

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

**LABORATOIRE CONSTRUCTION & ENVIRONNEMENT**

# **THESE**

**Présentée pour obtenir le diplôme de Docteur d'Etat**

**Spécialité : Génie Civil**

**Option : Matériaux**

**Par**

**KRIKER Abdelouahed**

**Ingénieur d'Etat en Génie Civil de L'ENP**

**Magister en Génie Civil de L'ENP**

## **Thème**

**Caractérisation des Fibres de Palmier Dattier  
Et  
Propriétés des Bétons et Mortiers  
Renforcés par ces Fibres  
en Climat Chaud et Sec**

**Soutenue Publiquement le : 13/01/05**

**Devant le Jury Composé de :**

<b>ABADLIA Mohamed Tahar</b>	<b>Pr.</b>	<b>Université de Boumerdes</b>	<b>Président</b>
<b>BOUHICHA Mohamed</b>	<b>Pr.</b>	<b>Université de Laghouat</b>	<b>Examineur</b>
<b>KENAI Saïd</b>	<b>Pr.</b>	<b>Université de Blida</b>	<b>Examineur</b>
<b>SILHADI Kamel</b>	<b>M. C.</b>	<b>ENP Alger</b>	<b>Examineur</b>
<b>BALI Abderrahim</b>	<b>Pr.</b>	<b>ENP Alger</b>	<b>Directeur de thèse</b>
<b>DEBICKI Gérard</b>	<b>M. C.</b>	<b>INSA de Lyon</b>	<b>Co-Directeur de thèse</b>
<b>KHENFER Mohamed Mouldi</b>	<b>Pr.</b>	<b>Université de Laghouat</b>	<b>Co-Directeur de thèse</b>

## ملخص

يعد تعزيز مواد البناء وخاصة الخرسانة والملاط بالألياف من التقنيات الواسعة الانتشار، وذلك لما يوفره هذا التعزيز من تحسين للخصائص الميكانيكية وخاصة مقاومة الشد والانحناء وكذا اللدانة.

إن المناخ الحار والجاف كالذي تتميز به المناطق الصحراوية من وطننا يؤثر سلبا على الخصائص الميكانيكية للخرسانة. فالإنشاءات في مثل هذه المناطق تعاني من ضعف في المقاومة، وانتشار التشققات والانكماش. وعليه فإن تعزيز الإنشاءات بالألياف من شأنه أن يحسن خصائص الخرسانة في هذه الأجواء. نظرا للمشاكل الصحية والصعوبات الاقتصادية التي تتميز بها بعض الألياف الصناعية، فإن جل الأبحاث الحديثة تتجه نحو تعزيز الخرسانة بالألياف النباتية، خاصة بالنسبة للدول التي تتوفر فيها هذه الألياف بكميات هائلة.

الهدف من بحثنا هو دراسة خصائص ألياف النخيل المثمرة لمنطقة ورقلة وكذلك دراسة إمكانية تميم هذه الثروة، باستعمالها في تعزيز خرسانة وملاط هذه المناطق. علما أننا استخدمنا الألياف المحيطة بجذع النخلة.

في هذه الأطروحة قمنا بدراسة خصائص خرسانة وملاط ألياف النخيل المثمرة، وذلك بدلالة:

- صنف الألياف
- التركيز الحجمي وطول الألياف
- طريقة الخلطة
- وسط الحفظ

علما أن أهم التجارب جرت على:

- الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للألياف وكذا للمواد المكونة للخرسانة والملاط
- الخصائص الميكانيكية للخرسانة والملاط: مقاومة الضغط والانحناء وكذا اللدانة وسرعة الصوت خلال الخرسانة
- ديمومة الألياف وخرسانة الألياف
- انكماش الملاط

خلصنا إلى أن إضافة ألياف النخيل المثمر إلى الخرسانة والملاط، في المناطق الحارة والجافة، حسن خصائص الانحناء واللدانة للخرسانة وقلل من انكماش الملاط. لكن لتحسين خاصية ديمومة ومقاومة الضغط لخرسانة الألياف يجب الاستعانة بعلاجات أخرى إضافية.

## RESUME

Le renforcement des matériaux de construction, en l'occurrence les bétons et mortiers, par des fibres est une technique de plus en plus utilisée dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques, notamment leurs résistances à la traction et à la fissuration ainsi que la ductilité.

Les environnements chauds et secs, tels que les régions sahariennes de notre pays dessèchent les matériaux hydrauliques notamment les bétons et mortiers, ce qui induit des retraites importants sur ces matériaux et des fissures dans les structures. De ce fait, les constructions en béton dans ces régions sont très fragiles, le renforcement des bétons et mortiers par des fibres peut offrir des solutions techniques pour l'amélioration de leurs propriétés mécaniques.

Pour des raisons de santé et d'autres économiques qui caractérisent quelques fibres industrielles, les efforts des chercheurs sont actuellement orientés vers le renforcement des bétons par des fibres végétales, notamment pour les pays qui possèdent ces fibres en grande quantité.

L'objectif de notre travail consiste à caractériser les fibres de palmier dattier et les bétons et mortiers renforcés par ces fibres, et à apporter notre contribution à la valorisation des fibres végétales de palmier dattier à faible coût et provenant d'une source renouvelable et de l'intégrer d'une façon rationnelle dans les bétons et mortiers en climat saharien chaud et sec.

Cette étude est consacrée ainsi au renforcement des bétons et mortiers par des fibres de surface de palmier dattier de la région de Ouargla (sud-est d'Algérie). Nous avons étudié l'effet:

- du type de fibre
- du dosage et des longueurs des fibres
- de la méthode de composition
- de cure

sur les caractéristiques physico-mécaniques des bétons et mortiers de fibres.

Les principales propriétés examinées sont:

- Les propriétés physico-chimiques des fibres et des constituants des bétons et mortiers
- Les propriétés mécaniques des bétons et mortiers de fibres: la résistance à la compression et à la flexion, la ductilité ainsi que la vitesse de propagation du son à travers le béton.
- La durabilité des bétons de fibres et des fibres végétales
- Les propriétés rhéologiques: le retrait des mortiers de fibres.

Nous avons montré que le renforcement des bétons et mortiers par des fibres de palmier dattier améliore leurs propriétés de flexion et réduit le retrait. Cependant, d'autres traitements sont nécessaires pour améliorer la durabilité et la résistance à la compression des bétons et mortiers de ces fibres.

---

### Mots clés

Fibres de palmier dattier; Béton; Mortier; Renforcement de ciment; Cure; Environnement chaud et sec; Résistance; Allongement; Module d'élasticité; Module de continuité; Indice de vides; Microstructure; Durabilité; Ductilité; Retrait.

---

## ABSTRACT

The reinforcement of construction materials such as concretes or mortars with fibres is mainly used to improve their cracking strengths, their toughness and post-cracking performances.

In fact, most materials used for construction, especially concretes and mortars are sensitive and adapted with difficulties to hot-dry climatic conditions, similar to those of Ouargla, south of Algeria. The mechanical properties of concrete, particularly the flexural strength, decrease with time under those climatic conditions. Furthermore the conventional concretes or mortars presented a high level of shrinkage and cracking in this environment. The reinforcement of concretes and mortars by fibres can offer some technical solutions for the improvement of their mechanical properties.

For health and economic reasons some researchers are actually oriented towards the reinforcement of concretes by vegetal fibres, notably for countries that possess these fibres in large quantities.

The aim of this study is to investigate the properties of date palm fibres and concretes and mortars reinforced with these fibres in hot-dry climate. It also endeavours to examine the possibility for utilization of these based natural resources in local construction.

The local natural resources used in this study are the surface date palm fibres from Ouargla south of Algeria.

The study examines the effects of:

- Fibre types
- Volume fraction and length of fibres
- Mix design methods
- Curing types

on the physical and mechanical properties of fibre concretes and mortars.

The main properties are:

- Physical and mechanical properties of fibres, cements, sands and aggregates
- Mechanical properties of fibre concretes and mortars: compressive and flexural strengths, toughness and sound velocity of across concretes.
- Fibres and concretes durability
- Mortar shrinkage

We have shown that, in hot dry climate, the presence of date palm surface fibres in concrete improves the post-cracking performance, the toughness and reduce the shrinkage. However, some other treatments are necessary to improve the durability and the compressive strength.

---

### Keywords:

Date palm fibres; Concrete; Mortar; Cement reinforced ; Curing; Hot-dry environment; Strength; Elongation; Modulus of Elasticity; Continuity index; Voids; Microstructure; Durability; Toughness; Shrinkage.

---

## **DEDICACE**

*Je dédie cette thèse de doctorat d'Etat à:*

- ✓ *Ma mère pour tous ses sacrifices, que dieu la protège*
- ✓ *Mon père pour ses encouragements et ses orientations, que dieu le guérisse et le protège*
- ✓ *Ma femme, pour sa passion et sa patience illimitées, qui a su m'épauler jusqu'à l'aboutissement, que dieu la récompense*
- ✓ *Ma fille Ouissal, que ce travail l'inspire et l'incite à mieux faire*
- ✓ *Mes beaux parents*
- ✓ *Mes frères, beaux frères, sœurs et mes belles sœurs*
- ✓ *Tous mes proches et mes amis fidèles*
- ✓ *Mes Directeurs et co-Directeur de thèse*
- ✓ *Tous mes enseignants et instituteurs*

*Que ces chères personnes trouvent dans ce travail le fruit de leurs efforts et leurs sacrifices.*

***Abdelouahed***

## **Avant propos**

*Cette étude a été réalisée dans le cadre des projets de coopération intergouvernementale entre l'Algérie et la France. Sous la direction: du Professeur A BALI Directeur du laboratoires Construction et Environnement L.C.E. de l'Ecole National Polytechnique d'Alger, du Dr G. DEBICKI du laboratoire URGC-Structures de l'INSA de Lyon, et du Professeur M.M. KHENFER du laboratoire Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zones Arides de l'université de Ouargla . Que les responsables et le personnel travaillant dans ces laboratoires, ainsi que toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail trouvent ici ma gratitude.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur G. DEBICKI, Maître de conférences, Directeur de thèse partie française, et le remercier vivement d'avoir accepté de m'accueillir au laboratoire URGC-Structures de l'INSA de Lyon. Sa disponibilité, son assistance par des conseils objectifs et pertinents, et ses encouragements permanents m'ont été grandement profitables. Ses qualités humaines m'ont apportées un solide soutien moral.*

*J'exprime également ma reconnaissance au Professeur M.M. KHENFER à l'université de LAGHOUAT, Co-Directeur de thèse, pour sa contribution et son aide si précieuse quant à l'élaboration de ce travail.*

*La réalisation de cette étude n'aurait pas été possible sans les conseils efficaces et l'encadrement étroit du Professeur A. BALI, Directeur de thèse, partie Algérienne, que ce document témoigne de ma reconnaissance et mon respect.*

*J'adresse mes remerciements au Professeur M. T. ABADLIA de l'Université de BOUMERDES qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.*

*Mes plus vifs remerciements vont aussi au Professeur S. KENAI de l'université de BLIDA, au Professeur M. BOUHICHA de l'université de LAGHOUAT et au Dr K. SILHADI de l'Ecole National Polytechnique d'Alger pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'être examinateurs.*

*Je tient à remercier mon Gouvernement représenté par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique et le Consulat de Lyon ainsi que le Gouvernement Français représenté par l'Ambassade de France en Algérie et le CROUS de France (Lyon), d'avoir permis le bon déroulement de ce projet.*

*J'exprime ma profonde gratitude au Dr M. CHABANNET, du laboratoire URGC-Matériaux de l'INSA de Lyon, qui m'a considérablement aidé dans les analyses Microscopiques et les DRX. Par la même occasion j'exprime mes remerciements aux responsables et aux techniciens du laboratoire URGC-Matériaux de l'INSA de Lyon, et du Centre d'analyse microscopique de l'Université de Lyon 1.*

*Je remercie ma femme M. BOUZIANE, Mm S. IDER, Monsieur S. ABBANI, Monsieur L. BOUAFIA, responsable du laboratoire: de Chimie, de Biologie, de Génie Civil et d'Hydraulique, respectivement, à l'université de Ouargla, ainsi que le responsable de l'administration du département de Génie Civil S. MAMMERI, pour leurs aides dans la réalisation des expériences.*

*Je remercie particulièrement le responsable, les ingénieurs, les techniciens et les administrateurs du laboratoire URGC-Structures, Mm et Messieurs: A. LIMAM, G. MICHEL, BRUNO, MARIO, CHRISTIAN, MAGALI, BERNADETTE.*

*Que Messieurs le directeur et le Directeur technique du laboratoire LTPS Messieurs ZEKRI et A. HAFSSI ainsi que tous les ingénieurs et techniciens du même laboratoire trouveront ma gratitude pour leurs aides et facilités dans la réalisation de ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi au Dr P. LEROUGE de l'université de Rouen et les techniciens du laboratoire CRNS de Nancy pour la réalisation de quelques analyses chimiques.*

*J'adresse mes remerciements au Professeur R.N. SWAMY de l'université de Sheffield pour sa contribution dans l'orientation du sujet de cette thèse.*

*Je remercie également mes collègues du laboratoire URGC-Structures en particuliers Yvon, Abdessalam, Dafer, Ayad, ainsi que mes collègues boursiers particulièrement A. MEHADJAR, M. SARI CHABANE et M. DJAMAA, pour l'ambiance amicale et le soutien moral.*

*Je remercie vivement mes collègues du laboratoire EVRNZA et du département Génie Civil de l'université de Ouargla, en particuliers le chef du département M.T. BENTABBA, ainsi que M. KEBAILI, Y. ABIMOULOUD, Y. TOUIL, Y. LEGRIEB, A. KEMOUKH, N. MEZA, N. SEKOUTI, S.L. MAGAZI, L. ROUAG, N. CHAOUKI, pour leurs aides*

*En fin que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouvent ici mes sincères remerciements.*

## Notations utilisées

### I/ En lettres françaises

B: Constante dépend des constituants du mélange des bétons.  
b: Largeur de l'éprouvette.  
C: Dosage de ciment.  
CR: Contrainte résiduelle.  
 $D_{max}$ : Diamètre maximal des granulats.  
 $D_n$ : Indices ou Coefficients de ductilité (AFNOR).  
d: Diamètre des fibres; Diamètre du granulat.  
E: Dosage en eau; Module de Young; Module d'élasticité.  
 $E_f$ : Module d'élasticité de la fibre.  
 $E_m$ : Module d'élasticité de la matrice.  
E/C: Rapport Eau sur Ciment.  
ES: Equivalent de Sable.  
e: Epaisseur des fibres.  
F: Charge.  
G: Dosage en Gravier.  
h: Hauteur de l'éprouvette.  
I: Indice de ductilité.  
 $I_c$ : Indice de continuité.  
L: Distance entre les appuis.  
l ou  $l_f$ : Longueur des fibres  
 $l_c$ : Longueur critique de la fibre.  
 $l/d$  ou  $l/e$ : Elancement des fibres.  
M: Moment de flexion.  
 $M_f$ : Module de finesse.  
 $n_0$ : Facteur d'orientation.  
 $n_l$ : Facteur de longueur.  
P ou F: Charge.  
 $P_0$ : Charge à la première fissuration.  
 $P_n$ : Charge correspondant à la déflexion  $\delta$   
Rc: résistance à la compression.  
 $R_f$ : Résistance à la flexion.  
S: Dosage en sable; section; distance.  
S/G: Rapport Sable sur Gravier.  
T: Température.  
t: Temps de propagation  
V: vitesse de propagation du son  
 $V_r$ : vitesse de propagation du son de référence  
 $V_f$ : Dosage des fibres en volume.  
 $V_0$ : Volume des vides dans la matrice.  
w: Ouverture de fissure; Déplacement.  
 $W_f$ : Dosage des fibres en poids ou en masse.

