% en masse du ciment par de la fumée de silice entraîne une perte de résistance du composite. Une amélioration a cependant été observée lorsqu'un ciment alumineux est utilisé avec des pouzzolanes naturelles. Concernant le ciment Portland, aucune amélioration réelle n'a été observée.

Tolêdo-Filho et al. [Tolêdo-Filho 2003] cité par [Sedan 2007] proposent alors d'immerger préalablement les fibres dans de la fumée de silice et de remplacer une partie du ciment Portland par de la fumée de silice non dense ou de la poussière de hauts fourneaux [Sedan 2007].

## **I.5.2. Généralités sur les propriétés des composites de fibres végétales**

### **I.5.2.1. Propriétés à l'état frais**

L'ajout de fibres végétales à une matrice minérale conduit à une diminution de sa maniabilité, compensable par un ajustement du rapport E/L ou l'usage de superplastifiant [Kriker 2005], [Castro 1981].

La présence de fibres au moment du malaxage induit également une augmentation de la quantité d'air entraîné [Aziz 1984].

Enfin, plusieurs auteurs relèvent un retard de prise lié à l'incorporation de fibres végétales.

Des mécanismes complexes semblent expliquer ce phénomène et la bibliographie est parfois contradictoire sur ce thème. Le retard de prise observé serait lié à la présence de sucres libres issus des fibres végétales. Fisher l'attribue plus précisément à la dégradation de carbohydrates solubles en acides sacchariniques, agents retardateurs de prise ([Fisher 1974] cité par [Sedan

2007]), explication reprise par Reading pour lequel la prise du ciment serait inhibée par des oligosaccharides produits par la dégradation de l'hémicellulose en milieu alcalin ([Reading 1985] cité par [Govin 2004]).

Govin [Govin 2004] a étudié la modification des mécanismes d'hydratation d'un ciment portland en présence de peuplier, il note une action prépondérante du bois sur l'hydratation du C3S et du C2S. L'inhibition de la précipitation de la portlandite est d'après lui causée par l'acidification de la phase interstitielle par la présence du bois. Elle modifie également la polymérisation des C-S-H, notamment par création d'un gradient de rapport C/S entre la fibre de bois et la matrice.

Dans ses travaux sur le renforcement d'une matrice cimentaire par des fibres de chanvre, Sedan [Sedan 2007] conteste l'attribution du retard de prise à la seule présence de sucres neutres ou d'acides issus de la dégradation des fibres végétales. Il met en évidence la fixation des ions calcium par les pectines des fibres, mécanisme qui, d'après lui, inhibe la précipitation des C-S-H du fait de la trop faible concentration en calcium dans la solution interstitielle.

#### **I.5.2.1.1. Influence sur la prise**

Dès les années 60, l'ajout du bois au -ciment, augmente sensiblement le temps de prise, voire même une inhibition totale de celle-ci et les mélange reste indéfiniment à l'état pâteux. La détermination des facteurs influençant la prise se posent donc depuis plus de trente ans [Biblis 1989]].

Biblis [Biblis 1989] attribut la plus forte influence au glucose et à la cellulose, tandis que Weatherwax et Tarkow [Weatherwax 1967] rendent ce fort retard de prise à la décomposition du bois dans le mélange. Les solutions apportées consiste en l'introduction d'accélérateurs de prise ciment afin de contrecarrer l'effet néfaste des extractibles du bois.

Moslemi [Moslemi 1985] préconise l'emploi des chlorures de fer, d'étain ou d'aluminium à 5 % en masse. Il est même possible de neutraliser les effets des extractibles à l'aide de chlorure de calcium sans altérer les propriétés mécaniques.

Des influences moins marquées sont attribuées aux tanins et aux acides aliphatiques, tandis que la lignine n'a pas d'effet notable [Biblis 1989].

Wilding et al. [Wilding 1984] ont entrepris la classification d'adjuvants organiques et inorganiques selon leur influence, accélératrice ou retardatrice, sur la prise du ciment, en

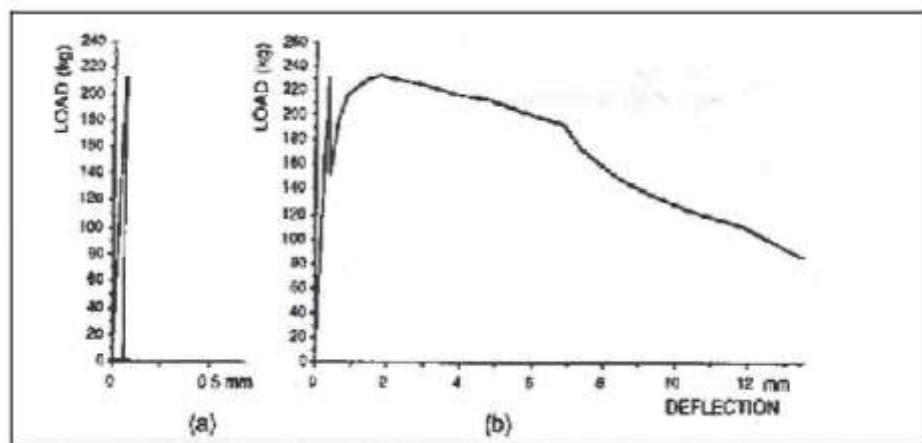
suivant l'hydratation par calorimétrie isotherme. Leurs conclusions semblent indiquer que toutes les molécules organiques induisent des retards, et que parmi elles, les adjuvants phénoliques avec des groupes hydroxyle adjacents sont de puissants retardateurs. D'autres molécules telles que l'acide citrique, le catéchol et l'acide salicylique ont la faculté de former des complexes avec des ions calcium.

Arsene et al. ont préparé des composites fibres de bagasse/ciment, avec une distribution aléatoire des fibres dans le composite [Arsene 2001]. Ils ont étudié l'influence de divers paramètres sur la prise du matériau composite bagasse/ciment [Yahiaoui 2011].

### I.5.2.2. Propriétés mécaniques

Les matrices minérales se caractérisent par une rupture de type fragile malgré leurs bonnes tenues à la compression, La résistance en flexion de ces matrices fragiles, tels que les mortiers, le plâtre ou les pâtes de ciment, peut être considérablement améliorée grâce aux propriétés mécaniques des fibres (résistance en traction élevée). [Yahiaoui 2011]

De plus, une modification notable dans le comportement du matériau est observée après la première fissuration de la matrice : passage d'un comportement fragile à un comportement semi fragile ou légèrement contrôlé ([Savastano 2000], [Andonian 1979]).



**Figure I.19:** Représentation schématique du comportement en flexion troispoints :(a) gypse pur(b) composite gypse-fibre de sisal. [Yahiaoui 2011]

Djoudi et al. [Djoudi 2009] ont étudié le renforcement de plâtre avec les fibres végétales du palmier (dattier). Les résultats montrent que l'augmentation de la fraction massique des fibres du palmier incorporées fait accroître la ductilité du matériau, les meilleurs résultats sont obtenus pour 1,5% en masse de fibres. Par contre la densité décroît à cause de l'augmentation du volume de vide créé par l'ajout des fibres dans la matrice.

Les fibres végétales changent complètement le comportement rhéologique du matériau et augmentent considérablement sa résistance à la flexion et le rend moins fragile en améliorant son seuil de fissuration.

Bahloul et al. [Bahloul 2009] ont examinée l'analyse des propriétés mécaniques et physiques des mortiers de ciment à base de fibres cellulosiques d'alfa. Ils ont montré que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres dans les mortiers et que l'ajout de fibres végétales au mortier n'a aucun effet bénéfique sur la résistance à la compression. Cela est expliqué par le fait que l'incorporation des fibres dans la matrice du mortier augmente le volume des vides et diminue la compacité du mortier, d'où une diminution de résistance à la compression. Ils observent aussi que le mortier de fibres donne des valeurs de conductivité thermique  $\lambda$  de l'ordre de  $0,8 \text{ W/m}^\circ \text{ C}$  ce qui est assez proche des performances d'un isolant.

Sedan [Sedan 2007] a travaillé sur les phénomènes physico-chimiques intervenant lors de l'association de fibres de chanvre avec du ciment, ainsi que leurs impacts sur les propriétés mécaniques des composites élaborés. Ils indiquent que la résistance en flexion de ces matériaux évolue d'environ de  $4,9 \text{ MPa}$  pour le ciment à  $6.8 \text{ MPa}$  pour un composite contenant 16% en masse de fibres.

Les précédents travaux démontrent que l'introduction des fibres végétales dans des matrices cimentaires améliore la contrainte à la rupture en flexion 3 points Des mortiers. On note aussi que la liaison fibre /matrice reste faible. Pour accroître les performances mécaniques et améliorer l'adhésion à l'interface, plusieurs approches ont été étudiées, incluant l'imprégnation des fibres avec des agents bloquant l'absorption d'eau, tels que le silicate de sodium et le sulfure de sodium ou des agents hydrophobe.

Payratou et al [Peyratou 2007] ont étudié les modifications physicochimiques des interactions entre les fibres de chanvres et la chaux. Leurs résultats montrent que le traitement avec de la soude améliore la rigidité du mortier par l'élimination des parties amorphes à la surface des fibres ce qui permet d'augmenter le taux de cristallinité des fibres.

Ils observent aussi que le traitement à L'EDTA (acide éthylène diamine tétra acétique) augmente la contrainte à la rupture des mortiers réalisé. Ce traitement permet de fixer le minimum de calcium à la surface de fibre. Car la présence de ce dernier en surface influence

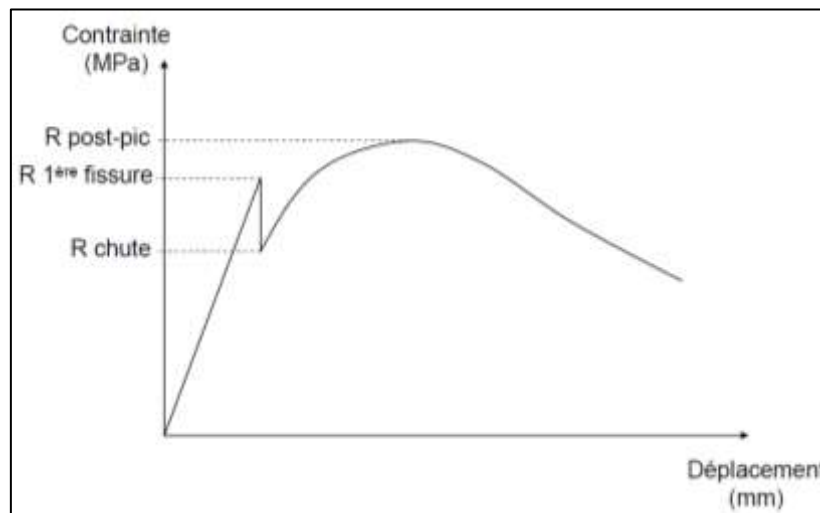
donc la contrainte à la rupture. On note aussi que le traitement à l'eau chaude contribue à l'amélioration de la rigidité des mortiers. [Yahiaoui 2011].

### I.5.3. Durabilité des composites de fibres végétales

Malgré les résultats encourageants obtenus vis-à-vis des propriétés et notamment des propriétés mécaniques des matériaux de construction renforcés par des fibres végétales, les études réalisées mettent en évidence des déficiences concernant la durabilité des fibres dans la matrice alcaline. [Magniont 2010]

Etant donné la variabilité des notations et des appellations utilisées par les différents auteurs, nous allons en préambule à cette partie définir les termes que nous retiendrons pour définir le comportement en flexion du composite fibré (Figure I.20) :

- la résistance à la première fissure ( $R_{1^{\text{ère}} \text{ fissure}}$ ) correspond à la contrainte de première fissuration de la matrice,
- la résistance de chute ( $R_{\text{chute}}$ ) correspond à la contrainte résiduelle après la rupture de la matrice,
- la résistance post pic ( $R_{\text{post-pic}}$ ) correspond à la contrainte maximale de la phase post-pic.

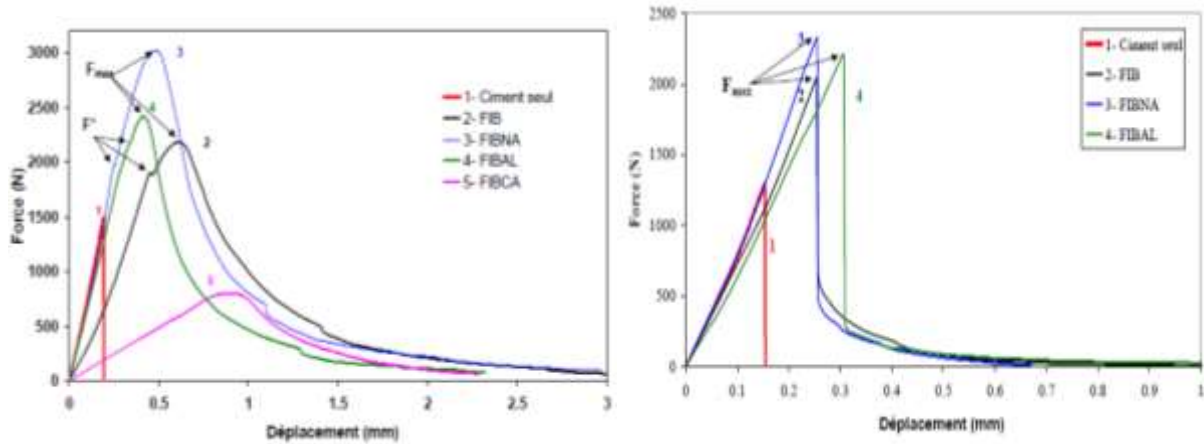


**Figure I.20** : Définition des grandeurs caractéristiques du comportement en flexion d'un composite fibré [Magniont 2010]

#### I.5.3.1. Evolution des propriétés des composites de fibres végétales à long terme

L'ensemble des travaux réalisés font état d'une chute de la ductilité des matériaux fibrés par des fibres végétales au cours du temps. Les résultats obtenus par Sedan [Sedan 2007] présentés sur la Figure I.21 illustrent ce phénomène. A l'issue de 12 mois de vieillissement naturel, le comportement mécanique des composites est notablement modifié. La force à la

première fissure est relativement constante par rapport aux essais réalisés à 28 jours, en revanche la phase post pic disparaît après vieillissement, le matériau présente une rupture fragile semblable à celle de la matrice non fibrée.



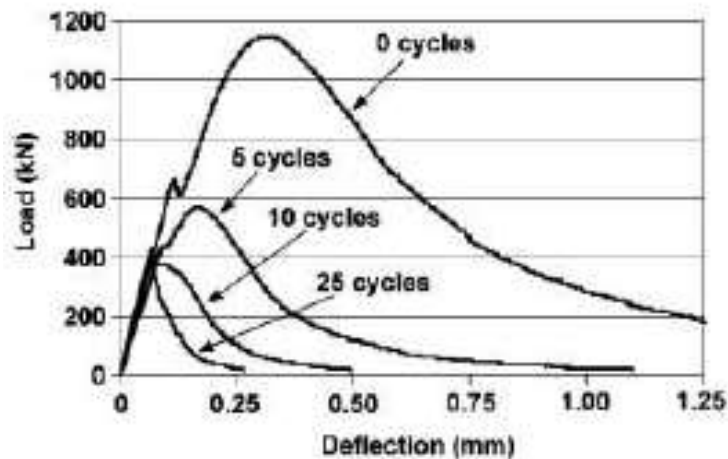
(A) (B)

**Figure I.21 :** Comportement mécanique en flexion 3 points d'une matrice cimentaire renforcée par des fibres de chanvre brutes (FIB) et des fibres traitées avec une solution de soude (FIBNA), de chlorure d'aluminium (FIBAL) et de chaux (FIBCA) à 28 jours (A) Et après 12 mois de vieillissement nature (B) ([Sedan 2007])

Des résultats comparables sont obtenus par Mohret *al.* [Mohr 2005] sur des composites de ciment renforcés par de la pâte kraft de conifères. Les éprouvettes soumises à des cycles de saturation en eau/séchage présentent une perte de la résistance maximale de 50.8 à 72.4% et une chute de la ténacité de 97.5 à 98.8%. La Figure I.22 présente l'évolution typique du comportement en flexion d'échantillons soumis à 0, 5, 10 et 25 cycles de vieillissement. La majorité des auteurs relève, en parallèle de la chute de ductilité, une augmentation de la résistance à la première fissure ([Akers 1989], [Kriker 2008], [Toledo. Filho. R.D 2009], [Toledo Filho 2000], [Soroushian 1984]). Au contraire, Mohret *al* mettent en évidence une chute de cette contrainte à la première fissure de 43.5 à 52%.

Un autre phénomène mis en évidence par différents auteurs [Toledo Filho 2000], [Bentur 1989],[Mohr 2005], [Mac Vicar 1999] est la modification du mode de rupture des fibres caractéristique de la mauvausedurabilité des fibres en milieu alcalin. Tandis que pour les composites au jeune âge, la rupture se fait par arrachement des fibres, pour les échantillons vieillis, le nombre de fibres cassées augmente et la longueur d'arrachement des fibres diminue.

Dans une étude sur la durabilité d'éléments de mortier compressé renforcé par des fibres de sisal, Toledo *et al.* [Toledo. Filho 2009] ont également mis en évidence une modification du mode de rupture à l'échelle de l'échantillon, rupture multifissurée pour les échantillons non vieillis et rupture monofissurée pour les échantillons ayant subi les cycles de vieillissement.



**Figure I.22 :** Effet des cycles de vieillissement sur le comportement mécanique en flexion 3 points de ciment renforcé par des fibres de conifères [Magniont 2010]

### I.5.3.2. Durabilité des fibres végétales en milieu alcalin

Le premier mécanisme expliquant la perte de ductilité des composites fibrés par des fibres végétales est la dégradation de ces fibres dans le milieu alcalin de la matrice. Afin d'étudier ce phénomène, plusieurs auteurs ont suivi les propriétés de fibres végétales immergées dans différentes solutions alcalines.

Juarez *et al.* [Juarez 2007] ont mesuré la résistance en traction et l'allongement à la rupture des fibres d'agave immergées dans une solution de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à pH 12.5. Après 12 mois d'immersion, les fibres conservent environ 30% de leur résistance à la traction initiale et seulement 17 à 27% de leur ductilité.

Toledo *et al.* [Toledo Filho 2000] ont comparé l'effet de l'immersion de fibres de sisal et de coir dans de l'eau à pH 8.3, du  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à pH 12 et du NaOH à pH 11 afin de distinguer d'une part l'effet du pH et d'autre part celui de la présence des ions calcium sur la durabilité des fibres végétales :

- après 210 jours d'immersion dans la solution d'hydroxyde de calcium, la résistance en traction résiduelle des fibres de sisal et de coco représente respectivement 33.7 et 58.7% de leur résistance initiale ;

- après immersion dans la solution de soude, les résistances résiduelles sont nettement plus élevées, à savoir 72.7 et 60.9 % de la résistance initiale après 420 jours d'immersion.

Cette différence est attribuée par l'auteur à la cristallisation de chaux dans les pores des fibres immergées dans la solution d'hydroxyde de calcium ce qui affecte leur résistance en traction.

Cette hypothèse avait déjà été faite par Gram [Gram 1983] qui relève une action spécifique des ions calcium par rapport à l'immersion de fibres dans des solutions d'hydroxyde de sodium ou de potassium.

Des expériences comparables ont été menées par Krikeret al. [Kriker 2008] sur des fibres de palmier dattier. Les résistances résiduelles après 6 mois d'immersion sont légèrement plus élevées pour la solution de NaOH que pour celle de  $\text{Ca(OH)}_2$ . De plus, l'auteur identifie, par observation des fibres au microscope électronique à balayage, deux modes d'action distincts de dégradation. Tandis que l'attaque par le  $\text{Ca(OH)}_2$  semble diffuse et relativement uniforme (la fibre est recouverte entièrement d'un dépôt de  $\text{Ca(OH)}_2$ , qui pénètre dans tous les pores de la fibre), l'attaque par NaOH est localisée (des trous apparaissent à la surface des fibres, et des dépôts sont visibles localement)

La perte de résistance dépend certes de la solution agressive mais également des propriétés intrinsèques des fibres. Ainsi, Krikeret al. [Kriker 2008] mettent en évidence le fait que plus le diamètre de la fibre est faible, plus la chute de résistance est intense. Ramakrishna et al. [Ramakrishna 2005], comparent les effets de l'immersion ou de la soumission à des cycles humidification/séchage

dans de l'eau, du  $\text{Ca(OH)}_2$  ou du NaOH sur les propriétés de fibres de coir, sisal, jute et *Hibiscus cannabinus*. Les résultats obtenus sont relativement différents en fonction de la nature des fibres :

- Le mode de dégradation le plus agressif semble être les cycles d'humidification/séchage avec la solution d'hydroxyde de calcium, pour laquelle, à l'issue de 30 cycles, les fibres de sisal, jute et *Hibiscus cannabinus* sont totalement détruites. Pourtant, avec ce même mode d'attaque, les fibres de coir conservent entre 20 à 40% de leur résistance originale.

- Le résultat de l'immersion dans l'eau dépend également du type de fibres. Les fibres de coir et de sisal conservent respectivement 50 à 60% et 60 à 70% de leur résistance initiale, tandis



que les fibres de jute et d'*Hibiscus cannabinus* ne conservent au maximum que 20% de leur performance initiale. L'auteur attribue la perte de résistance par immersion dans l'eau pure à une action microbiologique ;

- Enfin, l'auteur met en évidence une chute substantielle de la teneur en cellulose (de 20 à 85%) et de l'hémicellulose (de 30 à 70%) des différentes fibres soumises aux différents traitements.

La dégradation des fibres en milieu alcalin serait donc due à la dissolution partielle ou totale de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine qui les composent.

D'après Gram [Gram 1988] la décomposition de la cellulose en milieu alcalin intervient suivant deux phénomènes :

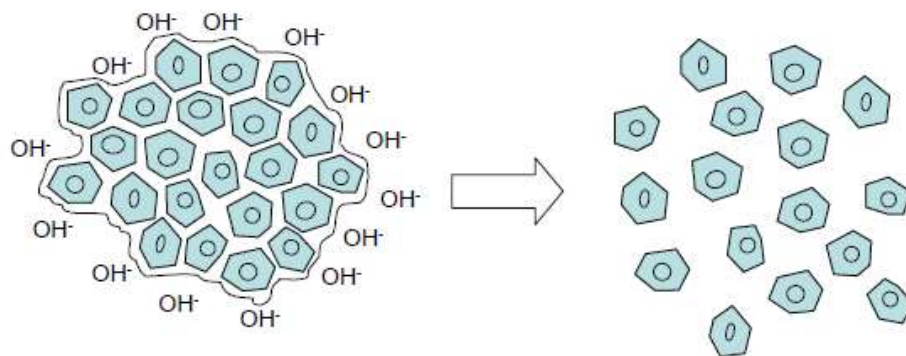
- Le « peeling-off » qui concerne les extrémités des chaînes moléculaires, constituées de groupes réducteurs qui réagissent avec les ions OH<sup>-</sup> de la solution basique. Cette réaction conduit à la formation d'acides isosacchariniques (CH<sub>2</sub>OH) qui se détachent de la chaîne. Ce mécanisme ne s'attaquant qu'aux extrémités des chaînes il sera par conséquent d'autant moins dangereux que le degré de polymérisation de la cellulose sera élevé ;

- L'hydrolyse alcaline qui entraîne la division de la chaîne moléculaire et la diminution du degré de polymérisation, conduisant à une plus grande sensibilité au premier mécanisme. Cependant, l'hydrolyse alcaline n'intervient à un fort taux qu'à partir d'une température de 100°C.

La décomposition de l'hémicellulose se fait suivant les mêmes mécanismes que ceux précédemment décrits, mais son degré de polymérisation étant faible, le mécanisme de « peeling-off » devient prépondérant.

La lignine est constituée de composés aromatiques facilement dégradés dans un environnement alcalin.

Pour Gram [Gram 1988], la première cause de dégradation des fibres de sisal (sur lesquelles est basée son étude) est donc la décomposition chimique de la lignine et de l'hémicellulose de la lamelle mitoyenne. Dans un milieu alcalin, la liaison entre les fibres individuelles est brisée comme l'illustre la Figure I.23. [Gram 1988] relève également que le lumen, vide central des fibres de sisal, est rempli d'hydroxyde de calcium et perd ainsi sa flexibilité.



**Figure I.23:** Représentation schématique de la décomposition des fibres de sisal en milieu alcalin [Magniont 2010]

Les résultats des travaux de Sedan [Sedan 2007] sur les fibres de chanvre diffèrent sensiblement puisque, si la concentration en hémicellulose des fibres soumises à des traitements alcalins ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et  $\text{NaOH}$ ) diminue effectivement, en revanche la teneur en lignine n'est pas modifiée.

En outre, les analyses thermiques différentielles réalisées dans cette étude révèlent une forte interaction entre la pectine et le calcium. Par ailleurs, l'auteur relève une augmentation du degré de cristallinité de la cellulose par traitement alcalin au  $\text{NaOH}$ , qu'il traduit par une solubilisation partielle des parties amorphes des fibres (cellulose amorphe, hémicellulose, graisses et cires). Pourtant, il observe qu'un traitement des fibres par une solution alcaline de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  induit, au contraire, une légère diminution du degré de cristallinité de la cellulose.

L'effet de la solution de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  présente donc des spécificités par rapport aux autres solutions d'immersion : d'une part, Sedan [Sedan 2007] détecte par diffraction de rayons X le pic caractéristique de la calcite sur les fibres. D'autre part, il met en évidence, par dosage, une quantité importante de calcium fixée à la surface des fibres (phénomène non observé lorsque les fibres sont immergées dans une solution de chlorure de calcium). Ces observations confirment donc l'interaction entre les fibres de chanvre et les ions calcium en milieu basique. Cité par [Magniont 2010]

La bibliographie met donc en évidence une chute de la résistance et de la ductilité des fibres végétales en milieu alcalin par décomposition partielle de ses constituants et en particulier de la lignine et de l'hémicellulose constituants de la lamelle mitoyenne. De plus, l'immersion dans une solution d'hydroxyde de calcium induit une dégradation plus intense des fibres du fait de la précipitation d'hydroxydes ou de carbonates de calcium à la surface ou dans les

pores des fibres ce qui entraîne leur rigidification et donc leur fragilisation. Cependant ces phénomènes sont largement dépendants de la nature des fibres végétales considérées.

### I.5.3.3. Phénomènes aux interfaces fibres/matrice

Le phénomène de fragilisation des fibres végétales en milieu basique n'explique pas à lui seul les pertes de performances au cours du temps des composites renforcés par ces fibres. Ainsi, plusieurs auteurs attribuent la perte de ductilité au cours du temps à la modification de la zone de transition existant autour des fibres [Magniont 2010]. Cette zone, décrite par de nombreux auteurs ([Toledo Filho 2000],[Savastano 1999], [Mac Vicar 1999]) est large de 50 à 100 micromètres environ. Elle est plus poreuse et plus fissurée que le reste de la matrice.

Toledo *et al.* [Toledo Filho 2000] associent la rupture ductile du composite aux faibles performances mécaniques de cette zone qui peut aisément rompre ou se fissurer.

D'après Savastano *et al.* [Savastano 1999], cette zone de transition se formerait lors du gâchage et serait due au fort coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales qui engendrerait un mouvement d'eau de la pâte à l'état frais vers les fibres, ce qui induirait ensuite une porosité plus élevée de la pâte durcie dans cette zone. L'auteur confirme cette hypothèse grâce à des analyses EDS qui révèlent la présence préférentielle de macrocristaux de portlandite dans cette zone attribuée à la plus grande mobilité des ions calcium en phase aqueuse.

Au cours du temps et/ou après avoir subi plusieurs cycles de vieillissement, cette zone se densifie et les fibres subissent un phénomène de minéralisation par pénétration des produits d'hydratation dans leurs ports ou leur lumen. Cette zone se rigidifie, les fibres perdent leur flexibilité et leur capacité de déformation, ce qui expliquerait la perte de ductilité du composite d'une part et l'amélioration de la résistance à la première fissure d'autre part.

Par analyse EDS, la migration des produits d'hydratation, et en particulier des ions calcium dans les fibres de coco, est confirmée par Toledo *et al.* [Toledo Filho 2000].

Les cycles d'humidification/séchage favorisent ce phénomène en accélérant le transport des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  vers les fibres alors qu'il reste très lent en conditions de température et d'humidité relative constantes [Gram 1988]. La carbonatation de la matrice semble également se traduire par une densification de cette zone ([Soroushian 1994], [Mac Vicar 1999]). Cependant, ce phénomène dépend de la nature de la matrice puisque Savastano *et al.*

[Savastano 2002], qui travaillent avec une matrice aux laitiers, suggèrent, au contraire, une augmentation de la porosité et une baisse des performances de la matrice du fait de sa carbonatation.

Benturet *al.* [Bentur 1989] distinguent trois modes de rupture et identifient l'influence de la carbonatation sur ce mécanisme :

- Mode 1 : Les échantillons non vieillis rompent par arrachement des fibres de la zone de transition poreuse constituée principalement de C-S-H, il s'agit d'une rupture ductile ;
- Mode 2 : Les échantillons vieillis par des cycles d'humidification/séchage présentent à la fois des fibres arrachées et des fibres cassées dont la section est creuse. La matrice autour des fibres est dense. Il s'agit d'un mode de rupture fragile mais sans minéralisation des fibres ;
- Mode 3 : Les éprouvettes vieillis par des cycles d'humidification/séchage en ambiance riche en CO<sub>2</sub>, présentent également une rupture fragile, mais la majorité des fibres est cassée et leur section est remplie de produits d'hydratation denses, elles sont pétrifiées.

Les propriétés du composite sont corrélées avec le mode de rupture, dans tous les cas les auteurs notent une chute de la ductilité, mais, pour les fibres pétrifiées en ambiance riche en CO<sub>2</sub> (mode 3), ils relèvent des augmentations de la résistance à la première fissure et du module d'élasticité tandis que pour les fibres creuses (mode 2), ces propriétés diminuent également.

Ils associent cette chute aux variations volumiques des fibres qui induisent la fissuration et donc l'affaiblissement de la matrice (hypothèse formulée également par Savastano *et al.* [Savastano 1999] et [Savastano 2002]). Cependant, dans le cas de la matrice carbonatée, l'hypothèse que la précipitation des hydrates dans les zones poreuses et en particulier dans les pores des fibres inhibe le phénomène de variations volumiques de ces dernières et limite donc la chute de performance de la matrice.

D'après Mohret *al* [Mohr 2005] ces phénomènes peuvent être successifs. Dans un premier temps, les variations volumiques des fibres consécutives aux cycles d'humidification/séchage engendreraient une perte d'adhérence entre les fibres et la matrice. Dans un second temps, la reprécipitation des produits d'hydratation à faible résistance (ettringite secondaire) dans la porosité créée par la première étape contiendrait les variations volumiques des fibres lors des

cycles suivants. Enfin, la troisième étape correspondrait à la fragilisation des fibres par minéralisation ce qui entrainerait une légère augmentation de la résistance à la première fissure mais une diminution de la ténacité et un mode de rupture fragile des fibres.

La modification à long terme des propriétés des composites renforcés par des fibres végétales résulte donc de la combinaison de différents mécanismes qui modifient les propriétés de la zone de transition située à l'interface pâte/fibre. Les variations volumiques des fibres auront tendance à affaiblir cette zone, et de ce fait les propriétés de la matrice, mais le composite conservera un comportement ductile et un mode de rupture par arrachement des fibres. Au contraire, la précipitation d'hydrates dans cette porosité ou directement dans les pores des fibres (phénomène favorisé par les cycles d'humidification/séchage combinés à une carbonatation accélérée) conduira à la densification de la matrice et à la pétrification des fibres. La résistance à la première fissure sera dans ce cas augmentée, mais la rupture sera de type fragile avec rupture des fibres.

#### **I.5.3.4. Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites renforcés par des fibres végétales**

Différents travaux ont été réalisés afin de pallier à la dégradation des composites à base de fibres végétales. On peut distinguer deux familles de solutions, soit par modification des propriétés des fibres (par imprégnation avec des agents bloquants ou traitants), soit en diminuant l'agressivité de la matrice envers les fibres. [Magniont 2010]

##### **I.5.3.4.1. Traitement des fibres**

Etant donné les problèmes rencontrés avec l'utilisation de particules végétales en complément d'une matrice minérale, de nombreuses études ont été menées dans le but de modifier certaines de leurs caractéristiques avant l'élaboration de composites. La plupart des traitements ont pour but de limiter le comportement hydrophile du végétal et le relargage d'extractibles. L'objectif peut également être de modifier la surface des particules végétales.

###### **I.5.3.4.1.1. Traitement chimique**

La plupart des traitements chimiques utilisés jusqu'à présent pour modifier les fibres végétales consistent en une trempe dans une solution alcaline ou d'une estérification. Ces techniques agissent généralement en profondeur et conduisent dans la plupart des cas à une

destruction partielle de la structure des particules végétales. Toutefois, des traitements en solution neutre existent également.

#### **I.5.3.4.1.1.a. Traitement à l'hydroxyde de sodium**

Le traitement le plus étudié sur les fibres végétales est le traitement alcalin, et en particulier à la soude (NaOH). Le traitement des fibres végétales avec de l'hydroxyde de sodium conduit à un changement de leur structure [Van de Weyenberg 2006]. Sedan a étudié l'effet du traitement à l'hydroxyde de sodium sur les fibres de chanvre en vue d'une incorporation dans une matrice cimentaire [Sedan 2007]. Ce traitement a été réalisé avec une concentration massique de 6 %. Une fois traitée, les fibres ont été rincées à l'eau afin de retirer l'excès de NaOH. Sedan a constaté une augmentation de 39 % de la résistance en flexion par rapport à un composite incorporant des fibres non traitées. L'auteur explique ces résultats par le fait que la soude a dégradé les impuretés, les hémicelluloses et les graisses à la surface de la fibre. Les fibres de chanvre sont donc plus homogènes, ce qui améliore leur adhérence avec la matrice. Par ailleurs, Le Troedec, qui a également travaillé sur le traitement des fibres de chanvre avec l'hydroxyde de sodium, a constaté une augmentation de l'indice de cristallinité de près de 45 % [Le Troedec 2008]

De plus, Toledo Filho *et al.* ont testé des fibres de sisal et de noix de coco immergées dans une solution de NaOH [Toledo Filho 2000]. Après 420 jours d'immersion, les fibres ont conservé respectivement 73 % et 61 % de leur résistance en traction initiales. Les fibres végétales n'ont donc pas été fortement altérées par la solution d'hydroxyde de sodium.

Récemment, Chafei *et al.* ont utilisé la soude (6 % de concentration) pour traiter des fibres courtes de lin en vue d'une incorporation dans un mortier [Chafei 2014]. L'absorption d'eau par les fibres de lin est légèrement diminuée par ce traitement (11 %) (Figure I.24). L'auteure explique ce résultat comme une conséquence de la réduction du taux d'hémicelluloses par le traitement. La résistance en flexion à 90 jours du mortier renforcé par des fibres de lin non traitées avait la même valeur que le mortier non fibré. Cependant, le mortier renforcé par des fibres traitées à l'hydroxyde de sodium avait montré une résistance en flexion supérieure de 30 % au bout de 90 jours. La résistance en traction d'une fibre unitaire de lin a également été augmentée suite au traitement à la soude. Selon les auteurs, l'hydroxyde de sodium a permis d'éliminer une grande partie des pectines et lignines présentes entre les microfibrilles, ce qui facilite le transfert des efforts entre elles.

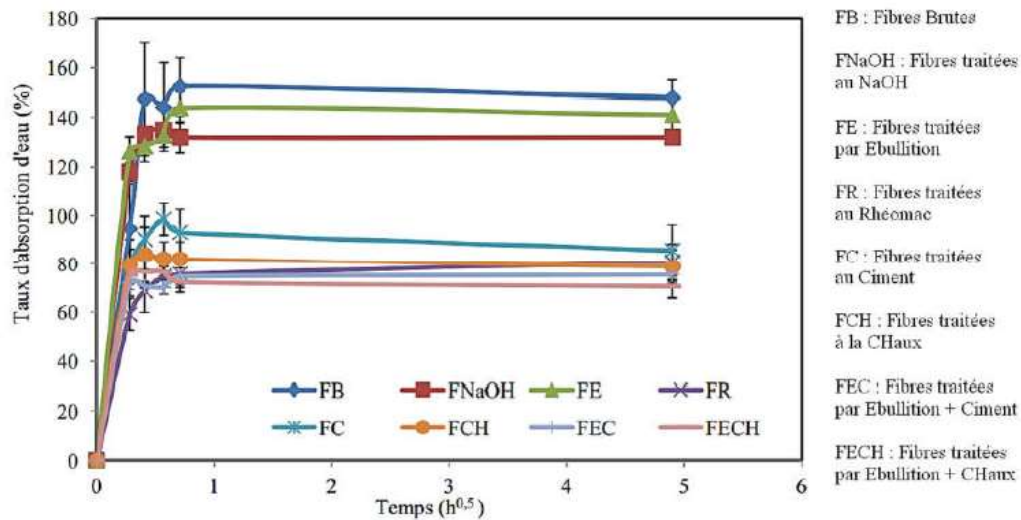
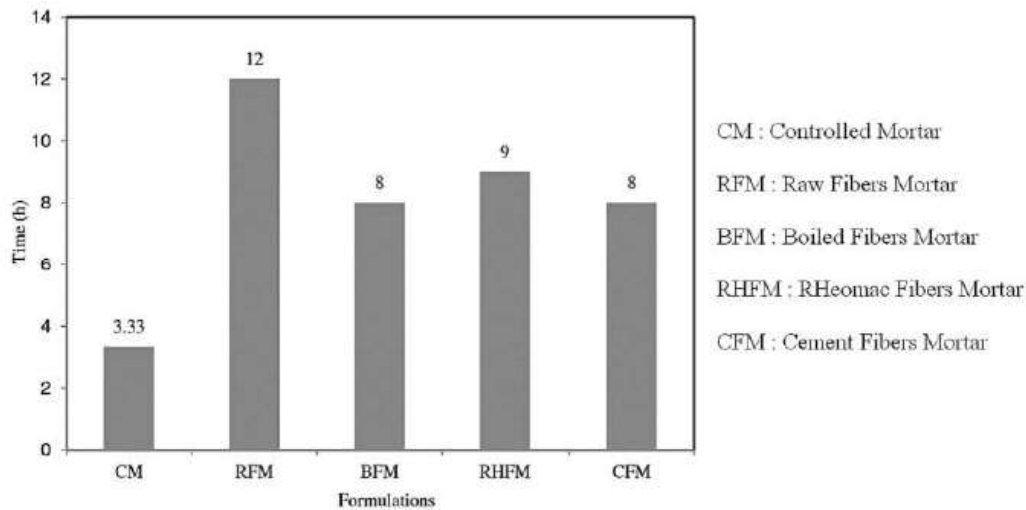


Figure I.24 : Absorption d'eau des fibres de lin avec ou sans traitement [Chafei 2014]

#### I.5.3.4.1.1.b. Traitement à l'eau bouillante

Sellamiet *al.* ont évalué l'effet d'un traitement à l'eau bouillante de fibres de Diss sur les propriétés mécaniques d'un mortier incorporant ce renfort [Sellami 2013]. Ce traitement consistait à ôter les extractibles par distillation dans l'eau. Ils ont noté une forte amélioration de la résistance à la flexion du composite de fibres traitées en comparaison avec celui de fibres brutes.

Chafeiet *al.* ont également fait un traitement à l'eau bouillante, sur des fibres de [Chafei 2015]. Les fibres bouillies présentent une capacité d'absorption d'eau similaire aux fibres non traitées (Figure I.23). Cependant, les composites élaborés avec ces fibres traitées présentent des améliorations à plusieurs niveaux. Tout d'abord, la maniabilité a été améliorée avec une diminution du temps d'écoulement au maniabilimètre de 33 % (Figure I.25). De plus, la résistance en flexion du composite a été améliorée de 30 %. Pour finir, le temps de prise du composite est passé de 12 heures pour les fibres non traitées à 8 heures pour les fibres traitées. Toutefois, ce temps reste supérieur à celui du mortier non fibré, qui est de 3 heures et 20 minutes.



**Figure I.25** : Temps d'écoulement au maniabilimètre de mortiers renforcés de fibres de lin brutes ou traitées [Chafei 2015]

#### I.5.3.4.1.1.c. Traitement à l'hydroxyde de calcium

Ce traitement consiste à immerger, pendant une certaine durée, les particules végétales dans une solution saturée de chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Les objectifs de ce traitement sont : d'extraire les polysaccharides, de minéraliser la surface, et de capturer les ions calcium dans la structure despectines. Sedan et Le Trodec ont testé ce traitement sur des fibres de chanvre (Le Trodec, 2009; [Sedan 2007]). Pour ces deux recherches, le traitement à l'hydroxyde de calcium a provoqué une diminution importante de la résistance en flexion du composite cimentaire dès 28 jours de cure. D'après Le Trodec, cette perte peut être expliquée par la création d'une zone intermédiaire entre la fibre et la matrice, suite au dépôt de calcium sur celles-ci.

Cette zone entraînerait une mauvaise adhésion à l'interface fibre/matrice, ce qui générerait une fissuration prématurée du composite. Une autre étude a été menée par Nozahicet al. cette fois sur de la chènevotte (anas de chanvre) traitée avec une solution saturée de chaux (40 g.L<sup>-1</sup>) (Nozahic, 2012). Le traitement à la chaux a effectivement permis d'éliminer une partie des polysaccharides présents en surface des particules, mais aussi de déposer des clusters de carbonates sur les surfaces des particules. L'effet de ce traitement sur la chènevotte n'a fait que très peu varier le comportement hygroscopique. Un test d'arrachement a souligné l'aptitude du traitement à la chaux à améliorer l'adhésion entre les particules végétales. Toutefois, les résistances mécaniques des bétons de chanvre contenant des particules traitées ont déchu de manière très importante.



#### **I.5.3.4.1.1.d. Estérification**

L'estérification est un procédé souvent utilisé pour les composites polymères. La réaction d'estérification avec l'anhydride acétique est appelée acétylation, et est à ce jour la plus étudiée. Le traitement des fibres avec l'anhydride acétique est une méthode efficace pour réduire le caractère hydrophile de fibres de cellulose [Hill 1998]. L'anhydride acétique permet de réduire l'énergie de surface de la fibre pour la rendre non-polaire [Zafeiropoulos 2002]. Des liaisons acétate sont formées par réaction de l'anhydride acétique. Les groupes OH de la surface des fibres ne sont donc plus libres pour réagir avec d'autres groupes, tels que les groupes hydroxyles de l'eau. Khazma et al., ont procédé à une acétylation sur des anas de lin en vue d'une incorporation dans un composite cimentaire [Khazma 2008]. La résistance en flexion a été fortement améliorée. Toutefois, la résistance en flexion du composite d'anas non traités semble très faible en comparaison. De plus, l'absorption d'eau par les anas a été fortement réduite : 67 % par rapport aux anas nonestérifiés.

#### **I.5.3.4.1.2. Traitement thermique**

Les traitements thermiques de réification sont régulièrement appliqués sur le matériau bois. La réification consiste à réaliser une pyrolyse contrôlée sous atmosphère inerte, ce qui confèrera au bois de nouvelles propriétés, notamment une stabilité dimensionnelle plus importante [Boustingorry 2002]. Selon cet auteur, il existe une température optimale, qui varie selon l'essence étudiée. Dans son cas, pour le bois de pin, la température doit être comprise entre 200 et 280°C. Bilba et al. notent après un traitement par pyrolyse de fibres de bagasse, une diminution de la quantité d'hémicellulose et d'extractibles [Bilba 2008]. Malgré une augmentation de la porosité de 6 %, la fibre devient plus hydrophobe après traitement en raison de la disparition d'une partie des hémicelluloses, aux propriétés hydrophiles et de gonflement importants.

#### **I.5.3.4.1.3. Traitement par enrobage minéral**

L'enrobage minéral des granulats ou fibres lignocellulosiques peut être effectué en utilisant le ciment ou la chaux hydraulique. Khazma et al. [Bilba 2008] ont effectué un revêtement ciment + sucre sur des anas de lin avec des rapports massique eau/(ciment + sucre) = 1 et anas/(ciment + sucre) = 2/3. Le recouvrement est limité selon les auteurs à la surface des particules, les pores du végétal n'étant pas comblés. Ils observent une large augmentation de la masse volumique en vrac qui passe de 96- 103 kg.m<sup>-3</sup> pour les granulats bruts à 255-283

kg.m<sup>-3</sup> pour ceux revêtus. De la même manière, ils observent une diminution de 73% de l'absorption d'eau. De plus, une forte augmentation de la résistance en flexion du composite cimentaire a été constatée.