## II/En lettres grecques

$\sigma_c$ : Contrainte en compression.  
 $\sigma_0$ : Contrainte en flexion à la première fissuration.  
 $\sigma_f$ : Contrainte en flexion.  
 $\sigma_{ft}$ : Contrainte en traction de la fibre.  
 $\sigma_{mc}$ : Contrainte en compression de la matrice.  
 $\sigma_{mt}$ : Contrainte en traction de la matrice.  
 $\sigma_t$ : Contrainte en traction.  
T: Contrainte d'adhérence fibre matrice.  
 $\varepsilon$ : Déformation.  
 $\varepsilon_r$ : Allongement à la rupture.  
 $\rho$ : Masse volumique.  
 $\theta$ : Angle d'orientation de la fibre.  
 $\eta$ : Coefficient de rendement des fibres.  
 $\delta$ : Déflexion ou Flèche.

## III/ Abréviation

B: Béton.  
BC: Béton Classique; Béton Courant.  
BF: Béton de fibres.  
CE: Conservation dans l'eau.  
CA: Conservation à l'air libre.  
CU: Conservation dans l'étuve.  
CE7-CA, CE7-CU, CE14-CA et CE14-CU: Conservations mixtes.  
MC: Mortier Classique.  
MF: Mortier de Fibre.  
DRX: diffraction par rayons X.  
FSPD: Fibre de surface de palmier dattier.  
HR: Humidité relative.  
MEB: Microscope électronique à balayage.  
MOR: Module de rupture en flexion.  
VV: Vitesse du vent.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : Généralités sur les fibres et leurs utilisations dans la Construction et Domaines Pratiques</b>	
1-1. Introduction .....	4
1-2. Historique et perspective .....	4
1-3. Les différents types de fibres utilisé dans le renforcement du béton .....	6
1-3-1. Les fibres d'amiante .....	6
1-3-2. Les fibres de verre .....	6
1-3-3. Les fibres de carbone .....	7
1-3-4. Les fibres polymères .....	7
1-3-5. Les fibres d'acier .....	8
1-4. Les fibres végétales .....	10
1-4-1. Introduction .....	10
1-4-2. Classification des fibres végétales .....	10
1-4-3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales .....	11
1-4-4. Caractéristiques chimiques des fibres végétales .....	15
1-4-5. Durabilité des fibres végétales .....	16
1-5. Utilisation des fibres dans la construction .....	17
1-6. Autres domaines d'utilisation des fibres végétales .....	18
1-7. Conclusion .....	21
<b>CHAPITRE 2 : Propriétés mécaniques et physiques des béton de fibres</b>	
2-1. Introduction .....	22
2-2. Composition et mise en œuvre des bétons de fibres .....	23
2-2-1. Ouvrabilité .....	23
2-2-2. Méthodes de composition .....	26
2-2-3 Fabrication et mise en œuvre des bétons .....	28
2-3. Comportement mécanique des bétons de fibres : Mécanisme et Modélisations. .....	30
2-3-1. Introduction .....	30
2-3-2. Comportement en traction des fibres .....	30
2-3-3. Comportement de la matrice .....	30
2-3-4. Comportement du matériau composite .....	32
2-4 Propriétés des bétons de fibres végétales durcis .....	49
2-4-1. Résistance à la compression .....	49
2-4-2. Résistance à la traction .....	50
2-4-3. Résistance à la flexion .....	52
2-4-4. Résistance à la fissuration .....	55
2-4-5. Module d'élasticité .....	55
2-4-6. Retrait des bétons de fibres: Propriétés et modélisation .....	56
2-5. Microstructure des bétons de fibres .....	59
2-6. Durabilité des bétons de fibres .....	61
2-4-5. Ductilité des bétons de fibres .....	49
2-5. Domaine d'utilisation et coût de production des bétons de fibres .....	64
2-6. Conclusion .....	64

### **CHAPITRE 3 : Constituants des bétons et mortiers de fibres: Aspects physico-chimiques et formulations**

3-1. Introduction .....	66
3-2. Les fibres végétales de palmier dattier .....	67
3-2-1. Introduction .....	67
3-2-2. Traitement des fibres .....	67
3-2-3. Propriétés physiques des fibres de surface de palmier dattier .....	68
3-2-4. Propriétés chimiques .....	69
3-2-5. Morphologie et structure interne des fibres .....	72
3-3. Propriétés des ciments .....	73
3-4. Les granulats et l'eau de gâchage .....	78
3-5. Composition de béton et de mortier .....	79
3-5-1. Composition de béton classique .....	79
3-5-2. Composition des bétons de fibres .....	81
3-5-3. Malaxage des bétons de fibres .....	85
3-5-4. Composition du mortier classique .....	86
3-5-5. Composition du mortier de fibres .....	86
3-5-3. Malaxage du mortier de fibres .....	88
3-6. Préparation et conservation des éprouvettes .....	88
3-7. Conclusion .....	90

### **CHAPITRE 4 : Propriétés physico mécaniques des bétons et mortiers renforcés par les fibres de palmier dattier**

4-1. Introduction .....	93
4-2. Propriétés mécaniques des fibres de palmier .....	93
4-3. Propriétés physico mécaniques des bétons de fibres .....	97
4-3-1. Introduction .....	97
4-3-2. Densité des bétons .....	98
4-3-3. Vitesse du son et indice de continuité .....	98
4-3-4 Résistance à la compression .....	102
4-3-5. Propriétés de flexion .....	105
4-4. Propriétés mécaniques des mortiers de fibres de palmier .....	112
4-4-1. Résistance à la compression du mortier .....	112
4-4-2. Résistance à la flexion du mortier .....	113
4-4-3. Conclusion .....	115

### **CHAPITRE 5 : Durabilité des bétons et mortiers de fibres de palmier dattier en climat chaud et sec**

5-1 Introduction .....	117
5-2. Durabilité des bétons de fibres et des fibres de palmier .....	117
5-3. Durabilité des fibres de palmier dans les milieux alcalins.....	118
5-4. Amélioration de la durabilité des bétons de fibres en climat chaud et sec .....	128
5-4-1. Influence du régime de cure sur la durabilité en climat chaud et sec .....	128
5-4-2. Influence de la composition des bétons de fibres sur la durabilité .....	133
5-4-3. Effet du type de ciment sur la résistance et sur la durabilité des mortiers .....	135
5-5. Conclusion .....	138

### **CHAPITRE 6 : Retrait des mortiers de fibres de palmier en climat chaud et sec**

6-1. Introduction .....	140
-------------------------	-----

6-2. Retrait des mortiers de fibres .....	141
6-2-1. Retrait des mortiers conservés dans un climat chaud et sec .....	141
6-2-2. Effet du régime de cure sur le retrait .....	145
6-2-3. Effet du type de ciment sur le retrait .....	147
6-3. Conclusion .....	147
<b>CONCLUSION GENERALE et RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>149</b>
<b>BIBLIOGRAPHIES .....</b>	<b>155</b>
<b>ANNEXE</b>	<b>I</b>

## Introduction

Au milieu du développement des matériaux composites, le béton et le mortier ne font pas exception. Les chercheurs et les producteurs de fibres ont pensé à l'incorporation de ces dernières comme matériau de renforcement dans les matrices cimentaires. Depuis lors, l'utilisation des fibres dans le béton et le mortier est devenue de plus en plus une pratique courante. Des applications sont développées grâce à la capacité prouvée par l'expérience de ces nouveaux composites, à limiter et à contrôler la fissuration et à améliorer la résistance à la flexion et au choc.

Des fibres de toutes natures ont été expérimentées dans le renforcement des bétons et des mortiers. Les plus répandues sont : les fibres d'acier, d'amiante, de polymère, de carbone, et végétales. Vu le problème que présentent les fibres d'amiante sur la santé humaine, le coût exorbitant de production de quelques fibres industrielles, le renforcement par les fibres végétales a un avenir prometteur, et particulièrement dans les pays en voie de développement qui généralement possèdent les filières pour valoriser ces ressources naturelles.

L'Algérie est parmi ces pays, qui dispose d'extraordinaires ressources en fibres végétales (de Palmier, Alfa, Abaca, Chanvre, Coton...), malheureusement, leur valorisation dans les domaines pratiques, entre autre, dans les matériaux de construction sont encore inexploitées.

Le béton classique résiste très mal à la traction et à la fissuration. Les environnements chauds et secs, tels que les régions sahariennes de notre pays dessèchent ce matériau hydraulique ce qui induit des retraites importants sur le matériau et des fissures dans les structures. En effet, les constructions en béton dans ces régions sont très fragiles. Le renforcement des bétons par des fibres peut offrir des solutions techniques pour l'amélioration des performances mécaniques.

Par ailleurs, le renforcement des ciments par les fibres végétales est relativement nouveau par rapport à celui des fibres d'amiante ou d'aciers. La caractérisation de ce nouveau composite nécessite alors, la multiplication des recherches, l'amélioration des méthodes d'essais traditionnelles, ainsi que le développement de nouveaux procédés, pour aboutir à l'élaboration des normes d'essais spécifiques.

L'objectif de notre recherche consiste à :

- apporter une contribution à la valorisation des ressources naturelles locales, en l'occurrence les fibres de palmier dattier, afin de les intégrer d'une façon rationnelle dans le domaine de la construction.
- proposer des solutions pour l'amélioration des performances mécaniques des bétons dans les régions sahariennes de notre pays. En effet, la prospérité d'un pays dans le domaine de la construction, dépend de l'utilisation de ces ressources naturelles locales.
- contribuer à l'élaboration de normes d'essais propres aux ciments de fibres végétales.

De ce fait, la plupart, des essais ont été réalisés dans la ville de Ouargla (sud-est de l'Algérie) durant la période la plus chaude et la plus sèche, qui s'étale entre le mois de mai et le mois de septembre. D'autres essais ont par ailleurs été réalisés à l'INSA de Lyon en utilisant une cure qui simule les conditions climatiques chaudes et sèches.

Le présent travail de recherche portant sur les propriétés des bétons et des mortiers renforcés par des fibres végétales de palmier dattier en climat chaud et sec, est scindé en deux grandes parties : Une étude bibliographique et une étude expérimentale, qui comportent respectivement deux et quatre chapitres.

Dans la première partie, une synthèse bibliographique traitant 149 références a été effectuée. Elle est présentée par les deux chapitres suivants :

Le chapitre 1 est consacré aux propriétés des principaux types de fibres utilisées dans les domaines de la construction et autres domaines pratiques.

Le chapitre 2 est réservé aux résultats des travaux antérieurs effectués par différents auteurs, notamment sur les travaux suivants :

- les propriétés mécaniques des ciments renforcés par les fibres et spécialement ceux renforcés par les fibres végétales
- les méthodes d'essais récemment développées pour les essais sur les ciments renforcés par les fibres.
- les comportements des bétons de fibres.

Dans la deuxième partie, nous avons exposé les résultats expérimentaux ainsi que leurs interprétations et comparaison avec ceux de la littérature. Cette partie est présentée par les quatre chapitres qui suivent.

Dans le chapitre 3, sont présentés :

- les caractéristiques physico-chimiques des constituants élémentaires utilisées dans cette recherche, à savoir : les fibres de surface de palmiers dattier, les ciments, les granulats et l'eau. Ainsi que les différents modes opératoires suivis dans la caractérisation de ces matériaux.
- les méthodes de composition des bétons et des mortiers (classiques et de fibres), ainsi que leurs modes de préparation et de conservation.

Le chapitre 4, est réservé aux résultats sur :

- les propriétés mécaniques des fibres de surface de palmier dattier et des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en fonction des régimes de cure (humide, chaud et sec) et de la variation du dosage et des longueurs des fibres dans la matrice.

Le chapitre 5, est consacré aux résultats sur :

- la durabilité des bétons et mortiers de fibres de palmier dattier en climat chaud et sec.
- la durabilité et les mécanismes d'attaque des fibres de palmier dattier dans les solutions alcalines de pH similaire à la matrice cimentaire.
- L'amélioration de la durabilité des bétons et mortiers de fibres de palmier dattier sous l'effet du régime de cure, de la composition et du type du ciment.

Dans le chapitre 6, nous exposons les résultats sur les retraits des mortiers de fibres de palmier dattier. Nous examinons aussi, l'influence de la cure (humide, chaud et sec) et du ciment sur ces dernières propriétés.

Enfin, une conclusion générale est établie, sur les propriétés des fibres de surface de palmier dattier, sur les bétons et mortier renforcés par ces fibres ainsi que sur les possibilités de valorisation de ces ressources dans les constructions en climat chaud et sec. En nous basant sur les résultats obtenus nous donnons quelques recommandations pour d'éventuels futurs travaux de recherches.

Nous espérons que ce travail apportera une contribution au développement et à l'exploitation des bétons et mortiers de fibres végétales du palmier dattier.

# **Généralités sur les fibres et leurs utilisations dans la construction et d'autres domaines Pratiques**

## **1-1. Introduction**

Depuis toujours, les chercheurs visent l'amélioration des performances des matériaux de construction. Pour y parvenir, l'une des pratiques très utilisée dans ce but est le renforcement des matériaux par des fibres incluses en son sein.

Des fibres de toute nature ont été expérimentées. Les plus répandues sont : l'amiante, le verre, l'acier, le plastique (nylon et polypropylène), le carbone, et les fibres végétales. [1-8].

Comme notre étude s'intéresse à l'utilisation des fibres végétales (de palmier) dans le béton, nous exposerons ultérieurement et en détail, les différents types de fibres végétales utilisées dans la construction. Dans un premier temps, pour bien positionner le cadre scientifique, nous donnons un aperçu historique sur l'utilisation d'autres types de fibres telles que les fibres d'amiante, d'acier, de verre et de polymère.

## **1-2. Historique et perspective**

L'idée de l'utilisation des fibres est très ancienne. Dès l'antiquité, les fibres ont été utilisées dans la fabrication des cordes et textiles spécialement celles d'origine végétales ou animale. Comme renforcement des matériaux de construction traditionnels, la première utilisation des fibres a été observée dans la fabrication des briques argileuses ou dans les mises en œuvre des plâtres, et spécialement par des fibres végétales.