Dans une étude visant à améliorer la ténacité d'un composite cimentaire incorporant des fibres longues de sisal, Toledo Filho *et al.* proposent d'enrober les fibres de sisal avec des particules de fumée de silice pour créer une zone de faible alcalinité autour d'elles, dans le but d'éviter ou de réduire leur dégradation par attaque alcaline. Ce traitement a bien amélioré la résistance à la flexion du composite ainsi que sa ténacité. Les auteurs observent également une durabilité accrue du composite puisque qu'après 322 jours, la résistance a été conservée et est même légèrement supérieure à celle du composite aux fibres non traitées.

Récemment, Chafei a étudié l'influence de l'enrobage à la chaux et au ciment de fibres de lin pour être utilisées comme renfort d'un composite cimentaire [Chafei 2014]. L'enrobage au ciment et à la chaux ont tous deux permis de diminuer l'absorption d'eau des fibres de lin d'environ 50 %. La résistance en flexion du composite à 90 jours a été améliorée pour les fibres de lin enrobée de ciment d'environ 15 %. [Chafei 2014] attribue cette augmentation de résistance à une meilleure adhérence fibre/matrice. En effet, l'absorption des fibres ayant été fortement réduite, la probabilité d'apparition de cavités entre la fibre et la matrice est beaucoup plus faible. Cependant, les performances obtenues avec l'enrobage à la chaux sont décevantes. En effet, la résistance en flexion du composite est bien en deçà de celle du composite non fibré, et ce dès 7 jours d'âge. La maniabilité des composites à l'état frais a également été améliorée grâce à l'enrobage des fibres de lin au ciment, avec un temps d'écoulement au maniabilimètre diminué de 33 % (Figure I.25).

L'auteur attribue cette amélioration à la diminution de l'absorption des fibres de lin.

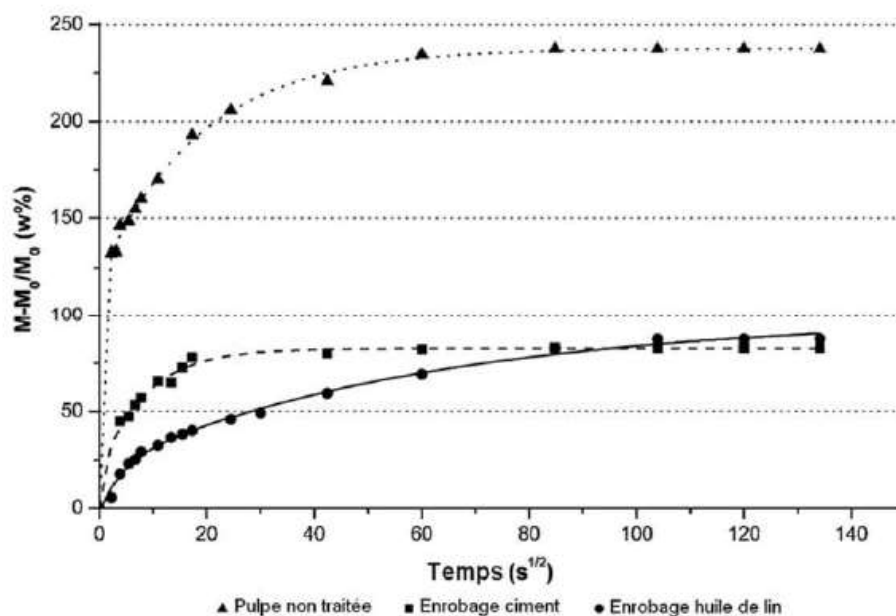
Monlmrealet *al.* se sont intéressés à la pulpe de betterave issue de l'industrie sucrière pour une utilisation en mélange avec le ciment [Monreal 2011]. Le ciment a été utilisé avec un rapport eau/ciment = 1, le rapport pulpe/liant étant fixé à 0,8. Ils observent également une large augmentation de la masse volumique en vrac qui atteint 300 kg.m<sup>-3</sup>. L'absorption d'eau de la pulpe de betterave a fortement diminuée grâce à l'enrobage au ciment puisqu'elle passe de 240 % pour la pulpe non traitée, à environ 80 % (Figure I.26).

#### I.5.3.4.1.4. Traitement par enrobage organique

Toujours dans le but d'isoler la fibre ou le granulat végétal du milieu cimentaire, une autre solution consiste à l'enrober par un polymère acrylique ou une huile polymérisée.

##### I.5.3.4.1.4.a. Enrobage à l'huile de lin

L'huile de lin est réputée être un bon moyen pour diminuer le caractère hydrophobe des particules végétales. Celle-ci est couramment utilisée comme traitement hydrofuge pour les bardages en bois. De plus, l'huile de lin a l'avantage d'être très intéressante d'un point de vue environnemental. Monreal *et al.* Se sont aussi intéressés au recouvrement de la pulpe de betterave avec de l'huile de lin [Monreal 2011]. Ils ont noté une forte diminution de l'absorption d'eau de la pulpe de betterave, passant de 240 % pour la pulpe non traitée, à environ 90 % pour la pulpe enrobée d'huile de lin (Figure I.26).



**Figure I.26:** Influence de recouvrements au ciment et à l'huile de lin sur la capacité d'absorption en eau de granulats de pulpe de betterave [Monreal 2011].

[Monreal 2011] L'huile de lin comme enrobage de particules végétales a été étudiée par plusieurs autres auteurs, avec de nombreuses fibres différentes :

- Anas de lin [Khazma2014] ;
- Fibres de diss [Merzoud 2007]; [Sellami2013];
- Chènevotte et granulat de tournesol [Nozahic 2012];
- Fibre d'agave [Juarez 2007];
- Fibres de lin [Lazko 2011].

Des conclusions générales peuvent être tirées de ces différentes études sur l'utilisation d'huile de lin comme substance d'enrobage de fibres ou granulats lignocellulosiques. L'acide linoléique contenu dans l'huile de lin possède la propriété de polymériser au contact de l'oxygène de l'air pour donner un acide oxylinoléique [Abraham 1996]. Cette forte siccativité explique son utilisation courante comme revêtement de surface pour imperméabiliser le bois. Cependant, cette polymérisation nécessite un temps minimum de cure pour opérer d'une vingtaine de jours environ [Lazko 2011]. Dans toutes ces différentes études, l'huile de lin a permis de réduire fortement, c'est-à-dire de plus de 50 %, l'absorption d'eau des particules végétales. Plusieurs études ont ensuite testé en flexion les composites cimentaires incorporant ces fibres traitées [Juarez 2007; Khazma 2008; Merzoud 2011; Sellami 2013]. Dans ces différents cas, la résistance à la flexion du composite a été améliorée par ce traitement, dans des proportions variables.

#### **I.5.3.4.1.4.b. Enrobage à la paraffine**

Dans le cadre d'une étude concernant l'élaboration d'un béton avec des granulats de tournesol, Nozahic *et al.* ont étudié le traitement de ces granulats par enrobage à la cire de paraffine [Nozahic 2012]. La paraffine a été utilisée avec un ratio massique cire/tournesol égale à 0,5. L'enrobage des granulats avec la paraffine a eu pour conséquence d'augmenter fortement la densité des granulats. En effet, le facteur de recouvrement est égal à 1,46. Après observation au MEB, les auteurs ont constaté un enrobage complet et homogène de la paraffine sur les granulats de tournesol. L'absorption d'eau des granulats de tournesol est passée de 404 % à 220 % (après correction de la densité). Un test d'arrachement a souligné l'aptitude de cet enrobage à améliorer l'adhésion entre les particules végétales. En effet, on peut observer une augmentation de 67 % de la contrainte de cisaillement pour l'essai d'arrachement. Juarez *et al.*, se sont également intéressés à la paraffine pour diminuer la sensibilité des fibres d'agave à l'environnement alcalin. Les auteurs notent que la paraffine se révèle efficace pour diminuer l'absorption d'eau des fibres (-37 % par rapport aux fibres non traitées) et leur perte de résistance (maintien de 53 % de la résistance initiale contre de la résistance initiale contre environ 31 % pour les autres traitements). Le même constat vaut pour la ductilité puisque l'allongement à la rupture des fibres traitées avec de la paraffine représente 47 % de la valeur initiale.

#### **I.5.3.4.1.4.c. Enrobage par un copolymère acrylique fluoré**

Une autre solution permettant de diminuer le caractère hydrophile des fibres végétales est d'utiliser un hydrofuge issu de l'industrie chimique. Chafei a choisie d'étudier l'influence de l'hydrofuge Rhéomac (BASF) sur les fibres de lin [Chafei 2015]. Cet hydrofuge est normalement utilisé pour protéger le béton vis-à-vis de l'eau. La résistance en traction des fibres unitaires de lin a légèrement diminué, passant de 849 MPa à 818 MPa. Etant donné les écart-types généralement obtenus pour la résistance en traction des fibres de lin (de l'ordre de 400 à 500 MPa), cette différence n'est pas significative. Cependant, l'absorption d'eau des fibres a diminué de 47 %. La maniabilité du composite a également été améliorée puisque le temps d'écoulement au maniabilimètre est passé de 12 secondes (pour le mortier à fibres brutes) à 9 secondes (Figure I.25). L'auteure attribue cette amélioration du comportement rhéologique à la diminution significative de l'absorption des fibres de lin traitées au Rhéomac (Figure I.24). La résistance en flexion des composites à 28 jours a été augmentée de près de 20 % grâce à l'enrobage des fibres au Rhéomac.

Dans le cadre d'une étude sur le béton de chanvre, Chamoin s'est intéressé au traitement de la chènevotte par un copolymère acrylique fluoré [Chamoin2013]. L'auteur a testé deux protocoles de traitement pour la chènevotte : le premier consistait en une immersion simple des granulats de chanvre ; le second consistait en une immersion sous vide. Pour ces deux protocoles, différentes concentrations massiques de polymères ont été testées : 2, 5, 10, 15 et 20 %. Pour l'immersion simple, le polymère a permis de réduire l'absorption d'eau jusqu'à 27 %, pour une concentration en polymère de 20 %. Pour l'immersion simple, il y a une relation quasi-linéaire entre la diminution de l'absorption d'eau et la concentration en polymère. Pour l'immersion sous vide, la diminution de l'absorption d'eau est toujours comprise entre 22 et 25 %. Dans ce cas, la concentration n'a quasiment pas d'influence sur la mouillabilité des particules végétales. L'auteur a pu observer au MEB les chènevottes traitées selon les deux protocoles. Il a remarqué une meilleure pénétration du polymère pour le traitement sous vide, ce qui est en accord avec les résultats reportés précédemment.

#### **I.5.3.4.2. Modification de la matrice**

La deuxième option envisagée par les chercheurs pour améliorer le comportement à long terme des composites renforcés par des fibres végétales consiste à transformer la matrice afin de réduire son agressivité envers celles-ci. Comme nous l'avons vu précédemment, cette

agressivité est en partie liée au pH fortement basique du milieu interstitiel et à la présence d'hydroxyde de calcium amené à diffuser vers les fibres et à y reprécipiter en causant leur minéralisation.

Différents auteurs ont donc choisi de substituer une partie de la matrice cimentaire par des pouzzolanes afin de réduire son alcalinité.

Gram [Gram 1988] a testé la substitution partielle du ciment par de la fumée de silice, des laitiers, des cendres volantes ou encore des pouzzolanes naturelles comme les cendres de balles de riz ou la diatomite. Les meilleurs résultats sont obtenus par substitution de 45% du ciment par de la fumée de silice, dans ce cas la fragilisation est évitée.

Soroushian *et al.* [SOR94] trouvent également que la substitution de 30% du ciment par de la fumée de silice permet de contrôler efficacement les mécanismes de vieillissement pour des échantillons soumis à des cycles d'humidification-séchage-carbonatation. Il attribue ce résultat à la réduction du pH de la matrice, à la diminution de la teneur en  $\text{Ca(OH)}_2$  et à sa plus faible perméabilité.

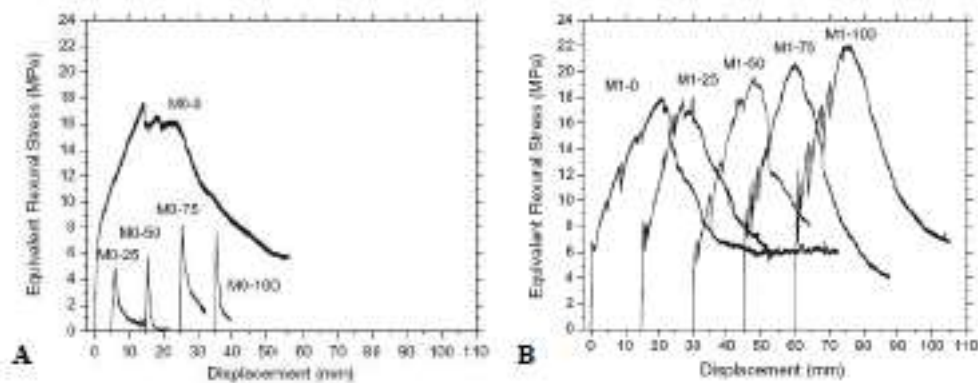
L'utilisation des ciments alumineux [Gram 1983] et des pouzzolanes naturelles permet également de diminuer la dégradation. En revanche les laitiers et les cendres volantes n'apportent pas d'amélioration notable de la durabilité.

Ces résultats sont confirmés par Toledo *et al.* [Toledo Filho 2003] qui notent que la substitution de 10% du ciment par de la fumée de silice induit un maintien des propriétés des composites soumis à différents cycles de vieillissement. Les laitiers (substitution de 40% du ciment) ne permettent en revanche aucune réduction de la dégradation des fibres, les auteurs attribuant ce résultat à la trop faible réduction de l'alcalinité de la solution interstitielle.

L'inefficacité des laitiers est également mise en évidence par Roma *et al.* [ROM06] qui travaillent sur une matrice substituée à 36% par des laitiers et à 5% par de la fumée de silice, et par Savastano *et al.* [Savastano 2002] dont la matrice composée de laitiers activés par 10% de phosphogypse et 4 % de chaux aérienne ne parvient pas à limiter la chute des propriétés à long terme.

Enfin, afin d'obtenir une matrice sans hydroxyde de calcium, Toledo *et al.* proposent l'utilisation d'un liant composé par 50% de ciment et 50% de métakaolin et de briques

calcinées [Toledo. Filho2009]. La consommation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  par la réaction pouzzolanique permet d'éliminer le phénomène de minéralisation des fibres et de maintenir la ductilité du composite au cours du temps (voir Figure I.27). La résistance maximale augmente même avec le nombre de cycles de vieillissement, l'auteur attribuant ce phénomène aux réactions pouzzolaniques à long terme.



**Figure I.27** : Comportement mécanique en flexion de composites à matrice cimentaire (A) et à matrice pouzzolanique sans hydroxyde de calcium (B) au jeune âge, et après 25, 50, 75 et 100 cycles de vieillissement accéléré [Toledo. Filho 2009]

Outre la substitution d'une partie de la matrice par des additions pouzzolaniques, certains auteurs préconisent de favoriser la carbonatation de la matrice pour améliorer la durabilité des composites.

Grâce à une carbonatation précoce de la pâte en enceinte riche en  $\text{CO}_2$ , Toledo *et al.* [Toledo Filho 2003] obtiennent une amélioration du comportement en flexion.

D'autres auteurs constatent que la carbonatation naturelle ou accélérée de la matrice conduit à une densification du composite, mise en évidence par des réductions de la porosité, de l'absorption d'eau et de la perméabilité [Mac Vicar 1999]. Des résultats comparables sont obtenus par Soroushian *et al.* [Soroushian 1994] et Akers *et al.* [Akers 1989] qui relèvent une augmentation de la résistance en flexion et du module d'élasticité du composite carbonaté.

Cependant, dans ces trois études, la ténacité n'est pas déterminée ou diminue [Soroushian 1994]. C'est pourquoi on peut supposer que la carbonatation entraîne effectivement une densification de la matrice ainsi qu'une minéralisation accrue des fibres [Bentur 1989] ce qui génère une amélioration de la résistance maximale du composite, mais aussi une fragilisation du composite avec une diminution importante de sa ténacité.

Enfin, l'effet de la carbonatation sur les propriétés de la matrice dépend de sa nature. En effet, d'après Savastano *et al.* [Savastano 2002], qui travaillent sur un composite à matrice de laitiers activés par du phosphogypse et de la chaux aérienne, la carbonatation de cette dernière entraîne une diminution de la résistance en flexion, des augmentations de la porosité et de l'absorption d'eau, que les auteurs attribuent à la décomposition de l'ettringite et des C-S-H. Les mesures préventives les plus efficaces pour maintenir les propriétés des composites renforcés par des fibres végétales semblent donc être :

- le traitement préalable des fibres par des agents hydrophobants ou par une boue de fumée de silice,
- la substitution partielle d'une partie du ciment par des additions pouzzolaniques de type fumées de silice ou métakaolin.

### **I.6. Conclusion**

Les fibres végétales semblent donc représenter une alternative prometteuse de renfort de matrice cimentaire par rapport aux fibres synthétiques traditionnelles. Elles ont l'avantage de leur faible coût économique et environnemental.

L'utilisation des fibres végétales en tant que matériau de renforcement dans les composites à matrice cimentaire a pour but d'améliorer le comportement du matériau vis-à-vis de la fissuration et retrait et de lui apporter un comportement mécanique davantage ductile plutôt que fragile. Un béton fibré continue ainsi de supporter les efforts après l'apparition des premières fissures. De plus, les fibres peuvent améliorer la résistance en flexion, en torsion, en cisaillement, aux impacts et à la fatigue. L'amélioration des résistances précédemment citées est fonction du taux, de la nature et de la résistance des fibres utilisées.

Cependant, leur durabilité est relativement mauvaise du fait d'une combinaison de phénomènes qui conduisent à la dégradation des fibres, à leur minéralisation et à la fragilisation du composite. Dans le cas des matrices cimentaires, des mesures permettant d'améliorer ce comportement ont été envisagées, la diminution de l'alcalinité et de la teneur en  $\text{Ca(OH)}_2$  de la matrice par substitution d'une partie du ciment par des additions pouzzolaniques semble particulièrement adaptée.



Dans la suite de nos travaux, nous étudierons donc la possibilité de renforcer un mortier et béton par des fibres d'Alfa, Palmier et Diss, afin d'améliorer les performances en flexion limitées de ce matériau et d'améliorer le retrait. Nous nous attacherons à vérifier la durabilité des fibres dans le milieu alcalin.



## **CHAPITRE II**

---

### **Caractérisation des matériaux utilisés**



---

## II.1.Introduction

Ce chapitre présente les caractéristiques des différents constituants qui seront utilisés dans la composition des matériaux (ciment, granulats et fibres). Ce chapitre détaille la campagne d'essais menés pour caractériser ces matières, à travers leurs propriétés morphologiques et physico-mécaniques.

## II.2. Matériaux de base

Tous les matériaux utilisés dans notre recherche sont de provenance locale. Pour la confection des mélanges nous avons utilisé un ciment, des granulats, de l'eau et des fibres, ce dernier composant est d'ailleurs le seul paramètre variable.

### II.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé de classe CEM II fabriqué par la cimenterie de HADJAR SOUD, conforme à la norme européenne EN 197-1 (EN 197-1 2012) et la norme Algérienne NA 442- 2005. Les caractéristiques physiques et la composition chimique sont données aux tableaux II.1, II.2.

**Tableau II.1 :** Caractéristique du ciment

Caractéristique	Unités	Valeurs
La masse volumique apparente	g/cm <sup>3</sup>	1.530
La masse volumique absolue	g/cm <sup>3</sup>	3.10
Consistance normale	%	28
Début de prise	H /min	2.46
Finesse de mouture Sur tamis 100 µm	%	1.71
Surface spécifique	Cm <sup>2</sup> /g	3726
Résistance à la traction	MPa	7.36
Résistance à la compression	MPa	40.50

**Tableau II.2 :** Composition chimique du ciment (%)

CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	P.A.F	Total
60.24	5.69	23.25	3.36	0.74	0.27	0.45	0.006	1.94	1.67	99.08

### II.2.2.L'eau de gâchage

L'eau introduite dans le mélange va remplir deux fonctions essentielles :

- une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques.
- une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation et donc des résistances mécaniques.

L'eau utilisée dans notre cas est l'eau du robinet provenant de la ville d'Annaba.

### II.2.3.Sable

C'est un sable siliceux, avec une granulométrie plus ou moins fin, cette étude est basée sur un sable de la région d'Annaba, avec un module de finesse égale 2,19.



**Figure II.1** : Sable utilisé

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF P18-560 EN 933-2.

### II.2.4.Gros granulats

Les gros granulats utilisés sont de nature calcaire pure blanc et calcaire cristallin gris, de forme cubique, à angularité réduite et lavé.



**Figure II.2** : Gros granulats

L'ensemble des résultats obtenus pour les caractéristiques physiques sur les trois fractions des granulats sont représentés dans la figure II.3

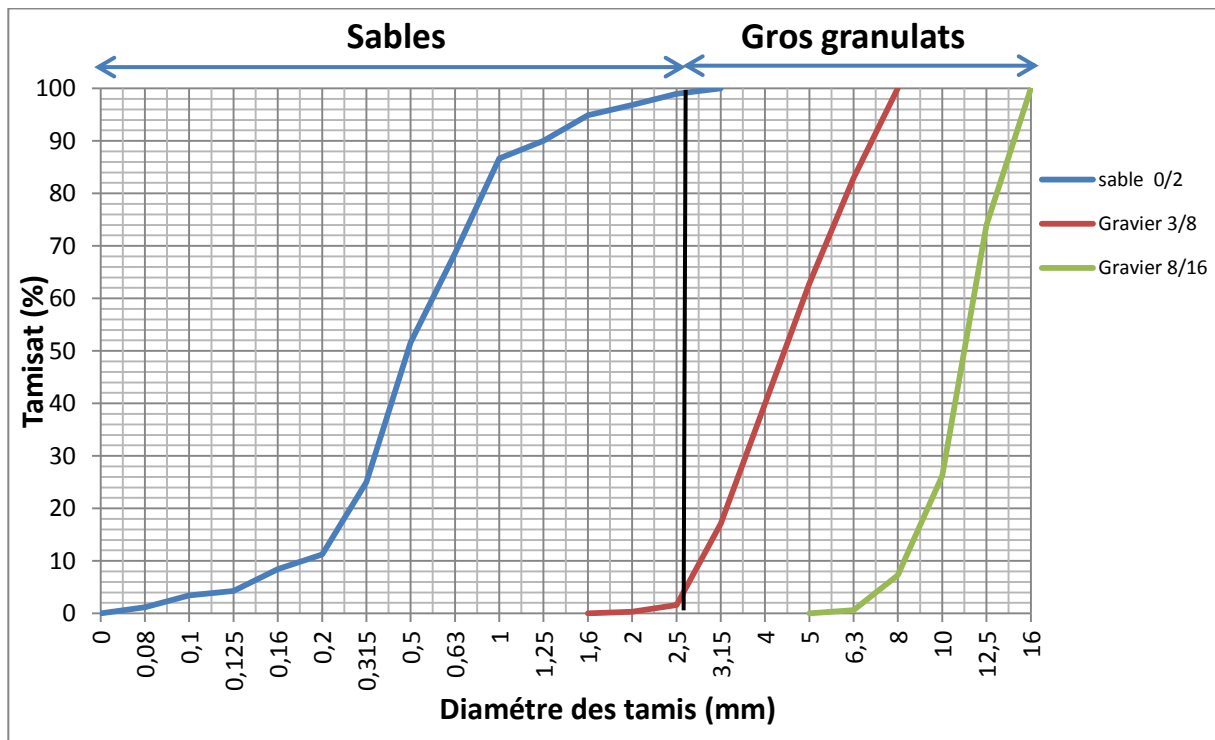


Figure II.3 : Courbe granulométrique des granulats

**II.2.4.1. Les essais physiques**

Pour les essais physiques sur les granulats nous avons utilisé trois échantillons pour chaque type d'essai

**II.2.4.1.a. Masse Volumique Apparente**

La masse volumique apparente des granulats [Mokhtari 2006], c'est la masse à l'état naturel du matériau rapportée à l'unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides, elle est donnée par la formule suivante:

$$\rho_{app} = \frac{M_t}{V_t} \text{ (Kg /m}^3\text{)} \dots\dots\dots \text{II.1}$$

Mt : Masse totale d'échantillon.

Vt : Volume total d'échantillon.

**II.2.4.1.b. Masse Volumique Absolue**

C'est la masse par unité de volume de la matière solide qui constitue les granulats sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains [Mokhtari 2006], elle est donnée par la formule suivante:

$$\rho_{abs} = \frac{M_t}{V_a} \text{ (Kg /m}^3\text{)} \dots\dots\dots \text{II.2}$$

Mt : Masse totale de l'échantillon.

Va : Volume absolu de l'échantillon.

### II.2.4.1.c. Equivalent de Sable

Cet essai est défini par la norme NF P18-598 [Mokhtari 2006], il est utilisé pour évaluer la propreté du sable entrant dans la composition du béton ou mortier, par conséquent la proportion des impuretés argileuses contenants dans le sable par rapport à la quantité des grains solides sableux. Il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Il consiste de laver un poids défini de sable dans une solution lavant. Après agitation, on laisse le mélange se décanter pendant 20 min, on en déduit l'équivalent de sable qui est par convention:

$$E_s = \frac{h_1}{h_2} \times 100 \text{ (%) } \dots\dots\dots \text{II.3}$$

h1: hauteur des grains solides sableux.

h2: hauteur des grains solides

**Tableau II.3:** Caractéristiques physiques des granulats d'étude.

Caractéristiques	Unité	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/16
<b>Le module de finesse</b>	-	2.19	-	-
<b>La masse volumique apparente</b>	g/cm <sup>3</sup>	1,480	1,207	1,192
<b>La masse volumique absolue</b>	g/cm <sup>3</sup>	2.5	2.5	2.5
<b>La propreté (ES)</b>	%	93.75	-	-

### II.2.5. Les fibres naturelles

Trois types des fibres végétales ont été utilisés pour cette étude

#### II.2.5.1. Fibres d'Alfa

Alfa (*stipa tenacissima*) qui est une plante à tige cylindrique qui pousse dans des régions arides, de l'ouest du bassin de la méditerranée. Cette espèce disposant des feuilles effilée, pousse en touffes d'environ un mètre de haut. Pour cette étude nous avons étudiée les fibres d'Alfa de la région de Tébessa figure II.4.



**Figure II.4 :** Fibres d'Alfa

### **II.2.5.2.Fibres de palmier dattier**

Pour les fibres de Palmier, on s'intéresse uniquement aux fibres extraite des folioles des palmes de dattier. Après chaque récolte, ces dernières sont soit brûlées ou jetées dans la nature. Les folioles étudiées ont été collectées à partir des palmiers dattiers de la région d'Annaba. Figure II.5



**Figure II.5 :** Fibres de folioles de palmier dattier

### **II.2.5.3.Fibres de Diss**

La plante diss (*Ampélodesmos mauritanicus*), est une grande graminée répandue à l'état sauvage dans l'Afrique du nord méditerranéenne. Nous avons étudié les fibres de diss de la région de Tébessa figure II.6



**Figure II.6:** Plante de diss

### II.2.6. Traitement des fibres végétales

Pour cette étude un traitement chimique à l'eau bouillante a été effectué sur les trois fibres pendant deux heures à une température de  $(99,4^{\circ}\text{C})$ , puis les fibres sont rincées avec de l'eau afin d'éliminer les substances causant un retard de prise du ciment lors des essais initiaux et sécher à l'air libre du laboratoire.



**Figure II.7 :** Fibres de palmier avant et après traitement

### II.2.7. Préparation de l'échantillon de fibres végétales

Les échantillons de fibres végétales utilisées (Alfa, Palmier et Diss) ont été récoltés et découpés à des longueurs (0.5, 1, 1.5 et 2cm) pour les fibres non traités, et pour les fibres traitées, après séchage à l'air les fibres sont découpes à des longueurs (0.5, 1, 1.5 et 2 cm) (Figure II.8, II.9 et II.10).





**Figure II.8 :** Fibres d'Alfa avec les différentes longueurs



**Figure II.9 :** Fibres de palmier dattier avec les différentes longueurs



**Figure II.10 :** Fibres de diss avec les différentes longueurs

### II.3. Caractéristiques physiques de fibres végétales

#### II.3.1. Masse volumique apparente de fibres végétales

Elle représente la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides et porosité inter-fibres. Les essais consistent à remplir un récipient vide de volume connu par la fibre sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau.

**Tableau II.4 :** La masse volumique apparente des fibres utilisées

	Masse volumique apparente (Kg/m <sup>3</sup> )			
Longueur (cm)	0.5	1	1.5	2
Alfa	260.8	197.5	163.0	125.0
Palmier dattier	251.8	171.1	147.3	110.1
Diss	198.7	185.3	169.8	135.6

#### II.3.2. Masse volumique absolue de fibres végétales

Est déterminée selon la norme NF EP 18-558 et définie comme la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière solide pleine.

Le tableau II.5 suivant résume les principales caractéristiques physiques de fibres de Diss.

**Tableau II.5 :** La masse volumique absolue des fibres utilisées

Fibres végétales	Masse volumique absolue (Kg/m <sup>3</sup> )
Alfa	666
Palmier dattier	770
Diss	1000

### II.3.3. Taux d'Humidité de fibres végétales

Le taux d'humidité des fibres végétales est une caractéristique importante à prendre en compte puisqu'il peut modifier les propriétés de la fibre et perturber les procédés de mise en forme.

Pour cette raison, on a calculé le taux d'humidité de fibres de diss par la formule suivante :

$$TH = \left( \frac{MH-MS}{MS} \right) \times 100(\%) \dots\dots\dots II.4$$

MH : Poids de fibres à l'état naturel

MS : Poids de fibres à l'état sec (après séchage dans une étuve à 50°C pendant 24h jusqu'à la stabilisation du poids).

Les résultats sont regroupés dans le tableau II.6

Donc, on peut dire que les fibres d'Alfa présentent un taux d'humidité faible par rapport aux autres fibres végétales, par ce que plus le taux d'humidité est élevé, plus le module d'élasticité, la contrainte maximale et la stabilisation thermique du composite diminuent. Plusieurs études font état d'un taux d'humidité inférieur à 8% mais il est conseillé de travailler avec un taux d'humidité inférieur à 5%, [Sombatsompop 2003].

**Tableau II.6 :** Taux d'humidité des fibres végétales utilisées

Fibres utilisés	Alfa	Palmier dattier	Diss
Taux d'humidité (%)	8,54	10,63	9,05

### II.3.4. La cinétique d'absorption d'eau de fibres végétales

Le coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales Alfa, Diss et palmier a été déterminé selon [Bessadok 2007], Les mesures ont été réalisées sur des échantillons de fibres préalablement découpées en brins de 0.5, 1, 1.5 et 2 cm. Pour chaque type de fibres, six échantillons d'environ 4.5 g et 9g. Les échantillons ont initialement été séchés à l'étuve à 105°C jusqu'à stabilisation de la masse. Ils ont ensuite été immergés dans de l'eau distillée

pendant 5 min et 24 heures. Les fibres ont été superficiellement séchées en utilisant du papier absorbant afin d'éliminer l'eau inter fibres ainsi que l'eau adsorbée à leur surface. Le coefficient d'absorption d'eau des fibres est alors déterminé par l'équation suivante :

$$\% \text{ Absorption} = \left( \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} \right) \times 100 \dots\dots\dots \text{II.5}$$

$M_S$  : masse sèche des fibres (g)

$M_{SSS}$  : masse saturée superficiellement séché (g)

**Tableau II.7** : Absorption d'eau pour 1% des fibres végétales utilisées

Absorption (%)	5 min				24 h			
	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2
<b>Longueur (cm)</b>								
<b>Alfa</b>	32.22	39.77	44.44	48.88	71.55	87.33	92.66	95.77
<b>Palmier dattier</b>	54.88	62.44	66.00	70.22	110.00	114.88	128.22	130.66
<b>Diss</b>	68.80	69.33	72.22	92.77	131.55	140.22	144.88	156.22

D'après les résultats tableau II.7, nous constatons que toutes les fibres ont une grande capacité d'absorber l'eau, donc il avère un caractère hydrophile, mais la fibre de Diss avec une absorption de 69% il absorbe plus d'eau que les autres fibres. Cependant l'absorption de l'eau pour la fibre d'Alfa est très lente atteint 32% pendant 5 minutes. Lorsqu'on augmente la longueur des fibres pour un même pourcentage que les fibres absorbe plus d'eau (Tableau II.7) (sa surface hydrophile augment provoque une absorption élevée). Après 24h, une augmentation égale au double quel que soit la longueur.

Pour le pourcentage de 2% une légère augmentation quel que soit la longueur. (Tableau II.8)

**Tableau II.8** : Absorption d'eau pour 2% des fibres végétales utilisées

Absorption (%)	5 min				24 h			
	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2
<b>Longueur (cm)</b>								
<b>Alfa</b>	36.33	43,22	50.55	52.00	88.33	93.66	108.11	110.44
<b>Palmier dattier</b>	56.55	65.88	73.66	88.66	121.66	130.33	131.22	133.11
<b>Diss</b>	69.66	70.22	75.66	80.00	138.88	145.66	161.33	166.77

### II.3.5. Saturation d'eau des fibres végétales

Le but de cette partie consiste à déterminer le taux de saturation des fibres végétales étudié Alfa, Diss et palmier selon la norme, les mesures ont été réalisées sur des échantillons de fibres préalablement découpées en brins de 0,5 - 1- 1,5 et 2 cm. Pour chaque type de fibres, 3 échantillons d'environ (9g). Les échantillons ont initialement été séchés à l'étuve à 105°C jusqu'à stabilisation de la masse. Ils ont ensuite été immergés dans de l'eau distillée jusqu'à la saturation des fibres, La saturation d'eau des fibres est alors déterminé par l'équation suivante :

$$\% \text{ Saturation} = \left( \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} \right) \times 100 \dots\dots\dots \text{II.6}$$

Ms : masse sèche des fibres (g)

Msss : masse saturée d'eau (g)

Les résultats sont illustrés dans le tableau

**Tableau II.9:** Saturation d'eau de fibres végétales utilisées

Longueur (cm)	Saturation d'eau (%)			
	0.5	1	1.5	2
<b>Alfa</b>	91.11	109.66	111.66	112.77
<b>Palmier dattier</b>	125.77	131.33	133.88	136.55
<b>Diss</b>	145.66	159.55	170.11	174.33

D'après les résultats tableau II.9 on remarque que la saturation d'eau des fibres végétales est presque proche de l'absorption d'eau à 24 heures, donc les fibres approchent de sa saturation totale dès sa 24 heures dans l'eau distillée.

Le point et le temps de saturation des fibres sont différents selon le type. On remarque que la fibre de Diss possède un point de saturation élevé, il peut atteindre 174% d'eau absorbé pendant 48 heures. Pour la fibre de palmier, le point de saturation est de 136% pendant 48 heures, puis la fibre de d'Alfa 112% de point de saturation pendant 48 heures. Ces valeurs des points de saturation, sont liées aux caractéristiques hygroscopiques de diverses longueurs des fibres végétales.

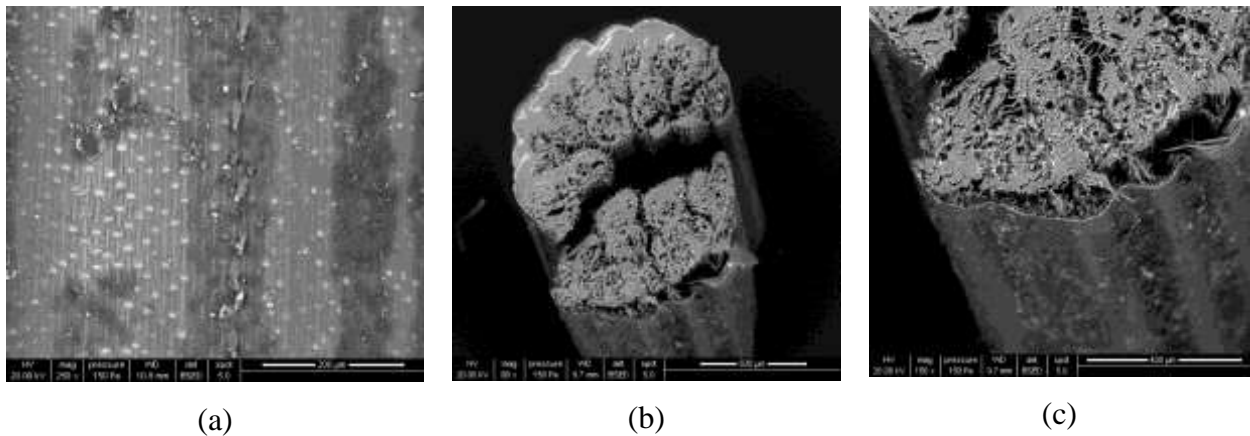
## II.4. Analyses morphologies et structures

### II.4.1. Observation microscopiques des fibres végétales

#### II.4.1.1. Observation microscopiques des fibres d'Alfa brute et traitées

Les images microscopiques ont été obtenues à l'aide d'un microscope électronique à balayage de CRP HENRI TUDOR de Luxembourg, afin de caractériser la constitution et l'organisation des parois cellulaires au sein des fibres d'Alfa, de diss et de palmier. Pour ce faire, des échantillons ont été découpés transversalement et longitudinalement, en prenant soin de ne pas altérer leur état natif.

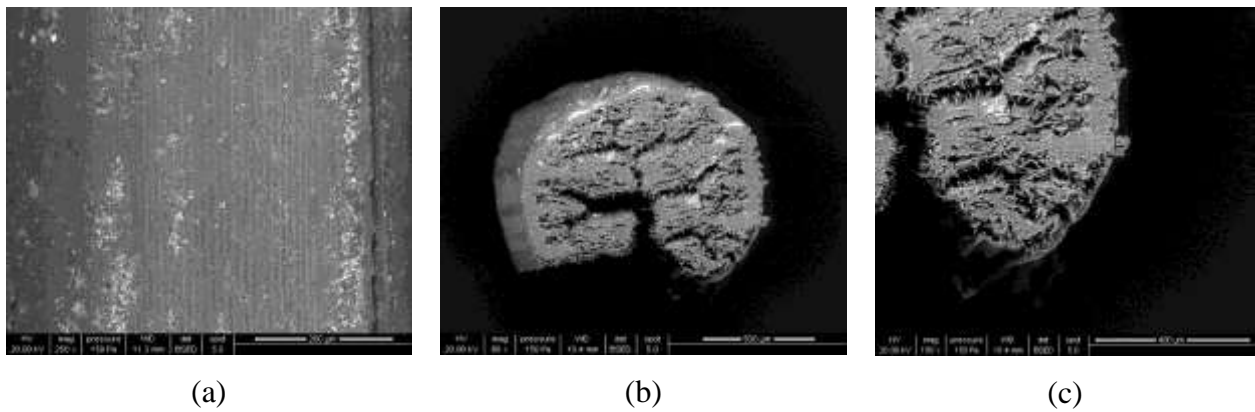
L'observation par microscopie électronique à balayage d'une coupe transversale (Figure II.11) de la fibre d'Alfa a permis de mettre en évidence la structure interne de la tige de l'Alfa. En effet, elle montre nettement la présence d'une fonte profonde non rectiligne.



**Figure II.11:** Observation de la texture de la fibre d'Alfa à l'état brute (coupe transversale et longitudinale)

Des observations au MEB des grossissements plus importants ont permis de montrer d'une façon plus détaillée, la structure et l'organisation cellulaire au sein des fibres de l'Alfa. En effet, on y trouve les différents tissus qui constituent les principaux composants dans cette plante, à savoir les vaisseaux libéro-ligneux (Figure II.11 (a et b)) et les fibres de sclérenchyme (ou cellules longues ou cellules matures) (Figure II.11(a, b et c)).

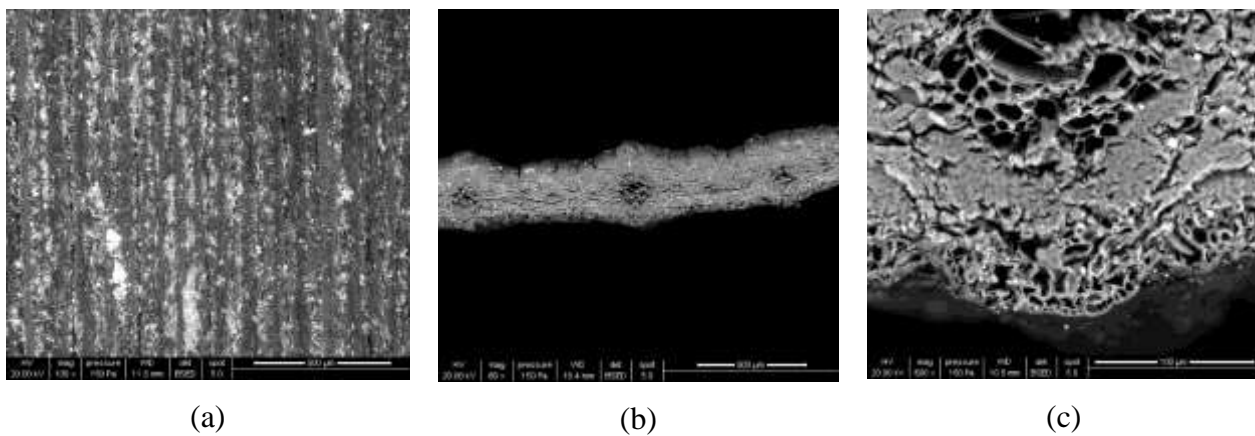
Dans les fibres d'Alfa, on observe des paquets de vaisseaux conducteurs enveloppés dans un faisceau de fibres (ou entourés par des fibres). La largeur d'un vaisseau peut atteindre 5  $\mu\text{m}$  (Figure II.11-c). [Ben Elmabrouk 2011]



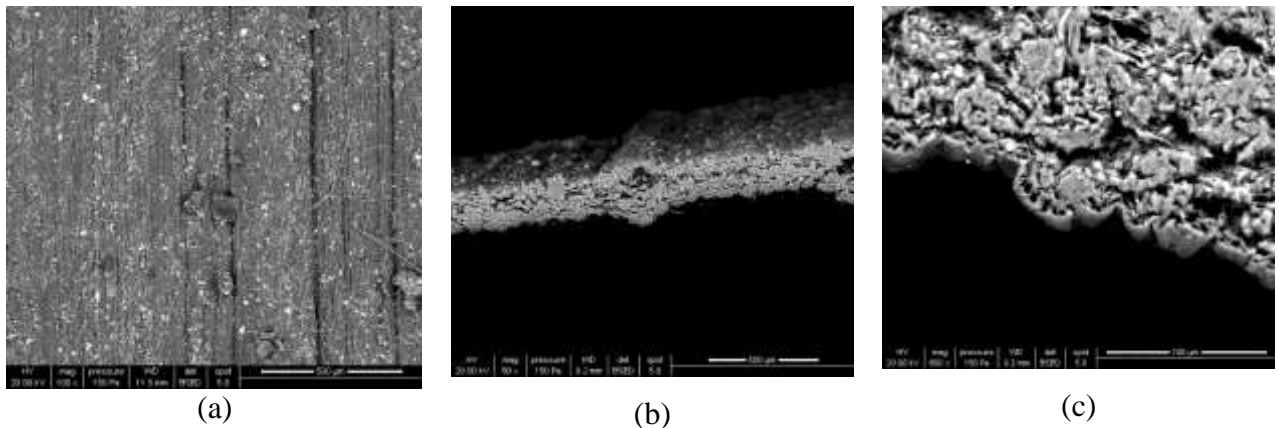
**Figure II.12:** Observation de la texture de la fibre d'Alfa traité (coupe transversale et longitudinale)

#### II.4.1.2. Observation microscopiques des fibres de palmier dattier brute et traitées

La morphologie des fibres de palmier dattier a été étudiée par microscopie électronique à balayage. La coupe transversale d'une foliole montre qu'elle est constituée par des faisceaux de fibres ultimes (figure II.13.b) et de rainures composées par des vaisseaux libéro-ligneux conducteurs, Le diamètre des fibres ultimes est de l'ordre de  $10\ \mu\text{m}$  et le lumen présente un diamètre de l'ordre de  $1\ \text{à}\ 2\ \mu\text{m}$ . (Figure II.13.c)[Adil 2011].



**Figure II.13 :** Observation de la texture de la fibre de palmier brute (coupe transversale et longitudinale)

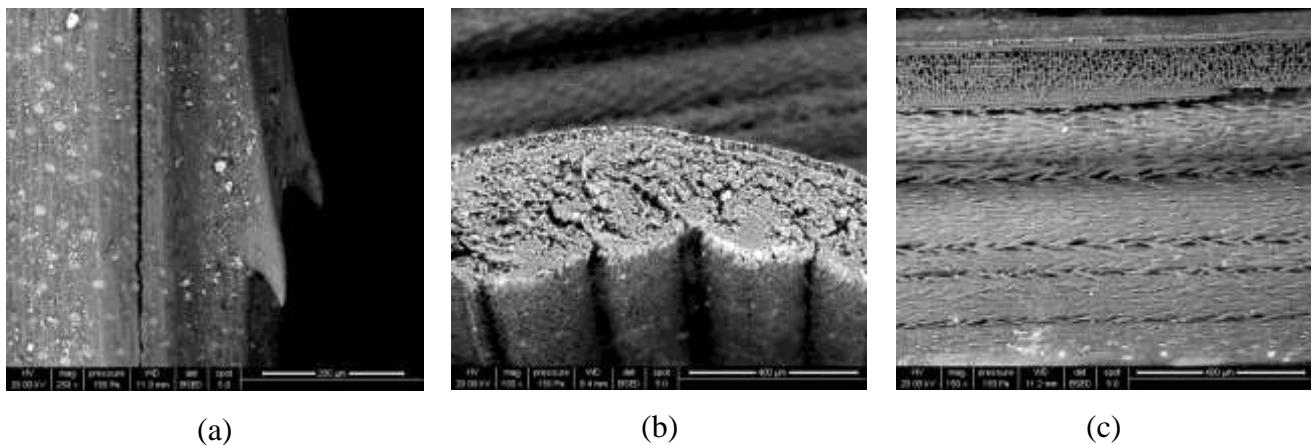


**Figure II.14** : Observation de la texture de la fibre de palmier traité (coupe transversale et longitudinale)

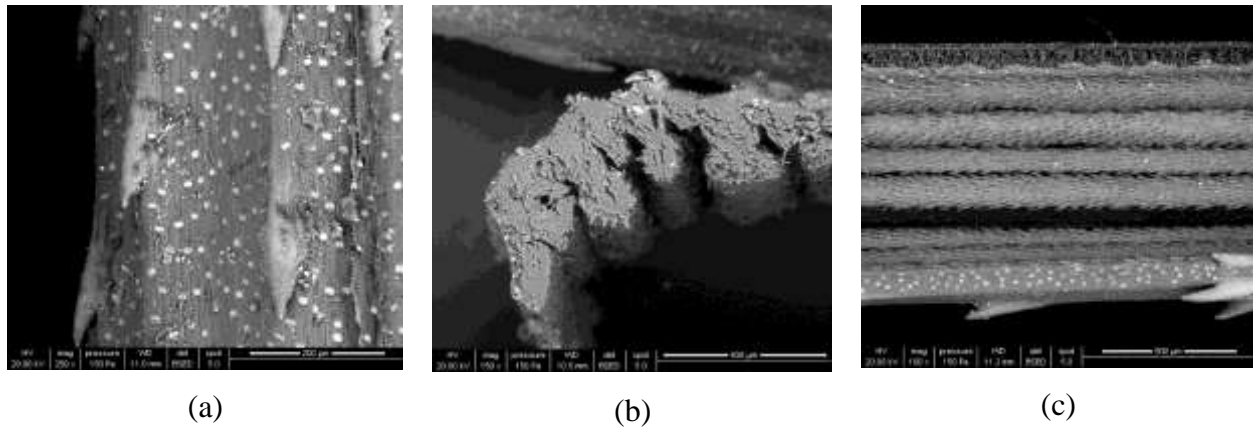
#### II.4.1.3. Observation microscopiques des fibres de diss brute et traitées

La surface extérieure de la fibre de diss présente des épines d'une taille d'environ  $100\ \mu\text{m}$  soit 5 fois plus grande que celles de la surface intérieure. La morphologie de ces épines est par ailleurs la même mais si leur répartition est beaucoup moins dense (figure II.15 a).

De plus, l'examen au MEB (figure II.15 c) montre que la surface intérieure de la fibre de Diss est recouverte d'épines de  $20\ \mu\text{m}$  de long avec un diamètre à la base de  $10\ \mu\text{m}$ . Ces épines sont distribuées sur toute la surface des fibres de façon homogène.



**Figure II.15** : Observation de la texture de la fibre de Diss brute (coupe transversale et longitudinale)



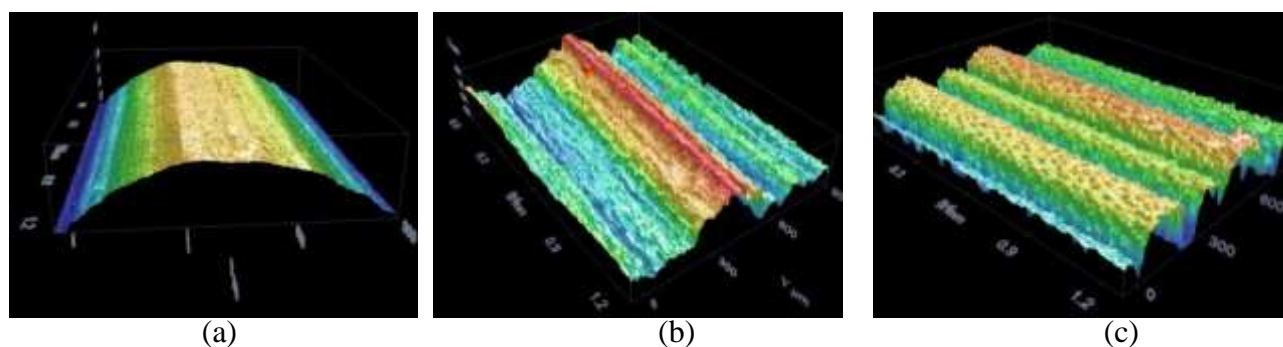
**Figure II.16:** Observation de la texture de la fibre de Diss traité (coupe transversale et longitudinale)

Une structure tubulaire-caverneuse mixte est observé à l'intérieur de la profondeur de la paroi de la fibre. La plupart des cavités sont fermées, cependant, et ne portent pas la sève (figure II.15 b). [Sellami 2013]

Le traitement thermique des fibres ne modifie pas la structure externe et interne de celle-ci, mais il élimine les impuretés dans les fibres. (Figure II.16)

#### II.4.2. Observation confocale de la rugosité de la surface des fibres végétales

Les images confocales ont été obtenues par le billet d'un appareil Leica DCM 3D, afin de déterminer la rugosité de la surface des fibres végétales utilisées. Comme on voit sur les figures II.17 (a, b et c) respectivement fibre d'Alfa, fibre de palmier et fibres de diss, les figures montrent clairement la rugosité de la surface des fibres. Les fibres de diss et de palmier ont une surface rugueuse et la fibre d'Alfa à une surface lisse.



**Figure II.17 :** Images confocales de la surface des fibres végétales (a) fibre d'Alfa, (b) fibre de palmier et (c) fibre de diss



## II.5. Caractéristiques mécaniques des fibres végétales

### II.5.1. Essai de traction directe sur les fibres végétales

Les essais de traction directe ont été réalisés à l'aide de la machine ZWICK/ROELL 20KN, sur les trois types de fibres végétales à l'état brut et traités, et programmé de donner la force en fonction du déplacement, (figure II.18) l'essai a été effectué selon la norme NFEN ISO 5079 dans les conditions climatiques  $t=30^{\circ}\text{C} \pm 2$  et  $\text{HR}= 65\% \pm 5$  [Kriker 2005] la longueur des échantillons pour les trois types de fibres est de 100mm. La mise en machine s'effectue avec une vitesse de 10 mm/min.

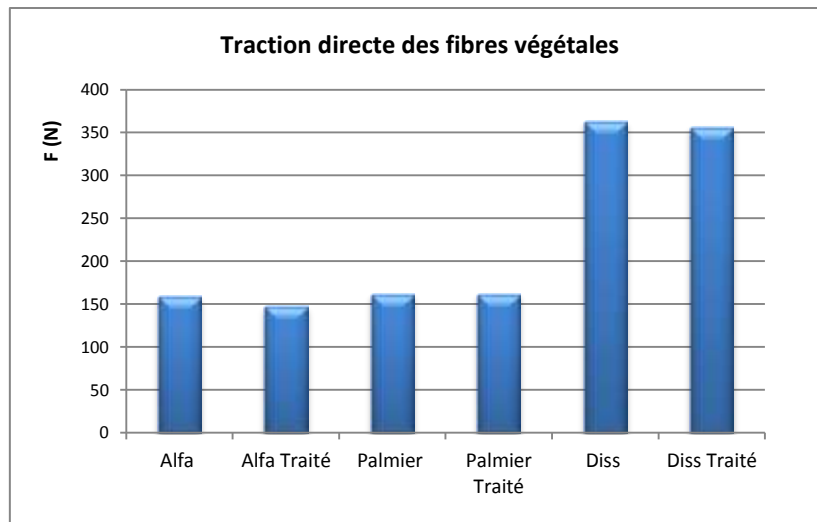
Le comportement en traction des fibres dépend de la nature de celle-ci, Ainsi, si le comportement en traction de l'acier est défini avec précision (élasto-plastique écrouissable) du fait que l'acier est un matériau homogène, le comportement des fibres végétales ne l'est pas parce qu'il dépend de plusieurs paramètres tels que la composition chimique, la morphologie et l'élanement (L/d).



**Figure II.18:** Montage utilisé pour l'essai de traction directe des fibres

**Tableau II.11 :** Force de traction et allongement des fibres d'Alfa, Palmier et de diss

Echantillons	F max (N)	dl pour Fmax (mm)
<b>Alfa</b>	159.285	2.7420
<b>Alfa traité</b>	147.510	3.5247
<b>Palmier</b>	162.117	3.6291
<b>Palmier traité</b>	162.063	4.9041
<b>Diss</b>	363.492	5.0556
<b>Diss traité</b>	356.705	4.6941



**Figure II.19 :** Force de traction directe des fibres végétales

Les résultats de l'essai de traction directe sur des fibres traitées et non traitées (Tableau II.11) montrent que la fibre de Diss possède une valeur élevée de la force de traction égale à 363.492 N pour la fibre non traitée et 356.705 N pour la fibre traitées. La fibre d'Alfa a donné des valeurs faibles par rapport aux deux autres fibres.

Des études antérieures réalisées par [Baley 2003]; [Charletet2007] ont mis en évidence un lien entre le diamètre de la fibre de lin et les caractéristiques mécaniques. En effet, le module d'élasticité et la contrainte à rupture décroissent lorsque le diamètre de la fibre augmente. Toutefois, aucune corrélation claire n'a été identifiée entre l'allongement à rupture et le diamètre de la fibre. Le traitement des fibres par ébullition diminue légèrement leurs résistance mais ne modifie pas la morphologie des fibres, il élimine juste la cellulose.

## II.6.Conclusion

Dans ce chapitre, on a identifié et caractérisé les différents matériaux constitutifs utilisés, à savoir les fibres végétales d'Alfa, palmier dattier et diss.

Selon les essais d'identification sur le matériau en question nous remarquons que d'après :

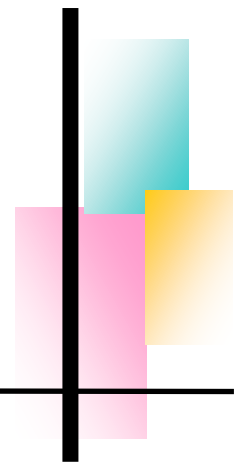
- L'analyse granulométrique : le matériau analysé présente les caractéristiques d'un sable (0/2) presque moyenne avec un module de Finesse  $M_f = 2.19$ , et deux fractions de gravillon (3/8 et 8/16), la fraction utilisé pour cette étude donne un squelette granulat continu.

- La connaissance des propriétés physiques de ces fibres végétales est importante; ces fibres possèdent une densité apparente diminuée avec l'augmentation de la longueur de celle-ci. Par contre, les fibres absorbent plus d'eau lorsqu'on augmente la longueur et le pourcentage.
- Les fibres d'Alfa, de palmier dattier et de diss respectivement possèdent une humidité relative de 8,54%, 10,63% et 9,05%, densité apparente respectivement égale à 0.666, 0.77 et  $1\text{g/cm}^3$  et qui ont un taux d'absorption d'eau assez faible 100, 133 et 166%, et présentent des caractéristiques mécaniques intéressantes : force à la rupture respectivement égale à 147,51, 162.063 et 356.70 MPa et l'allongement à la rupture égale à 3,52, 4,9041 et 4.69%.
- Une absorption d'eau élevée des fibres végétales est due à leur caractère hydrophile et à leur structure poreuse, la pénétration d'eau à travers la fibre augmente la ration Eau/Ciment à proximité de l'interface fibres/ciment.
- L'observation au MEB sur les fibres végétales (alfa, palmier et diss) montre nettement les différentes surfaces et structures qui constituent les composants principaux de celle-ci. Le traitement thermique qui a été fait sur les fibres ne modifie pas leur morphologie.



## **CHAPITRE III**

### **Méthodes et résultats expérimentaux**



### III.1. Introduction

L'étude bibliographique présentée dans le chapitre précédent a fait ressortir l'influence des fibres naturelles sur la formulation et les propriétés des bétons et mortiers, et détaille les méthodes d'essais qui seront appliquées pour l'étude des composites cimentaires.

Ce chapitre se compose de deux parties, la première partie examine l'effet de l'ajout des fibres végétales brutes et traitées sur les propriétés mécaniques des mortiers où nous avons fait varier le pourcentage volumétrique et les longueurs des fibres introduites, et déterminer le taux optimum sur la base des caractéristiques mécaniques (résistance à la flexion et à la compression).

La deuxième partie consiste à utiliser l'optimum du taux des fibres et réaliser des essais préliminaires élaborés (à l'état frais et durci) sur le mortier et béton puis le contrôle de retrait du mortiers et béton pendant 28 jours.

### III.2. Formulation du mortier et du mortier fibré

#### III.2.1. Composition du mortier

La méthode de composition du mortier classique utilisée est celle donnée par la norme EN-196-1. La composition massique du mortier utilisée est comme suit :

- 03 Parties de sable.
- 01 Partie de ciment.

Nous avons travaillé avec une ouvrabilité constante. Cette ouvrabilité est déterminée par l'essai d'étalement et cela pour l'optimisation du rapport E/C et l'obtention d'une meilleure ouvrabilité.

#### III.2.2. Composition du mortier fibré

Notre première démarche est le choix d'un mortier classique en le renforçant par des fibres végétales dont le volume des fibres remplace une partie du squelette granulaire. Quatre longueurs des fibres végétales (0.5, 1, 1.5 et 2 cm) ont été utilisées pour cette formulation. [Arabi 2006].

Selon le plan de travail visé, on peut distinguer que cette composition se divise en deux séries.

La première série, dans le but de l'étude de l'effet de traitement et du taux des fibres végétales sur les propriétés mécaniques des mortiers.

La deuxième série, les taux optimaux et le traitement des fibres végétales sont choisis pour l'étude sur le comportement physico-mécanique et le retrait de dessiccation et endogène des mortiers et bétons.

**Tableau III.1** : Composition des mortiers de fibres végétales

Dénomination des mortiers fibrés	Dosages en constituants (g)			
	Ciment	Sable	Eau	Fibres
Mortier témoin	450	1350	225	-
Mortier 0.5% de fibres	450	1347.75	225	2.25
Mortier 1% de fibres	450	1345.5	225	4.5
Mortier 1.5% de fibres	450	1343.25	225	6.75
Mortier 2% de fibres	450	1341	225	9

### III.2.3. Caractérisation des mortiers à l'état frais

#### III.2.3.1. L'étalement sur table à secousse

D'après la norme NBN EN 1015-3 [NBN EN 1015-3, 1999], la valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses (Figure III.1) définie, et soumis à un nombre donné des secousses verticales en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur donnée.



**Figure III.1** : Essai d'étalement à la table à secousses

### III.2.4. Propriétés du mortier fibré à l'état durci

#### III.2.4.1. Densité du mortier durci

La masse volumique du mortier à l'état durci est mesurée à partir de la masse de l'éprouvette rapportée à son volume après 28 jours de durcissement selon la norme NF EN 12390-7 [NF EN 12390-7, 2011], Les essais de la masse volumique ont été effectués sur des éprouvettes (4x4x16) cm [Melais 2016].

#### III.2.4.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression des mortiers de fibres est mesurée conformément à la norme EN 196-1, [NF EN ISO 5079, 1996], à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN à vitesse constante, comme le montrent les photos (Figure III.3), pour chaque type de mortier, trois éprouvettes sont utilisées. Comme l'indique la (Figure III.2) et la contrainte de rupture sera :

$$R_c = \frac{F_c}{S} (\text{MPa}) \dots \dots \dots \text{III.1}$$

$R_c$  : Résistance à la compression (MPa)

$F_c$  : Charge de rupture à la compression, (N)

$S$  : Section, ( $\text{mm}^2$ )

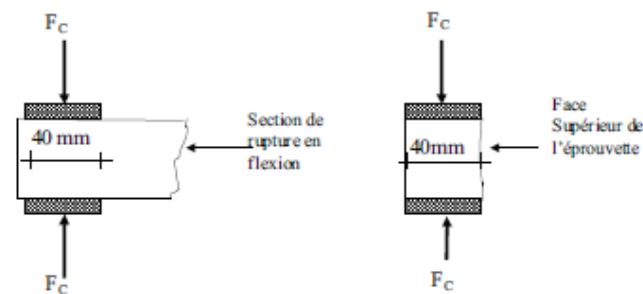


Figure III.2 : Dispositif de rupture en compression



Figure III.3 : Machine d'essai de compression

### III.2.4.3. Résistance à la traction par flexion

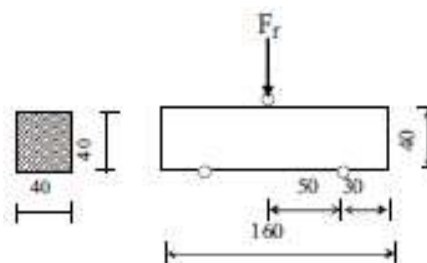
La résistance à la flexion du mortier classique est déterminée selon la norme EN 196-1, par un dispositif de flexion trois points (Figure III.4 et III.5), à l'aide d'un appareillage de traction par flexion de la presse de ZWICK Roel de capacité maximale de 20KN. Les éprouvettes utilisées dans l'essai de traction par flexion sont des éprouvettes prismatiques (4×4×16 cm). La valeur de la résistance et de la charge à la rupture est enregistrée directement au cours de l'essai. Cette résistance aussi est déterminée par la formule suivante :

$$R_{tf} = \frac{3PL}{2bh^2} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots \text{III.2}$$

P : l'effort de rupture en (N)

L: la distance ente les appuis en (mm)

b, h : dimension d'éprouvette en (mm)



**Figure III.4** : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion trois points



**Figure III.5** : Machine d'essai de flexion

### III.2.4.4. Déformations différées

#### III.2.4.4.1. Le retrait endogène

Le montage expérimental illustré sur la (Figure III.6) et la procédure d'essai mise au point lors de la présente étude, sont décrits brièvement dans ce paragraphe. Au moment du coulage, des ancrages (plots en laiton) sont placés aux deux extrémités de l'échantillon et fixés sur le



moule. Le coffrage est enduit d'huile, afin de faciliter le démoulage et d'obtenir une surface lisse qui améliore le contact entre l'échantillon et le film d'aluminium. Les mesures du retrait endogène commencent 1 jour après le coulage. Les éprouvettes de (4x4x16cm) sont protégées du séchage par un film pendant 24h après décoffrage de l'éprouvette est totalement couverte par deux couches du film alimentaire et double couches du film aluminium de telle manière à éviter tout échange d'humidité, et sont ensuite placées dans une chambre climatisée ( $T = 20^{\circ}\text{C} \pm 2$ ,  $\text{HR} = 50\% \pm 5$ ). La mesure du déplacement a été effectuée par un comparateur numérique [Zreiki 2009].



**Figure III.6:** Dispositif de mesure de retrait en mode endogène pour  
Éprouvette de 4x4x16 cm

#### III.2.4.4.2. Le retrait de dessiccation

La déformation de retrait de dessiccation d'un béton est la déformation causée par le séchage du matériau du fait du déséquilibre hygrométrique avec le milieu environnant. Pour déterminer le retrait d'après [Monge 2007], les mortiers ont été coulés dans des moules prismatiques de 4x4x16 cm, deux inserts (plot en laiton) sont placés à l'extrémités des éprouvettes qui serviront à positionner sur le banc de mesure, Ces deux plots serviront d'appuis au système de mesure (rétractomètre). Cet appareil permet de mesurer les variations dimensionnelles axiales à l'aide d'un afficheur micrométrique (Figure III.7).



**Figure III.7 :** Dispositif de mesure des formations de retrait en mode dessiccation pour éprouvette de (4x4x16) cm

Les éprouvettes destinées pour le retrait de dessiccation sont coulées et protégées du séchage par un film pendant 24 h, puis conservées dans une chambre dans laquelle l'air est en permanence à une température de  $(20 \pm 2) \text{ C}^\circ$  et à une humidité relative de  $(50 \pm 5)\%$ .

Les mesures des deux retraits débutent 24 heures après la fabrication des échantillons. Avant chaque série de mesure, le comparateur a été préalablement étalonné en se servant d'une tige d'étalonnage en invar (insensible à la variation d'ambiance). La hauteur de la tige invar est adaptée à la hauteur de l'éprouvette. Les plots doivent être nettoyés avant chaque mesure. Le retrait est déterminé par la formule suivante :

$$\varepsilon_{\text{retrait libre}} = 10^6 \times \frac{(\varepsilon_{\text{ini}} - \varepsilon(t))}{\varepsilon_{\text{ini}} + l_{\text{ini}}} (\mu\text{m/m}) \dots \dots \dots \text{III.3}$$

Avec :

$\varepsilon_{\text{retrait libre}}$  : Le retrait libre de dessiccation de l'éprouvette [ $\mu\text{m/m}$ ]

$\varepsilon_{\text{ini}}$  : La valeur initiale lue sur le capteur pour la première mesure

$\varepsilon(t)$  : La valeur mesurée à l'instant t

$l_{\text{ini}}$  : La longueur initiale de l'éprouvette

### III.3. Formulation du béton ordinaire et béton fibré

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des granulats, où l'on dispose le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage désiré. Généralement les qualités recherchées avec une telle composition sont :

- Une consistance adaptée à sa destination.

- Des qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours.
- Des qualités de durabilité qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment et un rapport E/C maximum.

On peut conclure que la formulation d'un béton doit permettre de respecter les qualités de consistance et de résistance aux moindres coûts possibles.

### III.3.1. Formulation du béton témoin par la méthode de Dreux-Gorisse

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode pratique qui simplifie la formulation du béton. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telle que la dimension des granulats.

Les quantités optimales de matériaux (eau, ciment, sable, gravillon et gravier) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton [Naville 2000].

#### a. Composition du béton à l'aide de la méthode Dreux-Gorisse

Pour permettre une mise en œuvre correcte du béton, il est important que la taille des plus gros granulats  $D_{\max}$  ne s'oppose pas au déplacement des grains entre les armatures métalliques du ferrailage. Il existe une borne supérieure de  $D_{\max}$  à respecter en fonction de la densité du ferrailage, des dimensions de la pièce à réaliser, et de la valeur de l'enrobage des armatures.

$D_{\max}$  est le diamètre du plus gros granulat entrant dans la composition du béton. Sa valeur peut être lue sur la feuille d'analyse granulométrique des granulats correspondants.

#### b. Dosage en ciment

Selon Dreux-G, on utilise la formule

$$\sigma'_{28} = \frac{G \sigma'_c}{E - 0,5} \dots \dots \dots \text{III.4}$$

On en déduit une valeur approximative du rapport E/C ; puis par des abaques on détermine C et E en fonction de C/E, de la résistance, et de la plasticité désirée

$\sigma'_{28}$  : Résistance moyenne à viser

$$\sigma'_{28} = \sigma'_n \sigma' + 15\% \dots \dots \dots \text{III.5}$$

$\sigma'_n$  : résistance nominale en compression a28 jours

G : Coefficient granulaire : valeur tabulée en fonction de la qualité des granulats (bonne ou courant, excellente, passable) et de la dimension D des gros granulats ; les valeurs approximatives de G supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

$\sigma'_c$  : Classe vraie du ciment à 28 jours en bars.

C : Dosage en ciment (kg/m<sup>3</sup>).

E : Dosage en eau totale sur matériaux secs (l/m<sup>3</sup>).

\*Remarque : Les abaques d'où sont déduits les très nombreux résultats expérimentaux, donnent des valeurs approximatives et il convient de les vérifier ou de les modifier par des essais dits « d'étude et de convenance »

### c. Dosage en eau

L'eau est dans la composition d'un béton le facteur qu'il convient de régler avec le plus de minutie. Or, c'est justement celui, qui, compte tenu de la précision nécessaire, est le plus difficile à calculer préalablement et à mettre en exécution.

La quantité d'eau dans un mètre cube de béton, sert pour une partie à l'hydratation et à la prise du ciment tandis que l'autre partie confère, sous forme d'eau de mouillage et interstitielle, au béton ses qualités de plasticité et d'ouvrabilité, une autre partie de l'eau pouvant d'ailleurs être absorbée par les granulats plus ou moins poreux.

### d. Dosage en granulats

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulaire de référence construite par l'une des méthodes de composition de béton, figure ci-dessous courbe OAB. La courbe OAB, où B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulats et le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies comme suit :

- En abscisse :

si  $D \leq 20$  mm l'abscisse est  $\frac{D}{2}$ ,

si  $D \geq 20$  mm l'abscisse est située au milieu du segment, gravier limité par le module 38(5mm) et le module correspond à D.

- En ordonnée : Y donnée par la formule suivante :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K \dots \dots \dots \text{III.6}$$

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (surtout le sable, dont l'influence est prépondérante) et également du module de finesse du sable.

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite. On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats (%s), (%g<sub>1</sub>), (%g<sub>2</sub>) par exemple. Si c'est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :  $V_c = \frac{C}{3,1}$  ou 3.1 C'est la masse spécifique pour les grains du ciment (valeur moyenne habituellement admise). Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V_{GT} = 1000\gamma - V_c \dots \dots \dots \text{III.7}$$

$V_{GT}$  : le volume des granulats totaux.

C : le volume absolu de ciment.

$\gamma$  : coefficient de compacité : valeur tabulée en fonction de la consistance, le serrage et la dimension maximale des grains de granulat D et en fonction de terme correctif sur le type de granulats (concassés, roulés) et le dosage en ciment différent de 350 kg/m<sup>3</sup>

Les valeurs absolues de chacun des granulats sont :  $V_s = (\%s \cdot V_{GT})$ ,  $V_{g1} = (\%g_1 \cdot V_{GT})$  et  $V_{g2} = (\%g_2 \cdot V_{GT})$ , et si les masses spécifiques de chacun des granulats sont  $\rho_s$ ,  $\rho_{g1}$ ,  $\rho_{g2}$  ; les masses de chacun d'eux sont :

$$M_s = (V_s \cdot \rho_s);$$

$$M_{g1} = (V_{g1} \cdot \rho_{g1});$$

$$M_{g2} = (V_{g2} \cdot \rho_{g2}). \text{ [Naville 2000]}$$

### III.3.2. Formulation du béton fibré

Notre première démarche est le choix d'un béton classique en le renforçant par des fibres végétales dont le volume des fibres remplace une partie du volume de squelette granulaire. Quatre longueur des fibres végétales (0.5, 1, 1.5, 2 cm) ont été utilisées pour cette formulation [Arabi 2006].

La composition de mélanges est récapitulée au tableau III.2,

Tableau III.2 : Composition des bétons de fibres de végétales

Dénomination des bétons fibrés		Dosages en constituants (Kg/m <sup>3</sup> )					
		Ciment	Eau	Fibre	Sable 0/2	Gravier 3/8	Gravier 8/16
<b>Béton témoin</b>		350	200	-	534.07	195.83	1050.25
<b>BF d'Alfa</b>	Béton avec 1% de fibres	350	200	3.5	530.12	194.37	1042.57
	Béton avec 2% de fibres	350	200	7	526.20	192.92	1034.85
<b>BF Palmier</b>	Béton avec 1% de fibres	350	200	3.5	530,66	194,57	1043,63
	Béton avec 2% de fibres	350	200	7	520,25	193,32	1036,92
<b>BF Diss</b>	Béton avec 1% de fibres	350	200	3.5	531,45	195,87	1045,18
	Béton avec 2% de fibres	350	200	7	528,82	193,90	1040,00

### III.4. Procédure expérimentale

#### III.4.1. Propriétés des bétons à l'état frais

##### III.4.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

La mise en œuvre du béton frais pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams est effectuée d'après la norme européenne NF EN 12350-2, 1999. Il permet de déterminer la consistance d'un béton frais en mesurant l'affaissement. Les mesures des affaissements sont données dans le Tableau III.5 [Makani 2011].



Figure III.8 : Affaissement au cône d'Abrams

### III.4.2. Propriétés des bétons à l'état durci

#### III.4.2.1. Densité du béton durci

La masse volumique du béton durci est mesurée à partir de la masse de l'éprouvette rapportée à son volume après 28 jours de durcissement selon la norme NF EN 12390-7, les éprouvettes utilisées sont de forme cubiques de dimensions (10 x 10 x 10 cm).

La masse volumique est calculée selon la formule :

$$D = \frac{m}{V} \text{ (Kg/m}^3\text{)} \dots \dots \dots \text{III.8}$$

D est la masse volumique du béton frais en kilogrammes par mètre cube (kg/m<sup>3</sup>) arrondie aux 10 kg /m<sup>3</sup> les plus proches ;

m: masse de l'éprouvette à 28 jours (kg) ;

V est le volume de l'éprouvette en mètres cube (m<sup>3</sup>).

#### III.4.2.2. Résistance à la compression

La résistance mécanique en compression est le repéré principal pour toute caractérisation de la résistance mécanique et de la qualité des bétons. Les éprouvettes utilisées sont de forme cubique de dimensions (10x10x10cm) confectionnées conformément à la norme NF EN 12390-3 [NF EN 12390-3 2000]. Après démoulage à 24heurs, les éprouvettes sont conservées en humidité saturante jusqu'aux échéances des essais à 28 jour. Pour chaque type de béton, la résistance est testés sur la moyenne de trois éprouvettes. L'essai de compression à été réalisés avec une presse hydraulique de 200 KN (Figure III.9). L'essai a été effectué selon les normes et la mise en machine s'effectue avec une vitesse de 2 mm/min [Beskri2017].

La résistance à la compression est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma = \frac{P}{S} \text{ (MPa)} \dots \dots \dots \text{III.9}$$

P : charge de rupture en N

S : Section d'éprouvette en mm<sup>2</sup>



**Figure III.9 :** Description d'essai de compression

### III.4.2.3. Résistance à la traction par flexion

Pour effectuer nos essais de traction par flexion, on a procédé à l'essai sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (10 x 10 x 40 cm) mûries à l'eau, conformément à la norme (NFP 18-406). La résistance à la traction  $\sigma_{tf}$  obtenue à 28 jours provient de la moyenne des résultats sur trois échantillons. L'appareil utilisé est une presse hydraulique de flexion dont la capacité maximale est de 150kN en cisaillement (Figure III.10).

L'expression des résultats pour exprimer la contrainte de rupture en traction par flexion sera donnée par la relation :

$$\sigma_{tf} = \frac{3Fl}{2b^3} \text{ (MPa)} \dots \dots \dots \text{III.10}$$

F : la charge de rupture.

B : le coté de la base en mm [100].



**Figure III.10 :** Description d'essai de traction par flexion



### III.4.2.4. Déformations différées

#### III.4.2.4.1. Le retrait endogène

La déformation de retrait endogène d'un béton se produit dans des conditions isothermes et sans échange hydrique entre l'éprouvette et le milieu extérieur.

Les éprouvettes en béton ont été coulés dans des moules prismatiques de (7x7x28 cm) cm sont coulé et protégés du séchage par un film pondront 24h Pour la mesure du retrait endogène. L'éprouvette est totalement couverte par deux couches du film alimentaire et double couches du film aluminium, de telle manière à éviter tout échange d'humidité, et elles sont conservées dans une chambre dans laquelle l'air est en permanence à une température de  $(20 \pm 2) \text{ C}^\circ$  et à une humidité relative de  $(50 \pm 5)\%$ .

#### III.4.2.4.2. Le retrait de dessiccation

Les éprouvettes de dimension de (7x7x28 cm) sont destinées pour le retrait de dessiccation sont coulé et protégés du séchage par un film pendront 24h, puis conservées dans une chambre dans laquelle l'air est en permanence à une température de  $(20 \pm 2) \text{ C}^\circ$  et à une humidité relative de  $(50 \pm 5)\%$ .



**Figure III.11** : Dispositif de mesure de retrait en mode dessiccation pour éprouvette de 7x7x28 cm

Les mesures des deux retraits débutent 24 heures après la fabrication des échantillons. Avant chaque série de mesure le comparateur a été préalablement étalonné en se servant d'une tige d'étalonnage en invar (insensible à la variation d'ambiance). La hauteur de la tige invar est adaptée à la hauteur de l'éprouvette. Les plots doivent être nettoyés avant chaque mesure.

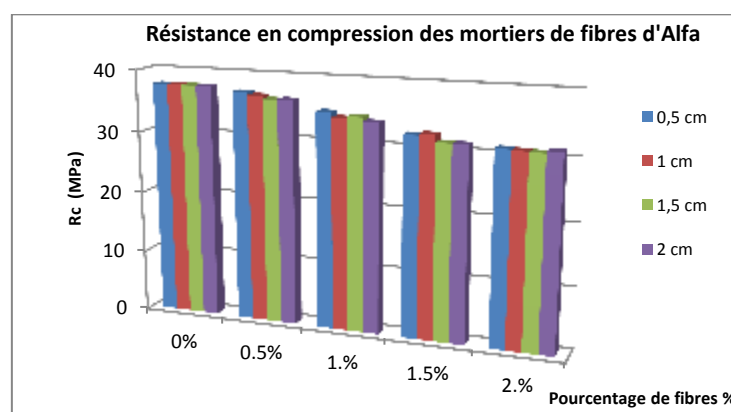
### III.5. Influence du pourcentage et la longueur des fibres végétales traité et non traité sur la résistance du mortier

Les propriétés mécaniques dans un composite dépendent principalement de la teneur en fibres et leur orientation ainsi que la teneur en eau, et aussi de l'interaction fibre/matrice en terme adhésion. Le transfert d'efforts entre la fibre et la matrice a en lieu au niveau de leur interface et joue un rôle essentiel dans le comportement du composite. Cet effet est amplifié par la répartition aléatoire des fibres dans le composite. Donc, il est important de s'intéresser à l'interaction fibre/matrice et étudier l'influence de la teneur en fibres du composite sur les performances mécaniques. Dans ces partis nous avons cherché le pourcentage optimal des fibres végétales et si le traitement des fibres améliore les caractéristiques mécaniques des composites.

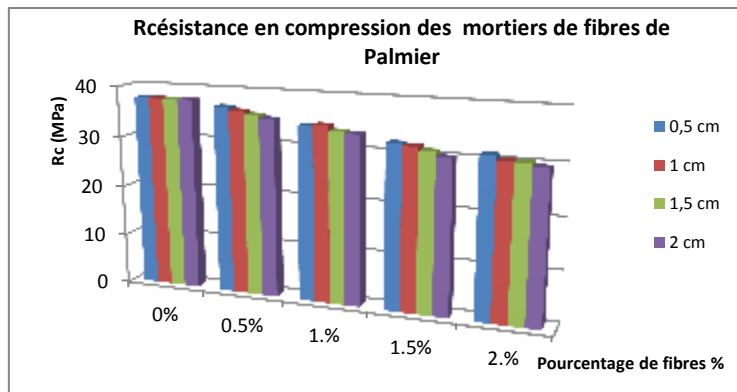
#### III.5.1. Propriétés mécaniques des mortiers de fibres non traitées

##### III.5.1.1. Résistance à la compression

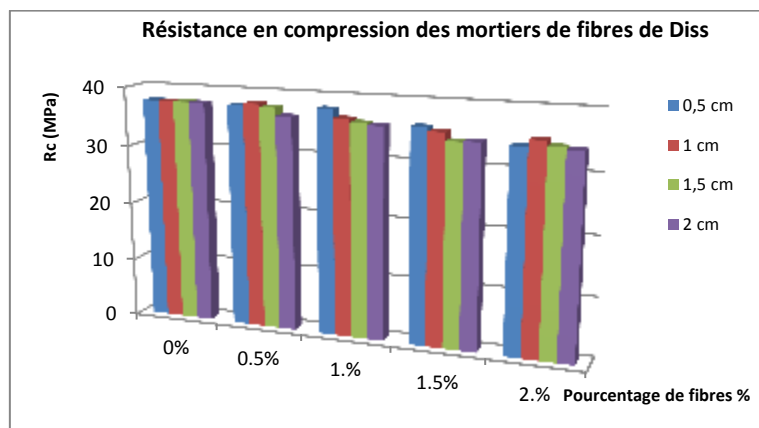
Les essais ont été élaborés sur des éprouvettes avec différents longueurs et pourcentages de fibres en masse, notamment (0.5. 1. 1.5 et 2 cm), (0.5. 1. 1.5 et 2 %) respectivement, pour voire l'influence de la nature et la longueur et le pourcentage des fibres végétales sur la résistance en compression. Les figures III.12, III.13 et III.14 montrent l'effet de la longueur et du pourcentage de fibre d'Alfa, Palmier et Diss non traitées respectivement sur la résistance en compression. La résistance du mortier témoin est égale à 37.75 MPa



**Figure III.12 :** Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibres d'Alfa avec différentes tailles.



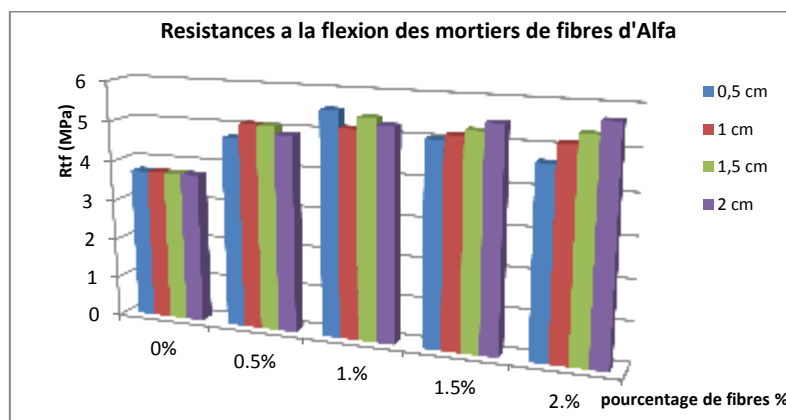
**Figure III.13 :** Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibres de palmier dattier avec différentes tailles.



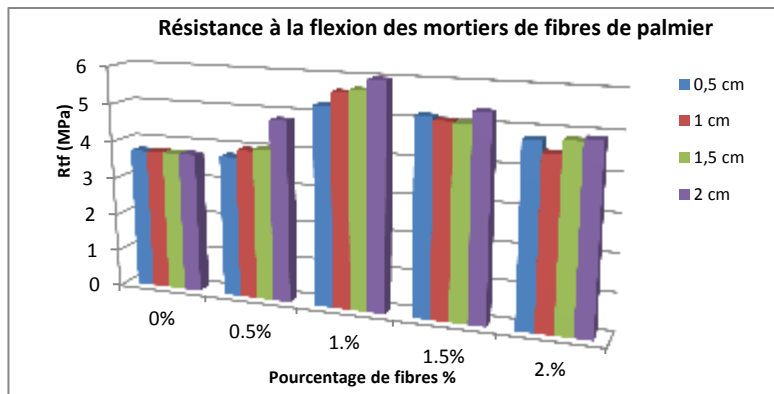
**Figure III.14 :** Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibres de Diss avec différentes tailles.

**III.5.1.2. Résistance à la flexion**

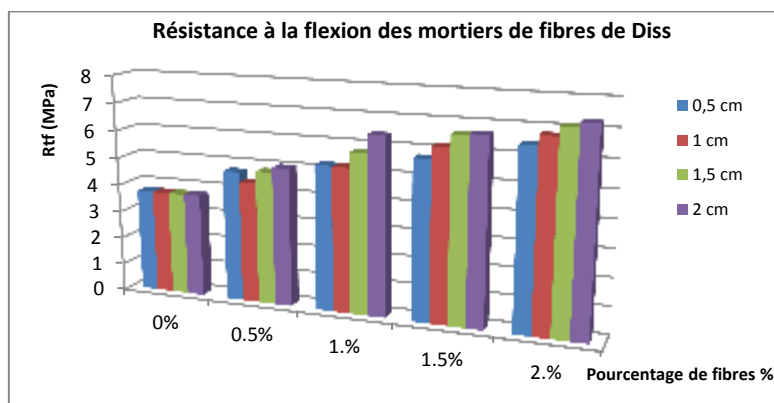
Les figures III.15, III.16 et III.17 présente l’effet de la longueur et du pourcentage de fibre d’Alfa, Palmier et Diss non traitée respectivement sur la résistance à la flexion.



**Figure III.15 :** Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibres d’Alfa avec différentes tailles.



**Figure III.16** : Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibres de palmier dattier avec différentes tailles.



**Figure III.17** : Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibres de diss avec différentes tailles.

On remarque que les mortiers de fibres fait un retard de prise il serait alors intéressant de traiter les fibres afin d'améliorer soit leurs propriétés mécaniques, soit leur adhésion avec la matrice en vue d'optimiser les caractéristiques physiques et mécaniques de ces composites.

### III.5.2. Propriétés mécaniques des mortiers de fibres traités

#### III.5.2.1. Résistance à la compression

Les figures III.18, III.19 et III.20 montrent l'effet de la longueur et du pourcentage des fibres d'Alfa, palmier et Diss traitées respectivement sur la résistance en compression.

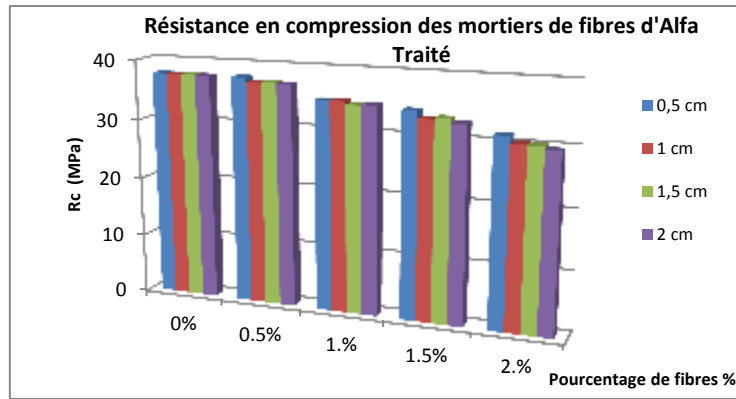


Figure III.18 : Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibres d'Alfa traitées avec différentes tailles.

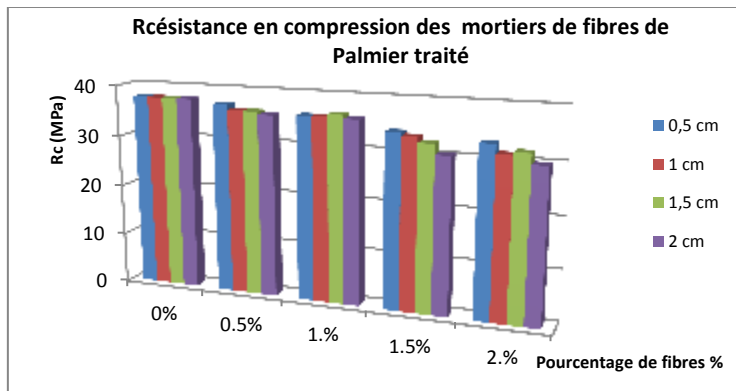


Figure III.19 : Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibres de palmier dattier traitées avec différentes tailles.