La naissance de la fibre industrielle, suite aux développements technologiques, a augmenté les champs d'application des fibres dans plusieurs domaines. Ainsi, dans le domaine du textile on utilise depuis le XIX<sup>e</sup> siècle la fibre de coton, à partir de l'année 1935 la fibre de Nylon (plastique), et récemment la fibre de polypropylène. Dans le domaine de la production des cordes et câbles, l'on utilise depuis l'année 1950 les fibres de verre et d'acier. Cependant, dans le domaine de la construction, la première fibre utilisée dans le renforcement des ciments fut la fibre d'amiante vers les années 1900 [1].

Le succès qui a marqué l'utilisation de l'amiante ciment fut dû premièrement à la grande demande du marché en matériaux à bas prix et durable, deuxièmement à la disponibilité des deux matières première principales l'amiante et le ciment, troisièmement à l'existence d'un processus industriel de fabrication simple inventé par HATSCHEK en 1900 [1], et enfin à la moulabilité du produit.

Si la fibre d'amiante est la première fille dans la famille des fibres minérales utilisées dans le renforcement des ciments, la fibre de verre est la première sœur. En effet, le renforcement des ciments par les fibres de verre a commencé à partir des années 50, pour répondre aux exigences et aux nécessités de produire un matériau résistant, durable et léger, [5], mais aussi et surtout pour se substituer à l'amiante.

Ainsi, les premières applications des ciments renforcés de fibres (CRF) de verre, ont commencé en Russie, ensuite au Danemark par KRENCHER et aux USA par ROMUALDI et enfin en Grande Bretagne par NURSE et MAJUNDA [1].

Depuis 1966, les efforts ont été concentrés pour l'amélioration de la qualité de la fibre de verre notamment sa résistance aux alcalis. En effet, le premier verre standard qui est un verre borosilicate dit de type E résiste mal aux alcali, d'autres compositions verrières ont été élaborées pour répondre à des exigences spécifiques, à savoir le verre dit type R, qui est un verre résistant à la corrosion et le verre dit type S qui est un verre résistant aux alcalis cimentaire. [1,2]

Parallèlement, la technologie avec des fibres d'acier fût développée. Des recherches se poursuivent pour adapter ces matériaux aux bétons à hautes performances [5-7].

Du point de vue durabilité dans les milieux agressifs et dans les milieux alcalins, des recherches sont aussi en cours pour améliorer la durabilité des fibres d'acier et des fibres végétale. En effet, si les chercheurs sont arrivés à mettre en application des fibres de verre qui résistent à la corrosion (type R) et aux alcalis (type S) [1,9], nous pensons qu'ils arriveront aussi à remédier la durabilité des fibres d'acier et végétales.

Cependant, si les fibres de la dernière génération de verre S et les fibres d'acier donnent de meilleurs résultats dans le renforcement de ciment, il faut noter, que du point de vue coût elles sont très chères comparées à d'autres types de fibres telles que les fibres végétales.

Ainsi, dernièrement, des recherches sont axées vers l'incorporation des fibres végétales ou naturelles tels que le sisal, la jute et la hampe dans le renforcement des matériaux de construction et particulièrement dans les ciments [8-12].

L'avenir du développement dans le domaine du béton de fibre sera peut être attribué aux fibres végétales.

### 1-3. Les différents types de fibres industrielles utilisées dans le renforcement du béton

#### 1-3-1. Les fibres d'amiante

Les fibres d'amiante sont constituées de silicates hydratés de magnésium parfaitement compatibles avec la pâte de ciment. Elles possèdent une bonne résistance à la traction et un bon module d'élasticité. Ce sont des fibres bon marché [13].

Cependant, leur utilisation dans le renforcement des ciments est de plus en plus délaissée et même réglementairement interdite pour beaucoup d'application à cause du danger qu'elles représentent pour la santé humaine [14].

Le tableau 1-1 présente les propriétés mécaniques des fibres d'amiante, reproduit par AIT AMEUR [13].

Tableau 1-1 : Caractéristiques mécaniques des fibres d'amiante [13]

Type de fibre	Amiante
Diamètre D (mm)	0.0002-0.002
Longueur l(mm)	5
Masse Volumique $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.6-3
Résistance à la rupture $\sigma_{fu}$ (MPa)	100-300
Module de Yong E (GPa)	80-150

#### 1-3-2. Les fibres de Verre

Les fibres de verre sont très fragiles. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines ou de fils coupés. La plus part des verres peuvent être attaqués par les alcalis des ciments [13].

Cependant, des recherches ont pu mettre en évidence une dernière génération de fibre de verre (type S) ayant une bonne résistance aux alcalis [13]. Le tableau 1-2 donne quelques caractéristiques des fibres de verre les plus utilisées, reproduit par AIT AMEUR [13], à savoir verre ordinaire (E), verre résistant à la corrosion (R) et verre résistant aux alcalis (S)

Tableau 1-2 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [13].

Type de verre	E	R	S
Résistance à la rupture $\sigma_{fu}$ (MPa)	3400	4400	4900
Module de Yong E (GPa)	73	86	87
Masse Volumique $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.54	2.55	2.54

### 1-3-3. Les fibres de Carbone

Pratiquement trois types de fibres de carbones sont commercialisés :

- Les fibres hautement résistant (H.R.)
- Les fibres à module intermédiaire (I.M.)
- Les fibres à haut module (H.M.)

Les fibres de carbones sont très fragiles ce qui rend l'opération de malaxage de béton de ces fibres très difficile [13].

Par ailleurs, le béton de ces fibres présente des caractéristiques de durabilité très intéressantes [9].

Le tableau 1-4 présente quelques propriétés des fibres de carbone.

Tableau 1-4 : Propriétés mécaniques des fibres de carbone [13]

Type de carbone	H.R.	H.M.
Diamètre D ( $\mu\text{m}$ )	8	8
Masse Volumique $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.75	1.81
Résistance à la rupture $\sigma_{fu}$ (MPa)	3000-5000	2800
Module de Yong E (GPa)	220	400

### 1-3-4. Les fibres Polymères

Les fibres polymères couramment utilisés sont:

- Le Polyamide 6.6 (PA 6.6), qui représente la famille la plus importante des plastiques par leur tonnage. Le PA 6.6 résiste mal aux acides minéraux.
- Le Polychlorure de vinyle (PVC), est une matière thermoplastique obtenue par polymérisation du chlorure de vinyle. Le PVC résiste bien aux acides et aux alcalis.
- Le Polypropylène (PP), est un thermoplastique formé de chaîne linéaires constituées de motifs propylène dans le cas d'un homopolymère et d'une altération contrôlée de motifs propylènes et éthylène dans les copolymères. Le PP résiste bien aux alcalis et aux acides. Les premières générations de fibres PP, étant lisses, présentent une mauvaise adhérence avec la matrice ciment. De ce fait, la résistance à la traction et à la propagation des fissures du béton de ces fibres est relativement faible. Pour cela, de nouvelles fabrications apparaissent par fusion-extrusion de polymère dans une filière. Le tube ainsi obtenu étant coupé en bande, puis étiré mono-axialement offre aux fibres une bonne adhérence à la matrice ciment. En outre, il n'existe aucune réaction

chimique entre ces fibres et la matrice de ciment ce qui augmente leur durabilité [13, 15].

De ce fait, le béton de fibre de polypropylène, de dernière génération, peut présenter des caractéristiques mécaniques comparables à celles du béton de fibre de verre [15].

Les tableaux 1-3 résument les caractéristiques mécaniques des fibres de polymère.

Tableau1-3 : Caractéristiques mécaniques des fibres de polymère [15]

Type de polymère	Référence	Module d'élasticité E (GPa)	Contrainte à la Traction (MPa)
PA 6.6	Rhône-Poulenc A 218	3	90
PVC	PVC rigide de Solvay	2.5	50
PP	RY 6100 de Shell	5	40

### 1-3-5. Les fibres d'Acier

Actuellement, les fibres d'acier sont de plus en plus utilisés dans le renforcement du béton ou mortier. En effet, ces fibres présentent un module d'élasticité et une résistance à la traction très élevés [1-3,12-16].

Parmi les fibres les plus utilisées nous citons :

- Les fibres Euro-Stell (F.E.S.)
- Les fibres Bekaert (F.B.)
- Les fibres Harex (F.H.)
- Les fibres de ruban en Fonte de pont-A-Mousson (F.R.F.A.)
- Les fibres à têtes d'ancrage en Acier trillé (F.T.A.)

Le tableau 1-5 présente les caractéristiques mécaniques de ces fibres, reproduit selon [13].

D'autre part, DEBICKI [12], résume sur le tableau 1-6 quelques propriétés de fibres industrielles. Il met en évidence la nature très variée de ces fibres.

Tableau1-5 : Caractéristiques mécaniques des fibres d'acier [13]

Type de fibre	F.E.S	F.B.	F.H.	F.R.F.A.
Résistance à la traction (Mpa)	1400	1100	700	200
Longueur L (mm)		25-60		15-60
Diamètre (mm)		0.4-0.8		

Tableau 1-6 : Différents types de fibres pour le renforcement du béton [12]

MATURE DE LA FIBRE	FORME DE LA FIBRE	COUPE DE LA FIBRE	LONGUEUR DES FIBRES	ELACEMENT L/φ ou L/e	DIMENSIONS DES GRANULATS ASSOCIES AUX FIBRES (mm)			X VOLUMIQUE DE FIBRE	
					< 1	< 5	< 10		
Renforts discontinus-fibres	acier	relief irrégulier φ = 0,45 à 1,04 mm e = 0,3 mm	25 - 35	25 - 55				1 à 3 X	
			16 - 32	110				0,7 à 2 X	
	acier	formes particulières e = 0,25 à 0,5 mm	6 - 30					0,7 à 3 X	
			30 - 40	100-150				0,7 à 2 X	
	Fonte amorphe	e = 25 μm	30 - 40	1200-1400				0,7 à 2 X	
			10 - 20					5 à 6 X	
	Verre	φ = 5 à 20 μm	O	3 - 15	150-400				2 à 5 X
				1 - 10	100-800				1 à 3 X
	Carbone	φ = 7 à 20 μm	O	10 - 30	140-1700				2 à 8 X
				5	5000				5 à 10 X
Aramide	φ = 12,4 μm	O	5					5 à 10 X	
Polypropylène	φ = 51 à 250 μm	O							
Amlante	φ = 0,0002 à 0,002 mm								
Mélange hybride : cellulose + polypro. ou polyéthylène ou PVA etc (pour tenue à long terme)									
Renforts Continus	Aramide	FIBRES ENDUITES DE RESINE							
	Verre	FIBRILLES							
			TISSES						
Polypropylène									
Verre									

## **1-4. Les fibres Végétales**

### **1-4-1. Introduction**

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétales dans la construction remonte aux années où l'on fabrique des briques renforcées par de la paille ou des roseaux. [17]. Dans le temps moderne (depuis l'année 70), le premier composite liant avec les fibres végétales c'est le plâtre. Plusieurs ouvrages sont réalisés avec le plâtre renforcé de fibres végétales [18]

Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine du renforcement de ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les fibres végétales [19-31].

### **1-4-2. Classification des fibres végétales**

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance. A s'avoir : les fibres de feuilles, de tiges, de bois et de surface

#### **A. Les Fibres de feuilles**

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par un chevauchement de paquet qui entoure les feuilles pour les renforcer. Ces fibres sont dures et rigides.

Les fibres de feuille les plus cultivées sont: la fibre de Sisal, de Henequen et d'Abaca [18].

De ce fait, plusieurs chercheurs tels que : NILSSON [21] et AYYAD et al. [22] ont montré l'efficacité du renforcement du ciment par les fibres de feuille.

#### **B. Les fibres de tiges**

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges des plantes.

Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Elles sont par la suite séparées individuellement par un processus de défilage. Les fibres, une fois séparées, sont utilisées dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et béton [17].

Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie de sunn , de kenaf, de urena et de chanvre [23].

NILSSON [21] rapporte que les fibres de tige, les plus utilisées dans le renforcement du ciment, sont celles de sunn, de chanvre et de jute.

### **C. Les fibres de bois**

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs [17,19] ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments.

### **D. Les fibres de surface**

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autre le coton et la noix de coco (coco). Les fibres de coco ont donné de bons résultats pour la résistance à la flexion du ciment de fibre [8,17].

Par ailleurs, les fibres de palmier, qui entourent son tronc, appartiennent à cette famille de fibres.

### **1-4-3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales**

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité.

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales ont été traitées par beaucoup de chercheurs [8-31]. A titre d'exemple nous citons les résultats des chercheurs BLEDZKI et al. [8] TOLÈDO FILHO et al. [30] SAVASTANO et al. [31] présentés sur les tableaux 1-7(a) et 1-7(b).

Sur le tableau 1-7(a) nous constatons que les fibres végétales sont naturellement humides. Pratiquement elles absorbent des quantités importantes d'eau à la saturation. Nous remarquons sur le tableau 1-7(b) que les densités de ces différentes fibres sont très rapprochées, alors que leurs résistances à la traction et leurs modules d'élasticité (tableau 1-7(b)) sont très variables. Cela est dû à la variation de leurs compositions chimiques et de leur texture et spécialement l'orientation de leurs filaments et leur angle spiral. De ce fait, plusieurs chercheurs [8, 25, 31] révèlent que la résistance à la traction et le module d'élasticité des fibres végétales sont proportionnelles à leur teneur en cellulose. Aussi, ils constatent que les fibres ayant un faible angle spiral des filaments ont une faible déformabilité et une grande

résistance à la traction. A titre d'exemple la figure 1-1 schématise une fibre végétale et montre les spirales des filaments des fibres. Tandis que, les figures 1-2 et 1-3 donnent la variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur en cellulose et de l'angle spiral des filaments.

Tableau 1-7(a) : Les caractéristiques physiques des fibres végétales les plus utilisées.