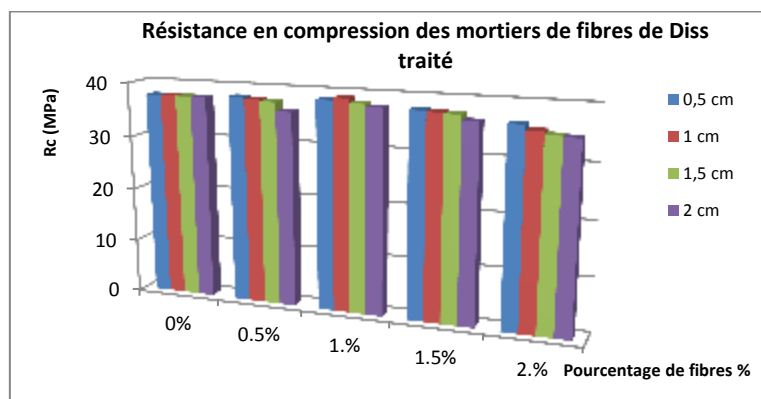


Figure III.20 : Résistance en compression des mortiers aux différents pourcentages de fibres de Diss traitées avec différentes tailles.

III.5.2.2. Résistance à la flexion

Les variations des résistances à la flexion des mortiers de fibre d’Alfa, palmier et Diss traitées en fonction de la longueur et de la teneur en fibres sont représentées sur les figures III.21, III.22 et III.23.

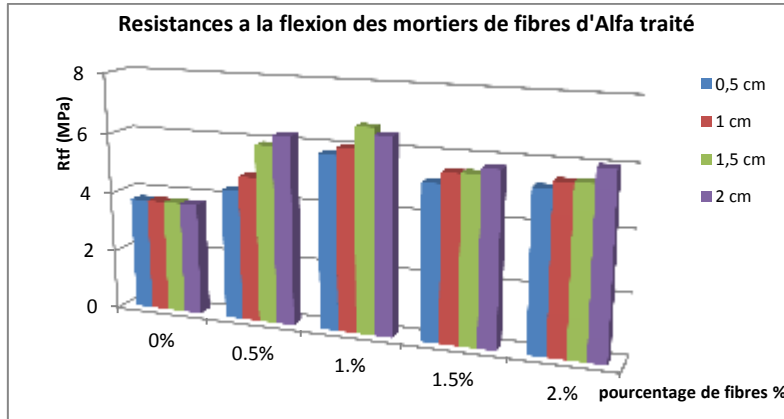


Figure III.21 : Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibres d’Alfa traitées avec différentes tailles.

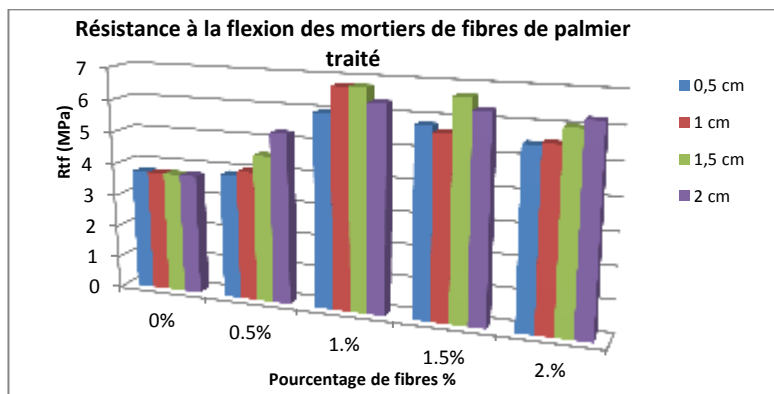


Figure III.22 : Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibres de palmier dattier traitées avec différentes tailles.

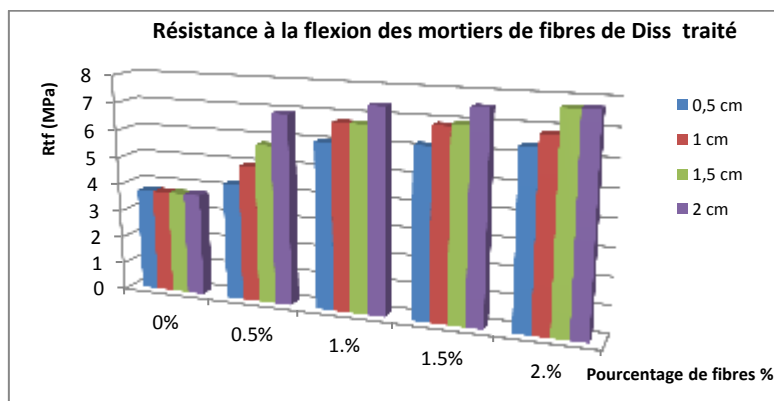


Figure III.23 : Résistance à la flexion des mortiers aux différents pourcentages de fibres de diss traitées avec différentes tailles.

### III.6. Conclusion

A partir des résultats obtenus dans cette expérience, on peut déduire que les fibres traitées améliorent le comportement du mortier, et nous pouvons conclure que chaque type de mortier à un comportement diffère pour améliorer les performances des mortiers.

Les mortiers renforcés par des fibres traitées ont des valeurs de résistance plus élevées que celle des mortiers renforcées par des fibres non traitées. Le traitement nettoie la surface de la fibre et augmente sa rugosité, ceci est justifié par les essais réalisés sur les fibres seules, et aussi plusieurs auteurs relèvent un retard de prise lié à l'incorporation de fibres végétales brute, pour cela nous avons choisi de traiter les fibres. Et on a remarqué que l'augmentation de la fraction des fibres utilisées fait accroître la ductilité du matériau en améliorant son seuil de fissuration, les meilleurs résultats sont obtenus pour 1% et 2% de fibres.

Les taux optimal et le traitement des fibres végétales est choisi pour l'étude sur le comportement physico-mécanique et le retrait de dessiccation et endogène des mortiers et bétons.

### III.7. Influence de fibres végétales sur les propriétés du mortier

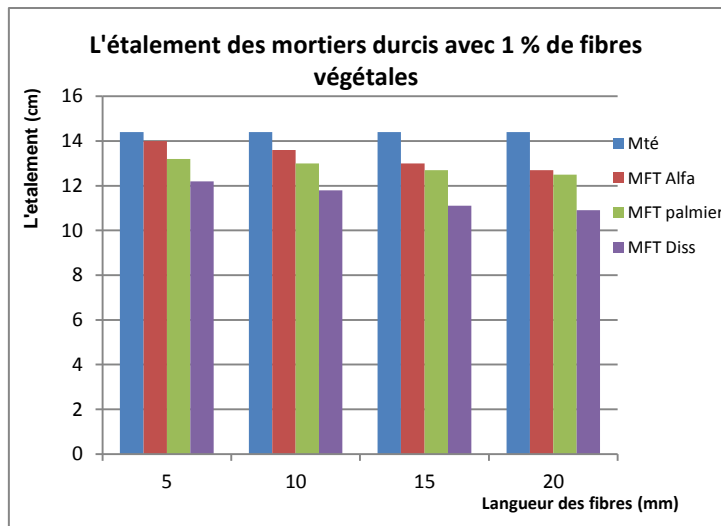
#### III.7.1. Propriétés à l'état frais

##### III.7.1.1. Effet de fibres sur l'étalement à la table à secousses des mortiers

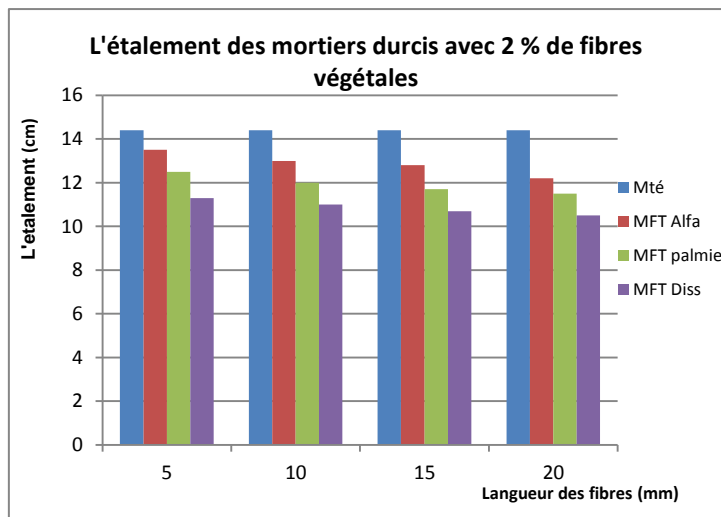
D'après la norme NBN EN 1015-3, la valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses, l'étalement du mortier témoin est égal à 14,4 cm.

**Tableau III.3 :** Effet de la longueur et pourcentage des fibres végétales sur l'étalement du mortier

L'étalement des mortiers fibrés ( $\text{kg/m}^3$ )								
	1%				2%			
Longueurs	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
<b>MF Alfa T</b>	14,0	13,6	13,0	12,7	13,5	13,0	12,8	12,2
<b>MF Palmier T</b>	13,2	13,0	12,7	12,5	12,5	12,0	11,7	11,5
<b>MFT Diss T</b>	12,2	11,8	11,1	10,9	11,3	11,0	10,7	10,5



**Figure III.24 :** Effet des longueurs des fibres végétales sur l'étalement du mortier avec un taux de 1%



**Figure III.25 :** Effet des longueurs des fibres végétales sur l'étalement du mortier avec un taux de 2%

Les figures II.24 et II.25 montrent que la maniabilité des mortiers caractérisée par les valeurs d'étalement est affectée par l'augmentation de la longueur et de taux des fibres. Avec un rapport E/C fixe, les mortiers avec des fibres de Diss comme les mortiers avec des fibres de Palmier et d'Alfa, on constate une diminution de la maniabilité des mortiers avec l'augmentation de taux des fibres et la longueur de celle ci, ceci s'explique par l'effet de l'absorption et l'effet de surface des fibres.



### III.7.2. Propriétés à l'état durci

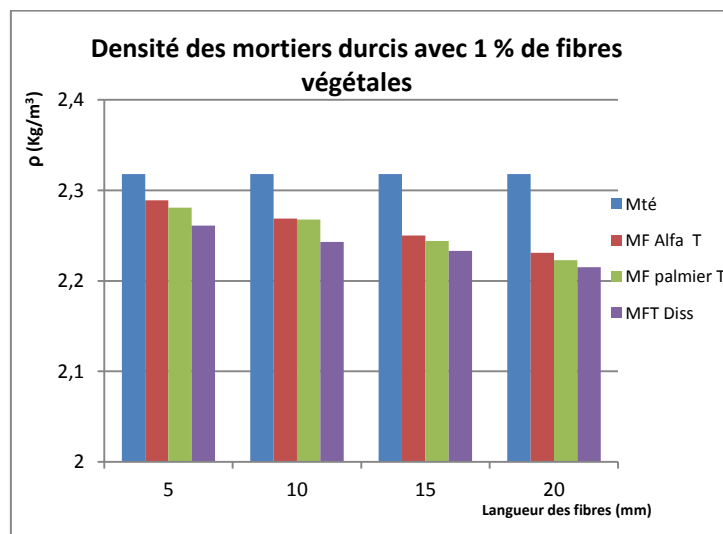
#### III.7.2.1. Effet de fibres sur la densité des mortiers durcis

La masse volumique des mortiers classiques et mortiers fibrés est mesurée après 28 jours de durcissement. Les résultats obtenus illustrés par les figures III.26 et regroupés dans le tableau III.4 montrent l'effet du taux, de la longueur et la nature des fibres sur la densité des mortiers.

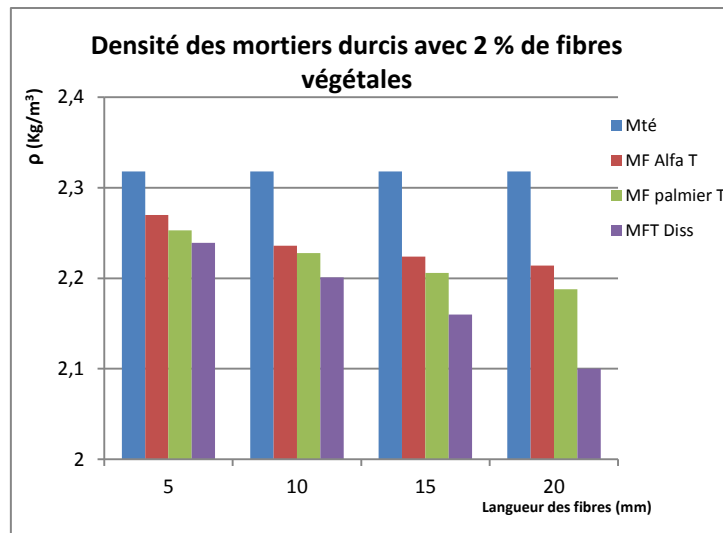
**Tableau III.4 :** Effet de la longueur et du pourcentage des fibres végétales sur la densité du mortier

Densité des mortiers durcis ( $\text{kg/m}^3$ )								
	1%				2%			
Longueurs	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
<b>MF Alfa T</b>	2.289	2.269	2.250	2.231	2.270	2.236	2.224	2.214
<b>MF Palmier T</b>	2.281	2.268	2.244	2.223	2.253	2.228	2.206	2.188
<b>MF Diss T</b>	2.261	2.243	2.233	2.215	2.239	2.201	2.160	2.100

Mortier témoin =  $2.318 \text{ kg/m}^3$



**Figure III.26 :** Effet des longueurs des fibres végétales sur la densité du mortier avec un taux de 1%

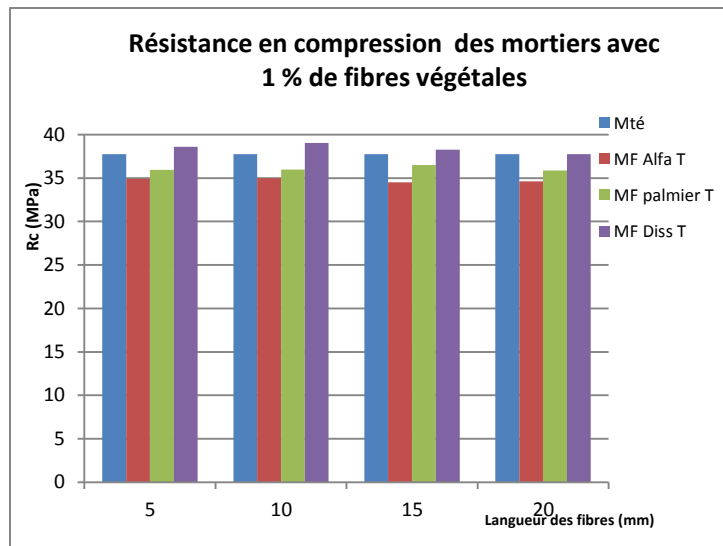


**Figure III.27 :** Effet des longueurs des fibres végétales sur la densité du mortier avec un taux de 2%

On remarque que l'effet de l'ajout des fibres végétales sur la masse volumique des mortiers est négligeable. Une légère diminution est enregistrée cela est dû à la faible densité des fibres d'Alfa, Palmier et fibre Diss. Les résultats obtenus dans les figures III.26, III.27 montre que les masses volumiques des composites diminuent quand le volume des fibres augmente.

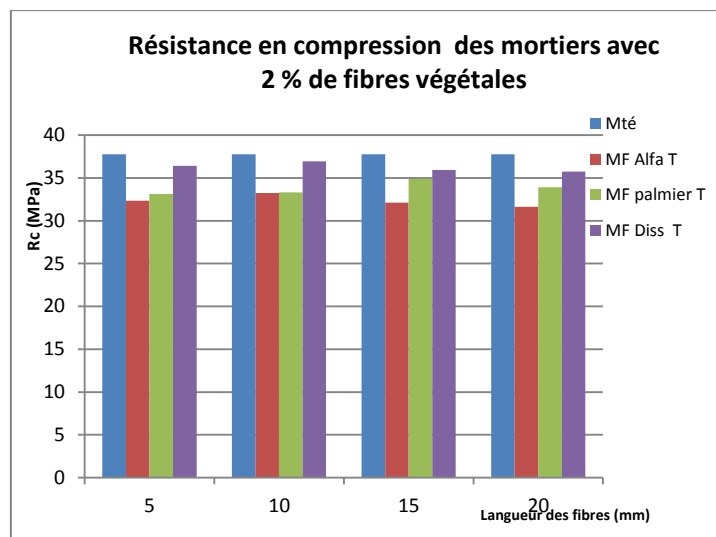
### III.7.2.2. Effet de la longueur et pourcentage de fibres végétales sur la résistance en compression des mortiers

La figure III.28 représente les résultats de la résistance en compression obtenus à 28 jours pour les mortiers témoins et les mortiers renforcé par 1% des fibres végétales (d'Alfa, palmier dattier et diss) et leurs différentes longueurs. Au regard de ces résultats, nous constatons une diminution nette de la résistance en compression des échantillons fibrés par rapport à l'échantillon de référence, cette diminution est enregistrée pour toutes les longueurs de fibre d'Alfa et fibre de palmier dattier et est due à l'augmentation du nombre de défauts des fibres (à la répartition des fibres, à sa morphologie et sa surface lisse). Ces résultats sont confirmés par d'autres études [Chafei 2015], [Ali-Boucetta 2016] et [Mokhtari 2006]. Cependant, avec l'adjonction de fibres de Diss la résistance à la compression du composite augmente par rapport au mortier de référence avec un taux d'amélioration de l'ordre de 3,44% pour une longueur de 2 cm, ceci est due à sa surface rugueuse qui assure un bon encrage avec la matrice.



**Figure III.28 :** Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales traités

La figure III.29 montre les résultats de la résistance à la compression de mortier renforcé par 2% de fibres végétales et leurs différentes longueurs. On voit que la résistance en compression des mortiers de fibres sont inférieures à celles du mortier témoin. Et en comparant ces résultats avec les valeurs de taux de 1%, on voit que la résistance diminue ce qui peut être expliqué par l'augmentation du volume de vide créé par l'incorporation d'un pourcentage élevé des fibres d'où l'obtention d'un composite moins dense. On constate que plus le pourcentage de fibres augmente plus la résistance diminue quel que soit le type de fibre.

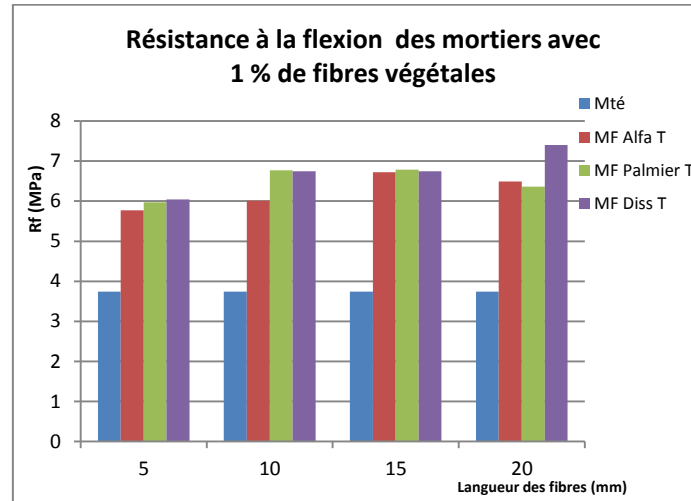


**Figure III.29 :** Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales traités

### III.7.2.3. Effet de la longueur et pourcentage de fibres végétales sur la résistance à la flexion des mortiers

La figure III.30 montre les résultats de la résistance en flexion de mortier renforcé par 1% de fibres végétales et leur différentes longueurs. On a remarqué que l'incorporation des fibres végétales dans le mortier améliore leur comportement en flexion, cette augmentation croît avec la longueur des fibres végétales utilisées. Les meilleures valeurs sont obtenues avec les fibres de diss avec un taux d'amélioration de l'ordre de 97,86% pour la longueur de 2 cm, sa surface rugueuse assure leur adhérence avec la matrice. [Lima 2016], [Ali-Boucetta 2016] et [Mokhtari 2006] ont remarqué que la résistance en flexion de ces matrices, telles que les mortiers ou les pâtes de ciment, peut être considérablement améliorée grâce aux propriétés mécaniques des fibres (résistance en traction élevée).

Pour le mortier de fibres d'Alfa et palmier dattier dans premier temps plus la longueur des fibres est importante plus la résistance en flexion est améliorée, ce pendant au-delà d'une longueur critique 1.5 cm la résistance en flexion n'augmente plus, cette amélioration est traduite par un taux d'amélioration pour le mortier de fibres d'Alfa de l'ordre de 79,67% avec une longueur de 2 cm et pour le mortier de fibre de palmier une amélioration de l'ordre de 81,55% pour la même longueur.



**Figure III.30** : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales traités

La figure III.31 montre les résultats de la résistance à la flexion de mortier renforcé par 2% de fibres végétales et leurs longueurs. L'évolution du comportement des composites en flexion par rapport à celui de mortier témoin, montre que tous les fibres jouent le rôle de renfort pour la matrice en lui offrant une ductilité intéressante en augmente le taux des celle-ci. Avec un

taux amélioration très intéressante pour les mortiers de fibres d'Alfa, Palmier et Diss égale à 80.21%, 88.77% et 106,42% respectivement pour la longueur de 2 cm.

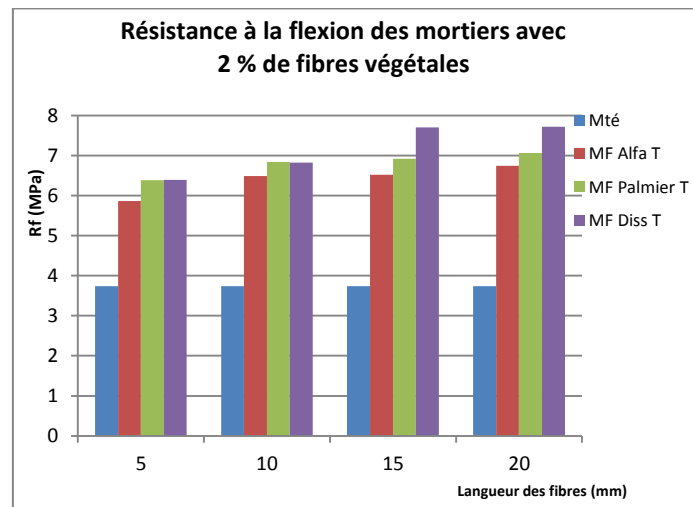


Figure III.31 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales traités

III.7.3.Effet des fibres végétales sur le retrait de dessiccation et endogène des mortiers

III.7.3.1. Retrait de dessiccation

L'évaluation du retrait de dessiccation du mortier en fonction du la longueur des fibres est montré sur les figures III.32, III.34 et III.36 respectivement pour les types des fibres utilisé alfa, palmier et diss pour le pourcentage de 1%.

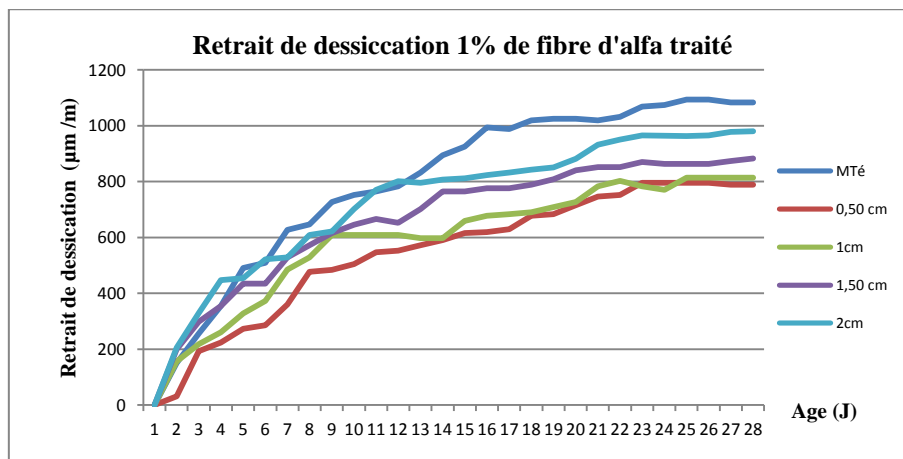


Figure III.32 : Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des mortiers

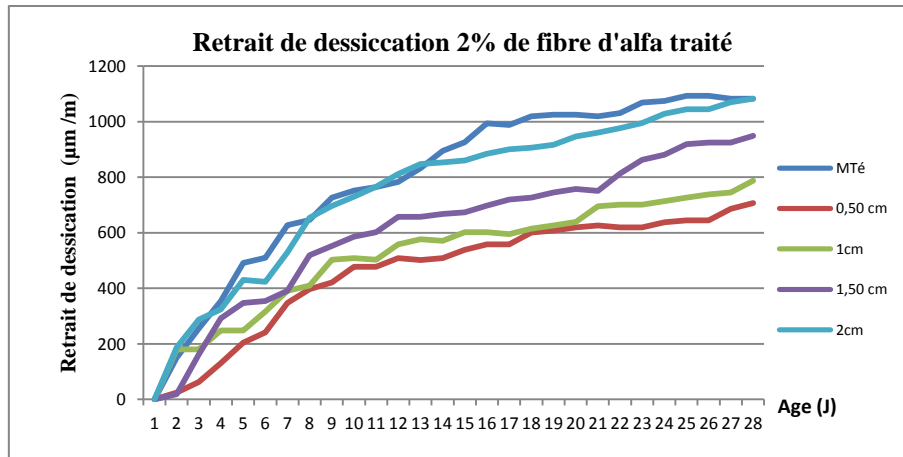


Figure III.33 : Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des mortiers

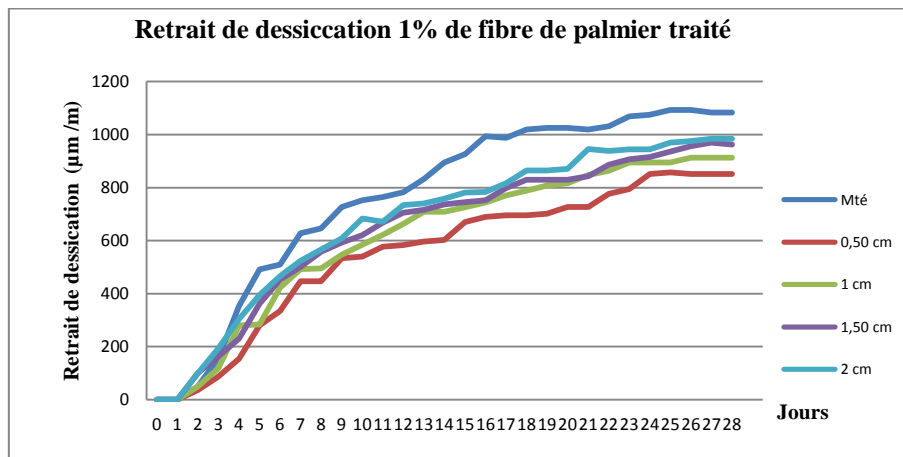


Figure III.34 : Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des mortiers

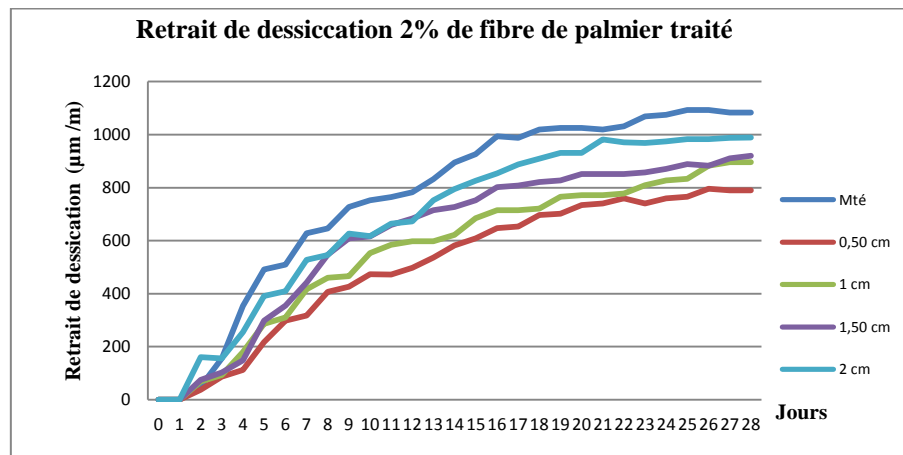
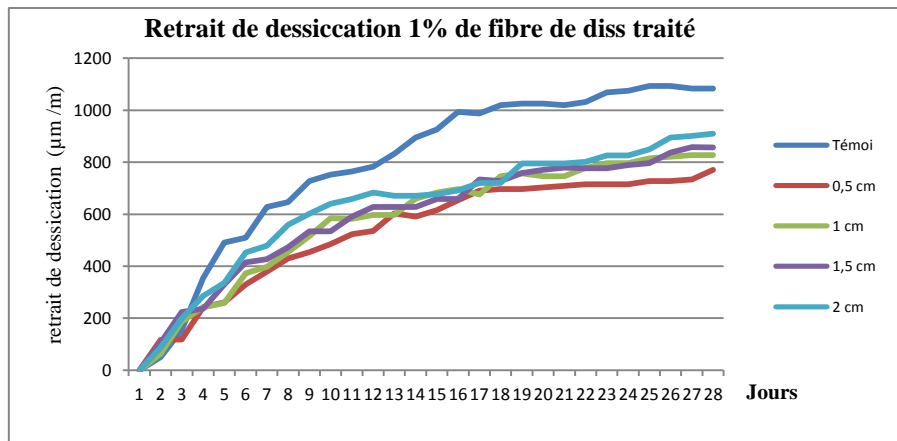
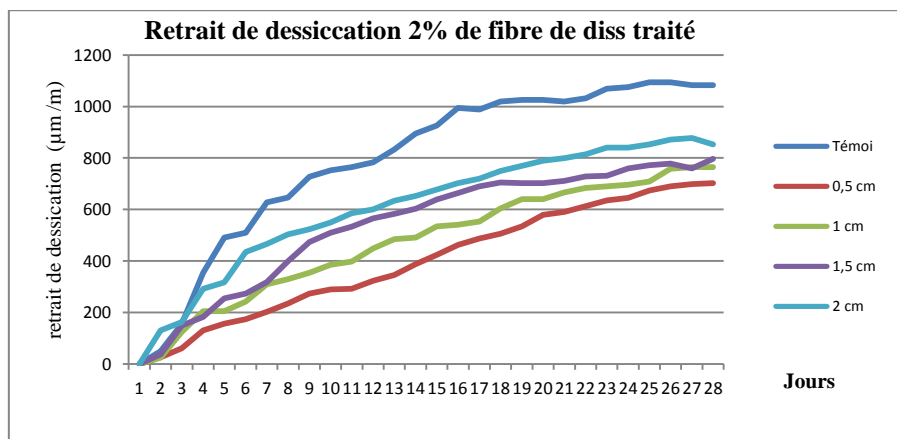


Figure III.35 : Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des mortiers



**Figure III.36 :** Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des mortiers



**Figure III.37 :** Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des mortiers

Les trois courbes montrent que chaque fibre a un comportement qui diffère de l'autre. Nous observons que la fibre de diss a des capacités de diminuer le retrait. Ceci pourrait être attribué à sa surface rugueuse et la matrice qui pénètre à l'intérieur de la fibre, qui assure une bonne adhérence matrice/fibres. Cela permet de contrôler l'ouverture de fissure et par la suite il limite le retrait. Le même comportement qui a été observé pour la fibre de palmier, il diminue le retrait lorsque l'on augmente la longueur et limite la propagation de fissure de retrait à cause de sa surface qui compose des rainures, voire figure (II.18-b). [Arabi 2006] a permis de valider l'hypothèse de développement d'une surface spécifique importante pour la fibre de longueur 3mm dosée à des teneurs élevées, ce qui a réduit le retrait par rapport au matériau témoin en faisant la comparaison entre les courbes. Il apparaît cependant que les fibres de tailles 6 et 12mm n'améliorent pas le retrait.

- La fixation de la fibre à la matrice sera meilleure avec une fibre ayant une surface rugueuse qu'une fibre ayant une surface lisse
- Le retrait augmente avec l'augmentation de la longueur de celle si

Les figures III.33, III.35 et III.37 montre l'évaluation du retrait de dessiccation en fonction du la longueur des fibres pour le taux de 2%.

### III.7.3.2. Retrait endogène

Les figures III.38, III.39, III.40, III.41, III.42 et III.43 illustres l'évaluation du retrait moyen des éprouvettes de 4x4x16 cm protégées de la dessiccation en fonction du temps des mortiers de fibres alfa et palmier et diss, pour les deux taux 1% et 2%.

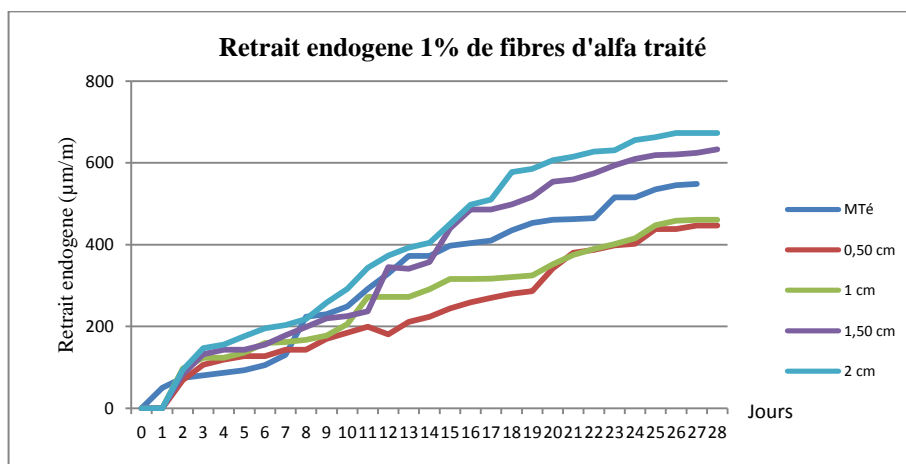


Figure III.38 : Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité un taux de 1% sur le retrait endogène des mortiers

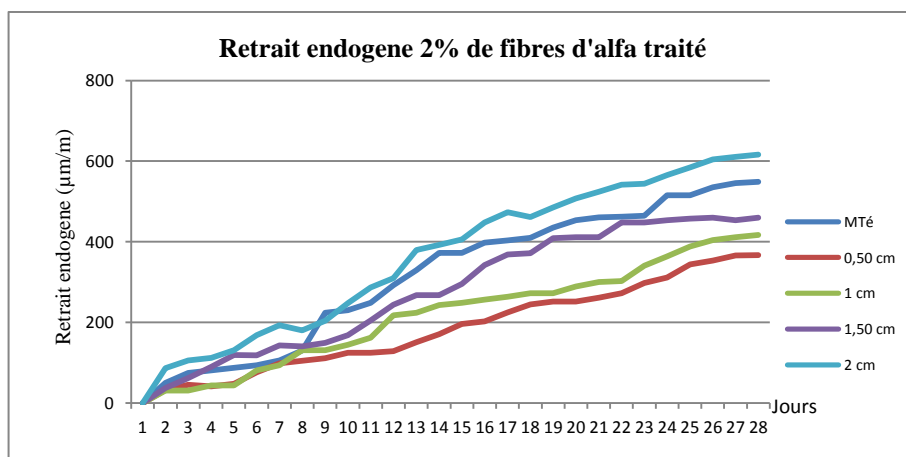


Figure III.39 : Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des mortiers



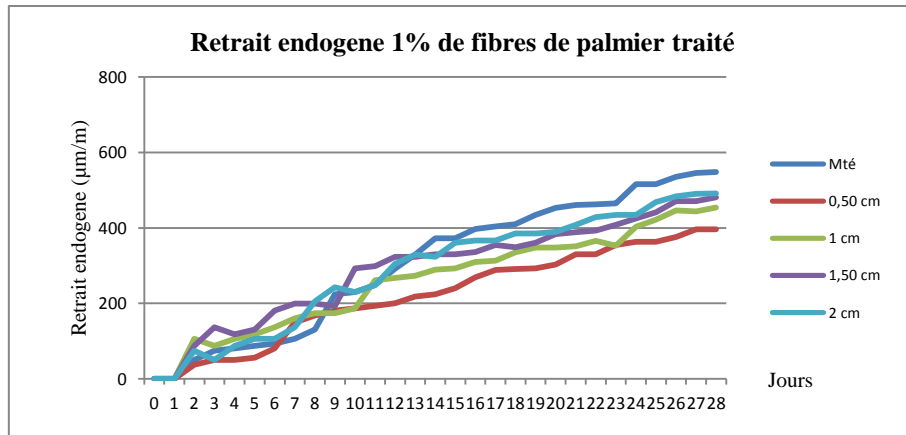


Figure III.40 : Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 1% sur le retrait endogène des mortiers

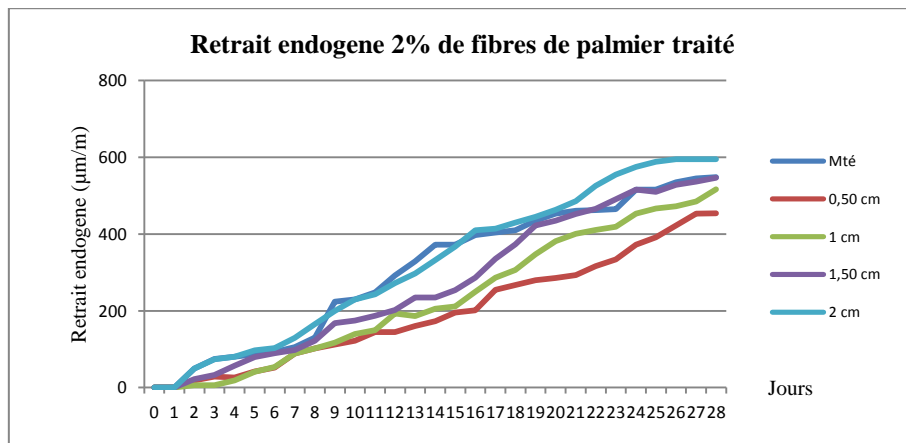


Figure III.41 : Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des mortiers

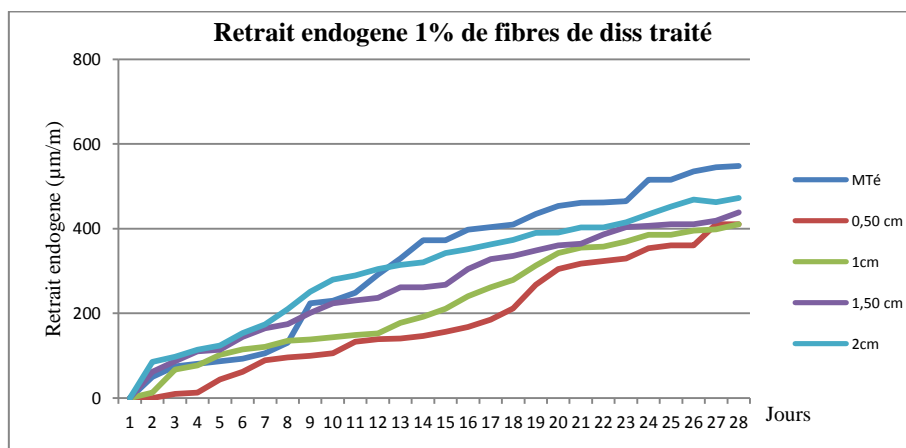
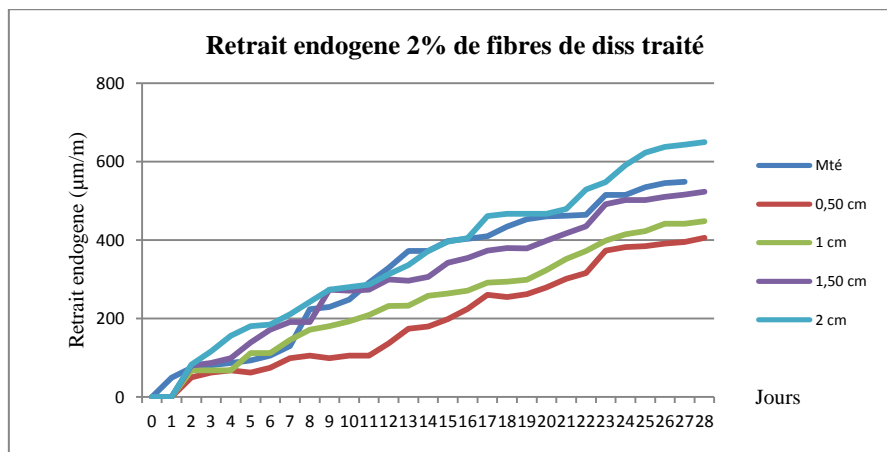


Figure III.42 : Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 1% sur le retrait endogène des mortiers



**Figure III.43** : Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des mortiers

Pour le retrait endogène d'après [Neville 2000], quand le rapport E/C est faible plus l'amplitude et la cinétique de ce retrait sera importante. Le rapport dans notre essai va diminuer avec l'augmentation de la longueur et le taux des fibres. D'après l'essai présidâmes de l'absorption d'eau (tableau II.7 et II.8). La fibre de diss et de palmier ont une forte absorption d'eau donc le rapport E/C va diminuer lorsque on augmente la longueur des fibres, mais ces deux fibres possèdent une structure rugueuse qui empêche le retrait pour ce développé. Pour la fibre d'alfa l'hypothèse de [Neville 2000] va se valider parce qu'il absorbe de l'eau et le rapporte E/C va diminuer lorsque on augmente la longueur des fibres et par la suite le retrait endogène va augmenter comme on l'aperçoit sur la (figure III.38 et III.39)

- La fibre de diss limite le retrait au jeune âge
- Une absorption d'eau élevée des fibres végétales est due à leur caractère hydrophile
- La rugosité de fibres aide à limiter le retrait

### III.8. Influence des fibres végétales sur les propriétés du béton ordinaire

#### III.8.1. Propriétés à l'état frais

##### III.8.1.1. Effet des fibres sur l'ouvrabilité du béton

Les figures III.45 et III.46 montre que l'incorporation des fibres végétales donne une diminution de l'affaissement. Cela s'explique par l'absorption d'eau des fibres avec l'augmentation de la longueur et le pourcentage. On peut considérer que l'influence du dosage en fibres végétales sur la maniabilité caractérisée par l'affaissement est importante, mais les

bétons fibrés restent toujours dans le domaine plastique à ferme. L'affaissement du béton témoin égale à 9 cm.