Fibre	Référence	Diamètre (mm)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Teneur en eau à l'état naturel (%)	Absorption d'eau après 5 min (%)	Absorption d'eau à la saturation (%)
Sisal	[8]	-	1.5	-	-	-
	[30]	0.08-0.30	0.75-1.07	10.97-14.44	67-92	190-250
	[31]	-	1.37	-	89.3	92
Noix de coco	[8]	-	1.2	-	-	-
	[30]	0.11-0.53	0.67-1.00	11.44-15.85	22-28	85-135
	[31]	-	1.17	-	43.2	80.4

Tableau 1-7(b) : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales

Fibre	Référence	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
Cotton	[8]	1.5-1.6	7.0-8.0	587-597	5.5-12.6
Jute	[8]	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
Lin	[8]	1.5	2.7-3.2	345-1035	27.6
Chanvre	[8]	--	1.6	690	--
Ramie	[8]	--	3.6-3.8	400-938	61.4-128
Sisal	[6]	--	2.6	278	--
	[8]	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
	[30]	0.75-1.07	2.08-4.08	577.50	10.94-26.70
	[31]	1.37	5.2	363	15.2
Noix de coco	[6]	1.33	--	72	2.0
	[8]	1.2	30.0	175	4.0-6.0
	[30]	0.67-1.00	13.7-41.0	174	2.5-4.5
	[31]	1.17	37.7	107	2.8

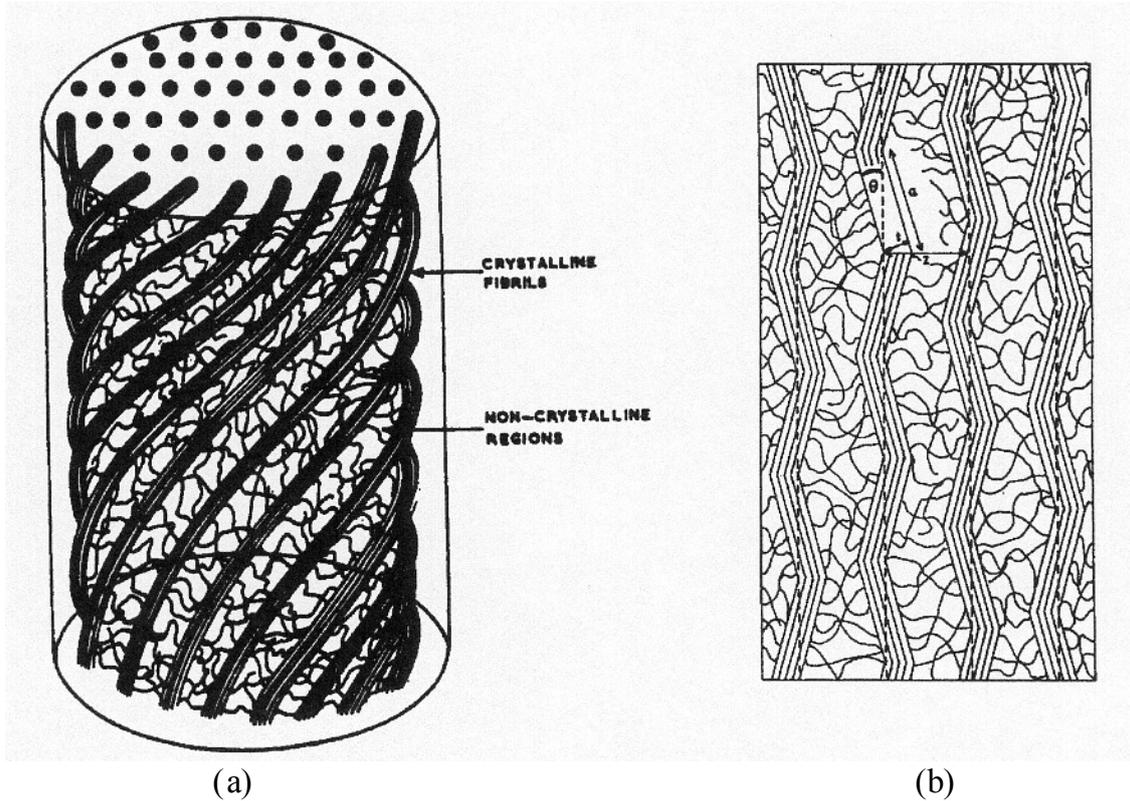


Figure 1-1 : Schématisation de l'élasticité des filaments et angle spiral des fibres végétales [8]  
 (a): en 3D, (b): en 2D

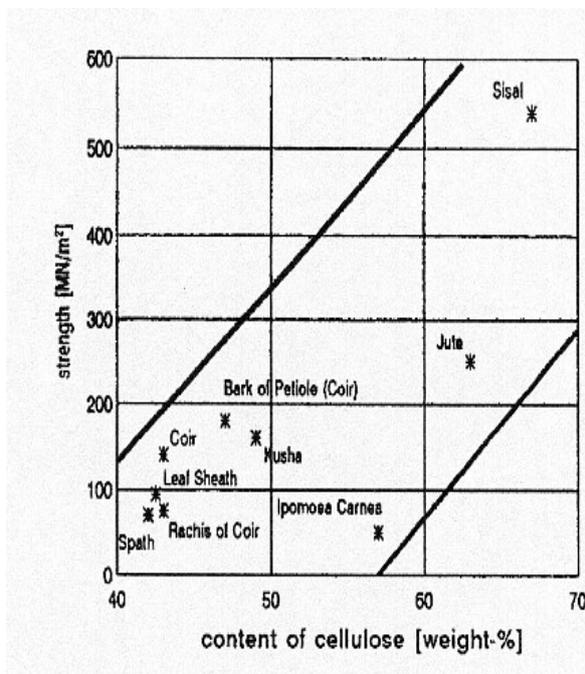


Figure 1-2 : Variation de la résistance en fonction du % de cellulose [8]

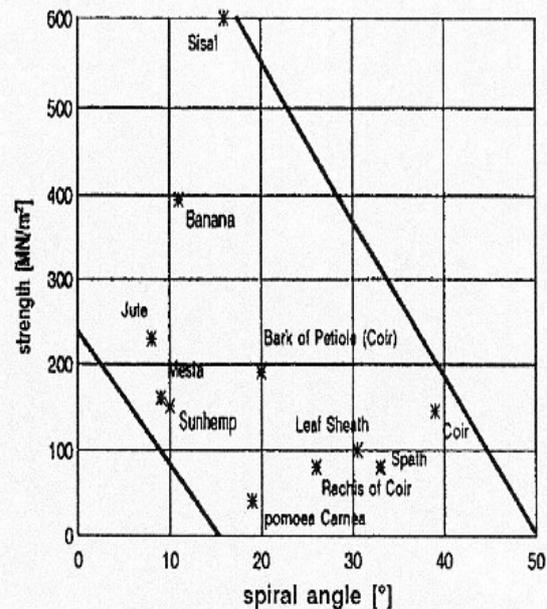
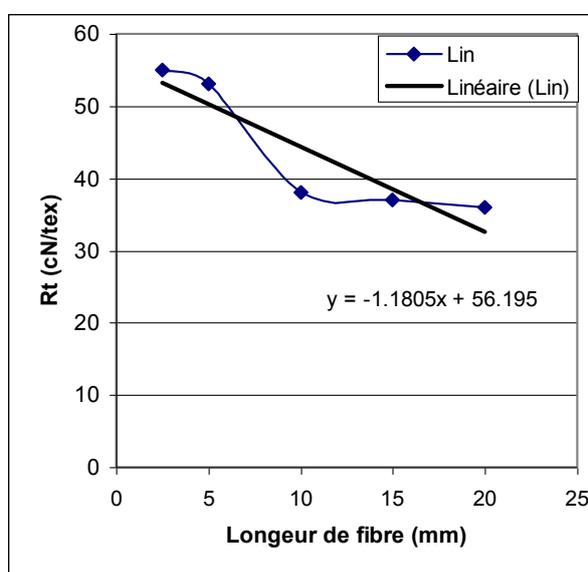


Figure 1-3 : Variation de résistance en fonction de l'angle spiral [8]

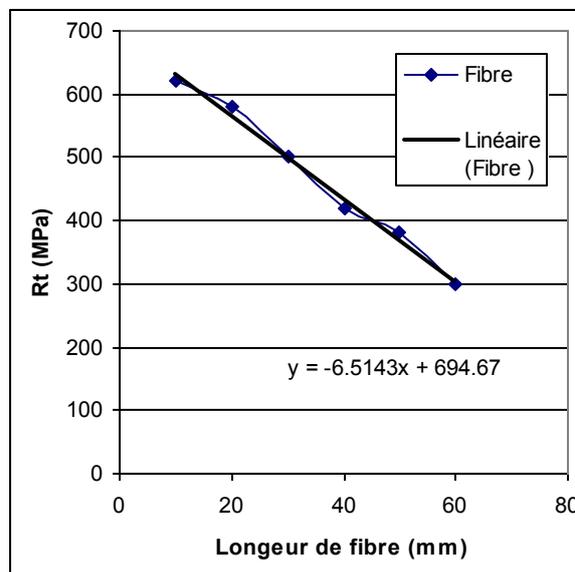
Par ailleurs, nous avons constaté que les écarts entre les valeurs des caractéristiques mécaniques, donnés dans la littérature pour une même fibre sont généralement très importants, cela est dû :

- Premièrement, à la non homogénéité de ces fibres et à leur porosité et structure physique qui varient d'une fibre testée à une autre (pour une même espèce).
- Deuxièmement, à la non normalisation du mode d'essai et spécialement la variation de la longueur du spécimen à tester.

De ce fait et concernant la résistance mécanique de ces fibres, BLEDZKI et al. [8] concluent que pour une même fibre, la résistance à la traction est inversement proportionnelle à l'augmentation de la longueur de la fibre. Ce qui explique la variation des résultats rapportés dans la littérature. Pour uniformiser les résultats, BLEDZKI et al. [8] proposent de donner la résistance qui correspond à la longueur zéro. Cette dernière pourrait être déduite expérimentalement de la courbe résistance en fonction de la longueur de fibres. A titre d'exemple la figure 1-4 présente la variation de la résistance à la traction de la fibre de lin et bois de pomme en fonction de la longueur du spécimen.



(a): Fibre de lin



(b): Fibre de bois de pomme

Figure 1-4: Résistance à la traction ( $R_t$ ) de quelques fibres naturelles en fonction de leur longueur [8]

La figure 1-5 reproduit les courbes contrainte déformation typiques en traction données par SWAMY [32], pour quelques fibres végétales avant la rupture.

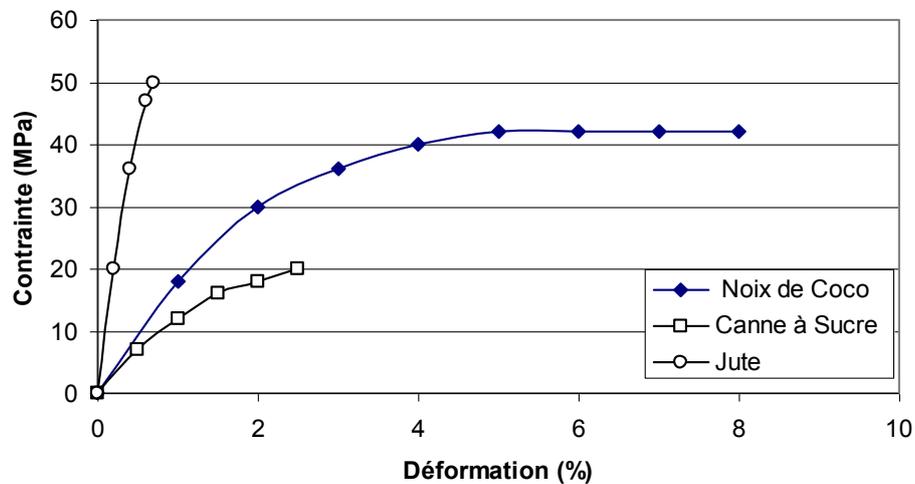


Figure 1-5 : Courbes contrainte déformation avant rupture de quelques fibres végétales [32].

#### 1-4-4. Caractéristiques Chimiques des fibres végétales

Les fibres végétales sont caractérisées par leur composition chimique qui influe énormément sur leur durabilité et spécialement dans les milieux alcalins.

La composition chimique des fibres végétales est formée de trois principaux constituants à savoir : la Cellulose, l'Hémicellulose et la lignine [8, 24-26].

##### A. La cellulose

C'est la principale composante des fibres végétales. C'est un polymère naturel qui a un rôle structural de premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne de fibres en cellulose dont la structure est représentée par la figure 1-6.

##### B. Hémicellulose

L' hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres, est un polysaccharide à chaîne courte ramifiée et repliée sur elle même. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres et qui permet aux parois de s'allonger pendant la croissance [25].

##### C. Lignine

La lignine constitue la colle qui lie les fibres végétales entre elles ainsi que leurs parois. C'est un polymère tridimensionnel provenant de la copolymérisation de trois alcools phénylpropénoïques [25,26].

Le tableau 1-8 présente la composition chimique de quelques fibres végétales (Noix de coco, Sisal et Jute) reproduit selon [27]

10].

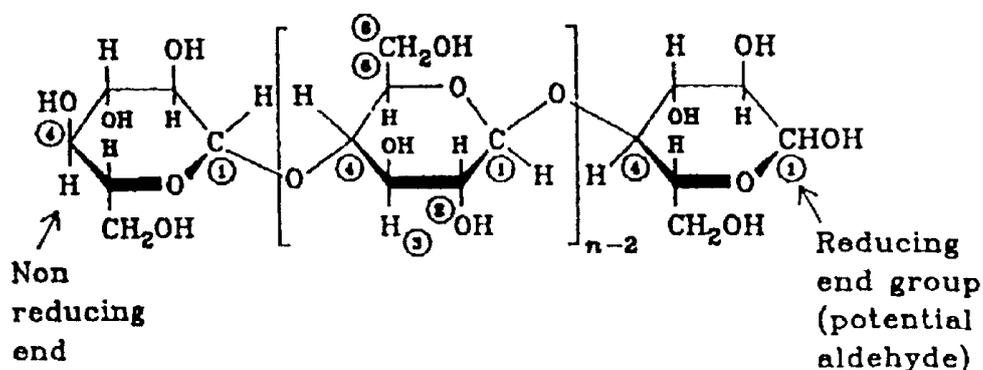


Figure 1-6: Structure de cellulose

Tableau 1-8 : Composition chimique de quelques fibres végétales [27]

Fibres	Composant (%)			
	Cendre	Cellulose	Hemi-Cellulose	Lignine
Noix de coco	1.44	32-43	0.15-0.25	40-45
Sisal	1.13	66-72	12.0	10-14
Jute	7.9	63	--	--

#### 1-4-5. Durabilité des fibres végétales

Plusieurs chercheurs [3,9-10,20-26, 33-36] révèlent que la plupart des fibres végétales résistent mal aux alcalis. Le faible tenu, de ces fibres dans les milieux alcalins, en particulier dans la chaux libérée par les ciments lors de l'opération d'hydratation, constitue une contrainte qui limite le champ d'utilisation de ces fibres dans les ciments. Ce phénomène se manifeste au niveau de la fibre soit par détérioration soit par diminution de sa résistance à la traction.

A titre d'exemple, la figure 1-7 illustre la chute de la résistance à la traction en fonction du temps d'immersion dans une solution de chaux de pH 11.5 [10]. De même, les résultats de BENTUR et AKERS [28] et TOLEDO FILHO et al. [29], montrent la faible tenue

de ces fibres aux alcalis. Ils attribuent cette chute dans la résistance à la traction et dans le module d'élasticité, à la cristallisation des fibres suite aux dépôts de chaux à la surface des fibres ainsi qu'à la pénétration de ces derniers dans les pores des fibres. De ce fait, les fibres deviennent très fragiles et peu résistantes.

Actuellement, l'amélioration de la durabilité des fibres végétales constitue un axe de recherche potentiellement exploité et la plupart des chercheurs utilisent plusieurs procédés qui se basent soit sur le traitement de l'état de surface des fibres soit sur le traitement de la matrice. C'est un peu la démarche qui avait été suivie pour améliorer les performances des fibres de verre dans les années 60-70. Ces procédés seront donnés avec plus de détails au chapitre suivant.