Figure III.44 : Effet de pourcentage des fibres végétales sur l'affaissement du béton

Tableau III.5: Effet de pourcentage et de la longueur des fibres végétales sur l'affaissement du béton

L'affaissement du béton (cm)								
	1%				2%			
Longueurs	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
<b>BF Alfa T</b>	8	7.5	7	5	7	6	5.5	4
<b>BF Palmier T</b>	7.5	6.5	6	4.5	6	4	3	2.5
<b>BF Diss T</b>	7	6	5	4	5	4.5	3	2

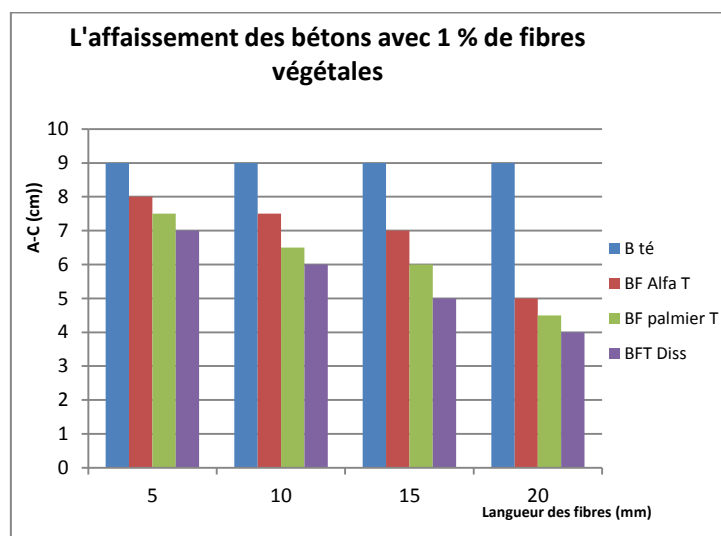
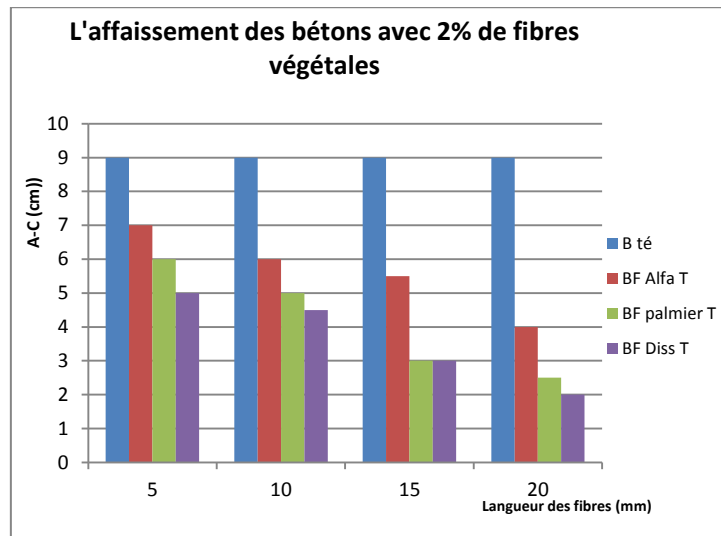


Figure III.45 : Affaissement des bétons avec 1% de fibres végétales traitées



**Figure III.46 :** Affaissement des bétons avec 2% de fibres végétales traité

- On observe une formation de boulettes de fibres pour les longueurs de 1,5 et 2 cm avec un taux de 2% : l’agglomération des fibres entre elles durant le malaxage. Le degré d’agglomération dépend du type et de la longueur des fibres utilisées, la fraction volumique de fibre présente dans le composite cimentaire.

**III.8.2. Propriétés à l’état durci**

**III.8.2.1.Effet de fibres sur la densité des bétons durcis**

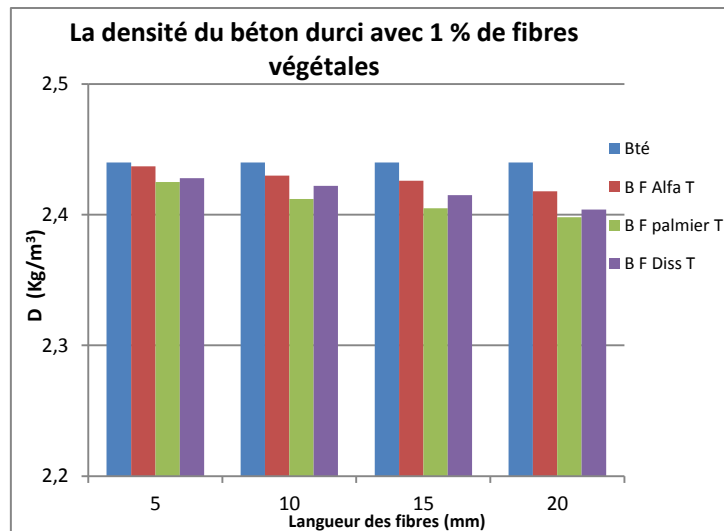
Le tableau III.6 représentent l’évolution de la masse volumique des composites en fonction des différentes longueurs et pourcentages des fibres végétales, on remarque que la masse volumique diminue en fonction de la concentration des fibres quel que soit la longueur.

La densité du béton témoin égale à 2.440 kg/m<sup>3</sup>.

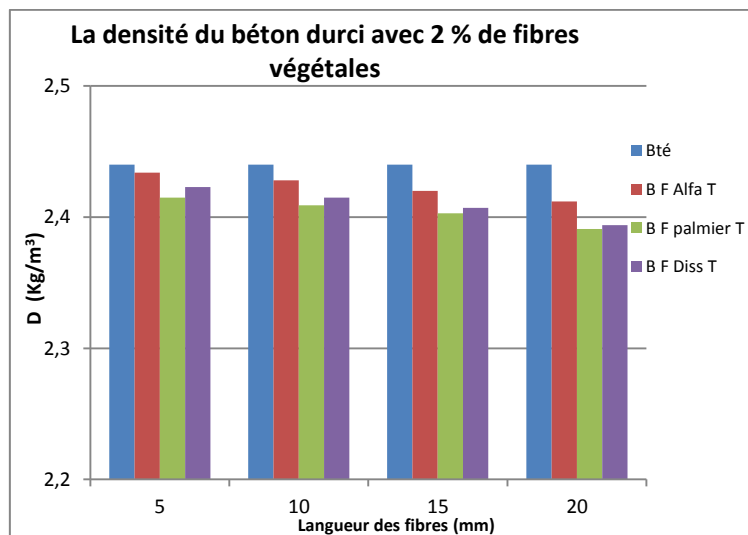
**Tableau III.6:** Effet de pourcentage et de la longueur des fibres végétales sur la densité du béton

La densité du béton (kg/m <sup>3</sup> )								
	1%				2%			
Longueurs	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm	0.5 cm	1 cm	1.5 cm	2 cm
<b>BF Alfa T</b>	2.437	2.43	2.426	2.418	2.434	2.428	2.42	2.412
<b>BF Palmier T</b>	2.425	2.412	2.405	2.398	2.415	2.409	2.403	2.391
<b>BF Diss T</b>	2.428	2.422	2.415	2.404	2.423	2.415	2.407	2.394

Les figures III.47 et III.48 représentent les résultats de la densité du béton durci avec 1 % et 2% de fibres végétales



**Figure III.47:** Densité du béton durci avec 1 % de fibres végétales



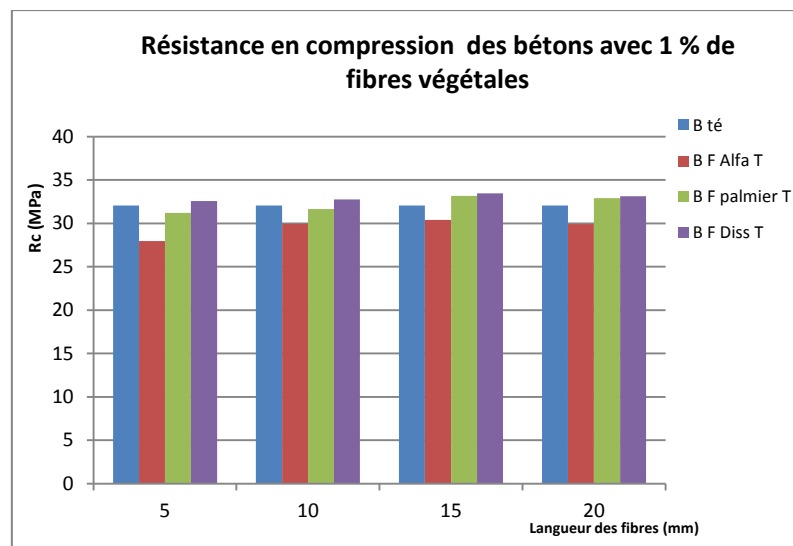
**Figure III.48 :** Densité du béton durci avec 2 % de fibres végétales

Les résultats obtenus dans notre travail expérimental indiquent que l'incorporation de faible ou de grande quantité de fibre dans le béton influe directement sur les masses volumiques des bétons de fibres végétales, Même remarque est faite pour les échantillons chargés par des diffèrent longueur de fibres. Ces résultats sont en accord avec d'autres études de la littérature [Morlier1991]. Qui ont souligné que l'augmentation du pourcentage des fibres naturelles dans la matrice diminue la masse volumique des composites. Cette diminution est reliée d'une part à la faible masse volumique des inclusions et d'autre part au vides présents dans la matrice engendrés par la perte d'eau des fibres.

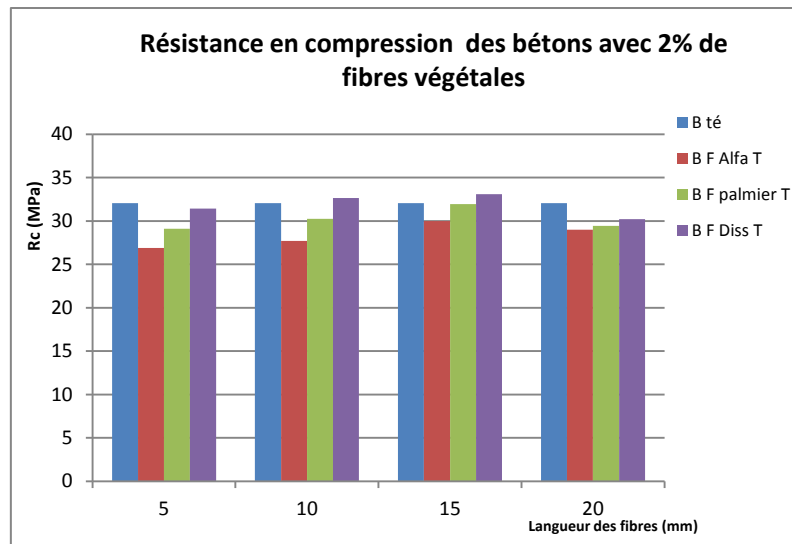
### III.8.2.2. Effet de la longueur et pourcentage de fibres végétales sur la résistance en compression des bétons

La figure III.49 représente les résultats de la résistance en compression obtenus à 28 jours pour les bétons témoins et les bétons renforcés par 1% des fibres végétales (d'Alfa, palmier dattier et diss). Au regard de ces résultats, nous constatons une diminution nette de la résistance en compression des échantillons fibrés par rapport à l'échantillon de référence, cette diminution est enregistrée pour toutes les longueurs de fibre d'Alfa et fibre de palmier dattier et est due à l'augmentation du nombre de défauts des fibres (la non uniformité à la répartition des fibres, à sa morphologie et sa surface lisse et peut rugueuse), Ces résultats sont confirmés par d'autres études [Bahloul 2009], et les ciments renforcés par des fibres courtes développent de plus faibles résistances que ceux renforcés par des fibres longues [Coutts1995]. Cependant, avec l'adjonction de fibres, la résistance à la compression du composite diminue par rapport au béton de référence.

On voit que la résistance en compression des bétons de fibres est en général inférieure à celle du béton témoin. Mais la résistance des bétons de fibre de diss est supérieure aux deux bétons de Palmier et d'Alfa avec un taux d'amélioration de 4,39% pour la longueur de 2 cm par son caractère rugueux et un bon encrage des fibres avec la matrice.



**Figure III.49** : Evolution de la résistance à la compression des bétons renforcés de 1% de fibres végétales traitées



**Figure III.50** : Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés de 2% de fibres végétales traités

L'influence du taux de fibre jusqu'à 1% ne modifie pas de façon significative la résistance à la compression, par contre avec un taux élevé en fibre arrive à 2% on constate une chute de la résistance en compression à 28 jours cela peut expliquer que le dosage élevé en fibre augmente le nombre des vides qui se forme entre les fibres (enchevêtrement des fibres) figure III.50.

En comparant ces résultats avec les valeurs des contraintes de taux de 1%, on constate que plus le pourcentage de fibres augmente plus la résistance diminue quel que soit le type de fibre.

### III.8.2.3. Effet de la longueur et pourcentage de fibres végétales sur la résistance à la traction par flexion des bétons

La figure III.51 montre les résultats de la résistance à la flexion des bétons renforcés par 1% de fibres végétales et leurs longueurs, on a remarqué que tous les fibres jouent le rôle de renfort pour la matrice en lui offrant une ductilité intéressante. L'incorporation des fibres végétales dans le béton permet d'améliorer la résistance en flexion lorsque on augmente le taux de celle-ci, et cette augmentation croît avec la longueur des fibres végétales utilisée. (Les meilleures valeurs sont obtenues avec les fibres de diss avec un taux d'amélioration attendu 37,30% pour la longueur de 2 cm, sa surface rugueuse assure leur adhérence avec la matrice). [Savastano 2000] et [Andonian 1979] ont remarqué que la résistance en flexion de ces matrices, Telles les bétons ou les pâtes de ciment, peut être considérablement améliorée grâce aux propriétés mécaniques des fibres (résistance en traction élevée). Pour le mortier de fibres

d'Alfa et palmier dattier, dans premier temps, plus la longueur des fibres est importante plus la résistance en flexion est améliorée, cette amélioration est de 18,15% pour la longueur de 2 cm de fibres d'Alfa. Pour la fibre de Palmier le taux d'amélioration attendre le 27,23 % pour la longueur de 2 cm.

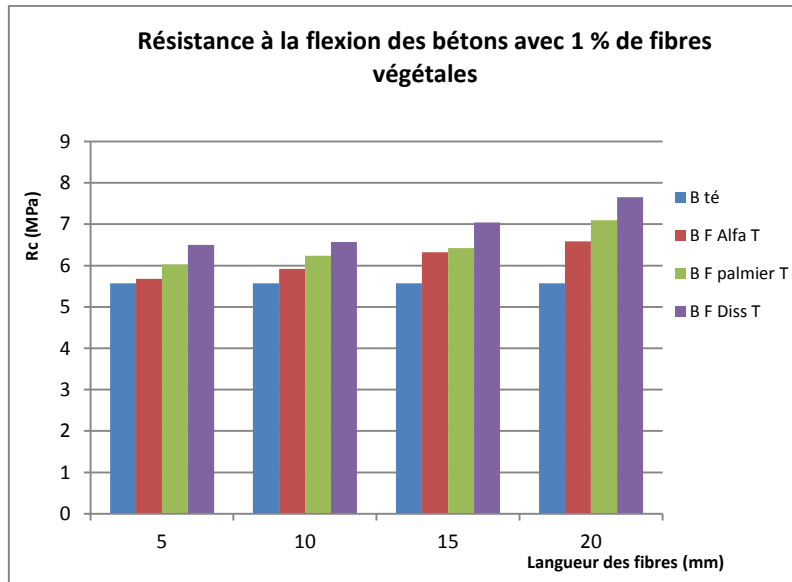


Figure III.51 : Evolution de la résistance à la flexion des bétons renforcés avec 1% de fibres végétales traitées

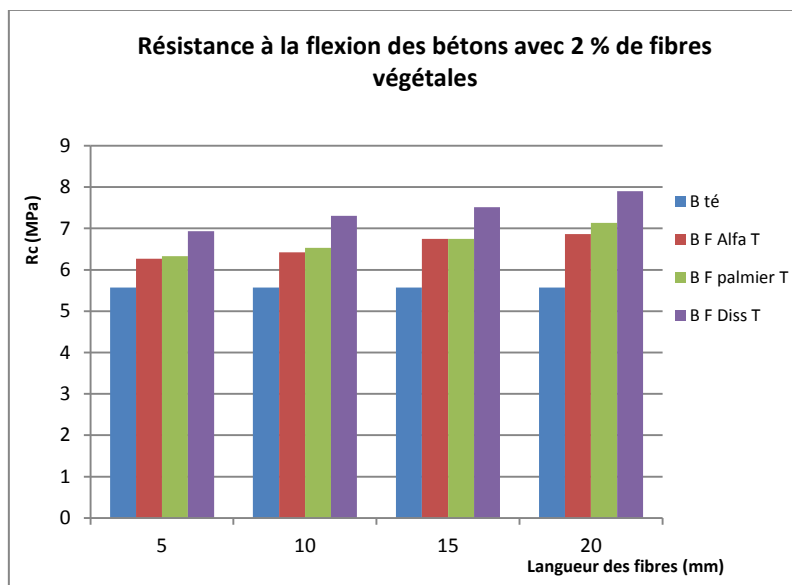


Figure III.52 : Evolution de la résistance à la flexion des bétons renforcés avec 2% de fibres végétales traitées

La figure III.52 montre les résultats de la résistance à la flexion de béton renforcé par 2% de fibres végétales et leur longueur. La résistance la plus faible est celle du béton avec des fibres d'Alfa avec un taux d'amélioration arrive à 23,19% par rapport au béton avec la fibre de diss



qui a donné les meilleurs résultats avec un taux d'amélioration de l'ordre de 41,75%. Cela s'explique par l'état de surface très rugueuse de celle si, la fibre de palmier améliore la résistance à la flexion du béton d'une valeur de 27,97%.

L'ajout de fibres végétales conduit à rendre la rupture du composite ductile. Ces résultats sont confirmés par d'autres études [Tonoli2010] et [Savastano 2000].

### III.8.3.Effet des fibres végétales sur le retrait de dessiccation et endogène des bétons

#### III.8.3.1. Retrait de dessiccation

L'évaluation du retrait de dessiccation en fonction du la longueur des fibres est montré sur les figures III.53, III.55, et III.57, respectivement pour les types des fibres utilisé d'alfa, de palmier et de diss pour un taux de 1%

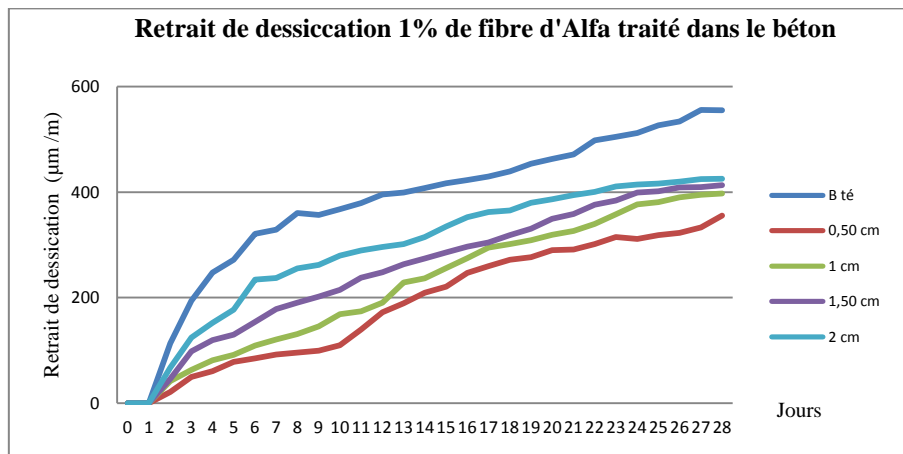


Figure III.53 : Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des bétons

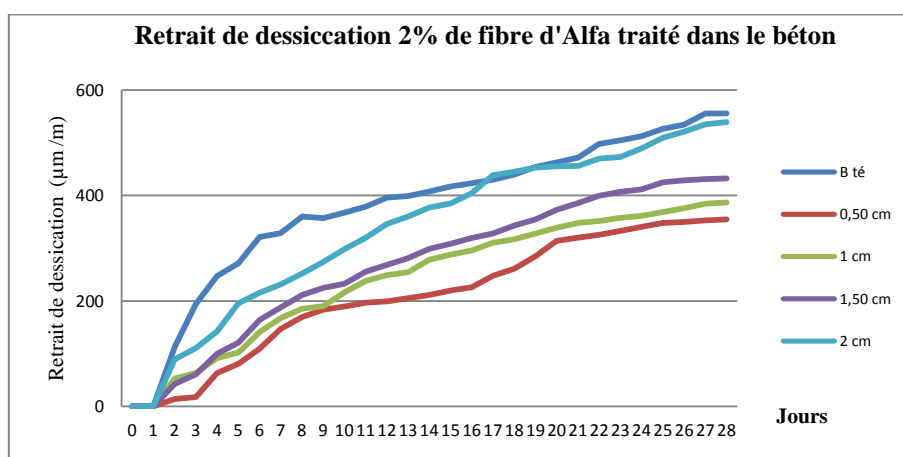


Figure III.54 : Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des bétons

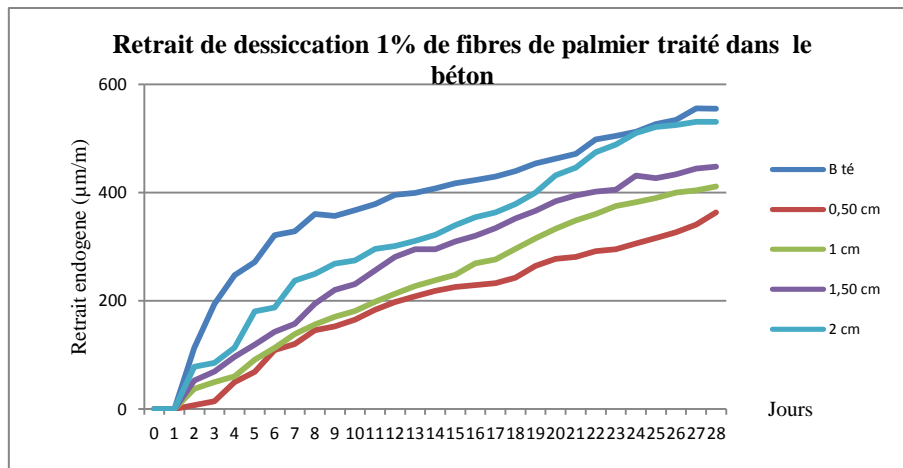


Figure III.55 : Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des bétons

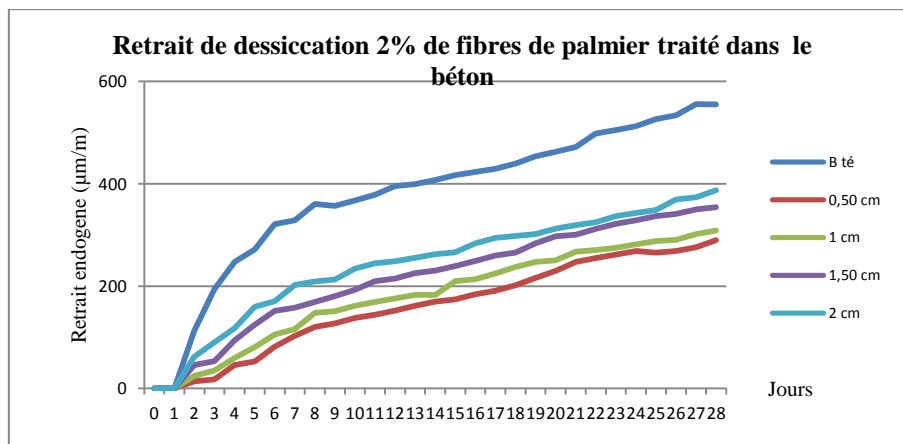


Figure III.56 : Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des bétons

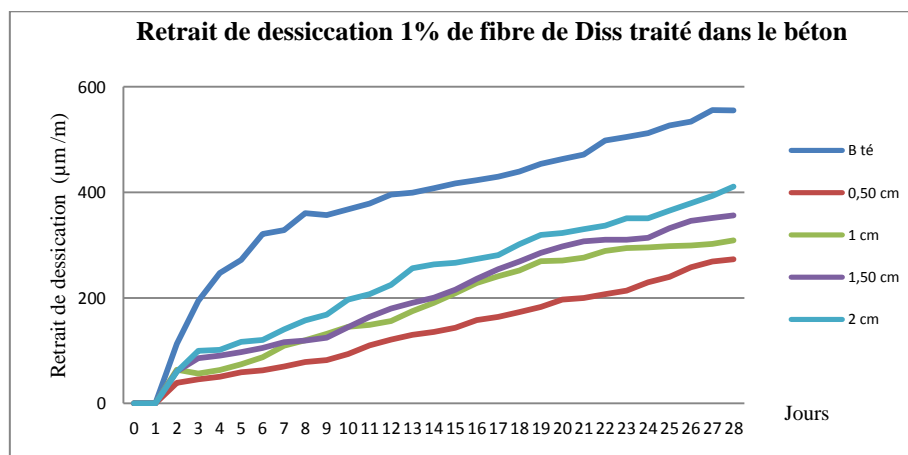
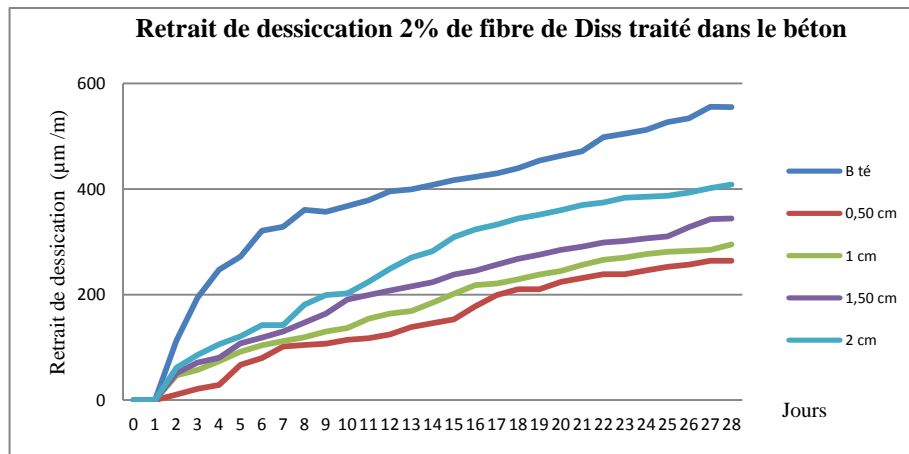


Figure III.57 : Effet de la longueur de diss traité avec un taux de 1% sur le retrait de dessiccation des bétons

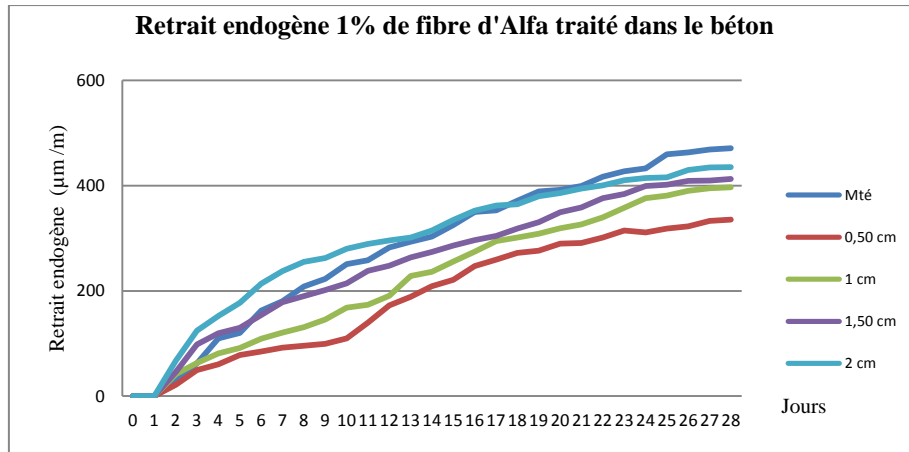


**Figure III.58** : Effet de la longueur de Diss traité avec un taux de 2% sur le retrait de dessiccation des bétons

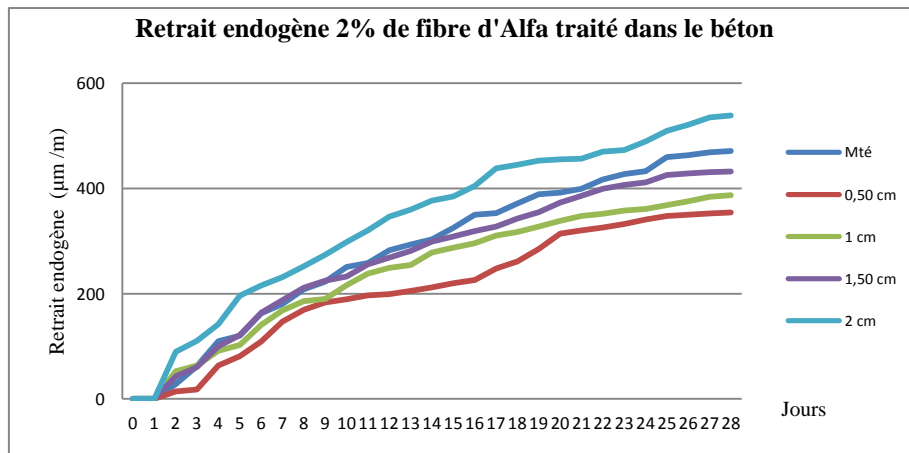
- Pour le béton sans fibres le retrait de dessiccation est plus important durant les premiers jours, le béton développera d'autant moins de retrait lorsque on incorpore des granulats, par rapport au mortier.
- Les résultats montrent que l'addition des fibres végétales quelle que soit leur nature diminue le retrait de dessiccation et de diminuer son amplitude par rapport au retrait du béton sans fibres.
- Le retrait du béton de fibre d'Alfa est plus élevé que les autres bétons de fibres palmier et de diss, à cause de sa surface lisse.
- Les fibres végétales semblent avoir une influence non négligeable sur le processus de retrait. le béton développera d'autant moins de retrait que le volume de fibres sera élevé.
- Les résultats sont confirmés par [Merhoufi 2004], qui a montré que la présence des fibres de palmier dattier dans les bétons, avec un dosage massique de 0.3%, à un effet bénéfique pour la réduction de retrait, de même les travaux de [Kriker 2005] qui confirment la réduction du retrait des mortiers à base de fibres de palmier dosé à 1% en volume [Akchiche 2007].

**III.8.3.2. Retrait endogène**

Les figures III.59, III.60, III.61, III.621, III.63 et III.64, illustre l'évaluation du retrait moyen des éprouvettes de 7x7x28 cm protégées de la dessiccation en fonction du temps des bétons de fibres alfa et palmier et diss, pour les deux taux 1% et 2%.



**Figure III.59** : Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 1% sur le retrait endogène des bétons



**Figure III.60** : Effet de la longueur de fibre d'Alfa traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des bétons

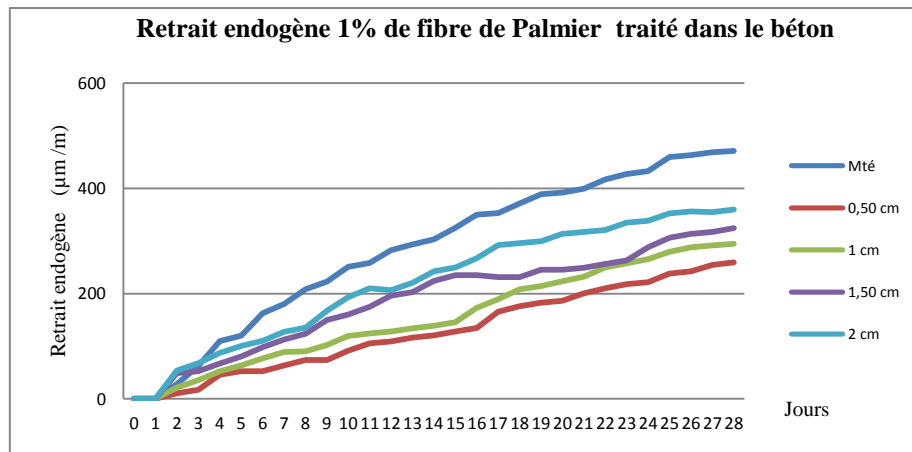


Figure III.61 : Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 1% sur le retrait endogène des bétons

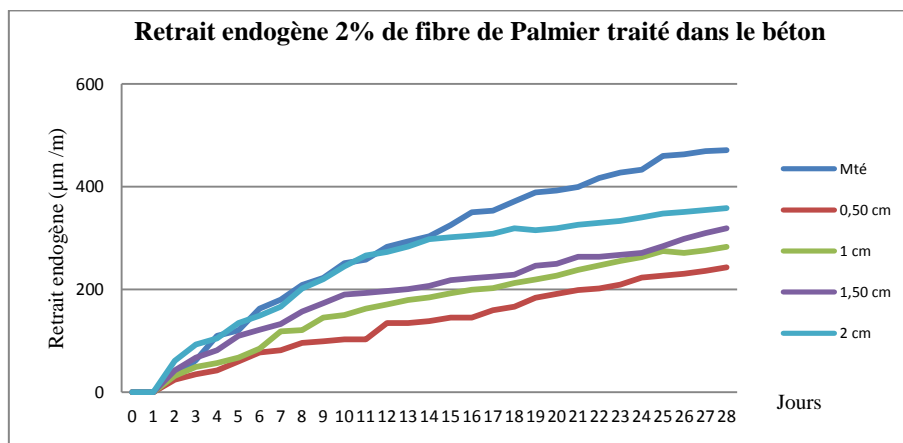


Figure III.62 : Effet de la longueur de fibre de palmier traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des bétons

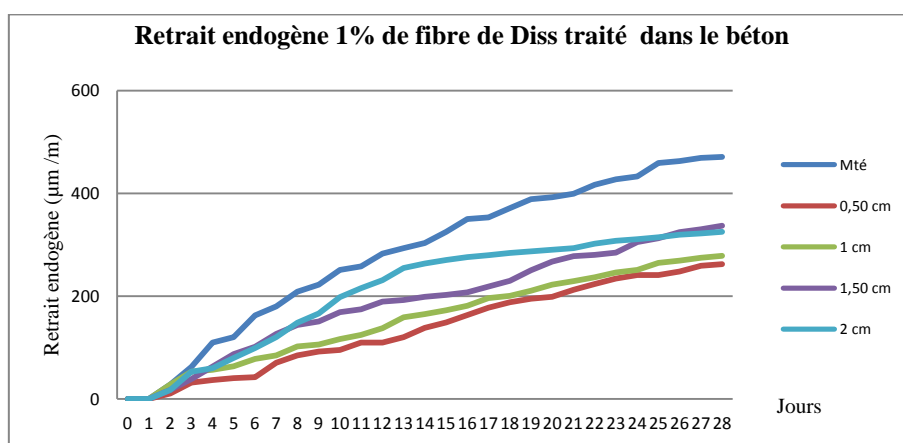
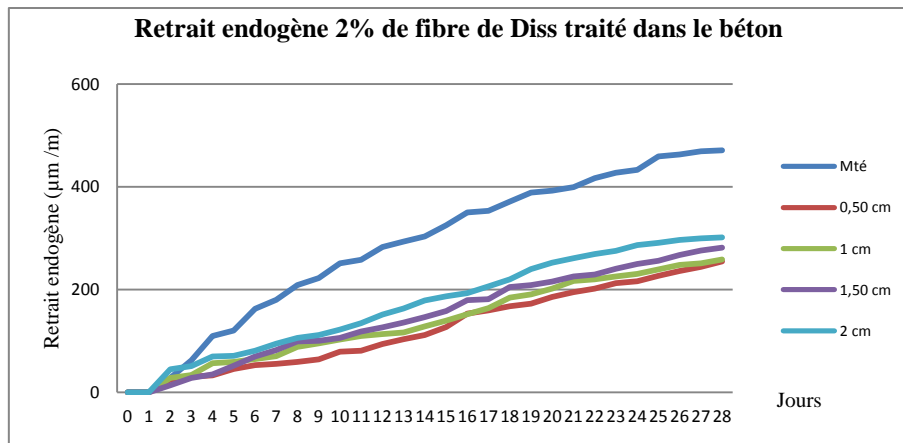


Figure III.63 : Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 1% sur le retrait endogène des bétons



**Figure III.64** : Effet de la longueur de fibre de Diss traité avec un taux de 2% sur le retrait endogène des bétons

- Le béton développera d'autant moins de retrait que le mortier ceci est dû à l'incorporation des granulats dans le béton.
- Les figures III.61, III.62, III.63 et III.64, révèlent que l'introduction de ce type de fibres (fibre de Palmier et fibre de diss) réduit le taux de retrait pendant les 07 premiers jours. ils retardent l'apparition de la première fissure et par la suite ils contrôlent l'ouverture de celle-ci.
- Les courbes obtenues montrent que le béton de fibres de diss présente un retrait inférieur à celui de béton de fibres de palmier et de fibres d'alfa. Mais les valeurs restent toujours inférieures au retrait de béton témoin. Cet effet s'explique par l'opposition des fibres végétales à la déformation endogène.

Les mécanismes de réduction du retrait et la limitation des fissures par les fibres incorporées dans le béton bien que largement étudiés, sont encore mal compris. Les résultats publiés sont parfois contradictoires. Ces contradictions sont probablement liées aux différentes conditions climatiques et ou structurales dans lesquelles les essais ont été réalisés.

En effet, la déformation de retrait endogène est liée à l'avancement de la réaction hydratation, alors que cette réaction dépend de l'humidité relative.

### III.9. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques et le retrait de mortier et béton, en incorporant différents types de fibres végétales. A partir des résultats expérimentaux nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Le traitement par l'eau bouillie des fibres améliore considérablement les caractéristiques mécaniques, les mortiers renforcés par des fibres traités ont des valeurs de résistance plus élevées que celle des mortiers renforcés par des fibres non traitées. Le traitement nettoie la surface de la fibre et augmente sa rugosité, cette amélioration conduisant à l'amélioration de la force d'adhérence inter-faciale et la compatibilité entre la fibre et la matrice.
- Les propriétés physiques du mortier et béton renforcés par des fibres végétales de différentes longueurs et pourcentages ont été comparées au mortier et béton témoin, on montre que l'augmentation de taux et pourcentage de fibres végétales diminue la densité du mortier et béton.
- L'ajout de fibres, comme tout autre type d'inclusions, modifie les propriétés rhéologiques du matériau cimentaire à l'état frais. Dans ce domaine et dans celui, connexe, de la mise en œuvre de ce type de matériaux, les connaissances sont peu établies et les études menées sont relativement rares. Pour de faibles taux de fibres, l'ouvrabilité du béton ne sera pas affectée et la répartition sera homogène dans le mélange. Mais avec un taux élevé de fibres végétales dans le béton conduit à une diminution de sa maniabilité, cette perte d'ouvrabilité est d'autant plus importante que la longueur est importante, à cause d'absorption élevée d'eau des fibres. On observe une formation de boulettes de fibres dans le béton leur de malaxage pour les longueurs de 1,5 et 2 cm avec un taux de 2%, le degré d'agglomération dépend du type et de la longueur des fibres utilisées, la fraction volumique de fibre présente dans le composite cimentaire.
- Nous constatons une diminution de la résistance en compression des échantillons fibrés par rapport à l'échantillon de référence, cette diminution est enregistrée pour toutes les longueurs de fibre d'Alfa et fibre de palmier dattier, mais, avec l'adjonction d'une longueur de 2 cm de fibres de Diss la résistance à la compression du mortier augmente par rapport au mortier de référence avec un taux d'amélioration de l'ordre de 3,44% et pour le béton fibré est de 4,39%, ce qui est dû à sa surface rugueuse qui assure un bon encrage avec la matrice.
- On a remarqué que l'incorporation des fibres végétales dans le mortier améliore leur comportement en flexion, cette augmentation croît avec la longueur des fibres végétales

utilisée. Les meilleures valeurs sont obtenues pour la longueur de 2 cm et avec un pourcentage de 2%, les résultats montre que tous les fibres jouent le rôle de renfort pour la matrice en lui offrant une ductilité intéressante en augmente le taux des celle-ci. Avec un taux amélioration très intéressante pour les mortiers de fibres d'Alfa, Palmier et Diss égale à 80.21%, 88.77% et 106,42% respectivement, et pour le béton de fibres d'Alfa, Palmier et Diss égale à 23.19 %, 27.97 % et 41.75 % respectivement.

- nous observons que la fibre de diss à des capacités de diminuer le retrait ceci pourrait être attribué à sa surface rugueuse et la matrice qui pénètre à l'intérieur de la fibre qui assure une bonne adhérence matrice/fibres, et permet de contrôlé l'ouverture de fissure et par la suite il limite le retrait. Même comportement qui été observer pour la fibre de palmier il diminue le retrait lorsque on diminue la longueur et limite la propagation de fissure de retrait à cause de sa surface qui compose des rainures. Le retrait augmente avec l'augmentation de la longueur de celle-ci. Le retrait du béton de fibre d'Alfa est plus élevé que les autres bétons de fibres de palmier et de diss, à cause de sa surface lisse.
- L'introduction des fibres dispersées dans le béton a pour objectif de contrôler la fissuration du matériau. En effet, le rôle des fibres est de reprendre les efforts de traction dus au phénomène de retrait dans la matrice cimentaire afin de retarder l'initiation puis la propagation instable des fissures. Les mortiers renforcés par les fibres végétales (alfa. palmier et diss) améliore le retrait par la limite de propagation des fissure au cours du temps ; Lorsque on augmente le taux des fibres le retrait va diminuer. la surface et la morphologie des fibres jouent un rôle très important pour réduire le retrait et permet également de contrôler l'ouverture de la fissure par la suite. On peut affirmer que les fibres utilisées peuvent constituer une alternative intéressante pour améliorer la résistance à la fissuration de retrait des matériaux cimentaires.

Pour mieux comprendre le comportement mécanique, physique ou chimique des bétons de fibres, il est important de connaître leur microstructure. En effet il est évident que les propriétés du béton de fibres végétales dépendent directement de la nature, la quantité des fibres et la matrice du béton ainsi que l'adhérence entre eux.





## **CHAPITRE IV**

---

**Durabilité des mortiers et des fibres végétales  
dans des différents milieux agressifs**



---

### IV.1. Introduction

Malgré les résultats encourageants obtenus vis-à-vis des propriétés et notamment des propriétés mécaniques des matériaux de construction renforcés par des fibres végétales, les études réalisées mettent en évidence des déficiences concernant la durabilité des fibres dans la matrice alcaline. Le vieillissement peut donc agir aussi bien sur chacun des constituants, comme sur les deux, mais aussi au niveau de l'interface entre la matrice et les fibres. Le vieillissement d'une pièce composite a donc un impact sur sa durée de vie, ce qui s'exprime par le temps pendant lequel les performances du matériau sont assurées. Afin d'évaluer cette durée de vie, il est possible d'effectuer des expériences en vieillissement naturel, qui sont souvent très longues, il est donc souvent préférable de recourir au vieillissement accéléré en laboratoire, qui permet ainsi de réduire les temps d'expérimentation, un vieillissement naturel sera nécessaire afin de valider les conditions et les résultats du vieillissement accéléré.

On procède à un vieillissement accéléré des fibres végétales le premier est conservé dans Na(OH) à pH 11 et le deuxième est conservé dans Ca(OH)<sub>2</sub> à pH 11,60 pendant 1, 2 et 3 mois afin de distinguer d'une part l'effet du pH et d'autre part celui de la présence des ions calcium par une observation au MEB et par la résistance des fibres végétales.

La résistance mécanique des mortiers de fibres à courte et à longue terme à 28 jours et 6 ans, pour voir la durabilité des fibres dans une matrice cimentaire. Pour voir l'effet de l'attaque alcaline du ciment sur la structure de fibre on a observé les fibres par MEB durant le vieillissement naturellement et accéléré des fibres à 3 mois et 6 ans.

### IV.2. Influence de Mode de conservation des éprouvettes sur le comportement mécanique des mortiers fibrés

#### IV.2.1. Résistance à la traction par flexion des mortiers renforcés par des fibres végétales avec différents modes de conservation

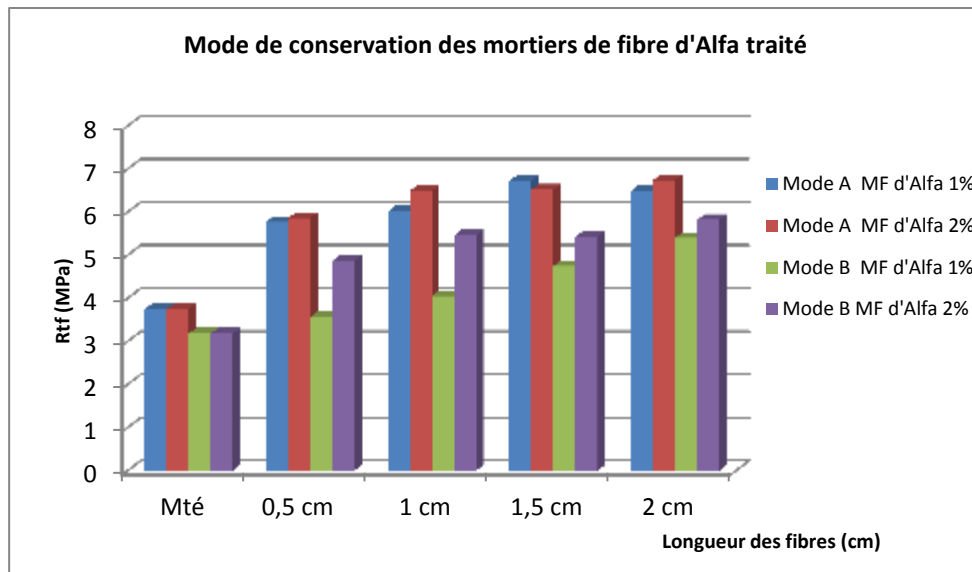
On a utilisé trois échantillons de chaque type de fibres (Alfa, Palmier et Diss et chaque longueur (0,5, 1, 1,5 et 2cm). Les éprouvettes sont coulés et après 24h sont placés dans deux modes de conservation après démoulage: mode (A) température égale à 20 C° et l'humidité relative 100%, et on mode (B) température égale à 20 C° et l'humidité relative 50%. Pour voir l'effet de mode de conservation des éprouvettes de fibres végétales sur la résistance à la traction par flexion à 28 jours. Les résultats sont regroupés dans les tableaux IV.1 et IV.2 pour le taux de fibres 1% et 2%.