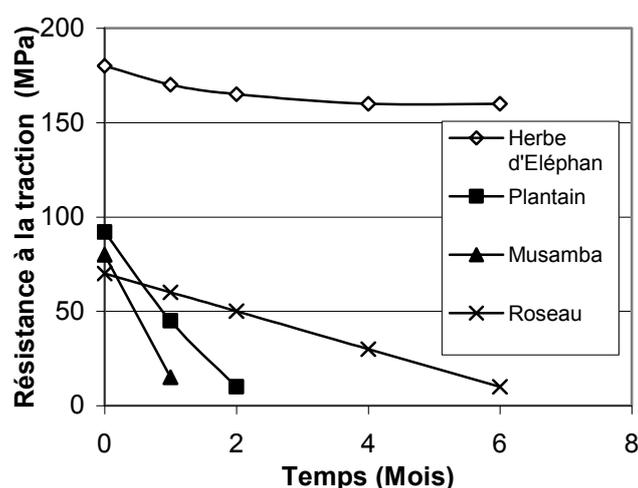


Figure 1-7 : Chute de résistance à la traction de quelques fibres végétales en fonction du temps d'immersion dans une solution de chaux de pH 11.5 [10].

### 1-5. Utilisation des fibres dans la construction

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'augmenter leurs performances mécaniques et physiques. A titre d'exemple le tableau 1-9 résume les diverses applications des fibres dans les produits cimentaires.

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 les dallages de parking [4] ainsi que dans le renforcement du plâtre [11].

Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polymère et d'acier est de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines, spécialement dans la fabrication des panneaux et dans la restauration des ouvrages anciens endommagés [37-40].

Tableau 1-9 : Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment [4, 9].

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince, enduit
Acier	Elément de toitures en béton cellulaire, linteaux, revêtements de chaussée, tabliers de pont, produit réfractaire, tuyaux en béton, piste d'atterrissage, réservoirs sous pression, travaux de restaurations.
Polypropylène nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, éléments flottant de débarquement et amarres pour les marinas, réparation des routes, tuyau sous-marin, travaux de restauration bâtiments.
Amiante	Voiles, tuyaux, panneaux matériaux d'isolation thermique, tuyaux d'égouts plaques de toiture plates et ondulées, revêtement des murs.
Carbone	Elément ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double courbure, coques, planches d'échafaudage.
Particules de mica	Panneaux, tuyaux, travaux de restauration
Végétale	Dalles, tuiles.

### 1-6. Autres domaines d'utilisation des fibres végétales

L'utilisation des fibres végétales dans les domaines pratiquée est très ancienne. A titre d'exemple, la première utilisation des fibres végétales a été dans le domaine de textile et de production des cordes, en suite dans la production du papier et enfin dans la production de matériaux de construction composites [41-47].

### 1-6-1 Domaine du textile

Plusieurs fibres végétales sont utilisées dans le domaine du textile [41]. A titre d'exemple nous citons les fibres:

- de graine : tel que le coton et le kapok,
- de tige : tel que le lin, le chanvre et le jute
- de feuille : tel que le sisal et le raphia.

### 1-6-2 Domaine de la production du papier

Dans la production du papier plusieurs fibres végétales sont utilisées. A titre d'exemple le tableau 1-10 présente le taux d'utilisation des fibres non-bois ( paille, bagasse, bambou, chanvre...) dans la production de la pâte du papier [43] ; FAO (87).

Tableau 1-10 : Utilisation mondiale des fibres non-bois dans la production de la pâte du papier [43] ; FAO (87)

Type de Fibre	Utilisation mondiale (10 <sup>3</sup> ) tonnes /	
	Année	
	1993	1998 (Estimation)
Paille	9566	10187
Bagasse	2984	3682
Bambou	1316	1850
Coton, Roseau, Sisal, Jute, Chanvre, Abaca, Kenaf et fâx	6870	7742
Total	20736	23461

Il faut mentionner que l'Algérie utilise une fibre végétale appelée Alfa dans la production de la pâte de papier.

### 1-6-3. Domaine de l'Art

Les fibres végétales sont très employées dans la production des objets d'art (Tapis, Chaises et Tables ...) ainsi que dans la décoration des maisons.

#### 1-6-4 Domaine des matériaux composites

La production de nouveaux matériaux composites à base de fibres végétales est l'un des domaines les plus récemment exploité. En effet, plusieurs chercheurs révèlent que le renforcement d'une matrice à base de résine ou de plastique par des fibres végétales ou naturelles donne de bons résultats tant sur le plan économique que sur le plan mécanique [8, 44-48]. Le tableau 1-11 reproduit les résultats des travaux de BOLTON [44] et qui montre que le matériau composite à base des fibres végétale-plastique ou végétale-résine présente des propriétés mécaniques aussi intéressantes que celles des fibres de verre.

Tableau 1-11 : Propriétés mécaniques d'une résine renforcée par des fibres naturelles et fibres de verre [41].

Fibre-Matrice	Densité	Résistance à la flexion (GPa)	Module de flexion (GPa)	Fraction de fibres en Vol. (%)
Bois / Phénolique « répartition au hasard »	1.2	0.11	8.0	65
Jute / Polyster « tissé »	1.2	0.090	8.0	50
Jute/Polyster « filé »	1.2	0.1	10	60
Coton / Epoxy	1.36	0.170	8.0	35
Jute/Epoxy « parallèle »	1.2	0.450	43.5	70
Kenaf / Epoxy « parallèle »	1.2	0.420	39.0	70
Verre /Epoxy « bien rangé »	1.7	0.690	42.0	70
Verre /Epoxy « répartition au hasard »	1.9	0.172	10.3	70

En outre, LEAO et al. [45] et BLEDZKI et al. [8] montrent dans leurs travaux les possibilités d'améliorer les propriétés mécaniques des produits polymères (plastique) par leur renforcement par des fibres naturelles. Le produit ainsi obtenu trouve une large application dans l'industrie automobile, électronique et peut être largement utilisé dans la restauration des ouvrages. Le tableau 1-12 montre les propriétés mécaniques du matériau composite (fibres végétales-plastique).

Tableau 1-12 : Propriétés mécaniques d'un matériau composé par 50% de fibres végétales et 50% de polypropylène (PP) [42].

Fibre/Matrice	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (GPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Module de flexion (MPa)
Ramie/PP	34.67	3.43	29.33	3.02
Jute/PP	15.66	2.4	23.97	2.5
Curaua/PP	46.58	3.78	33.1	2.51

## 1-7. Conclusion

L'utilisation des fibres de toute nature dans plusieurs domaines en particulier dans la construction est de plus en plus vaste. Vu les problèmes de santé que présentent les fibres d'amiante, leur substitution par des fibres végétales ou polymères est un enjeu social important. De ce fait, de récentes recherches sont en cours dans le but d'améliorer les propriétés des matériaux renforcés par des fibres végétales, de verre ou de polymère.

Pour des raisons de santé relatives aux fibres d'amiante, ou pour des raisons économiques relatives aux fibres de verres ou d'aciers l'avenir du renforcement des ciments et des bétons sera attribué aux fibres végétales, particulièrement pour les pays en voie de développement, qui possèdent des fibres naturelles en grande quantité qui sont souvent laissées sans valorisation.

Quoique l'Algérie soit parmi les pays qui possèdent une multitude de fibres végétales (fibre de palmier, Alfa, Abaca, Chanvre et Coton ...), la valorisation de ces fibres dans les domaines pratiques n'est pas encore généralisée. Cette valorisation est de nature à soutenir les secteurs industriels régionaux, et par la même à leur donner plus d'autonomie pour s'adapter intelligemment aux besoins locaux, en valorisant leurs propres ressources.

La démarche que nous avons suivie s'inscrit dans la valorisation des fibres pour améliorer l'adaptation des produits existants aux conditions locales.

L'histoire des technologies montre que l'utilisation des fibres dans les matériaux cimentaires ne s'improvise pas mais relève de recherches technologiques d'accompagnements indispensables afin que les procédés utilisés donnent les meilleurs résultats.

## **Propriétés mécaniques et physiques des bétons de fibres**

### **2-1. Introduction**

Le béton possède des propriétés intéressantes qui lui permettent d'être utilisé dans la plupart des ouvrages de construction. Non seulement il peut être moulé dans des formes les plus diverses mais il a une bonne résistance à la compression, une bonne durabilité et une faible conductivité thermique et électrique.

Néanmoins, son utilisation est limitée par deux caractéristiques : il est fragile et il résiste mal à la traction et à la fissuration. Il faut mentionner, que ces faiblesses sont largement aggravées dans les conditions climatiques sévères comme le climat saharien, qui présente un environnement sec et chaud. En effet, plusieurs chercheurs ont montré que les performances mécaniques du béton courant chutent dans ce type de climat [49-51].

Pour cela, plusieurs travaux ont été effectués dans le but d'améliorer les performances mécaniques du béton en climat normal ou en climat chaud et sec. L'un de ces axes de recherches récentes est la mise au point d'un matériau composite à base de fibres. Ainsi, des fibres de toutes natures (acier, verre, polymère, et végétale) sont ajoutées au béton.

La maîtrise du comportement de ce nouveau matériau composite nécessite une multitude d'essais expérimentaux qui demandent parfois l'adaptation des méthodes d'essais classiques aux conditions nouvelles. En effet, l'incorporation des fibres dans la matrice du béton à différents pourcentages et différentes longueurs change le comportement de cette dernière, ce qui complique souvent le déroulement de quelques essais classiques du béton. Dans ce sens, plusieurs modes d'essais spécifiques ont été proposés, par plusieurs chercheurs, pour caractériser les bétons de fibres [52-70].

Dans ce qui suit nous allons exposer les propriétés des bétons de fibres ainsi que quelques méthodes d'essais récemment développées pour caractériser ce matériau composite.

L'abréviation suivante sera utilisée BF : Béton de Fibre ; et BC : Béton Classique ou Courant.

## 2-2. Composition et mise en oeuvre des bétons de fibres

### 2-2-1. L'ouvrabilité

La littérature spécialisée [12-16, 52-70], révèle que l'ajout des fibres au béton frais lui confère une certaine cohésion au repos, apportée par le réseau frottant des fibres, ce qui diminue de façon remarquable l'ouvrabilité de ces bétons. La baisse de l'ouvrabilité de ces bétons est d'autant plus grande que :

- le dosage en fibres est grand
- l'élanement  $l/d$  ou  $l/e$  (longueur/diamètre ou longueur/épaisseur)
- le diamètre du plus gros granulat est grand

A titre d'exemple la figure 2-1 montre la chute d'ouvrabilité des BF métalliques en fonction de l'augmentation du dosage en fibres ainsi qu'en fonction de la diminution de leur élanement ( $l/d$ ) [61].

D'autres chercheurs [64] proposent des relations empiriques pour limiter le volume des fibres métalliques en fonction leur élanement ( $l/d$ ) et leur volume ( $V_f$ ), pour obtenir une bonne ouvrabilité.

$$V_f(l/d) < 3 \quad (2-1)$$

Le tableau 2-1 met en évidence la chute d'ouvrabilité des BF de métallique ( $l=38$  mm,  $D=0.4$ mm) en fonction de l'augmentation du pourcentage des fibres ainsi qu'en fonction de l'augmentation du diamètre des gros granulats [65], généralement l'ouvrabilité diminue quand le dosage et la taille des granulats augmentent. De ce fait, pour avoir une bonne maniabilité, LIM et LEE [66] proposent une loi empirique qui détermine le volume des fibres métalliques ( $V_{max}$ ) en fonction du diamètre maximum des granulats et de l'élanement des fibres.

$$V_{max} = \left[ \frac{B}{l/d - 16} \right] * 1.08 * \left[ 1 - \frac{D_{max}}{32.5} \right] \quad (2-2)$$

Avec :

- $D_{max}$ : Diamètre maximum des granulats
- B: Une constante qui dépend des constituants du mélange pour le béton courant B = 1.80
- $l/d$ : Elancement des fibres.

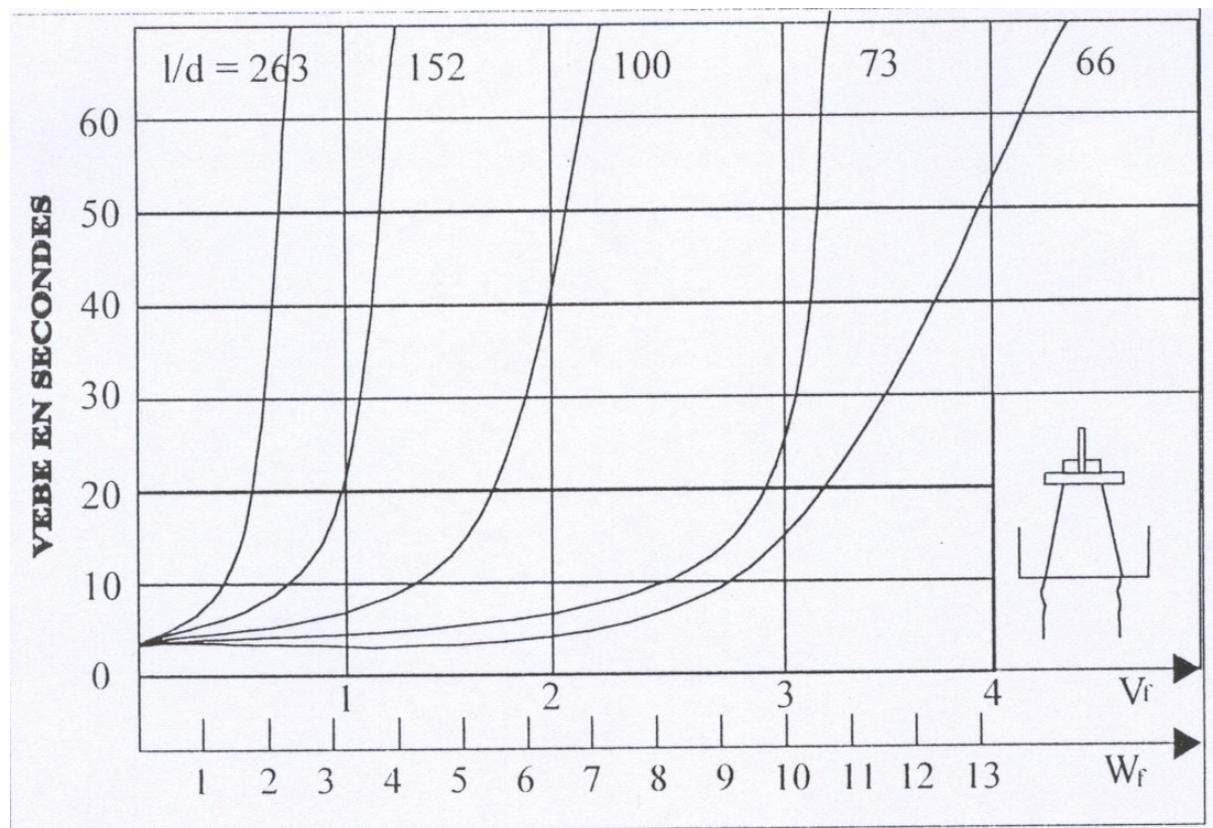


Figure 2-1. Effet de la teneur en fibres d'acier et leur élancement sur l'ouvrabilité VeBe [61].