**Tableau IV.1** : Effet du mode de conservation sur la résistance à la flexion des éprouvettes renforcées de 1% des fibres végétales

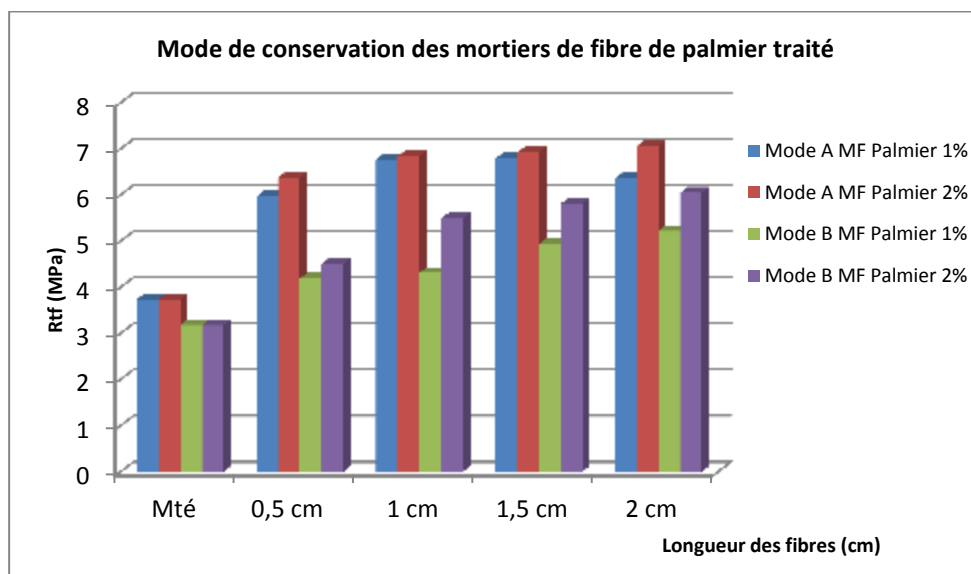
Rtf 1% (MPa)		Mode A	Mode B
		20 C° et HR = 100%	20 C° et HR = 50%
<b>Mortier témoin</b>		3.74	3.18
<b>MF d'Alfa T</b>	<b>0.5 cm</b>	5.77	3.56
	<b>1 cm</b>	6.01	4.05
	<b>1.5 cm</b>	6.72	4.75
	<b>2 cm</b>	6.49	5.40
<b>MF Palmier T</b>	<b>0.5 cm</b>	5.97	4.19
	<b>1 cm</b>	6.77	4.31
	<b>1.5 cm</b>	6.79	4.93
	<b>2 cm</b>	6.36	5.22
<b>MF Diss T</b>	<b>0.5 cm</b>	6.06	5.06
	<b>1 cm</b>	6.75	5.50
	<b>1.5 cm</b>	6.75	5.69
	<b>2 cm</b>	7.40	6.05

**Tableau IV.2** : Effet de mode de conservation sur la résistance à la flexion des éprouvettes renforcé de 2% des fibres végétales

Rtf 2% (MPa)		Mode A	Mode B
		20 C° et HR = 100%	20 C° et HR = 50%
<b>Mortier témoin</b>		3.74	3.18
<b>MF d'Alfa T</b>	<b>0.5 cm</b>	5.86	4.87
	<b>1 cm</b>	6.49	5.46
	<b>1.5 cm</b>	6.52	5.43
	<b>2 cm</b>	6.74	5.82
<b>MF Palmier T</b>	<b>0.5 cm</b>	6.38	4.51
	<b>1 cm</b>	6.84	5.49
	<b>1.5 cm</b>	6.92	5.81
	<b>2 cm</b>	7.06	6.05
<b>MF Diss T</b>	<b>0.5 cm</b>	6.39	5.32
	<b>1 cm</b>	6.82	5.70
	<b>1.5 cm</b>	7.70	5.91
	<b>2 cm</b>	7.72	6.46

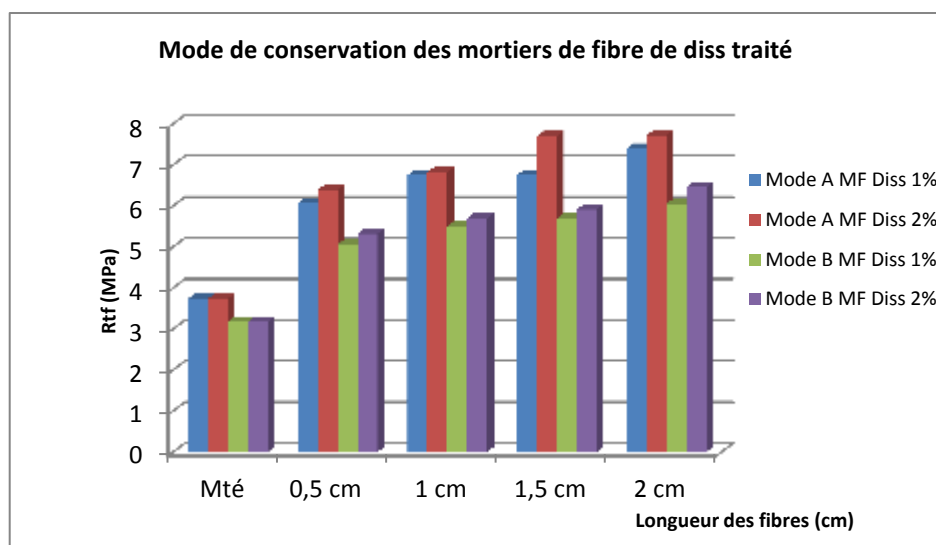


**Figure IV.1** : Effet de mode de conservation et taux des fibres des mortiers de fibre d'Alfa traité sur la résistance à la flexion



**Figure IV.2** : Effet de mode de conservation et le taux des fibres des mortiers de fibre de Palmier sur la résistance à la flexion

La chute de la résistance en flexion des éprouvettes conservées à l'air libre par rapport ou éprouvettes conservées dans l'eau, le milieu sec influe sur la zone de transition autour de ces fibres.



**Figure IV.3 :** Effet de mode de conservation et le taux des fibres des mortiers de fibre de Diss sur la résistance à la flexion

#### IV.1.2. Résistance en compression des mortiers renforcés par des fibres végétales avec différents mode de conservation

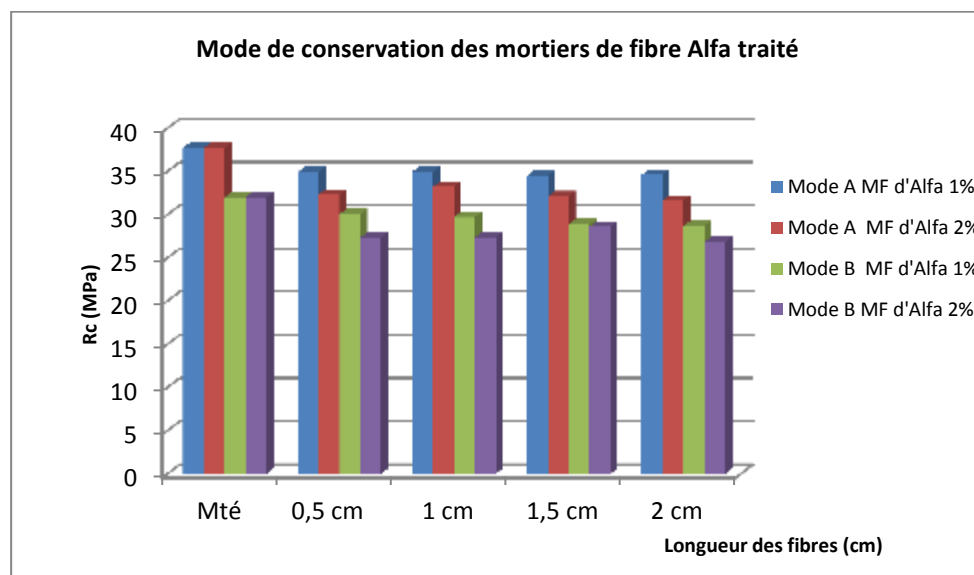
Les tableaux IV.3 et IV.4 regroupe les résultats de l'effet de mode de conservation des mortiers de fibre d'Alfa, palmier et Diss traité avec deux taux de renforcement 1% et 2% respectivement sur la résistance en compression.

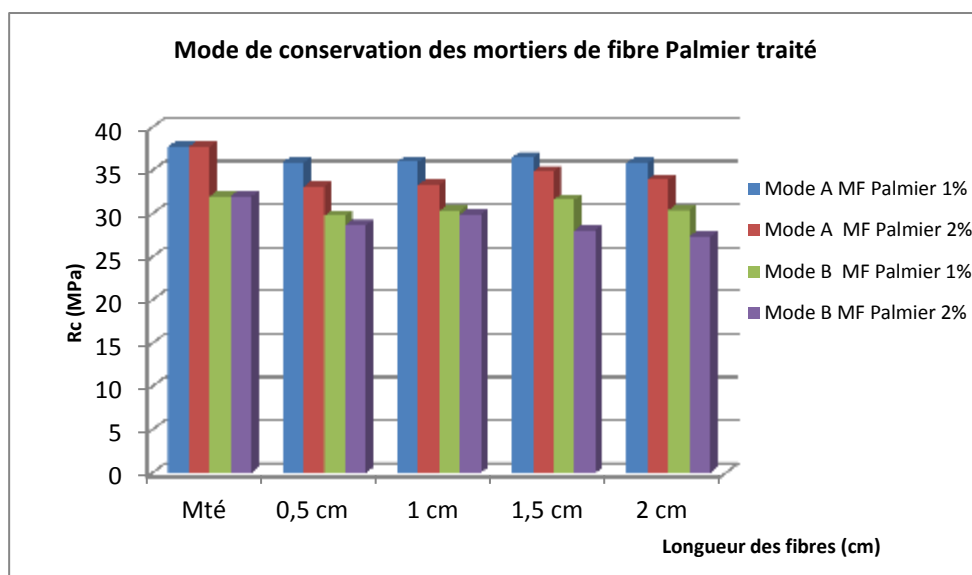
**Tableau IV.3 :** Effet de mode de conservation sur la résistance en compression des éprouvettes renforcé de 1% des fibres végétales

Rc 1% (MPa)		Mode A	Mode B
		20 C° et HR = 100%	20 C° et HR = 50%
<b>Mortier témoin</b>		37.75	32.02
<b>MF d'Alfa T</b>	<b>0.5 cm</b>	34.93	30.05
	<b>1 cm</b>	35.00	29.73
	<b>1.5 cm</b>	34.50	28.89
	<b>2 cm</b>	34.62	28.67
<b>MF Palmier T</b>	<b>0.5 cm</b>	35.93	29.75
	<b>1 cm</b>	36.00	30.31
	<b>1.5 cm</b>	36.50	31.61
	<b>2 cm</b>	35.87	30.41
<b>MF Diss T</b>	<b>0.5 cm</b>	38.58	31.03
	<b>1 cm</b>	39.05	32.10
	<b>1.5 cm</b>	38.25	34.25
	<b>2 cm</b>	37.75	34.63

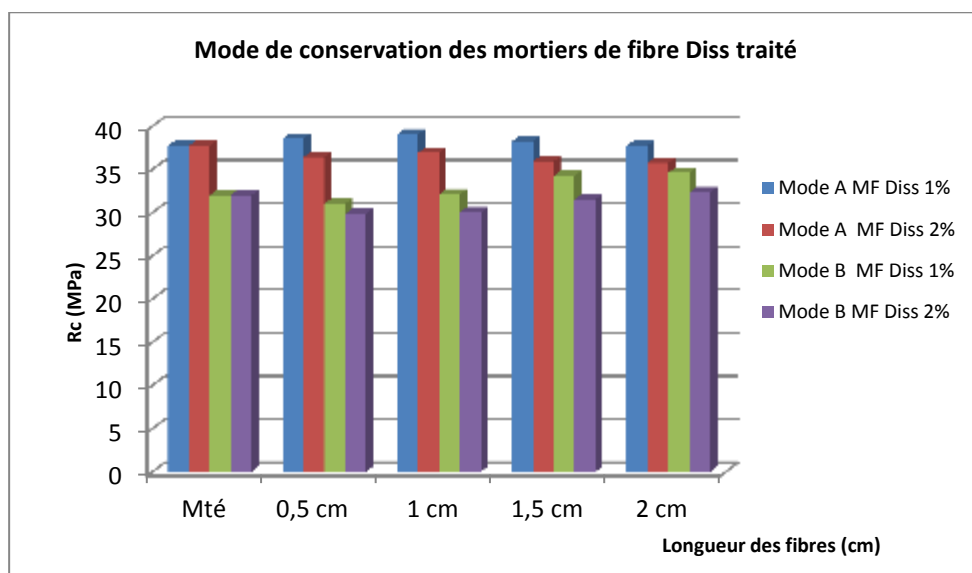
**Tableau IV.4 :** Effet de mode de conservation sur la résistance en compression des éprouvettes renforcé de 2% des fibres végétales

Rc 2% (MPa)		Mode A	Mode B
		20 C° et HR = 100%	20 C° et HR = 50%
<b>Mortier témoin</b>		37.75	32.02
<b>MF d'Alfa T</b>	<b>0.5 cm</b>	32.33	27.36
	<b>1 cm</b>	33.25	27.37
	<b>1.5 cm</b>	32.12	28.60
	<b>2 cm</b>	31.62	26.82
<b>MF Palmier T</b>	<b>0.5 cm</b>	33.12	28.65
	<b>1 cm</b>	33.31	29.91
	<b>1.5 cm</b>	34.88	28.08
	<b>2 cm</b>	33.91	27.35
<b>MF Diss T</b>	<b>0.5 cm</b>	36.43	29.86
	<b>1 cm</b>	36.95	30.03
	<b>1.5 cm</b>	35.93	31.51
	<b>2 cm</b>	35.75	32.34

**Figure IV.4 :** Effet de mode de conservation et taux des fibres des mortiers de fibre d'Alfa traité sur la résistance en compression



**Figure IV.5 :** Effet de mode de conservation des mortiers de fibre de palmier traité sur la résistance en compression



**Figure IV.6 :** Effet de mode de conservation des mortiers de fibre de Diss traité sur la résistance en compression

Les conséquences du séchage sont alors nombreuses, la résistance des éprouvettes conservées dans l'eau est plus élevée par rapport ou éprouvettes conservé dans l'air.

### IV.3. Propriétés mécaniques des mortiers fibrés après vieillissement naturel

Les éprouvettes de mortiers chargés par des différentes natures et pourcentage et longueurs des fibres végétales sont conservés après démoulage dans l'eau pendant 28 jours puis sont conservée à l'air libre du laboratoire et protégé pendant 6 ans.

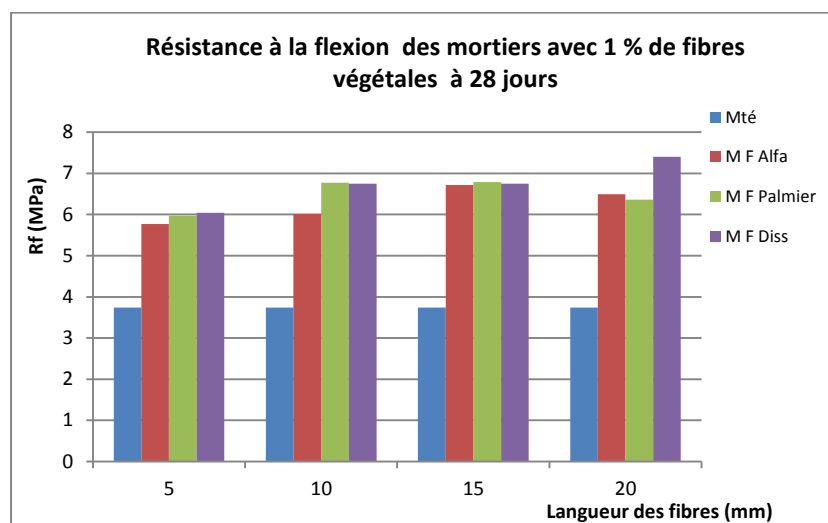
## IV.3.1. Résistance à la traction par flexion

Le tableau IV.5 regroupe les résultats obtenus en flexion après 6 ans de vieillissement nature des mortiers de fibres végétales.

**Tableau IV.5 :** Durabilité des mortiers de fibres végétales dans le temps sur la résistance à la flexion

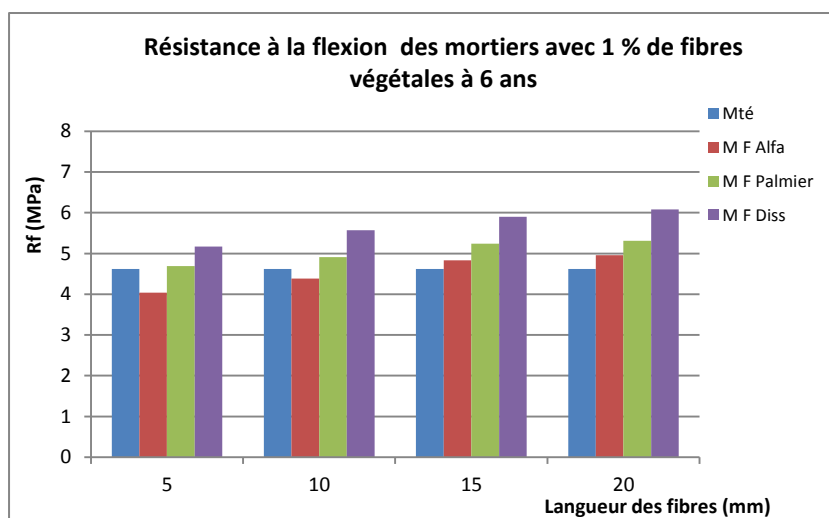
Résistance à la flexion (MPa)		1%		2%	
		28 jours	6 ans	28 jours	6 ans
<b>Mortier témoin</b>		3.74	4.62	3.74	4.62
<b>M F d'Alfa T</b>	<b>0.5 cm</b>	5.77	4.04	5.26	4.89
	<b>1 cm</b>	6.01	4.38	5.49	4.96
	<b>1.5 cm</b>	6.72	4.83	5.52	5.15
	<b>2 cm</b>	6.49	4.96	6.00	5.46
<b>M F Palmier T</b>	<b>0.5 cm</b>	5.97	4.69	5.48	4.96
	<b>1 cm</b>	6.77	4.91	5.54	5.39
	<b>1.5 cm</b>	6.79	5.24	6.02	5.69
	<b>2 cm</b>	6.36	5.31	6.26	5.80
<b>M F Diss T</b>	<b>0.5 cm</b>	6.04	5.17	6.39	6.04
	<b>1 cm</b>	6.75	5.57	6.82	6.41
	<b>1.5 cm</b>	6.75	5.90	7.70	6.78
	<b>2 cm</b>	7.40	6.08	7.72	6.96

Les figures IV.7, IV.8, IV.9 et IV.10 illustrent respectivement les résistances en flexion obtenus après 6 ans de vieillissement nature des mortiers de fibres végétales d'Alfa, Palmier et Diss

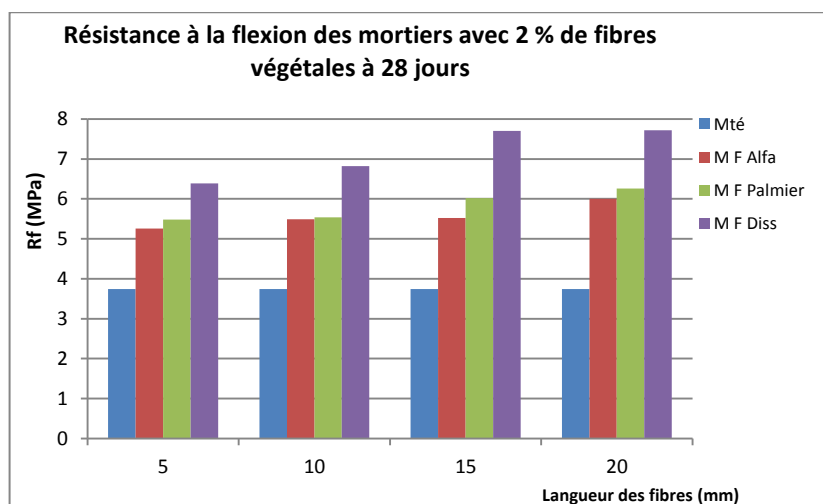


**Figure IV.7 :** Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales à l'âge de 28 jours





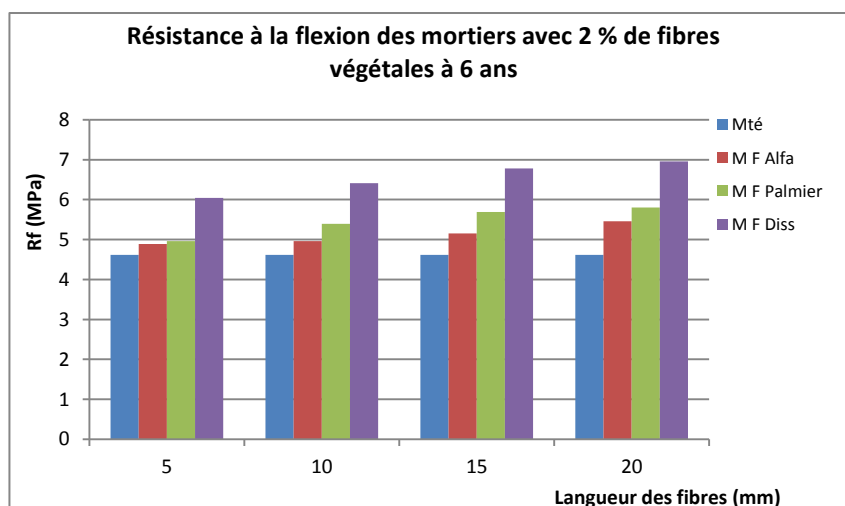
**Figure IV.8 :** Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales à l'âge de 6 ans



**Figure IV.9 :** Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales à l'âge de 28 jours

D'après le Tableau IV.5 on remarque une chute de résistance en flexion est enregistrée pour l'ensemble des mortiers d'études, au départ les fibres est bien ancrée dans le composite ; au bout d'un certain temps la fibre change de section (suite au gonflement et retrait), ce qui diminue sa capacité d'ancrer dans le composite et ceci donne chute de résistance. Mais les résultats de la flexion restent toujours supérieurs au mortier témoin, les même résultats obtenus par [Sedan 2007].

Les mortiers de fibres de Diss présentent les meilleures résistances mécaniques par rapport aux deux autres types de mortiers de fibres de palmier et de fibres d'Alfa.



**Figure IV.10 :** Evolution de la résistance à la flexion des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales à l'âge de 6 ans

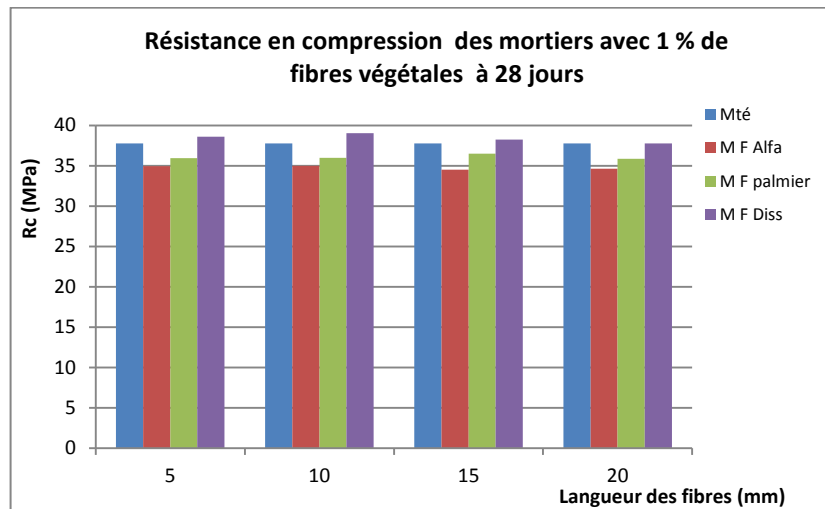
### IV.3.2. Résistance en compression

Le tableau IV.6 regroupe les résultats obtenus en compression après 6 ans de vieillissement naturel des mortiers de fibres végétales.

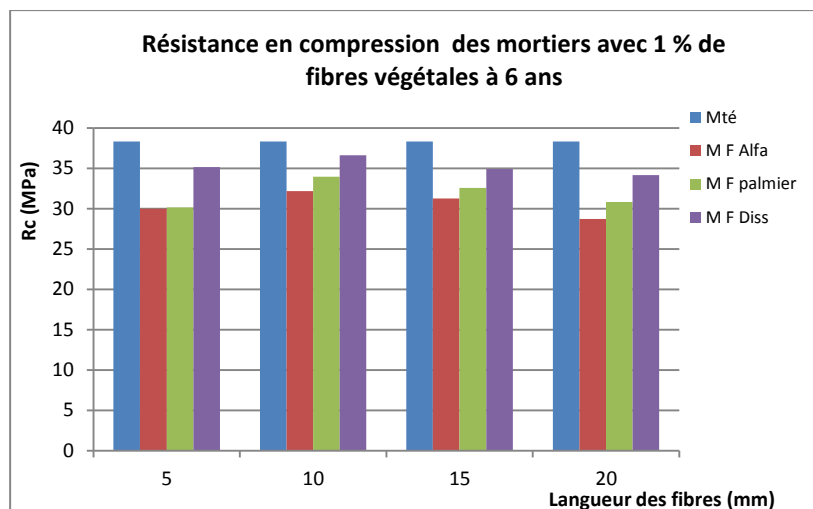
**Tableau IV.6 :** Durabilité des mortiers de fibres végétales dans le temps sur la résistance en compression

Résistance en compression (MPa)		1%		2%	
		28 jours	6 ans	28 jours	6 ans
<b>Mortier témoin</b>		37.75	38.31	37.75	38.31
<b>M F d'Alfa T</b>	<b>0.5 cm</b>	34.93	29.98	32.33	26.86
	<b>1 cm</b>	35.00	32.19	33.25	29.79
	<b>1.5 cm</b>	34.50	31.25	32.12	28.73
	<b>2 cm</b>	34.62	28.72	31.62	26.37
<b>M F Palmier T</b>	<b>0.5 cm</b>	35.93	30.16	33.12	28.43
	<b>1 cm</b>	36.00	33.97	33.31	29.47
	<b>1.5 cm</b>	36.50	32.55	34.88	30.76
	<b>2 cm</b>	35.87	30.83	33.91	27.21
<b>M F Diss T</b>	<b>0.5 cm</b>	38.58	35.13	36.43	31.76
	<b>1 cm</b>	39.05	36.61	36.95	34.92
	<b>1.5 cm</b>	38.25	34.92	35.93	34.17
	<b>2 cm</b>	37.75	34.16	35.75	33.03

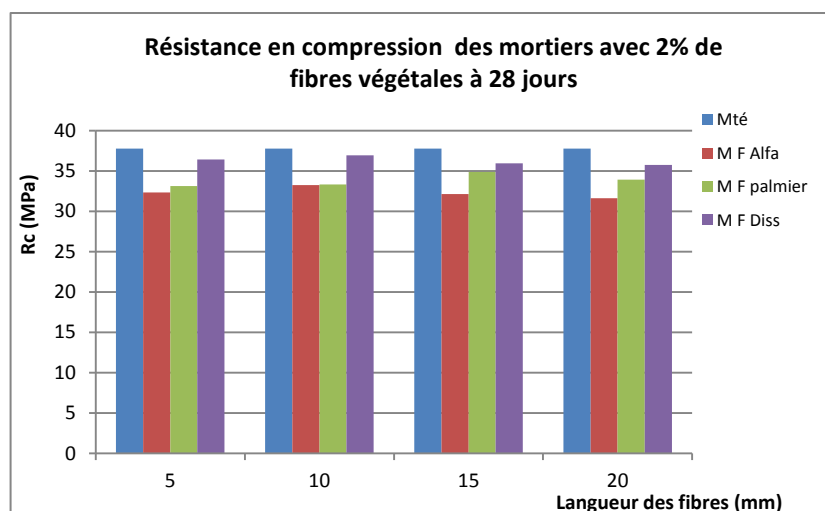
Les figures IV.11, IV.12, IV.13 et IV.14 illustrent respectivement les résistances en compression obtenus après 6 ans de vieillissement naturel des mortiers de fibres végétales d'Alfa, palmier et diss



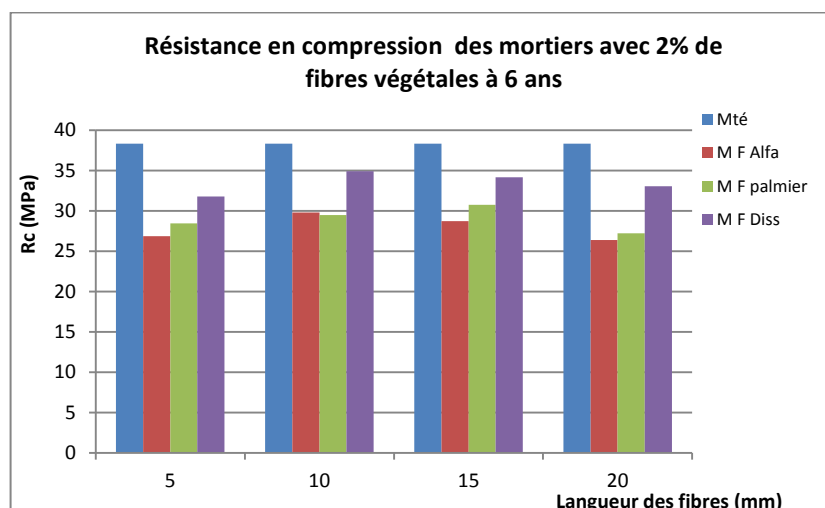
**Figure IV.11** : Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales à l'âge de 28 jours



**Figure IV.12** : Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 1% de fibres végétales à l'âge de 6 ans



**Figure IV.13 :** Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales à l'âge de 28 jours



**Figure IV.14:** Evolution de la résistance à la compression des mortiers renforcés avec 2% de fibres végétales à l'âge de 6 ans

Les résultats montrent une chute de la résistance des mortiers fibrés 6 ans par rapport aux essais réalisés à 28 jours. Les mortiers avec 2% de fibres végétales présentent les plus faibles résistances mécaniques par rapport à ceux de 1% cette chute est due à la modification la zone de transition autour de ces fibres, décrite par des nombreux auteurs elle est plus poreuse et plus fissurée que le reste de la matrice [Toledo Filho 2000], [Savastano 1999]. Par la suite la rupture des éprouvettes se rompt par arrachement des fibres, ce qui explique la perte de résistance au cours du temps. Tableau IV.5, IV.6

#### IV.4. Vieillessement accéléré des fibres végétales dans une solution alcaline

##### IV.4.1. Essai de traction directe des fibres végétales ayant subi un vieillissement accéléré dans Na(OH)

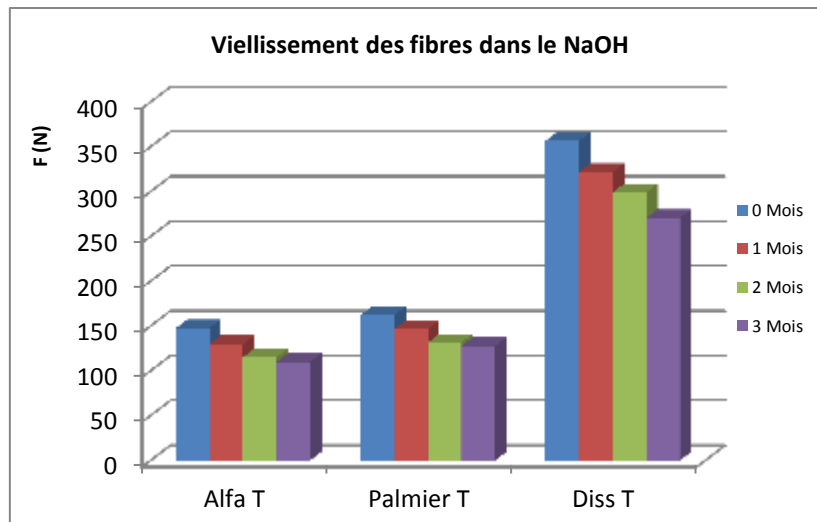
Les fibres traitées sont immergées dans une solution d'hydroxyde de sodium Na(OH) pendant une durée que l'on a fait varier entre 1, 2 et 3 mois à température ambiante. En suite elles sont lavées avec de l'eau distillée jusqu'à pH neutre. Les fibres sont ensuite placées dans une étuve à 80°C pendant 48h. Après chaque mois les fibres sont testées la traction directe.



**Figure IV.15** : pH de la solution d'hydroxyde de sodium Na(OH)

**Tableau IV.7** : Effet du temps de conservation des fibres végétales dans le Na(OH) sur l'effort de traction

Les fibres végétales conserver dans le Na(OH)				
Echantillons	F max(N)			
	0 mois	1 mois	2 mois	3 mois
<b>Alfa traité</b>	147.51	129.81	115.17	109.96
<b>Palmier traité</b>	162.06	146.32	131.55	127.67
<b>Diss traité</b>	356.70	321.89	299.28	270.53



**Figure IV.16 :** Vieillissement accéléré des fibres végétales dans le Na(OH)

Après 3 mois d'immersion dans la solution d'hydroxyde de sodium la résistance en traction résiduelle des fibres d'Alfa, Palmier et de Diss représente une résistance inférieure aux fibres non vieilles. Les fibres végétales apparaissent clairement dégradées après un mois d'immersion dans le Na(OH) à température ambiante et de  $\text{pH} = 11$ . On remarque des dégradations à l'extrémité des fibres, à cause de la forte absorption d'eau ; le processus d'absorption-désorption (absorption de solvants, migration d'adjuvants). C'est-à-dire des petites particules de solvant vont migrer au sein du matériau ce qui peut avoir des conséquences sur les propriétés des fibres.

#### **IV.4.2. Essai de traction directe des fibres végétales ayant subi un vieillissement accéléré dans $\text{Ca(OH)}_2$**

Les fibres traitées sont immergées dans une solution d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$  pendant une durée que l'on a fait varier entre 1, 2 et 3 mois à température ambiante. En suite elles sont lavées avec de l'eau distillée jusqu'à pH neutre. Les fibres sont ensuite placées dans une étuve à  $80^\circ\text{C}$  pendant 48h. Après chaque mois les fibres sont testées à la traction directe.



Figure IV.17 : pH de la solution d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca(OH)}_2$

Tableau IV.8 : Effet du temps de conservation des fibres végétales dans  $\text{Ca(OH)}_2$  le sur l'effort de traction

Les fibres végétales conserver dans le $\text{Ca(OH)}_2$				
Echantillons	F max(N)			
	0 mois	1 mois	2 mois	3 mois
Alfa traité	147.51	131.90	102.75	87.62
Palmier traité	162.06	138.72	111.23	103.53
Diss traité	356.70	310.18	285.74	255.27

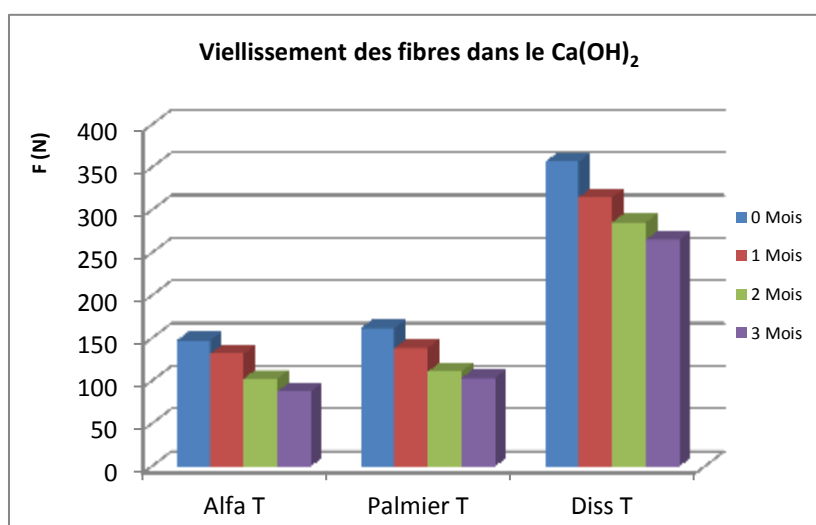


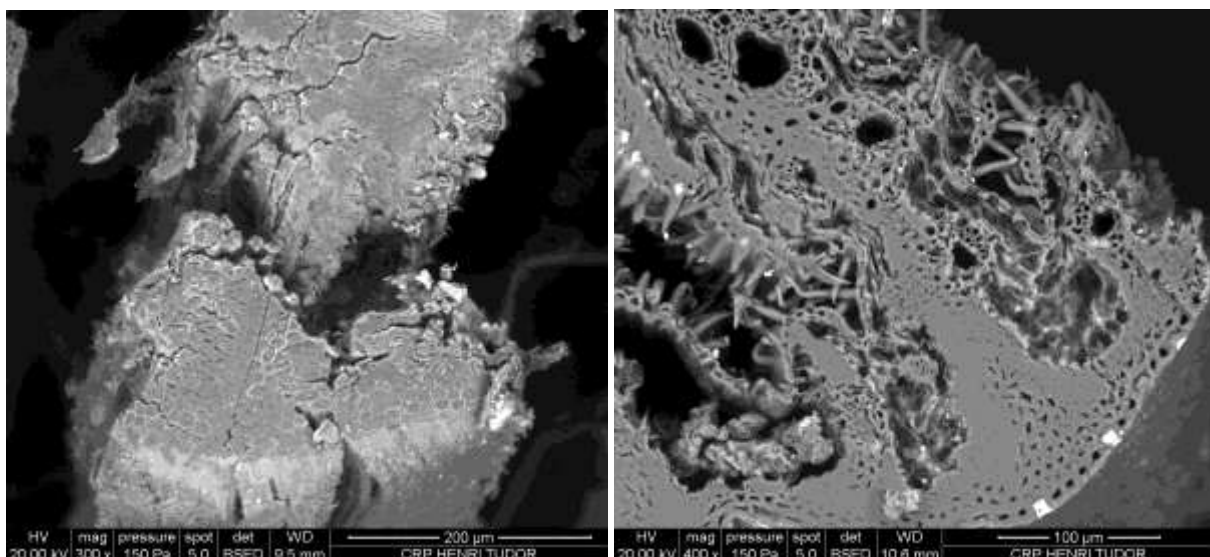
Figure IV.18 : Vieillissement accéléré des fibres végétales dans le  $\text{Ca(OH)}_2$

Les résultats montrent une chute de la résistance en traction des fibres quel que soit leur nature, comparables avec [Juarez 2007], la différence provient des différences de porosité entre les fibres celles de Palmier et de Diss, plus importante que celle d'Alfa, permettraient la cristallisation de chaux dans les pores des fibres immergées dans la solution d'hydroxyde de calcium ce qui entrainerait leur fragilisation et affecte leur résistance en traction, des expériences comparables ont été menées par [Kriker 2008].

#### IV.5. Observation MEB des fibres végétales vieillie

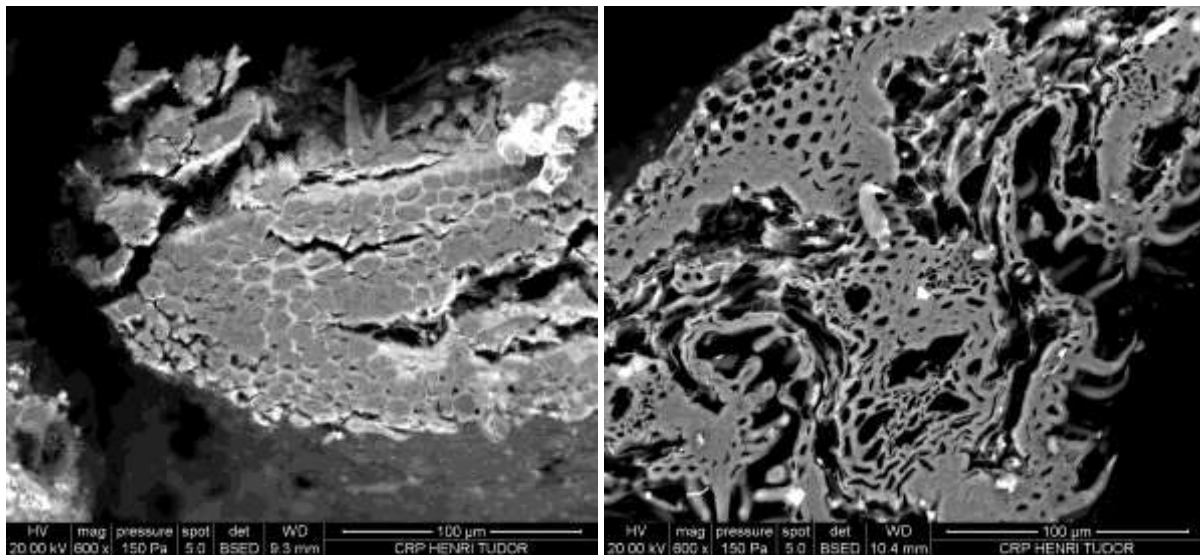
##### IV.5.1. Observation MEB des fibres végétales subi un vieillissement accéléré dans Na(OH)

L'observation des fibres au microscope électronique à balayage de Université Mohammed Khider -Biskra Laboratoire de physique et couches minces et applications (LPCMA) de marque TESCAN (VEGA3), le mode d'action distincts de dégradation par l'attaque de NaOH est localisée (des trous apparaissent à la surface des fibres, et des dépôts sont visibles localement) une grande vulnérabilité aux attaques chimiques. En effet, les fibres végétales ont une faible résistance face à un environnement alcalin [Saran 2010]. Les micro-fibrilles de cellulose et les hémicelluloses sont oxydées et fragmentées par les alcalins mais les hémicelluloses sont plus sévèrement touchées du fait de leur faible degré de polymérisation. De plus, la lignine se dissout dans les alcalins. Des trois constituants principaux de la fibre végétale, la cellulose est le composé le plus résistant face aux alcalis [Rodier 2014].

**A****B**

**Figure IV.19:** Observation MEB d'une coupe transversale avec un agrandissement de x300 et x400 de la fibre d'Alfa : (A) dans le NaOH, (B) à l'état brut.

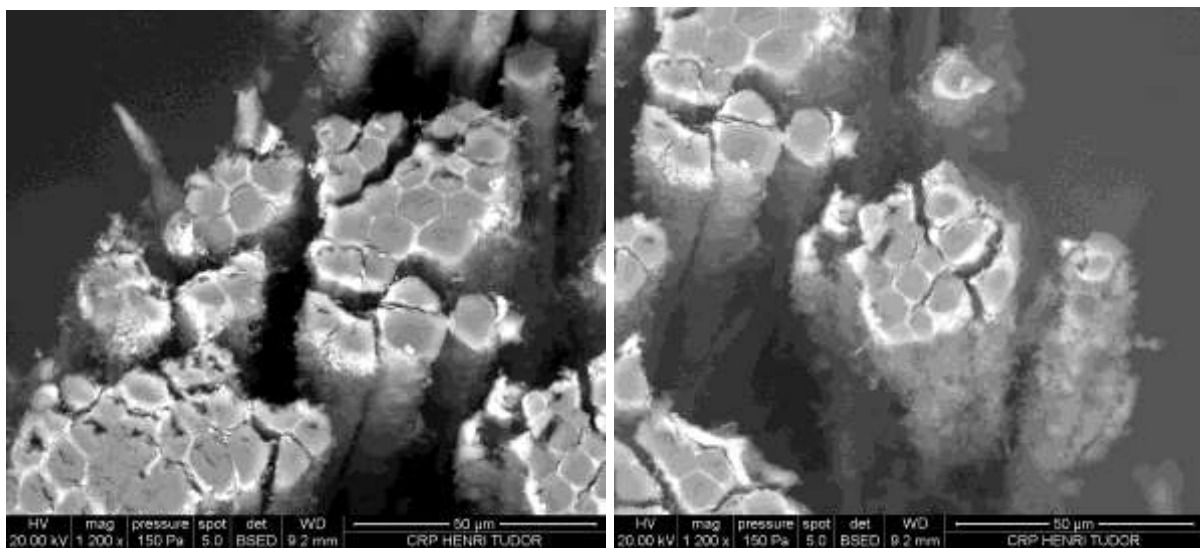




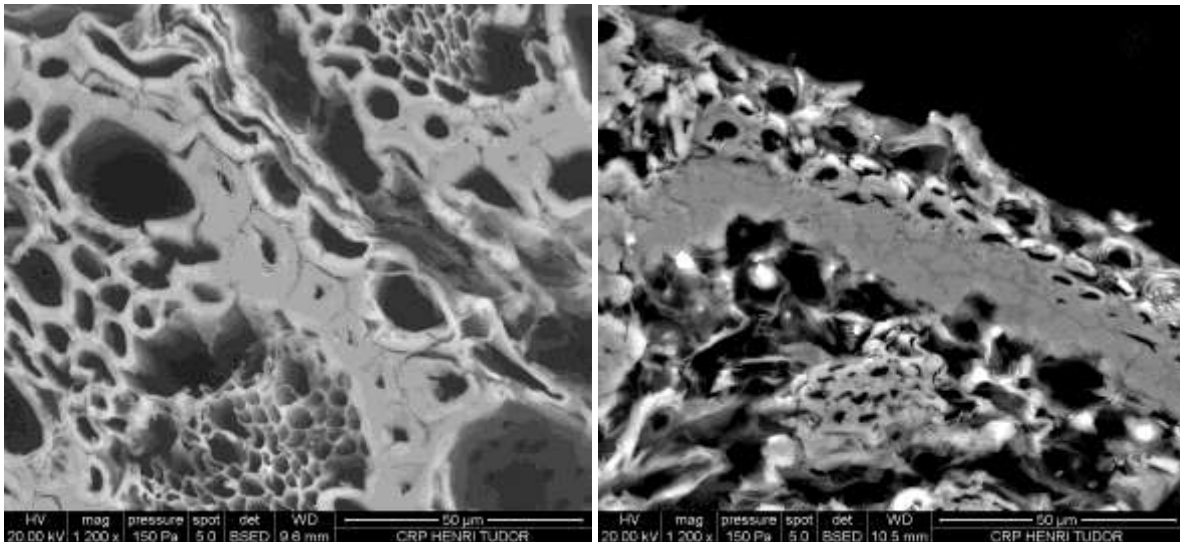
A

B

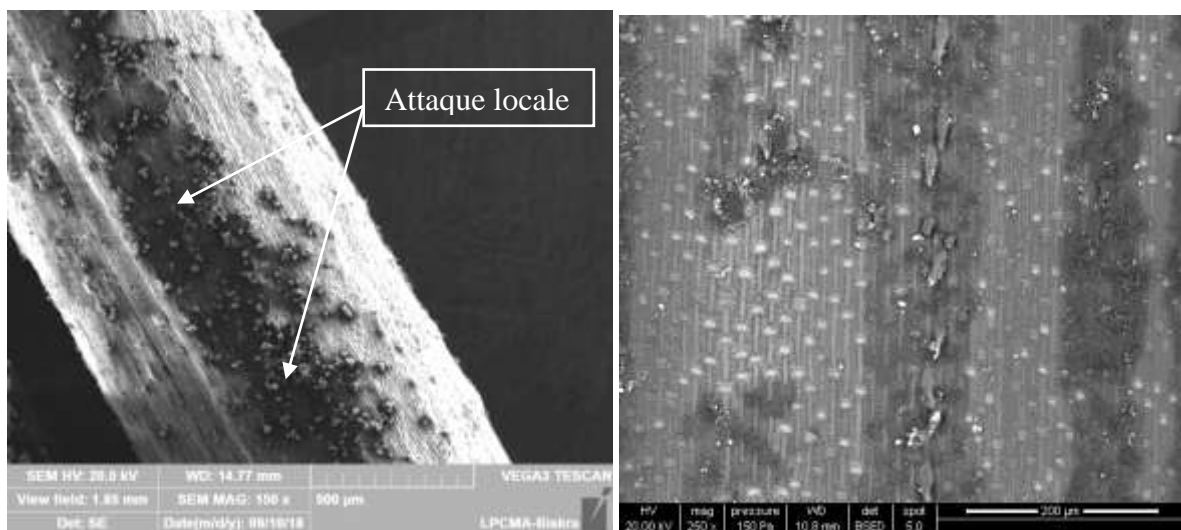
**Figure IV.20** : Observation MEB d'une coupe transversale avec un agrandissement de x600 de la fibre d'Alfa : (A) dans le Na(OH), (B) à l'état brut.



**Figure IV.21** : Observation MEB d'une coupe transversale avec un agrandissement de x1200 de la fibre d'Alfa dans le NaOH.

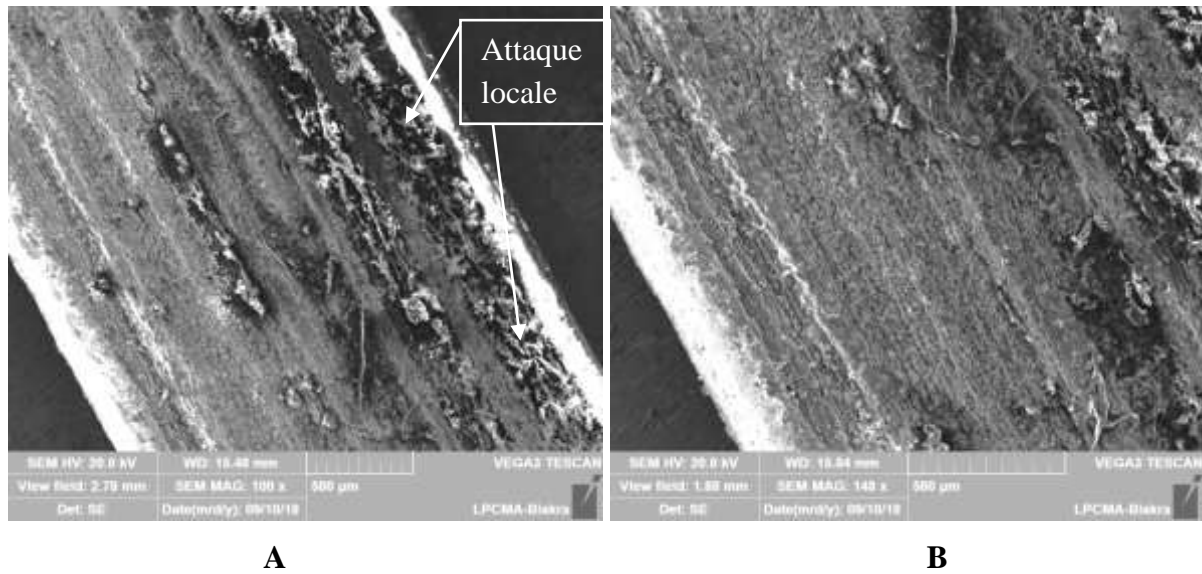


**Figure IV.22 :** Observation MEB d'une coupe transversale avec un agrandissement de x1200 de la fibre d'Alfa l'état brut

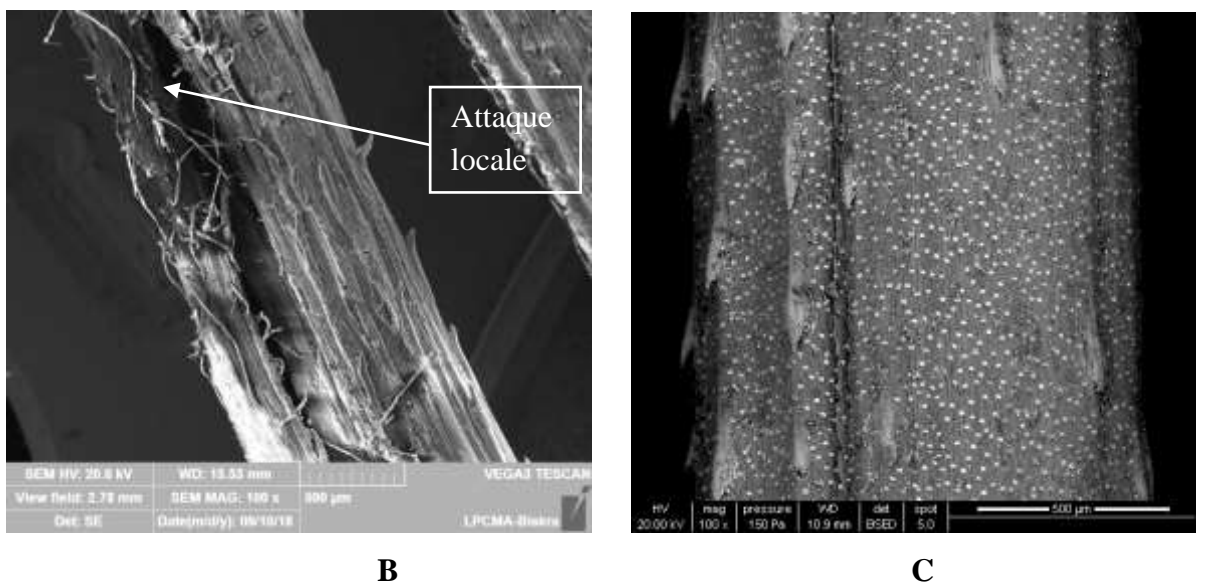
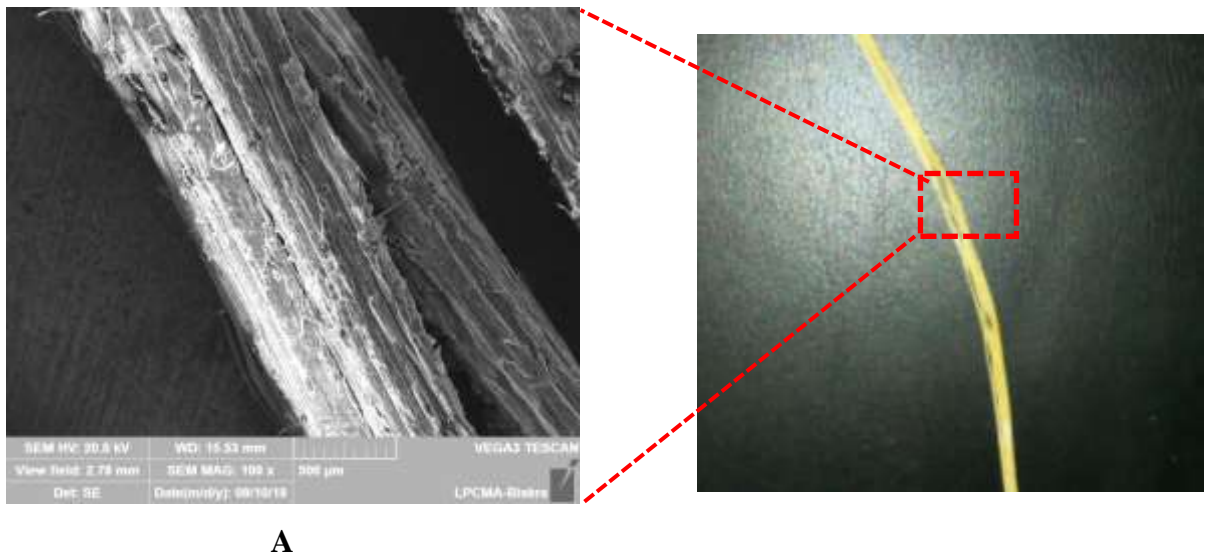


**Figure IV.23 :** Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x150 de la fibre d'Alfa : (A) dans le NaOH, (B) l'état brut

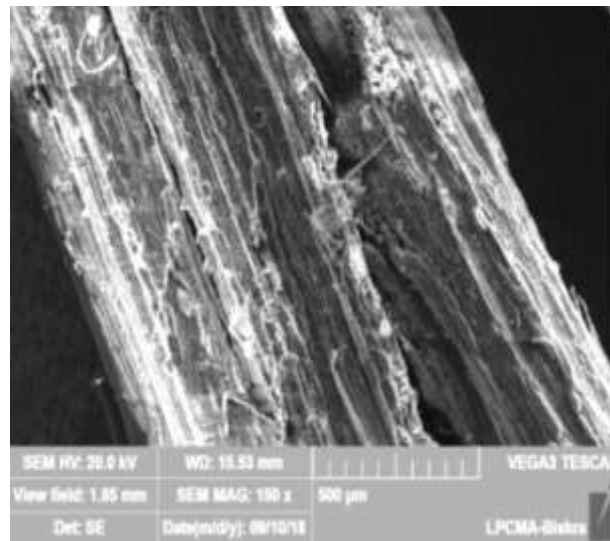
Pour avoir une idée de la pureté et de la dégradation, les fibres sont examinées avec le microscope à balayage MEB. On remarque que la morphologie de la surface de la fibre d'Alfa n'est pas identique avant et après le vieillissement. Il est constaté que cette couche n'est pas lisse et plus ou moins épaisse à certains endroits (Figure IV.23.A). Cela signifie que la soude ne réagit pas de façon homogène tout au long des tiges, ces résultats sont en accord avec la littérature [Kriker 2008].



**Figure IV.24 :** Observation MEB d'une coupe longitudinale de la fibre de Palmier dans le NaOH: (A) avec un agrandissement de x100, (B) avec un agrandissement de x150



**Figure IV.25 :** Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x100 de la fibre de Diss : (A-B) dans le NaOH, (C) l'état brut

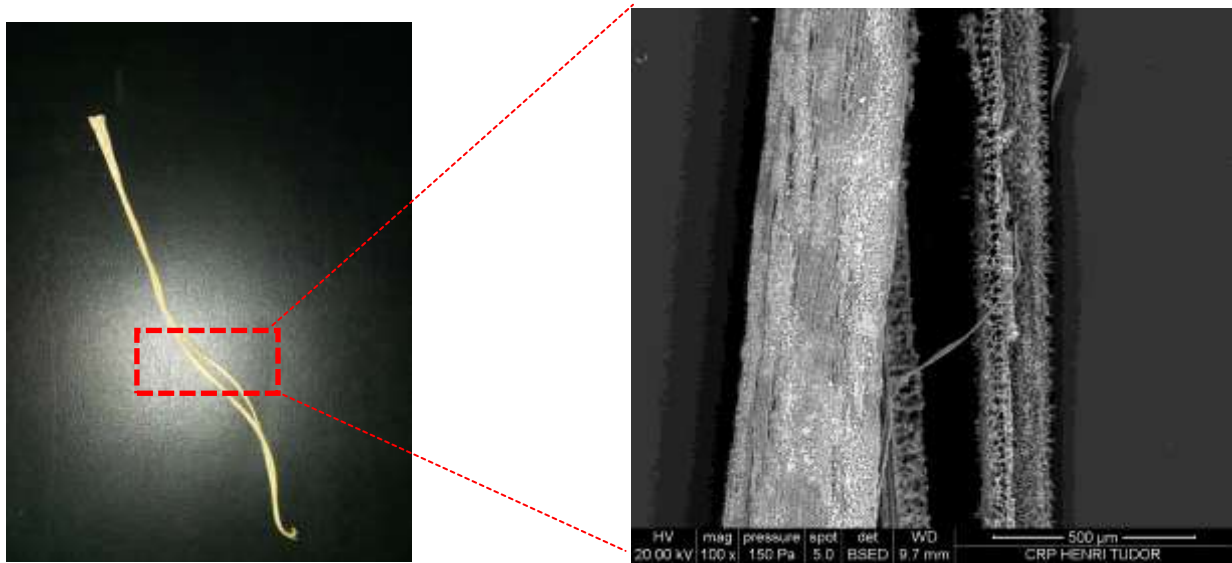


**Figure IV.26 :** Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x150 de la fibre de Diss dans NaOH

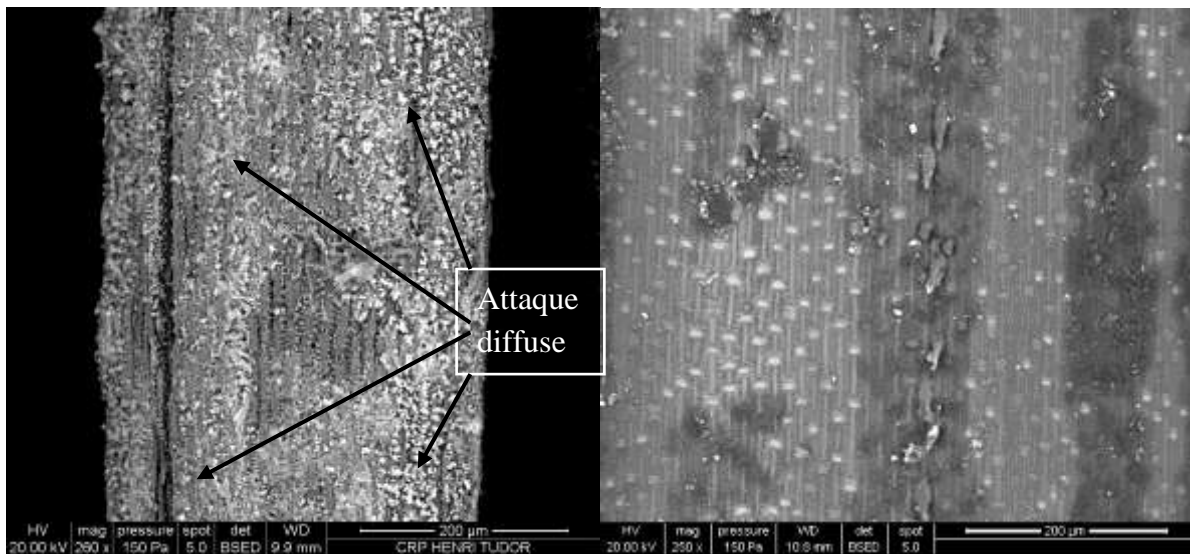
On remarque que la fibre de diss est très dégradée par rapport aux deux autres fibres Alfa et Palmier, l'attaque de la soude est locale, la fibre de Diss absorbe de l'eau plus que la fibre de palmier et d'Alfa donc la dégradation est plus que les deux autre fibres, cette dégradation est en fonction de pourcentage d'absorption d'eau des fibres. Ces résultats sont confirmés par les contraintes de traction directe des fibres (Tableau IV.7)

#### IV.5.2. Observation MEB des fibres végétales subi un vieillissement accéléré dans $\text{Ca(OH)}_2$

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) après 3 mois de conservation des fibres d'étude dans un milieu alcaline  $\text{Ca(OH)}_2$ , ont montrées que toutes les fibres subit un endommagement superficielle avec des degrés différents selon la nature, d'après l'observation sur les fibres on remarque un modes d'action distincts de dégradation de l'attaque de  $\text{Ca(OH)}_2$  semble diffuse et relativement uniforme sur tout la longueur des fibres. D'après les figures IV.27, IV.28, IV.29 et IV.30 que la fibre d'Alfa et la fibre de Palmier sont recouverte entièrement d'un dépôt de  $\text{Ca(OH)}_2$  qui pénètre dans tous les pores des fibres, ces résultats sont en accord avec la littérature [Kriker 2008] et [Rodier 2014].



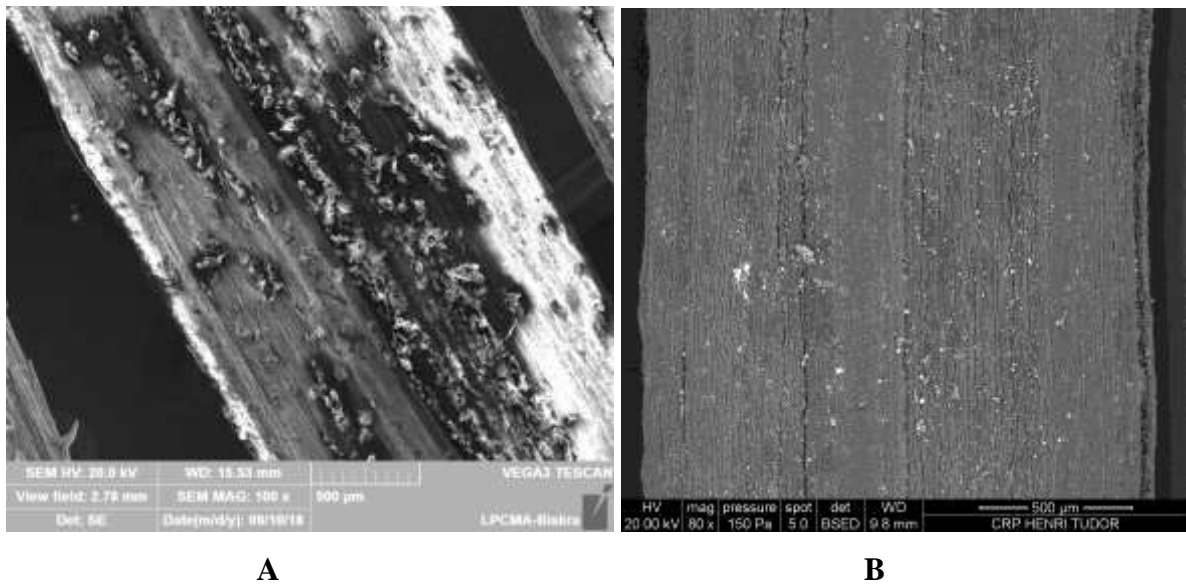
**Figure IV.27** : Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x100 de la fibre d'Alfa dans le  $\text{CaOH}_2$



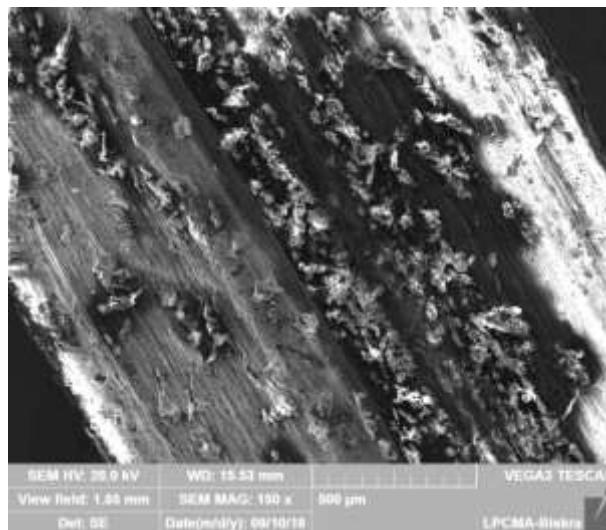
A

B

**Figure IV.28** : Observation MEB d'une coupe longitudinale de la fibre d'Alfa dans le  $\text{CaOH}_2$  : (A) avec un agrandissement de x100, (B) avec un agrandissement de x250

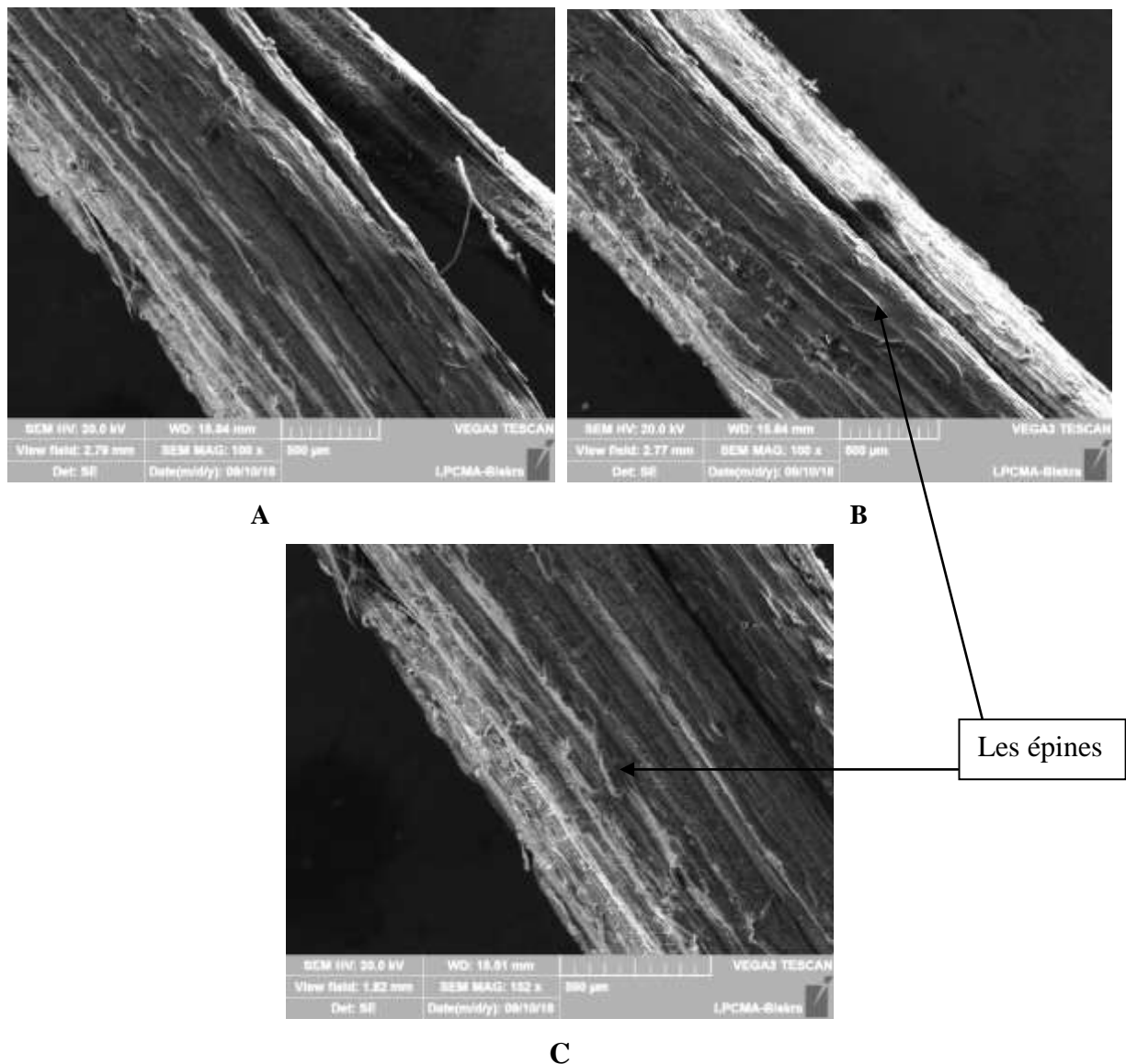


**Figure IV.29** : Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x100 de la fibre de palmier : (A) dans le  $\text{CaOH}_2$ , (B) l'état brut



**Figure IV.30** : Observation MEB d'une coupe longitudinale avec un agrandissement de x150 de la fibre de palmier dans le  $\text{CaOH}_2$

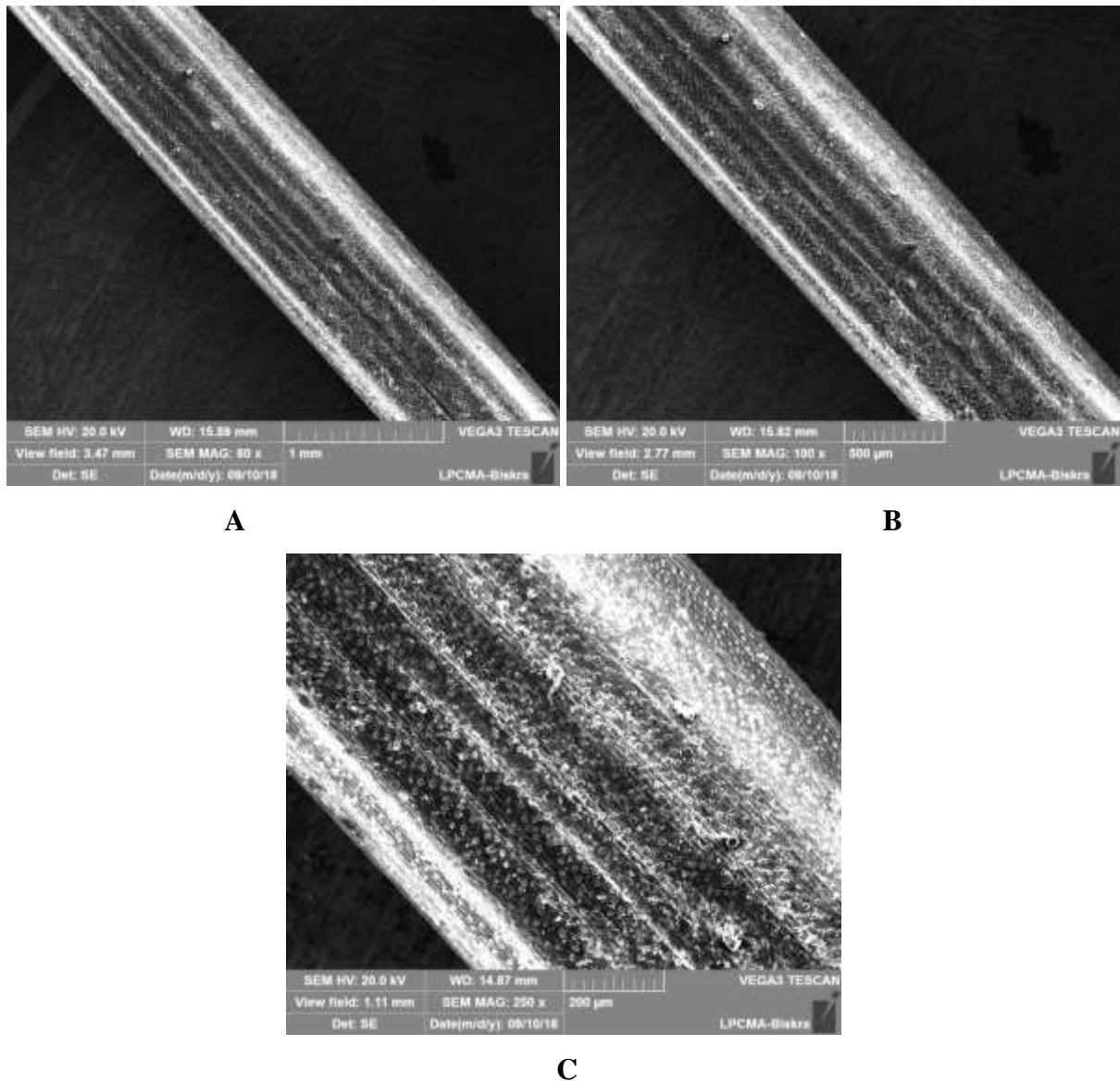
Nous avons observé que l'effet de  $\text{Ca(OH)}_2$  sur les fibres de Diss est très agressif par rapport aux deux autres fibres, on voit clairement que les épines des fibres de Diss sont dégradé par le  $\text{Ca(OH)}_2$ . Les pathologies sont dues aux porosités des fibres, la fibre de Diss présente le plus grandes porosités par rapport aux autres fibres ; ce qui augmente leur absorption de la solution de  $\text{Ca(OH)}_2$  conduisant donc à la minéralisation et à la fragilisation des fibres. Figure IV.31, ces résultats sont confirmés par les contraintes de traction directe des fibres (Tableau IV.8)



**Figure IV.31 :** Observation MEB d'une coupe longitudinale de la fibre de diss dans le  $\text{CaOH}_2$  : (A-B) avec un agrandissement de x100, (C) avec un agrandissement de x150

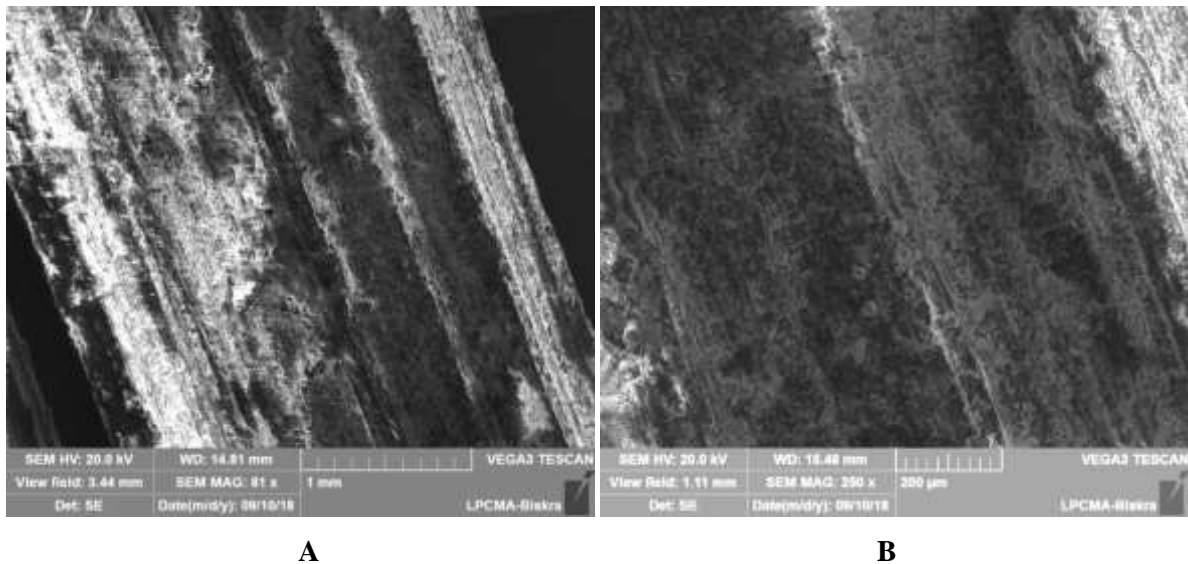
#### IV.5.3. Observation MEB des fibres végétales vieillie naturellement dans la matrice cimentaire

L'observation au MEB d'une section longitudinale des fibres végétales extraite d'un mortier de ciment âgé de 6 ans conservé en ambiance intérieure sans contrôle particulier de l'humidité relative ne montre pas une dégradation sur la surface des fibres comme le montrent les figures IV.32, IV.33 et IV.34,

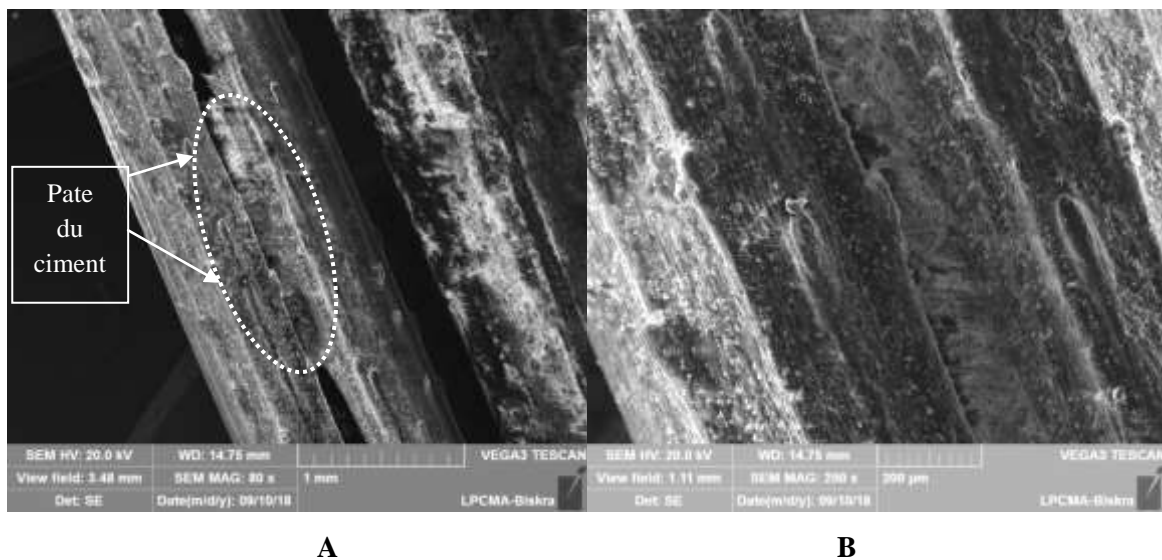


**Figure IV.32 :** Observation MEB d'une coupe longitudinale de la fibre d'Alfa plonger dans le mortier durant 6 ans : (A) avec un agrandissement de x80, (B) avec un agrandissement de x100 (C) avec un agrandissement de x250





**Figure IV.33 :** Observation MEB d'une coupe longitudinale de la fibre de Palmier plonger dans le mortier durant 6 ans : (A) avec un agrandissement de x80, (B) avec un agrandissement de x250



**Figure IV.34 :** Observation MEB d'une coupe longitudinale de la fibre de Diss plongé dans le mortier durant 6 ans : (A) avec un agrandissement de x80, (B) avec un agrandissement de x250

#### IV.6.Conclusion

Pour les résultats de l'Influence de Mode de conservation des éprouvettes sur le comportement mécanique des mortiers fibrés, On remarque que la chute de la résistance en flexion et en compression des éprouvettes conservées dans le mode (B) température égale à 20 C° et l'humidité relative 50% par rapport ou éprouvettes conservé dans (A) température égale à 20 C° et l'humidité relative 100%. Le milieu de conservation des éprouvettes dans

l'eau joue un rôle très important dans le développement de la résistance des mortiers renforcés par des fibres végétales.

Le mode B favorise l'évaporation rapide d'eau, et donc défavorise le phénomène de retrait du mortier et par la suite une chute de la résistance du béton dans le temps.

Propriétés mécaniques des mortiers fibrés après vieillissement naturel : D'après les résultats on remarque une chute de résistance en flexion est enregistrée pour l'ensemble des mortiers d'études, au départ les fibres sont bien ancrées dans le composite ; au bout d'un certain temps la fibre change de section (suite au gonflement et retrait), ce qui diminue sa capacité d'ancrage dans le composite et ceci provoque une chute de résistance. Mais les résultats de la flexion restent toujours supérieurs au mortier témoin, les mêmes résultats obtenus par [Sedan 2007].

Les mortiers de fibres de Diss présentent les meilleures résistances mécaniques par rapport aux deux autres types de mortiers de fibres de palmier et de fibres d'Alfa.

Et pour les résultats les fibres traitées sont immergées dans une solution d'hydroxyde de sodium  $\text{Na}(\text{OH})$  et d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pendant une durée que l'on a fait varier entre 1, 2 et 3 mois à température ambiante, que après 3 mois d'immersion dans la solution d'hydroxyde de sodium la résistance en traction résiduelle des fibres d'Alfa, Palmier et de Diss représente une résistance inférieure aux fibres non vieilles. Les fibres végétales apparaissent clairement dégradées après un mois d'immersion dans le  $\text{Na}(\text{OH})$ . On remarque des dégradations à l'extrémité des fibres, à cause de la forte absorption d'eau ; le processus d'absorption-désorption (absorption de solvants, migration d'adjuvants). C'est-à-dire des petites particules de solvant vont migrer au sein du matériau ce qui peut avoir des conséquences sur les propriétés des fibres.

Les résultats montrent une chute de la résistance en traction des fibres immergées dans la solution d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  quel que soit leur nature, la différence provient des différences de porosité entre les fibres celles de Palmier et de Diss, plus importante que celle d'Alfa, permettraient la cristallisation de chaux dans les pores des fibres ce qui entraînerait leur fragilisation et affecte leur résistance en traction

Pour avoir une idée de la pureté et de la dégradation des fibres dans le  $\text{Na}(\text{OH})$ , les fibres sont examinées avec le microscope à balayage MEB. On remarque que la morphologie de la surface de la fibre d'Alfa n'est pas identique avant et après le vieillissement. Il est constaté que cette couche n'est pas lisse et plus ou moins épaisse à certains endroits (Figure IV.23.A).

Cela signifie que la soude ne réagit pas de façon homogène tout au long des tiges. On remarque que la fibre de Diss est très dégradée par rapport aux deux autres fibres Alfa et Palmier, l'attaque de la soude est locale, la fibre de Diss absorbe de l'eau plus que la fibre de palmier et d'Alfa donc la dégradation est plus que les deux autres fibres, cette dégradation est en fonction de pourcentage d'absorption d'eau des fibres. Ces résultats sont confirmés par les contraintes de traction directe des fibres

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) après 3 mois de conservation des fibres d'étude dans un milieu alcaline  $\text{Ca(OH)}_2$ , ont montrées que toutes les fibres subit un endommagement superficielle avec des degrés différents selon la nature, d'après l'observation sur les fibres on remarque un modes d'action distincts de dégradation de l'attaque de  $\text{Ca(OH)}_2$  semble diffuse et relativement uniforme sur tout la longueur des fibres. D'après la figure IV.27, IV.28, IV.29 et IV.30 que la fibre d'Alfa et la fibre de Palmier sont recouverte entièrement d'un dépôt de  $\text{Ca(OH)}_2$  qui pénètre dans tous les pores des fibres, ces résultats sont en accord avec la littérature [Kriker 2008] et [Rodier 2014].

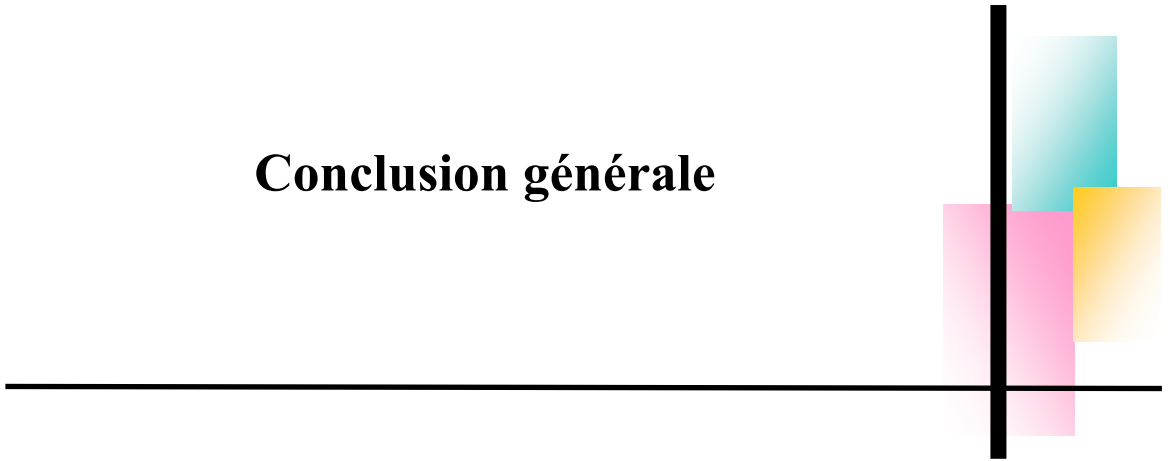
Ont observé aussi que l'effet de  $\text{Ca(OH)}_2$  sur les fibres de Diss est très agressif par rapport aux deux autres fibres, on voit clairement que la surface et les épines des fibres de Diss sont dégradé par le  $\text{Ca(OH)}_2$ . Les pathologies sont dues aux porosités des fibres, la fibre de Diss présente le plus grandes porosités par rapport aux autres fibres ; ce qui augmente leur absorption de la solution de  $\text{Ca(OH)}_2$  conduisant donc à la minéralisation et à la fragilisation des fibres. Figure IV.31, ces résultats sont confirmés par les contraintes de traction directe des fibres (Tableau IV.8).

Nous avons remarqué à partir de l'observation au MEB d'une section longitudinale des fibres végétales extraite d'un mortier de ciment âgé de 6 ans conservé en ambiance intérieure sans contrôle particulier de l'humidité relative ne montre pas une dégradation sur la surface des fibres comme montre les figures

Il est donc souvent préférable de recourir au vieillissement accéléré en laboratoire, qui permet ainsi de réduire les temps d'expérimentation. Un vieillissement naturel sera nécessaire afin de valider les conditions et les résultats du vieillissement accéléré.



## **Conclusion générale**



## Conclusion générale

---

Les travaux présentés dans cette étude s'inscrivent dans l'objectif général de valorisation de co-produits végétaux en abondance sur tout le pourtour méditerranéen et à l'état sauvage qui présentent d'excellentes caractéristiques mécaniques, qui sont utilisés comme fibres dans des composites à matrice cimentaire. Trois types de fibres végétales sont utilisés dans le renforcement des bétons et des mortiers, à limiter et à contrôler la fissuration due au retrait endogène et de dessiccation et à améliorer la résistance à la flexion.