Avec: -  $V_f$ : dosage de fibre en volume de fibre et -  $W_f$ : Dosage des fibres en poids

Tableau 2-1: Variation de l'ouvrabilité en fonction du dosage volumique des fibres métalliques et de la taille des granulats [65].

Élément	Composition 1 (kg/m <sup>3</sup> )			Composition 2 (kg/m <sup>3</sup> )		
Ciment	447			460		
	774			712		
Granulats 0-14 mm	965			410		
Granulats 0-25 mm	--			615		
E/C	0.48			0.45		
% de fibre (Vol)	0.75	1.0	1.5	0.75	1.0	1.5
Temps VeBe (s)	3.2	4.0	7.3	3.4	4.3	8.4
Cône inversé (s)	9.1	12.6	24.1	11.5	16.7	29.3

Par ailleurs, DEBICKI [12] constate que l'ouvrabilité est aussi affectée par la souplesse (module ou inertie) des fibres ainsi que par leur orientation dans la matrice. Généralement les fibres souples donnent une ouvrabilité plus grande. Et une bonne orientation des fibres dans la matrice peut améliorer l'ouvrabilité.

Toutefois, certaines fibres telles que les fibres végétales absorbent une partie de l'eau de gâchage, ce qui diminue de façon remarquable l'ouvrabilité des bétons de ce type de fibres. La figure 2-3 met en évidence la quantité d'eau qu'il faut ajouter au mélange de béton de fibres de sisal pour maintenir une ouvrabilité constante [17].

C'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'optimiser la composition des bétons de fibres, de sorte à obtenir une ouvrabilité acceptable avec la plus faible quantité d'eau. Pour cela, souvent il faut utiliser un adjuvant, pour réduire au maximum la quantité d'eau, afin de ne pas perdre l'effet bénéfique des fibres. Ainsi les pourcentages de fibres introduits sont limités par des problèmes de mise en oeuvre.

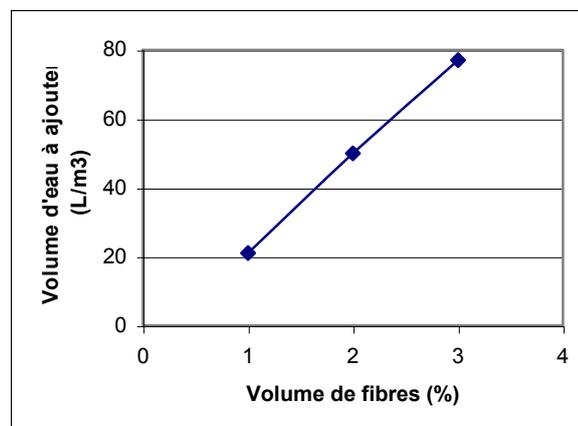


Figure 2-2 : Volume d'eau à ajouter pour conserver une ouvrabilité constante pour le BF de sisal [17]

Avant de développer les méthodes de composition des bétons de fibres, nous donnons les différents essais qui déterminent l'ouvrabilité des bétons.

Dans ce contexte, nous précisons que l'utilisation des essais statiques d'ouvrabilité en l'occurrence le cône d'ABRAMS ne donnera pas des résultats significatifs pour les bétons des fibres. Il est nécessaire de développer d'autres essais adéquats qui font intervenir un aspect

dynamique. Ainsi, la tentative de trouver de nouveaux modes d'essais ou de développer les essais existants, pour mesurer l'ouvrabilité des bétons de fibres, est actuellement un axe de recherche assez développé.

Un rapport de recherche du 544 ACI Comité [57] a mis en évidence un essai de cône d' ABRAMS inverse (ASTM 143) avec l'association d'une vibration interne verticale au centre du cône pour déterminer l'ouvrabilité des bétons de fibres métalliques.

En outre, GROTH [16,58] rapporte qu'une nouvelle méthode développée par une entreprise japonaise est utilisée pour mesurer l'ouvrabilité des bétons de fibres métalliques. Elle consiste à utiliser un cône d'ABRAMS et un anneau (Ring) de diamètre 50 cm avec l'association d'une vibration externe durant un temps  $T_{50}$  (2-10 s). Si durant ce temps la surface d'étalement  $S$  est comprise entre 65 et 75 cm le béton est de consistance normale. Cette méthode peut être utilisée au laboratoire ou in situ.

D'autre part, SACHANT et al. [70] ont développé un appareil qui mesure l'ouvrabilité des bétons de fibres cellulose appelé : le "New Cone Penetration test (NCPT)". C'est un cône métallique creux avec un angle de  $30^\circ$  au sommet équilibré avec une masse de plomb afin d'atteindre un poids de 4 kg. Ainsi, si la pénétration du l'NCPT sous son propre poids sur le béton de fibres est comprise entre 60 et 200 mm, le béton sera plastique.

En outre, il est important de noter que les essais dynamiques d'ouvrabilité traditionnels pour le béton tel que le Maniabilimètre (LCPC) ou le VeBe test demeurent utilisables pour les bétons de fibres.

### **2-2-2. Méthode de composition**

Les méthodes de compositions du béton de fibres (BF) sont basées sur l'optimisation des constituants de sorte que la compacité soit maximale et l'ouvrabilité optimale soit proche de celle du béton classique. En effet, plusieurs auteurs montrent que la compacité du béton frais est en fonction de sa maniabilité. Ce qui rend possible l'étude de la composition à partir des mesures de maniabilité.

La maniabilité des BF dépend de la nature des fibres utilisées, de leurs pourcentages d'incorporation et de leurs élancements. A titre d'exemple, si les fibres métalliques augmentent la cohésion du mélange, les fibres végétales augmentent aussi la cohésion et absorbe en plus un certain pourcentage de l'eau de gâchage ce qui réduit l'ouvrabilité du béton. Généralement l'ouvrabilité des BF est inversement proportionnelle au pourcentage d'incorporation des fibres.

Dans la littérature la majorité des méthodes de confection de BF sont destinées aux bétons de fibres métalliques. Parmi ces méthodes, il en existe certaines qui ne tiennent pas compte de l'ouvrabilité alors que cette propriété est une variante principale pour ces bétons.

En effet, la plupart des méthodes d'élaboration des BF sont basées sur le développement des méthodes de confectionnement du béton classique, spécialement qui se basent sur l'ouvrabilité telles que la méthode de BARON LESAGE [71] ou bien la méthode de GORISSE [72].

Parmi les méthodes utilisées pour la confection des bétons de fibres métalliques, qui tiennent compte de l'ouvrabilité, nous citons la méthode de SWAMY et al. [62], la méthode de SERENA-ROS [67] et la méthode de ROSSI et al. [59]. Ces deux dernières sont basées sur un développement de la méthode de BARON LESAGE [71], qui se base sur les trois hypothèses suivantes:

- Pour un rapport E/C fixé, le béton le plus maniable c'est celui ayant un squelette minéral S/G (Sable/Gravier) optimal.
- Le dosage optimal en granulat ne dépend pas de la nature et du volume de pâte de ciment (eau + ciment)
- L'ajout des fibres métallique ne modifie pas les deux hypothèses précédentes (cette hypothèse a été ajoutée par ROSSI)

Ainsi, SERENA-ROS [67] procèdent en trois étapes pour composer leur béton avec des fibres métalliques:

- 1- Fixer le rapport E/C et le dosage de fibres
- 2- Faire varier le rapport S/G et tracer la courbe maniabilité en fonction de S/G, déduire le rapport S/G pour lequel la maniabilité est la plus grande
- 3- Sur la base de la deuxième hypothèse, ajuster la quantité d'eau uniquement afin d'obtenir la maniabilité souhaitée.

Remarque: la maniabilité dans cette méthode (SERENA-ROS) fût mesurée par le cône d'ABRAMS.

Par ailleurs, ROSSI et al. [59] procèdent aussi en trois étapes. Les deux premières sont identiques à celles de SERENA-ROS, mais pour la troisième étape ils procèdent différemment:

Sur la base des deux premières hypothèse ROSSI et al., ajustent la quantité d'eau et de ciment en gardant constant le rapport E/C afin d'obtenir la maniabilité souhaitée.

Remarque:

- La maniabilité dans cette méthode de ROSSI et al., est mesurée par un maniabilimètre L.C.P.C.
- Durant la première étape d'optimisation du matériau, une quantité de super plastifiant respectant les normes en vigueur peut être ajoutée. Puis au cours de la deuxième étape, on fait varier cette quantité de super plastifiant en même temps que les quantités d'eau et de ciment afin d'atteindre la maniabilité souhaitée.

Nous pensons que la méthode de SERNA-ROS donne un béton de fibres métallique moins résistant et plus poreux que celle de ROSSI. De plus, comme nous allons le détailler ultérieurement, le cône d'ABRAMS utilisé par la première méthode, est un essai d'ouvrabilité statique qui ne permet pas de bien optimiser le rapport S/G. En effet, il est très difficile d'observer des affaissements significatifs des bétons de fibres métalliques par le cône d'ABRAMS.

Par ailleurs, pour les fibres végétales, qui se caractérisent par un grand pouvoir d'absorption d'eau, et vu le problème d'évaporation rapide des bétons dans les conditions climatiques chaudes et sèches qui provoque une chute de résistance, nous pensons que la méthode de SERNA-ROS, pourrait produire des bétons de fibres végétales de bonnes résistances. En fait, nous prévoyons utiliser la quantité d'eau absorbée par les fibres comme une source d'humidité interne dans les bétons qui assurera la continuité du processus d'hydratation et l'évolution de la résistance.

Dans les conditions climatiques chaudes et sèches, il est ainsi intéressant de tester la résistance de bétons de fibres végétales confectionnés par une méthode qui se base sur les hypothèses de SERNA-ROS.

En plus de l'optimisation du squelette solide (S/G), d'autres auteurs tel BOUCHEKOUK et al. [15-63] optimisent aussi la forme des fibres pour avoir un gain de résistance du béton de fibres. Toute en travaillant avec une matrice fixe et une maniabilité correcte. Cette méthode a été appliquée pour les bétons et mortiers des fibres métalliques, de verre et de polymère.

Enfin, il faut préciser que la plupart des méthodes de confection des bétons de fibres insistent sur la mise en place d'essais de qualification pour accompagner les formulations.

### **2-2-3. Fabrication et mise en œuvre des bétons de fibres**

Les opérations de malaxage et de mise en œuvre des bétons de fibres sont des étapes très importantes dans la détermination de leurs propriétés à l'état frais ou durcis. Toutefois,

dans le malaxage des bétons de fibres, il faut veiller à obtenir une ouvrabilité acceptable et une bonne dispersion des fibres dans le mélange pour éviter la formation de pelotes de fibres "oursins". Pour cela il faut respecter le pourcentage critique qui est le pourcentage limite admissible de fibres à introduire dans la matrice pour éviter les problèmes de mise en œuvre.

Le pourcentage limite dépend du rapport l/d de la fibre de la proportion et de la dimension maximum des granulats ainsi que de la technologie de la mise en œuvre. Il faut souligner qu'un malaxage énergique n'est pas toujours recommandé parce qu'il peut endommager les fibres fragiles.

Ainsi les pourcentages limite des fibres introduites sont toujours limités par la technique de mise en œuvre. A titre d'exemple le tableau 2-2 donne les techniques de mise en œuvre de quelques bétons de fibres.

Tableau 2-2: Techniques de mise en œuvre des béton de fibres [15]

Type de béton de fibres	Méthode de mise en œuvre
Fibres de verre ou de fil coupé ou roving	Malaxage Projection manuelle Projection automatique
Fibres métalliques	Malaxage Projection
Fibres polypropylène	Malaxage Magnani (méthode de production de l'amiante ciment)
Fibres de cellulose	HATSHEK (méthode de production de l'amiante ciment)
Fibres de sisal	Malaxage

Suivant la nature des fibres utilisées, le COMITE 544 de l'A.C.I. [68] recommande plusieurs méthodes pour la fabrication des bétons de fibres, qui varient en fonction du type de fibres comme suit:

- 1- Mélanger les fibres et les granulats avant l'introduction dans le malaxeur (par exemple ajouter les fibres sur un tapis roulant d'alimentation des granulats), cette méthode convient plus pour les fibres métalliques.
- 2- Mélanger d'abord les granulats et le sable, ajouter les fibres puis le ciment et l'eau. Cette méthode convient pour les fibres de polypropylène de façon à les défibrer.
- 3- Ajouter les fibres en fin de malaxage et adapter un temps de malaxage minimum pour obtenir la répartition homogène. Cette méthode convient pour les fibres fragiles (le verre).

Concernant les bétons de fibres végétales, plusieurs chercheurs [29-30] préconisent la méthode suivante:

- Mélanger d'abord les granulats et le sable avec 40% de l'eau de gâchage ajouter petit à petit les fibres et en même temps 30% à 35% d'eau de gâchage, pour éviter la formation de pelotes de fibres, en suite ajouter le ciment et le reste d'eau. Le temps global de malaxage est de 5 min.

Nous pensons que pour faciliter la dé-fibration des fibres végétale il est souhaitable de les utiliser à l'état humide.

## **2-3. Comportement mécanique des BF : Mécanismes et Modélisations**

### **2-3-1. Introduction**

L'association fibre béton constitue un matériau composite ayant un comportement différent de celui du béton classique, se caractérisant principalement par sa ductilité et par sa résistance à la traction et à la fissuration.

Le comportement de ce matériau composite est assez compliqué et difficile à cerner parce qu'il dépend de plusieurs facteurs dépendant eux mêmes de plusieurs variables tels que :

- les propriétés des fibres, qui dépendent de :
  - la nature de la fibre (acier, verre, polymère ou végétale),
  - l'élanement des fibres ( $l/d$ )
  - la quantité d'incorporation des fibres
- les propriétés de la matrice, qui dépendent aussi :
  - de la qualité et la quantité de ciment,
  - de la qualité et les dimensions des granulats
  - du rapport E/C
- le comportement de la bande d'interface qui dépend:
  - de la géométrie des fibres
  - du type de cure
  - du mode de chargement
- les conditions de la mise en œuvre qui dépendent :
  - de la distribution des fibres, leur orientation et leur espacement.
  - du mode de remplissage du béton (pression, vibration).

La complexité des phénomènes mis en jeu dans le fonctionnement du BF et la sévérité des contraintes qui lui sont appliquées nécessite une bonne précision dans la simulation. Dans cet esprit, plusieurs chercheurs [12, 53, 73-90] se sont penchés sur l'élaboration des modèles qui peuvent simuler le comportement mécanique du BF par l'utilisation de lois mathématiques et des méthodes de calcul très poussées notamment la méthode des éléments finis.

Dans un premier temps, nous allons présenter le comportement des éléments qui constituent ce matériau composite à savoir les fibres et la matrice de béton. Par la suite, le comportement à l'interface fibre-béton et enfin nous donnons quelques exemples de comportement des bétons de fibres végétales.

### **2-3-2. Comportement en traction des fibres**

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 très variables tels que la composition chimique, la teneur en eau et l'élanement ( $l/d$ ).

La figure 1-5 du chapitre 1 a présenté quelques courbes expérimentales (contrainte-déformation) données par SWAMY [32]. Selon ces courbes nous constatons que les fibres testées (canne à sucre, jute ou noix de coco) ont un comportement presque élastique et linéaire au démarrage de l'essai, et ensuite un comportement plastique jusqu'à la rupture.

### **2-3-3. Comportement de la matrice**

Le comportement de la matrice des BF est similaire à celui du béton classique qui est assez compliqué et le débat est ouvert quant au choix des théories ou des méthodes de calcul pour sa modélisation. Les méthodes généralement utilisées sont dérivées du modèle élasto-plastique.

Parmi les nombreux modèles qui simulent le comportement des bétons classiques nous citons le modèle de DAVENNE et al. [77] qui se base sur la théorie d'endommagement scalaire et qui stipule que la rupture du béton peut être caractérisée par la naissance, la propagation puis la coalescence des micro-fissures qui conduisent à la formation de macro-fissures et à la ruine finale. Ce modèle est donné par l'équation 2-3 :

$$\sigma = IE_0 ( \Pi_d - ID ) \varepsilon \quad (2-3)$$

Avec:

- $\sigma$  : le tenseur contrainte
- $IE_0$  : la matrice de raideur élastique initiale
- $\Pi_d$  : la matrice identité
- $ID$  : l'opérateur d'endommagement
- $\varepsilon$  : le tenseur déformation

Sous un état quelconque de sollicitation, l'endommagement est considéré comme étant la combinaison d'un endommagement dû à la traction  $ID_t$  et d'un endommagement dû à la compression  $ID_c$  sous la forme suivante :

$$ID = \alpha^\beta ID_t + ( 1 - \alpha )^\beta ID_c \quad (2-4)$$

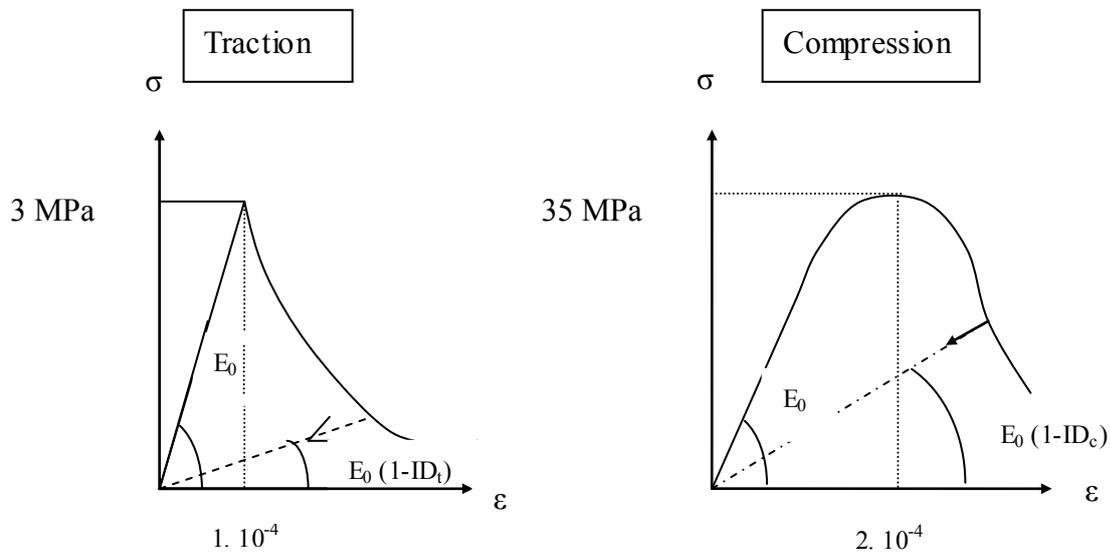
Avec:

- $\alpha$ , traduit la part respective de traction et de compression, est égale à 0 en compression pure et 1 en traction pure.
- $\beta$ , traduit le couplage entre ces deux endommagements (voisin de 1.05 pour béton normal).

Les lois d'évolution de  $ID_t$  et  $ID_c$  sont déterminées à partir des essais uni axiaux comme le montre la figure 2.3.

#### **2-3-4. Comportement du matériau composite**

Le comportement du matériau composite BF est très compliqué du moment que c'est le résultat du comportement de deux matériaux non homogènes comme nous l'avons vu précédemment. Dans ce qui suit nous allons examiner le comportement de ces matériaux sous différentes sollicitations.



Figures 2.3 : Comportement du béton sous sollicitation uni-axiales [77]

### 2-3-4-1. Comportement en compression

La plupart des auteurs affirment que la résistance des bétons de fibres est, en général, légèrement inférieure à celle du béton classique et spécialement pour les fibres végétales [10, 19]. Certains chercheurs [12, 13, 66, 85] révèlent qu'une orientation adéquate des fibres métalliques a permis d'améliorer la résistance à la compression des BF par rapport au béton classique d'environ 15%.

Le comportement et le mécanisme de rupture des BF en compression peuvent être interprétés selon MANGAT et AZARI [84], qui rapportent qu'en compression, la présence des fibres fait augmenter le volume des micro fissures, celles ci se propagent rapidement et entraînent la rupture du matériau.

Il existe plusieurs auteurs qui ont travaillé sur la modélisation de la résistance à la compression des bétons de fibres métalliques, à titre d'exemple nous citons les travaux de LIM et al. [66] qui proposent une loi donnant la relation de la contrainte à la compression ( $\sigma_c$ ) en fonction de l'orientation des fibres et de leur longueur comme suit :

$$\sigma_c = \sigma_{mc} (1 - V_f) + n_1 n_0 \sigma_{ft} V_f \quad (2-5)$$

Avec:

- $\sigma_{mc}$ : Contrainte en compression de la matrice

- $\sigma_{ft}$  : Contrainte en traction de la fibre
- $n_0$  : Facteur d'orientation
- $n_1$  : Facteur de longueur
- $V_f$  : Volume des fibres

$n_1$  et  $n_0$  sont donnés par les relations suivantes.

$$n_1 = \begin{cases} 0.50 & \text{si } l_f < l_c \\ 1 - l_c / l_f & \text{si } l_f \geq l_c \end{cases} \quad (2-6)$$

$$n_0 = \frac{\int_0^\phi \int_0^\theta \cos^4 \theta \cos^4 \phi d\theta d\phi}{\iint d\theta d\phi} \quad (2-7)$$

Avec :

$$\theta = \arcsin (h / l_f) \leq \pi/2 \quad (2-8)$$

$$\phi = \arcsin (b / l_f) \leq \pi/2 \quad (2-9)$$

Où:

- $l_f$  : Longueur de la fibre
- $l_c$  : Longueur critique de la fibre
- $h$  : Hauteur de l'éprouvette
- $b$  : largeur de l'éprouvette

Nous constatons que le calcul du facteur d'orientation  $n_0$  demande un calcul mathématique très poussé.

De ce fait, les travaux de DEBICKI [12] relatifs à l'effet de l'orientation des fibres sur la relation contrainte déformation en compression des bétons de fibres métallique (figure 2-4), permet de conclure que:

- La première phase élastique n'est guère modifiée par le changement de l'orientation des fibres.
- L'initiation d'une microfissuration plus intense pour  $\theta' = 0^\circ$  (le chargement est perpendiculaire aux fibres) donne une plus grande souplesse à l'éprouvette.

- $\theta' = 90^\circ$  (le chargement est parallèle aux fibres) favorise la formation de colonnettes qui facilitent la création des macro fissures.
- $\theta' = 0$ , les fibres par effet de couture retardent la formation des colonnettes et de fissures.
- Les phénomènes d'instabilité sont nettement retardés pour  $\theta = 0$ .

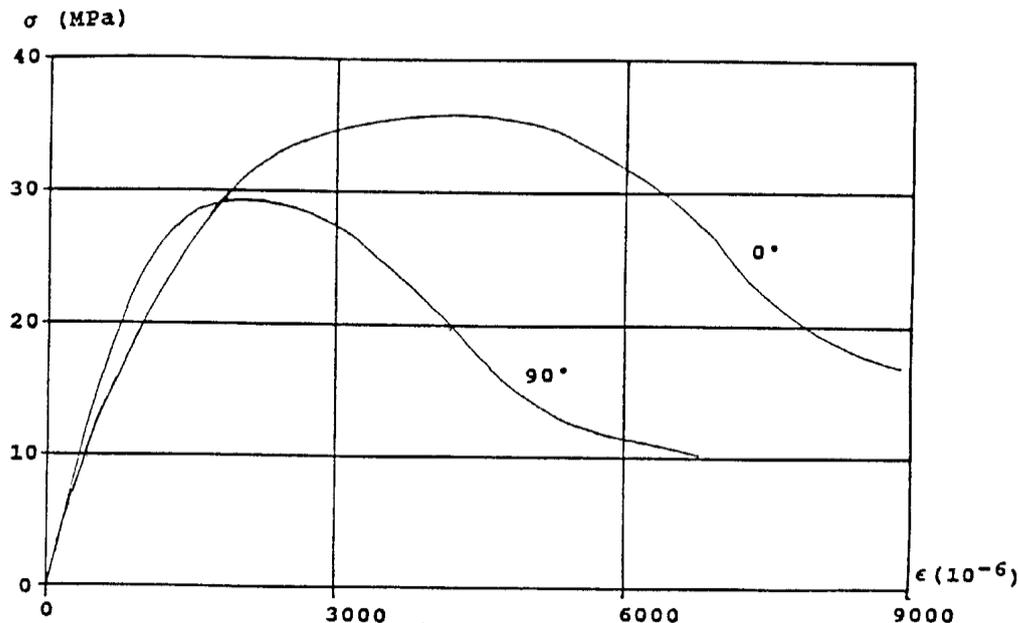


Figure 2-4: Relation contrainte déformation des bétons de fibres métalliques en fonction de l'angle d'orientation [12].

### 2-3-4-2. Comportement en traction

Les fibres ont un rôle très important dans l'amélioration de la résistance à la traction et la limitation de la propagation des fissures du BF en traction, surtout après l'apparition de la première fissure.

En fait, avant l'apparition de la première fissure le comportement du BF en traction uniaxial est presque similaire au béton classique. En revanche le comportement post-fissuration est fortement lié à la nature des fibres, à leur longueur à leur quantité et leur orientation.

Ainsi, ANDONIAN et al. [74], proposent la loi (2-10) qui simule la résistance du BF de cellulose en traction uniaxiale.

$$\sigma_t = \sigma_{mt} (1 - V_0) (1 - V_f) + \eta \sigma_{ft} V_f \quad (2-10)$$

Avec :

- $\eta$  : Coefficient de rendement des fibres
- $\sigma_{mt}$  : Contrainte en traction de la matrice
- $V_0$  : Volume des vides dans la matrice

-  $\sigma_{ft}$ : la contrainte en traction de la fibre est donnée par l'équation (2-11)

$$\sigma_{ft} = 2 \tau (l/d) \quad (2-11)$$

Avec  $\tau$  : la contrainte moyenne d'adhérence à l'interface fibre-matrice.

L'équation (2-10) devient :

$$\sigma_t = \sigma_{mt} (1 - V_0) (1 - V_f) + 2\eta \tau V_f (l/d) \quad (2-12)$$

### 2-3-4-3. Comportement en flexion

Les fibres sont très efficaces dans l'amélioration de la résistance à la flexion et l'énergie de rupture des BF. Cependant, le comportement en flexion des BF est largement influencé par la nature, le pourcentage, et l'orientation des fibres dans la matrice. L'allure générale du diagramme flèche-effort, donnée par plusieurs auteurs [19, 29, 32, 53, 74, 82-91], peut être résumé par le diagramme illustré par la figure 2-5.

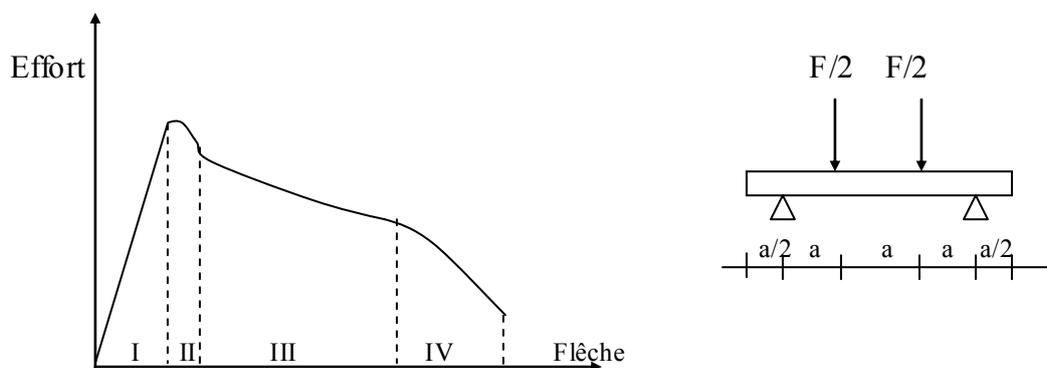


Figure 2-5 : Diagramme flèche-effort des BF en flexion quatre points [Norme NFP 18-409].

Le diagramme flèche-effort des BF en flexion comporte quatre zones. [87], à savoir :

- Zone I : Comportement élastique : Les fibres n'interviennent pas, seul les caractéristiques de la matrice régissent le comportement.

- Zone II : Localisation des microfissures qui conduit à l'apparition de la première macro fissure. Cette zone est largement influencée par la qualité de la matrice ainsi que le type et pourcentage des fibres.
- Zone III : Propagation de la macro fissure. Le dosage et l'orientation des fibres sont fondamentaux. Si la contrainte, après la première fissuration, excède la limite élastique de la matrice d'autres macro fissures peuvent apparaître. La distance entre les fissures dépend de la longueur et de l'orientation des fibres.
- Zone IV : Ouverture de la principale macro fissure de manière importante et qui correspond à une dégradation du renforcement soit par déchaussement soit par rupture des fibres. Cela dépendra de l'intensité de l'adhérence matrice-fibre, qui est fonction du type, de l'état de surface et de la longueur des fibres.

Ainsi, comme nous l'avons montré au paragraphe 2.3.2, l'augmentation de la longueur des fibres ainsi que le blanchissement permet de donner une rupture plutôt par fracture des fibres. Alors que l'augmentation du dosage des fibres permet d'augmenter la ductilité du composite.