Dans ce contexte, ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est composé de quatre parties, le premier consacre à l'étude bibliographique sur le ciment et ses mécanismes d'hydratation et au phénomène de retrait, ensuite poursuivre un état de l'art sur les fibres végétales et sur le potentiel et les enjeux des matériaux à base de fibres végétales. Troisième partie détaille les caractéristiques des fibres végétales utilisées comme renfort dans cette étude. La dernière partie d'écrire un état de l'art des composites à base des fibres végétaux, et la durabilité de celle-ci

Le second chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisées et les différentes techniques expérimentales ainsi que les moyens d'essais développés spécifiquement lors de ce travail.

Dans le troisième chapitre on présente une analyse des résultats des essais expérimentaux qui caractérisent l'influence de la nature, traitement, la longueur ainsi que le taux des fibres végétales Alfa, Palmier et Diss sur les propriétés des mortiers à l'état durci, d'après ces résultats on choisit deux dosages optimaux des fibres pour les essais suivants. Et on présente une analyse des résultats de l'influence de la nature, traitement, la longueur ainsi que le taux des fibres végétales Alfa, Palmier et Diss qu'on a choisi dans la première partie sur le comportement physicomécanique (masse volumique, affaissement, résistance en compression, résistance en traction par flexion et le retrait).

Le dernier chapitre est consacré à l'étude de la durabilité qui expose l'étude menée sur l'impact du milieu alcalin sur les fibres végétales, et l'influence des modes de conservation des mortiers renforcés de fibres végétales.

Par l'analyse des résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

La connaissance des propriétés physiques de ces fibres végétales est importante; ces fibres possèdent une densité apparente qui diminue avec l'augmentation de la longueur de celle-ci. Par contre, les fibres absorbent plus d'eau lorsqu'on augmente la longueur et le pourcentage.

## Conclusion générale

---

La fibre de Diss possède une absorption d'eau élevée par rapport aux fibres de Palmier et d'Alfa.

Les résultats de l'essai de traction directe montrent que la fibre de diss possède une valeur élevée de la force de traction égale à 363.492 N pour la fibre non traitée et 356.705 N pour la fibre traitée. La fibre d'Alfa a donné des valeurs faibles par rapport aux deux autres fibres.

L'observation au MEB sur les fibres végétales (Alfa, Palmier et Diss) montre nettement les différentes surfaces et structures qui constituent les composants principaux de celle-ci. Le traitement thermique qui a été fait sur les fibres ne modifie pas leur morphologie il nettoie sa surface.

Cette partie nous a permis d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques et le retrait de mortier et béton, en incorporant différents types de fibres végétales. A partir des résultats expérimentaux les conclusions suivantes peuvent être tirées

Le traitement par l'eau bouillie des fibres améliore considérablement les caractéristiques mécaniques, les mortiers renforcés par des fibres traités ont des valeurs de résistance plus élevé que celle des mortiers renforcées par des fibres non traitées. Le traitement nettoie la surface de la fibre et augmente sa rugosité, cette amélioration conduisant à l'amélioration de la force d'adhérence interfaciale et la compatibilité entre la fibre et la matrice.

Les propriétés physiques du mortier et du béton renforcés par des fibres végétales de différentes longueurs et pourcentages ont été comparées au mortier et béton témoin, on montre que l'augmentation de taux et pourcentage de fibres végétales diminue la densité du mortier et béton.

L'ajout de fibres, comme tout autre type d'inclusions, modifie les propriétés rhéologiques du matériau cimentaire à l'état frais. Dans ce domaine et dans celui, connexe, de la mise en œuvre de ce type de matériaux, les connaissances sont peu établies et les études menées sont relativement rares. Pour de faibles taux de fibres, l'ouvrabilité du béton ne sera pas affectée et la répartition sera homogène dans le mélange. Mais avec un taux élevé de fibres végétales dans le béton conduit à une diminution de sa maniabilité, cette perte d'ouvrabilité est d'autant plus importante que la longueur est important, à cause d'absorption élevée d'eau des fibres. On observe une formation de boulettes de fibres dans le béton leurs de malaxage pour les longueurs de 1,5 et 2 cm avec un taux de 2%, le degré d'agglomération dépend du type et de

## Conclusion générale

---

la longueur des fibres utilisées, la fraction volumique de fibre présente dans le composite cimentaire.

Nous constatons une diminution de la résistance en compression des échantillons fibrés par rapport à l'échantillon de référence, cette diminution est enregistrée pour toutes les longueurs de fibre d'Alfa et fibre de palmier dattier, mais, avec l'adjonction d'une longueur de 2 cm de fibres de Diss la résistance à la compression du mortier augmente par rapport au mortier de référence avec un taux d'amélioration de l'ordre de 3,44% et pour le béton fibré est de 4,39%, ce ca est due à sa surface rugueuse qui assure un bon encrage avec la matrice.

On a remarqué que l'incorporation des fibres végétales dans le mortier et béton améliore leur comportement en flexion, cette augmentation croit avec la longueur des fibres végétales utilisée. Les meilleures valeurs sont obtenues pour la longueur de 2 cm et avec un pourcentage de 2%, les résultats montre que tous les fibres jouent le rôle de renfort pour la matrice en lui offrant une ductilité intéressante en augmentent le taux des celle-ci. Avec un taux d'amélioration très intéressante pour les mortiers de fibres d'Alfa, Palmier et Diss égale à 80.21 %, 88.77 % et 106,42 % respectivement, et pour le béton de fibres d'Alfa, Palmier et Diss respectivement égale à 23.19 %, 27.97 % et 41.75 %.

Nous observons que la fibre de diss à des capacités de diminuer le retrait de dessiccation ceci pourrait être attribué à sa surface rugueuse et la matrice qui pénètre à l'intérieur de la fibre qui assure une bonne adhérence matrice/fibres, et permet de contrôler l'ouverture de fissure et par la suite limite le retrait de dessiccation. Le même comportement a été observé pour la fibre de palmier : elle diminue le retrait lorsqu'on diminue la longueur et limite la propagation de fissure de retrait à cause de sa surface qui comporte des rainures. Le retrait de dessiccation augmente avec l'augmentation de la longueur de celle-ci. Le retrait du béton de fibre d'Alfa est plus élevé que les autres bétons de fibres palmier et de diss, à cause de sa surface lisse.

La fibre de diss et de palmier ont une forte absorption d'eau donc le rapporte E/C va diminuer lorsque on augmente la longueur des fibres, mais ces deux fibres possèdent une structure rugueuse qui empêche le retrait endogène pour se développer. Pour le mortier de fibre d'alfa l'hypothèse de [Neville 2000] va se validé par ce que il absorbe de l'eau et le rapporte E/C du mortier va diminuer lorsqu'on augmente la longueur des fibres et par la suite le retrait endogène va augmenter.

## Conclusion générale

---

Le béton développera d'autant moins de retrait que le mortier ceci est dû à l'incorporation des granulats dans le béton.

L'introduction des fibres de Palmier et fibre de diss réduit le taux de retrait endogène pendant les sept premiers jours. Ils retardent l'apparition de la première fissure et par la suite ils contrôlent l'ouverture de celle-ci. Les résultats obtenus montrent que le béton de fibres de diss présente un retrait inférieur à celui de béton de fibres de palmier et de fibres d'alfa. Mais les valeurs restent toujours inférieures au retrait de béton témoin. Cet effet s'explique par l'opposition des fibres végétales à la déformation endogène.

Lorsque on augmente le taux des fibres le retrait va diminuer, la surface et la morphologie des fibres jouent un rôle très important pour réduire le retrait et permet également de contrôler l'ouverture de la fissure par la suite. On peut affirmer que les fibres utilisées peuvent constituer une alternative intéressante pour améliorer la résistance à la fissuration de retrait des matériaux cimentaires.

La chute de la résistance en flexion et en compression des éprouvettes conservées dans l'air par rapport aux éprouvettes conservées dans l'eau, le milieu de conservation des éprouvettes dans l'eau joue un rôle très important dans le développement de la résistance des mortiers renforcés par des fibres végétales. Cependant, on remarque une perte de la résistance et de la ductilité des fibres végétales dans la matrice cimentaire par décomposition partielle de ses constituants.

Les fibres sont plus sensibles à l'immersion dans la solution d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que dans la solution d'hydroxyde de sodium  $\text{NaOH}$ . Ceci est attribué par plusieurs auteurs à la cristallisation de la chaux dans les pores des fibres. Selon les auteurs la durabilité des fibres utilisées dans le ciment portland peut être affectée en raison de la libération de la portlandite au cours du processus d'hydratation.

De plus, l'immersion dans une solution d'hydroxyde de calcium induit une dégradation plus intense des fibres du fait de la précipitation d'hydroxydes ou de carbonates de calcium à la surface ou dans les pores des fibres ce qui entraîne leur rigidification et donc leur fragilisation, voire leur minéralisation. Cependant les résultats montrent une chute de la résistance en traction des fibres quel que soit leur nature, la différence provient des différences de porosité entre les fibres de Palmier et de Diss, plus importante que celle d'Alfa. L'analyse de la morphologie de surface des fibres végétales qui ont subi un vieillissement accéléré dans le  $\text{NaOH}$  pendant 3 mois a été faite au moyen de la microscopie électronique à



## Conclusion générale

---

balayage (MEB). Les images MEB montrent une dégradation visible et plus ou moins épaisse à certains endroits des trous apparaissent à la surface des fibres, et la soude ne réagit pas de façon homogène tout au long des tiges et l'attaque de la soude est locale, la fibre de Diss absorbe de l'eau plus que la fibre de palmier et d'Alfa donc la dégradation est plus que les deux autres fibres. Cette dégradation est en fonction de pourcentage d'absorption d'eau des fibres, ce qui entraînerait leur fragilisation.

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) après 3 mois de conservation des fibres d'étude dans un milieu alcalin  $\text{Ca(OH)}_2$ , ont montré que toutes les fibres subissent un endommagement superficiel avec des degrés différents selon la nature, d'après l'observation sur les fibres on remarque des modes d'action distincts de dégradation de l'attaque de  $\text{Ca(OH)}_2$  qui semble diffuse et relativement uniforme sur toute la longueur des fibres. La fibre d'Alfa et la fibre de palmier sont recouvertes entièrement d'un dépôt de  $\text{Ca(OH)}_2$  qui pénètre dans tous les pores des fibres. Et on a observé aussi que l'effet de  $\text{Ca(OH)}_2$  sur les fibres de Diss est très agressif par rapport aux deux autres fibres, on voit clairement que la surface et les épines des fibres de Diss sont dégradées par le  $\text{Ca(OH)}_2$ . Ces pathologies sont dues aux porosités des fibres, la fibre de Diss présente la plus grande porosité par rapport aux autres fibres ; ce qui augmente leur absorption de la solution de  $\text{Ca(OH)}_2$  conduisant donc à la minéralisation et à la fragilisation des fibres.

Nous avons remarqué à partir de l'observation au MEB d'une section longitudinale des fibres végétales extraites d'un mortier de ciment âgé de 6 ans, les images ne montrent pas de dégradation sur la surface des fibres. Le ciment n'attaque pas la fibre mais il modifie la zone de transition autour de ces fibres.

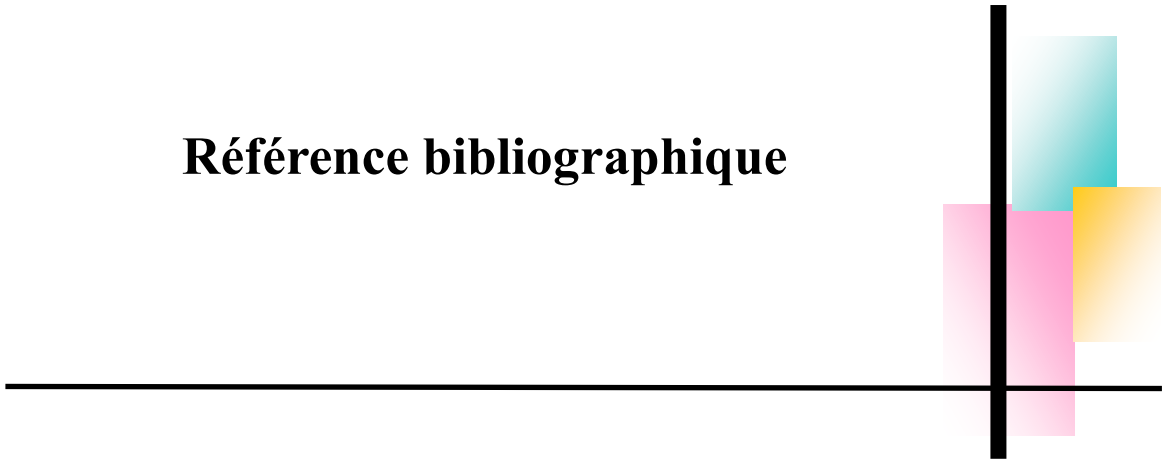
Il est donc souvent préférable de recourir au vieillissement accéléré au laboratoire, qui permet ainsi de réduire les temps d'expérimentation. Un vieillissement naturel sera nécessaire afin de valider les conditions et les résultats du vieillissement accéléré.

Les perspectives de cette étude sont nombreuses. Le programme expérimental pourrait être complété par les études suivantes :

- Contrôler l'absorption d'eau des fibres végétales
- Interactions physico-chimiques entre les fibres végétales et la matrice cimentaire
- Étude de l'effet de la température sur les propriétés mécaniques des composites renforcés de fibres



## Référence bibliographique



### A

[**Abdelouahed 2005**] Abdelouahed. K., « *Caractérisation des Fibres de Palmier Dattier Et Propriétés des Bétons et Mortiers Renforcés par ces Fibres en Climat Chaud et Sec* », Thèse de doctorat, ENP Alger, pp 154, 2005.

[**Abraham 1996**] Abraham. C. J., « *Solution to spontaneous combustion in linseed oil formulations* », Polymer Degradation and Stability, Vol. 54, 157-166, 1996.

[**Achour 2017**] Achour. A.R., « *Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles : valorisation des plantes locales* », Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2017.

[**Adil 2011**] Adil. Sbiai., « *Matériaux composites à matrice époxyde charge par des fibres de palmier dattier: effet de l'oxydation au tempo sue les fibres* », Thèse de doctorat, Ecole doctorale Matériaux, Lyon, 2011.

[**Agarwall 1995**] Agarwall. L.K., « *Bagasse reinforced cement composites* », Cement and Concrete Composites, Vol.17, 107-112, 1995.

[**Akchiche 2007**] Akchiche. H., « *Contribution à la modélisation du retrait et du fluage des bétons et mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier en régions désertiques* », mémoire de magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, (2007)

[**Akchiche 2007**] Akchiche. O., Messaoud Boureghda K., « *Esparto Grass (Stipa Tenacissime L.), raw material of papermaking* », First Part, Chimija rastitel'no go syr'ja, Vol.4, 25-30, 2007.

[**Akers 1989**] Akers. S.A.S., J.B., « *Studinka Ageing behaviour of cellulose fiber cement composites in natural weathering and accelerated tests* », The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol.11-2, 1989.

[**Albuquerque 1999**] Albuquerque. A., Joseph. K., Hecker de Carvalho. L., Morais d'Almeida. J., « *Effect of wettability and ageing conditions on the physical and mechanical properties of uniaxially oriented jute-roving-reinforced polyester composites* », Composites Science and Technology, pp. 833-844, 1999.

[**Ali-Boucetta 2016**] Ali-Boucetta. T., Tioua. T., Behim. M., Kriker. A., Belebchouche. Ch., Laifa. W., « *Effet de l'incorporation des fibres d'alfa sur le comportement des bétons autoplaçants* », Journal of Materials Processes and Environment. Vol 4(1), 2335-1020, 2016.

[**Aliprandi 1989**] Aliprandi. G., « *Matériaux réfractaires et céramiques techniques* », Edition Septima, Paris, France, pp. 489-519, 1989.

[**Almeida 2010**] Almeida. A., Toledo Filho. R., Melo Filho. J., « *Cement composites reinforced by short curaua fibers* », Matéria (Rio de Janeiro), vol.15 no.2, Rio de Janeiro

2010

[**Andonian 1979**] Andonian. R., Mai. Y.W., Cottrell. B., « *Strength and fracture properties of cellulose fiber reinforced cement composites* », Journal of Cement Composites, pp. 151-158. 1979.

[**Arabi 2006**] Arabi. N., « *Contribution à l'étude du comportement mécanique du composite ciment-verre et durabilité des fibres de verre* », Thèse de doctorat d'état université Annaba 2006.

[**Arsene 2001**] Arsene. M., Bilba. K., Ouensanga. A., « *Influence des constituants de la fibre de bagasse sur la prise du matériau composite bagasse/ciment* », Revue des composites et des matériaux avancés, p 7-20, 2001.

[**Ashour 2010**] Ashour T., Georg. H., Bockisch. F.J., Wu. W., « *The influence of natural reinforcement fibers on insulation values of earth plaster for straw bale buildings* » Materials and Design, vol. 31, p 4676-4685, 2010.

[**Aziz 1984**] Aziz. M.A., Paramasivam. P., Lee. S.L., « *New Reinforced Concretes 3. Concrete reinforced with natural fibres* » Surrey University Press, 1984.

### B

[**Bahloul 2009**] Bahloul. O., Bourzam. A., Bahloul. A., « *Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de ciment (Cas d'Alfa)* », SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

[**Baley 2003**] Baley. Ch., « *Contribution à l'étude de matériaux composites à matrice organique renforcés par des fibres de lin* », Thèse Université de Bretagne Sud, Lorient, France, 2003.

[**Barcelo 2001**] Barcelo. L., « *Influence des Caractéristiques des Ciments sur la Structuration et le Comportement Dimensionnel des Matériaux Cimentaires au Jeune âge* », Thèse de doctorat, LMT Cachan, Paris, France, 2001.

[**Baron 1971**] Baron. J., « *Fissuration du béton par hydratation localement différée du ciment* », Thèse de la faculté des sciences de Paris, 1971.

[**Bedard 2009**] Bedard. E., « *Influence de la température sur le comportement au jeune âge du béton* », faculté des sciences et génie université Laval Québec 2009, P 3-7.

[**Belgacem 1994**] Belgacem. M.N., Bataille. P. Sapeiha. S., « *Effect of corona modification on the mechanical properties of polypropylene/cellulose composites* », Journal of Applied

Polymer Science, p. 379, 1994.

**[Ben Elmabrouk 2011]** Ben Elmabrouk. A., « *Elaboration de nano-composites à base de whiskers cellulose et de polymère acrylique par polymérisation in situ* », Thèse de doctorat, Université. Grenoble. 2011, pp 78.

**[Bentur 1989]** Bentur, A. S.A.S., « *The microstructure and ageing of cellulose fibers reinforced cement composites cured in a normal environment Akers* », The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 11-2, 1989.

**[Berhane 1999]** Berhane. Z., « *Performance of natural fiber reinforced mortar roofing tiles* », Materials and Structures, pp. 347-352, 1999.

**[Bessadok 2007]** Bessadok. A., Marais. S., Gouanvé. F., Colasse. L., Zimmerlin. I., Roudesli. S., Métayer. M., « *Effect of chemical treatments of alfa (stipe tenacissim) fibers on water-sorption properties* », Compos. Sci. Technol, Vol.67, 685-697, 2007.

**[Biblis 1989]** Biblis. E.J., Lo. C.F., « *Effect on the setting of southern pine-cement mixture* », Forest Products Journal, pp. 28-34, 1989.

**[Bilba 2008]** Bilba. K., Arsene. M.A., « *Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 39, 1488-1495, 2008.

**[Bisanda 1991]** Bisanda. E.T.N., Ansell. M.P., « *The effect of silane treatment on the mechanical and physical properties of sisal-epoxy composites* », Composites Science and Technology, p.167, 1991.

**[Bjøntegaard 1999]** Bjøntegaard. Ø., « *Thermal dilation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high performance concrete* », Ph.D. thesis of NTNU, Trondheim, pp 256, 1999.

**[Bledzki 1999]** Bledzki. A.K., Gassan. J., « *Composites reinforced with cellulose based fibres* », Progress in Polymer Science, Vol. 24, 221–274, 1999.

**[Blankenhorn 1994]** Blankenhorn. P.R., Lobosky. P., Dicola. M., Stover. L.R., « *Compressive strength of hardwood cement composites* », Forest Products Journal, Vol. 44, pp. 59-62, 1994.

**[Blankenhorn 1999]** Blankenhorn. P.R., Silsbee M.R., Blankenhorn. B.D., Dicola. M., « *Temperature and moisture effect on selected properties of wood fiber-cement composites* », Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 737-741, 1999.

**[Bouiri 2009]** Bouiri. B., Amrani. M., « *Production of dissolving grade pulp from Alfa*,

*Bioresources* », Vol. 5(1), 291-302, 2009.

**[Bourahli 2013]** Bourahli M.E.H., H. Osmani, « *chemical and mechanical properties of diss (Ampelodesmos mauritanicus) fibers* » *Journal of Natural Fibers*. Vol.10(3), 219-232, 2013.

**[Bourahli 2014]** Bourahli. M.E.H., « *Caractérisation d'un composite verre/époxy* », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif, 2014.

**[Bourgois 1988]** Bourgois. J., Guyonnet. R., « *Characterization and analysis of terrified wood* », *wood science and technology*, Vol. 22, 143-155, 1988.

**[Boustingorry 2002]** Boustingorry. P., « *Elaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté Amélioration de la résistance au visage de produits préfabriqués en gypse* », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Saint-Etienne, France, 2002.

**[Brahim 2007]** Brahim. S.B., Cheikh. R.B., « *Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite* », *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 140-147, 2007.

**[Brahmi 2016]** Brahmi H., A. Hamouine, « *Influence of treatments on the date palm fibres and cement matrix behavior tensile and pull-out tests* » *American Journal Civil Engineering and Architecture*, Vol.4 (6), 211-215, 2016.

**[Beskri 2017]** Beskri. Y., « *Comportement physico mécanique et durabilité des bétons à hautes performances à base de deux fillers : influence de la nature des granulats* », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2017

### C

**[Castro 1981]** Castro. J., Naaman. A.E., « *Cement mortar reinforced with natural fibers* », *ACI Materials Journal*, Vol.78-6, 69-78, 1981.

**[Cabrillac 1992]** Cabrillac. R., « *Etude comparative des bétons de fibres métalliques, de verre et de bambou* », *Béton* 290, 504, pp. 18-27, 1992.

**[Callister 2001]** Callister. W.D. Jr., « *Science et Génie des matériaux* », Edition Dunod, Mont-Royal, Quebec, p. 463, 2001.

**[Canovas 1992]** Canovas. S.K., « *New economical solutions for improvement of durability of portland cement mortars reinforced with sisal fibers* », *Materials and Structures*, pp. 417-422, 1992.

**[Cazaurang 1991]** Cazaurang-Martinez. M., Herrera-Franco. P., Gonzales-Chi. I. Aguilar-

Vega. M., « *Physically and mechanical properties of henequen fibers* », Journal of Applied Polymer Science, pp. 749-756, 1991.

**[Chafei 2014]** Chafei. S., « *Influence de différents traitements sur les comportements rhéologique et mécanique d'un composite cimentaire mortier-fibres de lin* », Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, Caen, France, 2014.

**[Chafei 2015]** Chafei. S., Khadraoui. F., Boutouil. M., Gomina. M., « *Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite* », Construction and Building Materials, Vol.79, 229-235, 2015.

**[Chamoin 2013]** Chamoin. J., « *Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation* », Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Rennes, France, 2013.

**[Charlet 2007]** Charlet. K., Baley. C., Morvan. C., Jernot. J.P., Gomina. M., Bréard. J., « *Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol 38, 1912-1921, 2007.

**[Coutts 1995]** Coutts. R.S.P., Ni. Y., « *Autoclaved bamboo pulped fiber reinforced cement* », Cement and Concrete Composites, Vol. 17, pp. 99-106, 1995.

### D

**[Dallel 2012]** Dallel. M., « *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil* », Thèse de docteur, Université de Haute Alsace, 2012.

**[Davis 1940]** Davis. H.E., « *Autogenous volume changes of concrete* », American Society for testing materials ASTM Proceeding Vol. 40, 1103-1112, 1940.

**[Devi 1997]** Devi. L., Bhagawan. S. Thomas. S., « *Mechanical properties of pineapple leaf fibre reinforced polyester composites* », Journal of Applied Polymer Science, pp. 1379-1748, 1997.

**[Djoudi 2009]** Djoudi. A., khenfer. M.M, Bali. A., « *Etude d'un nouveau composite en plâtre Renforcé avec les fibres* », 1st International Conférence on Sustainable Built Environnement Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Alegria), Octobre 12-14, 2009.

**[Dupain 2000]** Dupain. R., Lanchon. R., Saint Arroman. J. C., « *Granulats, sols, ciments et bétons – caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire*, Collection CAPLIEZ, édition CASTEILLA, V235, Paris, 2000.

### E

[**Eva Rogge 2010**] Eva Rogge., « *Extraction et étude des propriétés physiques et mécaniques des fibres d'alfa (Esparto grass) en vue d'applications textiles* », Faculteit Ingenieur wetenschappen, UGent, 2009-2010.

### F

[**Fisher 1974**] Fisher. V.F., Wihaus. O., Ryssel. M., Oldrecht. J., « *The water soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wools boards* », Holztechnologie, Vol.15, 1303-1309, 1974.

[**Felix 1991**] Felix. J.M., Gatenholm. P., « *Nature of adhesion in composites of modified cellulose fibers and polypropylene* », Journal of Applied Polymer Science, Vol.42, p. 609, 1991.

[**Felix 1994**] Felix. J.M., Carlsson. C.M.G., Gatenholm. P., « *Adhesion characteristics of oxygen plasma-treated rayon fibers* », Journal of Adhesion Science and Technology, p. 163, 1994.

### G

[**Gardner**] Gardner. E.M., Gaidis. W.R., « *Hydration mechanisms I* », Materials Science of Concrete, Edited by Skalny, pp. 95-125.

[**Gay 1987**] Gay. D., « *Matériaux composites* », Edition Hermes, Paris, France, pp.30-38, 1987.

[**Govin 2004**] Govin. A., « *Aspects physico-chimiques de l'interaction bois- ciment /Modification de l'hydratation du ciment par le bois* », Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, N°:331CD, 2004.

[**Govin 2003**] Govin. A., Grosseau. P., Guilhot. B., Guyonnet. R., « *Etude physico-chimique d'un composite ciment-bois durant les premières heures d'hydratation* », Journées Annuelles du Groupe Français de Céramique, Montpellier, 26 au 28 Mars 2003.

[**Gutierrez 1992**] Gutierrez. J.F., Hoarau. P., « *Etude du vieillissement de composite verre résine en milieu marin." Construction naval en composites* », Paris-France. 1992.

[**Gram 1983**] Gram. H.E., « *Durability of natural fibers in concrete* », CBI Research fo 1-83, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, pp 255, 1983.

### H

[**Harche 1979**] Harche. M., Bounaga. D., « *Etude comparative du tissu fibreux dans la feuille d'alfa (Stipa tenacissima L.)* », Bull Soc, Hist, Nat, Alger, 113-120, 1979.

[**Herrera 1997**] Herrera-Franco. P., Valadez-Gonzalez. A., Cervantes-Uc. M., « *Development*



*and characterization of a HDPE-sand-natural fiber composite* », Composites Part B, pp. 331-343, 1997.

**[Herrera 2005]** Herrera-Franco. P.J., Valadez-Gonzalez. A., « *A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites* », Composites Part B, pp. 597-608, 2005

**[Hill 1998]** Hill. C.A., Khalil. H.P.S.A., Hale. M.D., « *A study of the potential of acetylation to improve the properties of plant fibres* », Industrial Crops and Products, vol.8, 53-63, 1998.

**[Hua 1992]** Hua. C., « *Analyses et modélisations du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante* », Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1992.

**[Hua 1987]** Hua. L., Zadorecki. P., Flodin. P., « *Cellulose fiber-polyester composites with reduced water sensitivity (2) Surface analysis* », Polymer Composites, Vol. 8, pp. 199-202, 1987.

### J

**[John 1990]** John. V.M., Agopyan. V., Derolle. A., « *Durability of blast furnace-slag-based cement mortar reinforced with coir fibers* », In: Second International Symposium on vegetable plants and their fibers as Building Materials, RILEM Proc. 7, Chapman and Hall, London, pp. 87-97, 1990.

**[Joseph 1993]** Joseph. K., Thomas. S., Pavithran. C., Brahmakumar. M., « *Tensile properties of short-sisal fiber-reinforced polyethylen composites* », Journal of Applied Polymer Science, pp. 1731-1739, 1993.

**[Joshi 2004]** Joshi. S.V., Drzal. L.T., Mohanty. A.K., Arora. S., « *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites* », Composites Part A, pp. 371- 376, 2004.

**[Juarez 2007]** Juarez. C., Durán. A., Valdez. P., Fajardo. G., « *Performance of "Agave lecheguilla" natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions* », Building and Environment, Vol.42, 1151-1157, 2007.

### K

**[Khazma 2008]** Khazma. M., El Hajj. N., Goullieux. A., Dheilily. R.M., Queneudec. M., « *Influence of sucrose addition on the performance of a lignocellulosic composite with a cementitious matrix* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.39, 1901-1908, 2008.

**[Khazma 2014]** Khazma. M., Goullieux. A., Dheilily. R.M., Rougier. A., Quéneudec. M., « *Optimization of flax shive -cementitious composites: Impact of different aggregate treatments* »

using linseed oil », *Industrial Crops and Products*, Vol 61, 442-452, 2014.

**[Khelifaa 2016]** Khelifaa M.R., N. Lekloud, T. Bellala , R.L. Hebertb, B.A. Ledesertb, « *ductility behaviours of oil palm shell steel fiber* », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1964-8189, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2016.12177922>

**[Khenfer 1990]** Khenfer. M.M., « *Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques* », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Juin 1990.

**[Kriker 2008]** Kriker. A, Bali. A., G. Debicki, M. Bouziane, Chabannet. M., « *Durability of date palm fibers and their use as reinforcement in hot dry climates* », *Cement and Concrete Composites*, Vol.30, 639-648, 2008.

**[Kriker 2005]** Kriker. A., Debicki. G., Bali. A., Khenfer. M.M., Chabannet. M. « *Mechanical properties of date palm fibers and concrete reinforced with date palm fibers in hot-dry climate* », *Cement and Concrete Composites*, Vol.27, 554-564, 2005.

### L

**[Laifa 2014]** Laifa. W., Behim. M., Turatsinze. A., Ali-Boucetta. T., « *Caractérisation d'un béton autoplaçant avec addition de laitier cristallisé et renforcé par des fibres de polypropylène et de diss* », *Sci. Tech. Synth.* 29 100-110, 2014.

**[Lazko 2011]** Lazko. J., Dupré. B., Dheilly. R.M., Quéneudec. M., « *Biocomposites based on flax short fibers and linseed oil* », *Industrial Crops and Products*, Vol.33, 317-324, 2011.

**[Le Troedec 2009]** Le Troedec. M., « *Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulosiques* », Thèse de doctorat, Université de Limoges, Limoges, France, 2009.

**[Le Troedec 2008]** Le Troedec. M., Sedan. D., Peyratout. C., Bonnet. J.P., Smith. A., Guinebretiere. R., « *Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibers* », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vlo.39, 514-522, 2008.

**[Le Troëdec 2009]** Le Troëdec. M., « *Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulosiques* », Thèse de doctorat, Université de Limoges, Faculté des Sciences et Techniques, 65, 2009.

**[Ledhem 1996]** Ledhem. A., « *Etude des paramètres de fabrication d'un composite argile/ciment/bois* », *Materials and Structures*, Vol. 29, 1996.

**[Lima 2016]** Lima. P.R.L., Barros. J.A.O., Santos. D.J., Fontes. C.M., Lima. J.F.M., Filho.

R.T., « *Experimental and numerical analysis of short sisal fiber cement composite produced with recycled matrix* », European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2016 <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1271357>

### M

[**Mac Vicar 1999**] Mac Vicar. R., Matuana. L.M., Balatinecz. J.J., « *Cement Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement* », composites and Concrete Composites, Vol.21, 189-196, 1999.

[**Magniont 2010**] Magniont. C., « *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources* », Thèse doctorat de l'université de Toulouse, 2010.

[**Makani 2011**] Makani. A., « *Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons* », Thèse de Doctorat de L'université de Toulouse, 2011.

[**Maldas 1989**] Maldas. D., Kokta. B.V., Daneault. C., « *Influence of coupling agents and treatments on the mechanical properties of cellulose fibers-polystyrene composites* », Journal of Applied Polymer Science, Vol.37, pp. 751-7751989.

[**Melais 2016**] Melais. F. Z., « *Durabilité des bétons de sable fibres dans les différents milieux agressifs effets de la nature des fines d'ajouts et fibres* », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2016

[**Merkhoufi 2004**] Merkhoufi. A., « *Contribution à l'étude des propriétés et déformations du béton renforcé par les fibres du palmier dattier en climat sec et chaud* », mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2004,

[**Merzoud 2007**] Merzoud. M., « *Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de diss dans la fabrication de la maçonnerie* », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2007.

[**Michaud 2003**] Michaud. F., « *Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage* », Thèse Phd, Université Laval, 2003.

[**Mieck 1995**] Mieck. K.P., Nechwatal. A., Knobelsdorf. C., « *Reinforcement of polypropylene by annual plant fibers: Optimization of the coupling agent efficiency* », Composite Interfaces, Vol. 7, p.73, 1995.

[**Mohr 2005**] Mohr. B.J., Nanko. H., Kurtis. K.E., « *Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling* », Cement and Concrete Composites, Vol.27, 435-448, 2005.

## Référence Bibliographique

---

**[Mokhtari 2015]** Mokhtari. A., Kriker. A., Guemmoula. Y., Boukrioua. A., Khenfer. M.M., « *Formulation and characterization of date palm fibers mortar by addition of crushed dune sand* », *Energy Procedia.*, Vol.74, 344-350, 2015.

**[Mokhtari 2006]** Mokhtari. A., « *Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier* », Mémoire, Magister, Université de Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2006.

**[Monge 2007]** Monge. J., « *Fissuration des Mortiers en Couches Minces - Effets de l'Hydratation, du Séchage et de la Carbonatation* », Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2007.

**[Monreal 2011]** Monreal. P., Mboumba. L.B., Mamboundou., Dheilily. R.M., Quéneudec. M., « *Effects of aggregate coating on the hygral properties of lignocellulosic composites* », *Cement and Concrete Composites*, Vol.33, 301-308, 2011.

**[Morlier 1991]** Morlier. P., khenfer. M., « *Effet de la longueur des fibres sur les propriétés mécanique des ciments renforcées de fibres cellulosiques* », *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol 24, 185-190, 1991.

**[Moselmi 1985]** Moselmi. Zientian., « *Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood –cement -water mixture* », *Forest product journal*, Vol.35(7), 37-43, 1985.

**[Mounanga 2003]** Mounanga. P., « *Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques* », Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, 2003.

**[Munier 1973]** Munier. P., « *Le palmier-dattier* », M. Larose, Ed.: Maisonneuve & Larose, 1973, pp. 221.

**[Mwaikambo 1999]** Mwaikambo. L., Bisanda. E., « *The performance of cotton/kapok fabric-polyester composites* », *Polymer Testing*, pp. 181-198, 1999.

### N

**[Naville 2000]** Naville A.M., « *Propriétés Des Bétons* », ISBN 2-212-01320-5 (2000) 406.

**[NBN EN 1015-3, 1999]** NBN EN 1015-3 « *Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie– partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (à la table à secousses)* », 1999.

**[Nenonene 2009]** Nenonene. A.Y., « *Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage* », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de

Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.

**[NF EN 12350-2, 1999]** NF EN 12350-2, « *Essai pour béton frais. Partie 2: Essai d'affaissement* », AFNOR, décembre, 1999.

**[NF EN ISO 5079, 1996]** NF EN ISO 5079 fibres textiles « *détermination de la force de rupture et de l'allongement de rupture des fibres individuelles* », AFNOR, France, 1996.

**[Nozahic 2012]** Nozahic. V., Amziane. S., « *Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder*», Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 43, 1837-1849, 2012.

### P

**[Paiva 2007]** Paiva M.C., Ammar I., Campos A.R., Cheikh R.B., Cunha A.M., « *Alfa fibers: Mechanical, morphological and interfacial characterization* », Composites Science and Technology, Vol.67, 1132-1138, 2007.

**[Pal 1984]** Pal. P.K., « *Jute reinforced plastics: a low cost composite material* », Plastics and rubber processing and applications, pp. 215-219, 1984.

**[Panesar 2012]** Panesar. D.K., Shindman. B., « *The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork* », Cement & Concrete Composites, vol.34, 982-992, 2012.

**[Peyratou 2007]** Peyratou. C.S., Troede. M.L., Chotard. T., Bonnet. J.P., Smith. A., « *Modification Physico-chimique des interactions entre les fibres du chanvre et la chaux: impact sur les propriétés mécaniques des mortiers* », 18<sup>ème</sup> congrès français de mécanique, Grenoble, 2007.

**[Peyron 2000]** Peyron. G., « *Cultiver le palmier-dattier* », E. Quae, Ed., pp. 112, 2000.

**[Page 2017]** Page. J., « *Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée* », Génie civil. Normandie Université, Français, 2017.

### R

**[Ramakrishna 2005]** Ramakrishna. G., Sundararajan. T., « *Studies on the durability of natural fibers and the effect of corroded fibers on the strength of mortar* », Cement and Concrete Composites, Vol.27, 575-582, 2005.

**[Raj 1988]** Raj. R.G., Kokta. B.V., Maldas. D., Daneault C., « *Use of wood fibers in thermoplastic composites. Isocyanate as a binding agent for polyethylen-wood fiber* », composites v Polymer Composites, Vol. 9, pp 404-411, 1988.

**[Reading 1985]** Reading. T.J., « *Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces* », Concrete International, 57-62, 1985.

**[Rodier 2014]** Rodier. L., « *Matériaux de construction en zone tropicale Humide Potentialités de sous-produits ou de matériaux naturels locaux en substitution ou en addition à la matrice cimentaire* », Thèse pour le doctorat, Université des Antilles et de La Guyane, 2014.

**[Roma 2008]** Roma. Jr.L.C., Martello. L.S., Savastano. H.Jr., « *Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement based tiles reinforced with vegetable fibers* », Construction and Building Materials, Vol.22-4, 668-674, 2008.

### S

**[Saran. 2010]** Saran. S., « *Reinforced Soil and its Engineering Applications* », I.K. International Publishing House Pvt., Limited, 2010

**[Sapieha 1989]** Sapieha. S., Pupo. J.F. Schreiber. H., « *Thermal degradation of cellulose containing composites during processing* », Journal of Applied Polymer Science, p. 233, 1989.

**[Savastano 1999]** Savastano. H, Agopyan. V., Nolasco. A.M., Pimentel. L., « *Plant fibre reinforced cement components for roofing* », Construction and Building Materials, Vol.13, 433-438, 1999.

**[Savastano 2002]** Savastano. H., John. V.M., Agopyan. V., Pellegrino. O., « *Weathering of vegetable fibre-clinker free cement composites* », Materials and Structures, Vol.35, 64-68, 2002.

**[Savastano 2000]** Savastano. J.H., Warden. P.G. Coutts. R.S.P., « *Brazilian waste fibers as reinforcement for cement-based composites* », Cement and Concrete Composites, pp. 379-384, 2000.

**[Sedan 2007]** Sedan. D., « *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite* », Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 2007.

**[Sakakibara 1991]** Sakakibara . A., « *Wood and cellulosic chemistry* », Edition D. N-S. Hon et N. Shiraishi, pp. 113-175, 1991.

**[Sellami 2015]** Sellami. A., « *Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss) : Caractérisation, Durabilité et Application au cas de la maçonnerie* », Thèse de doctorat université Annaba, 2015.

**[Sellami 2013]** Sellami. A., Merzoud. M., Amziane. S., « *Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers* », Construction and Building

Materials, Vol.47, 1117-1124, 2013.

**[Sombatsompop 2003]** Sombatsompop. N., Chaochanchaikul. K., Phromchirasuk. C., Thongsang. S., « *Effect of wood sawdust content on rheological and structural changes, and thermo-mechanical properties of PVC/sawdust composites* », Polymer International, Vol.52 (12), 1847-1855, 2003.

**[Soroushian 1984]** Soroushian. P., Shah. Z., Won. J.P., Hsu. J.W., « *Durability and moisture sensitivity of recycled wastepaper-fiber-cement composites* », Surrey University Press, 1984.

**[Soroushian 1994]** Soroushian. P., Shah. Z., Won. J.-P., Hsu. J.-W., « *Durability and moisture sensitivity of recycled wastepaper-fiber-cement composites* », Cement and Concrete Composites, Vol.16, 115-128, 1994.

**[Sterzynski 1995]** Sterzynski. T., Triki. B., Zelazny. S., « *Influence of fiber surface treatment on the creep behavior of jute fiber-reinforced polypropylene* », Polymery, p. 468, 1995.

**[Swamy 1988]** Swamy N, Gram. H.E., « *Durability of natural fibers in concrete* », Natural fibre reinforced cement and concrete, 1988.

### T

**[Tazawa 1995]** Tazawa. E., Miyazawa. S., Kasai. T., « *Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste* », Cement and Concrete Research, Vol.25 [2], 288-292, 1995.

**[Toledo Filho 1997]** Toledo Filho. R.D., « *Natural fiber reinforced mortar composites: experimental characterisation* », PhD thesis, DEC-PUC-Rio, Brazil, p. 472, 1997.

**[Toledo Filho 2003]** Toledo Filho. R.D., Ghavami. K., England. G.L., Scrivener. K. « *Development of vegetable fiber-mortar composites of improved durability* », Cement and Concrete Composites, Vol.25 185-196, 2003.

**[Toledo Filho 2000]** Toledo Filho. R.D., Scrivener. K., England. G.L., Ghavami. K., « *Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites* », Cement and Concrete Composites, Vol.22, 127-143, 2000.

**[Toledo. Filho 2009]** Toledo. Filho. R.D., Andrada. Silva. F., Fairbain. E.M.R., Almeida. J. Melo. Filho., « *Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates* », Construction and Building Materials, Vol.23, 2409-2420, 2009.

**[Toma 1999]** Toma. G., « *Comportement des bétons au jeune âge* », Thèse de doctorat ès science, université de Laval, Canada, pp 264, 1999.

## Référence Bibliographique

---

**[Tonoli 2010]** Tonoli. G. H. D., Santos. S. F., Joaquim. A. P., Savastano. H., « *Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fiber* », Construction and Building Materials 24, 193-201, 2010.

**[Turcry 2004]** Turcry. P., « *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants influence de la formulation* ». Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France, 2004.

### V

**[Van de Weyenberg 2006]** Van de Weyenberg, I., Chi Truong. T., Vangrimde. B., Verpoest. I., « *Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fiber treatment. Composites* », Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.37, 1368-1376, 2006.

### W

**[Weatherwax 1967]** Weatherwax. R.C., Tarkow. H., « *Effect of wood on the setting of Portland cement: decayed wood as an inhibitor* », Forest Products Journal, pp, 30-32, 1967.

**[Wilding 1984]** Wilding .C.R., Walter. A., Double. D.D., « *A classification of inorganic and organic admixtures by conduction calorimetry* », Cement and Concrete Research, pp 185-194, 1984.

### Y

**[Yahiaoui 2011]** Yahiaoui. L., « *Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales diss* », Université Ferhat Abbas-Setif UFAS (Algerie), 2011.

### Z

**[Zadorecki 1985]** Zadorecki P., Flodin. P., « *Surface modification of cellulose fibers. The effect of cellulose fibers treatment on the performance of cellulose-polyester composites* », Journal of Applied Polymer Science, Vol. 30, pp. 3971-3983, 1985.

**[Zafeiropoulos 2002]** Zafeiropoulos. N.E., Williams. D. R., Baillie. C. A., Matthews F. L., « *Engineering and characterisation of the interface in flax fiber/ polypropylene composite materials* », Part I. Development and investigation of surface treatments. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.33, 1083-1093, 2002.

**[Zreiki 2009]** Zreiki. J., « *Comportement du béton au jeune âge dans les structures massives. Application au cas de réparation des ouvrages* », Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, p 77, 2009.