Concernant la modélisation du comportement des BF en flexion, une synthèse des travaux de plusieurs chercheurs a permis à SWAMY [32] et al., de proposer une relation (2-13) qui permet d'estimer la résistance en flexion des BF métalliques .

$$\sigma_f = 0.97 \sigma_{mf} (1 - V_f) + 3.41 V_f (1/d) \quad (2-13)$$

D'autre part, ANDONIAN et al. [74], proposent avec la même démarche une relation (2-14) qui simule le comportement du BF de cellulose en flexion.

$$\sigma_f = (\alpha' / \beta') \sigma_{mf} (1 - V_0)(1 - V_f) + 2\eta \alpha' \tau V_f (1/d) \quad (2-14)$$

Avec

- $\sigma_{mf}$ : Contrainte de flexion de la matrice
- $\alpha' = \sigma_{mf} / \sigma_{ft}$
- $\beta' = \sigma_{mf} / \sigma_{mt}$

Dans le même contexte, ANDONIAN et al. [74], présentent une relation (2-15) qui permet de calculer le module d'élasticité en traction ( $E_{mt}$ ) ou en flexion ( $E_{mf}$ ) des BF de cellulose.

$$E_{mt} = E_{mf} = E_m (1 - V_0)(1 - V_f) + \eta E_f V_f \quad (2-15)$$

Avec : -  $E_m$  et  $E_f$  : Respectivement, modules d'élasticité de la matrice et de la fibre.  
 -  $\eta$  : Coefficient de rendement des fibres

#### 2-3-4-4. Ductilité des Bétons de Fibres

Comme nous l'avons montré précédemment, le renforcement du béton par les fibres permet d'augmenter sa résistance à la flexion et de diminuer sa fragilité. Le matériau composite BF devient un matériau ductile. Cependant, comme le mentionne la synthèse bibliographique le comportement ductile des BF n'apparaît qu'après la première fissure. En effet, avant la première fissuration le comportement des BF est similaire au comportement du béton classique. L'addition des fibres n'augmente que très légèrement la charge correspondant à la première fissure [11].

La ductilité des BF est souvent exprimée par quelques indices appelés indices de ductilité. La détermination de ces indices est généralement donnée en fonction de l'énergie de rupture qui n'est que la surface limitée par la courbe effort-flèche. En fait, selon la norme suivie on distingue plusieurs indices de ductilité. Cependant, il est important de mentionner que les indices proposés par les normes, que nous allons exposer, dépendent de la taille de l'échantillon utilisé ainsi que du type et du mode de chargement.

Ainsi, l'association ACI, pour le diagramme charge-flèche de la figure 2-6 (a), définit la ductilité par deux indices ( $I_t$  et  $I_{ACI}$ ) comme suit :

$$I_t = \frac{\text{aireOABF}}{\text{aireOAKL}} \quad (2-16)$$

$$I_{ACI} = \frac{\text{aireOABEG}}{\text{aireOAJ}} \quad (2-17)$$

La norme ASTM-C 1018, pour diagramme charge-flèche de la figure 2-6 (b), propose de déterminer les indices de ductilité  $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{30}$  comme suit :

$$I_5 = \frac{\text{aireOABCI}}{\text{aireOAJ}} \quad (2-18)$$

$$I_{10} = \frac{\text{aireOABDH}}{\text{aireOAJ}} \quad (2-19)$$

$$I_{30} = \frac{\text{aireOABEG}}{\text{aireOAJ}} \quad (2-20)$$

Par ailleurs, BANTHIA et DUBEY [69], dans le but d'éliminer l'instabilité du système, ont développé une nouvelle technique RSTM (Residual Strength Test Method) récemment, adoptée par ASTM C 1399. Cette technique adopte le même mode de chargement et les mêmes types d'éprouvette définis par les normes ASTM-C 1018 en flexion quatre points, mais elle ajoute les modifications suivantes :

- 1- On place une plaque métallique d'épaisseur 12 mm, entre l'éprouvette et les appuis inférieurs. Cette plaque permet l'absorption de l'énergie libérée par la machine lors du développement de la première fissure. Aussi elle permet au couplage global d'être maintenu juste après la charge maximale en limitant l'ampleur de l'ouverture de fissure
- 2- On place un capteur de déplacement muni d'un dispositif qui permet de déterminer le déplacement vertical net de l'éprouvette.
- 3- On charge, jusqu'à ce que le déplacement net de l'éprouvette soit compris entre 0.25 et 0.5 mm.
- 4- On décharge et on retire la plaque.
- 5- L'éprouvette fissurée est rechargée. On note les charges  $P_{0.5}$ ,  $P_{0.75}$ ,  $P_{1.0}$ , et  $P_{1.25}$  correspondant respectivement aux déflexions 0.5, 0.75, 1.0 et 1.25. La contrainte résiduelle (CR) est donnée par l'équation (2-21).

$$CR = \frac{L}{bh^2} \left[ \frac{P_{0.5} + P_{0.75} + P_{1.0} + P_{1.25}}{4} \right] \quad (2-21)$$

Avec: L, b et h respectivement, la portée, la largeur et la hauteur de l'éprouvette.

Enfin, l'indice de la contrainte résiduelle est défini par l'équation (2-22) :

$$I_{CR} = \frac{CR}{MOR} * 100 \quad (2-22)$$

Avec : MOR : Le module de rupture en flexion.

En conclusion, on peut dire que la technique (RSTM) est très recommandée pour les BF à faible dosage en fibres.

Tandis que, les normes Japonaises JCI-SF4 et JSCE-SF4, pour le cas du chargement donné par la figure 2-6 (c), définissent la ductilité  $T_{JCI}$  comme étant l'énergie nécessaire pour avoir une déflexion centrale ( $\delta_{150}$ ) équivalente à ( $L/150$ ). La contrainte moyenne de flexion  $\sigma_f$  après fissuration peut être déterminée par l'équation (2-40) :

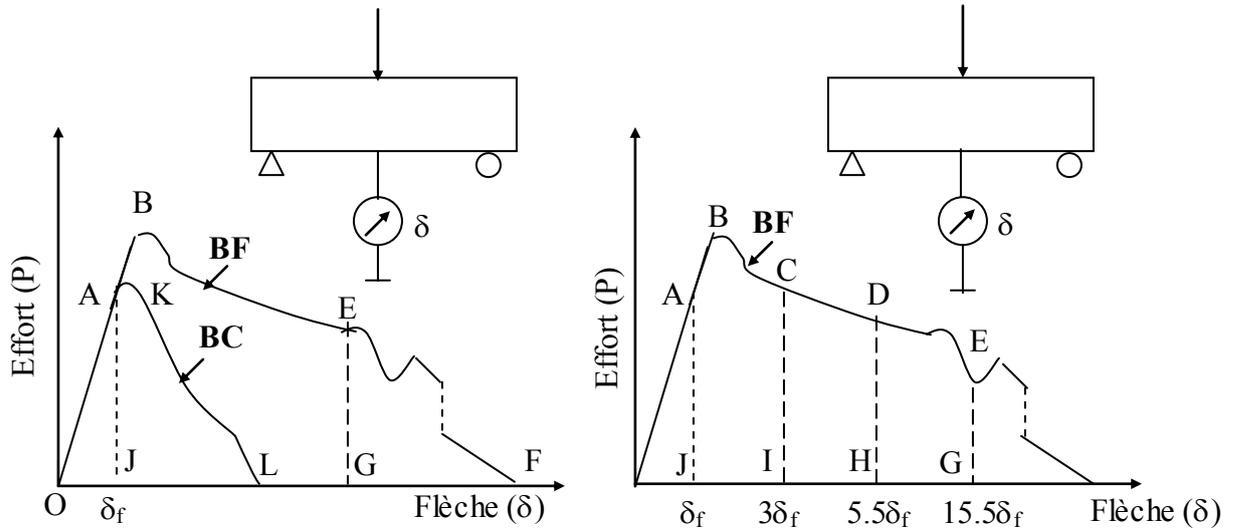
$$\sigma_f = \frac{T_{JCI} \cdot L}{\delta_{150} b h^2} \quad (2-23)$$

La norme AFNOR P 18-409, pour le cas du chargement donné par la figure 2-6 (d), détermine en premier lieu les charges  $P_{0.7}$ ,  $P_{1.4}$ , et  $P_{2.8}$  correspondant respectivement aux déflexions 0.7, 1.4 et 2.8 ainsi que la charge  $P_0$  qui correspond par définition au maximum de la courbe charge- flèche située à gauche d'une parallèle à la partie linéaire montante de cette dernière, parallèle tracée à 0.05 mm de la flèche. La ductilité est par la suite définie par trois indices  $D_{0.7}$ ,  $D_{1.4}$ , et  $D_{2.8}$ , donnés respectivement par les équations (2-24 à 2-26). La déflexion nette est mesuré par deux capteurs de déplacement fixés sur support s'appuyant sur l'éprouvette elle-même.

$$D_{0.7} = \frac{P_{0.7}}{P_0} \quad (2-24)$$

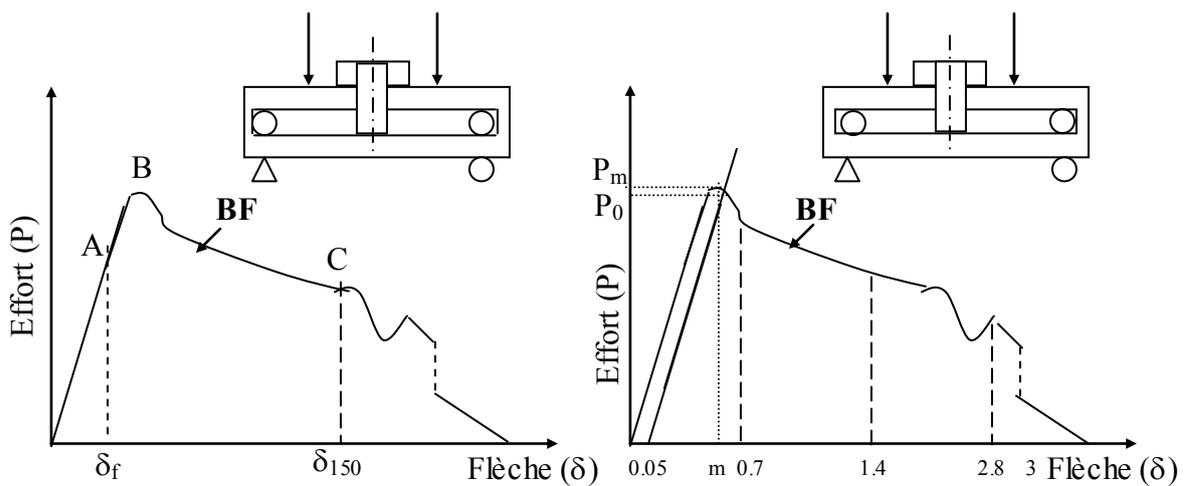
$$D_{1.4} = \frac{P_{1.4}}{P_0} \quad (2-25)$$

$$D_{2.8} = \frac{P_{2.8}}{P_0} \quad (2-26)$$



(a) [ACI-544]

(b) [ASTM-C 1018]



(c) [JCI-SF4]

(d) [AFNOR P 18 409]

Figure 2-6 : Diagramme flèche-effort des BF en flexion

Avec :

- BC : béton classique sans fibre, BF : Béton avec fibre
- $P_m$  : la charge maximale correspondant à la déflexion m.

### 2-3-4-5. Comportement à l'interface en traction

La résistance des BF est largement conditionnée par son comportement à l'interface. En effet, c'est dans cette zone que s'effectue le transfert des contraintes de la matrice à la fibre, par le biais des contraintes de frottement ou d'adhérence ( $\tau$ ) et c'est aussi dans cette zone qu'apparaissent les premières microfissures qui provoquent la rupture du matériau composite. C'est pour cette raison que nous allons examiner, avec plus de détail, le comportement des BF à l'interface.

Pour se faire, il est retenu le schéma mécanique donné par la figure 2-7, et les deux hypothèses suivantes :

- La matrice est homogène jusqu'au contact de la fibre
- La fibre de cellulose est considérée comme un cylindre creux de longueur « l » et de Diamètres extérieur et intérieur respectivement « D » et « d ».

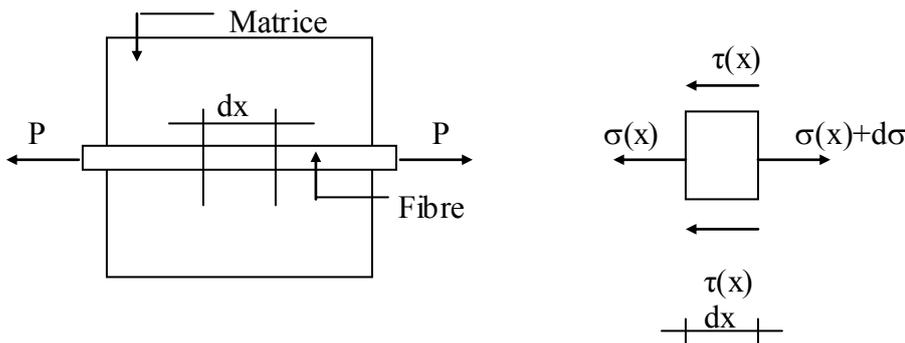


Figure 2-7 : modèle d'interactions fibre-matrice [60, 83]

Une synthèse des travaux de ABSI [60] et VALAD [83] relatifs à l'étude de l'interface matrice-fibres permet dans ce contexte, de déterminer la résistance en traction des fibres à l'interface comme suit :

$$P = \sigma S \quad (2-27)$$

Avec, S : section droite pleine de la fibre.

$$P = [\pi(D^2 - d^2) / 4] \sigma \quad (2-28)$$

Sur un petit élément dx on aura :

$$dP = [\pi(D^2 - d^2) / 4] d\sigma \quad (2-29)$$

L'équilibre statique ( $\Sigma F = 0$ ) implique que :

$$\sigma(x) S + \tau(x) S_1 = (\sigma(x) + d\sigma) S \quad (2-30)$$

Où  $S_1$  est la surface latérale extérieur de la fibre sur  $dx$ .

D'où :

$$\tau(x)(\pi D) dx = [\pi(D^2 - d^2) / 4] d\sigma \quad (2-31)$$

Et donc :

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{4D}{(D^2 - d^2)} \tau(x) \quad (2-32)$$

Les lois d'élasticité permettent d'écrire :

$$\sigma = E_f \varepsilon = E_f \frac{dw}{dx} \quad (2-33)$$

Si on dérive par rapport à "x"

$$\frac{d\sigma}{dx} = E_f \frac{d^2w}{dx^2} = E_f w'' \quad (2-34)$$

Si on suppose que ( $\tau$ ) est proportionnelle à l'allongement ( $w$ ) soit :

$$\tau(x) = K w(x) \quad (2-35)$$

L'égalisation de l'équation (2-34) à (2-32) donne :

$$w'' = \frac{4DK}{(D^2 - d^2) E_f} w \quad (2-36)$$

Si l'on admet, aussi que  $(\tau)$  est constant suivant  $x$  soit :

$$\tau(x) = \tau_{fu} \quad (2-37)$$

Avec :  $\tau_{fu}$  : La résistance limite de frottement

Il s'ensuit que :

$$w'' = \frac{4D \tau_{fu}}{(D^2 - d^2) E_f} K \quad (2-38)$$

Avec:

- $w(x)$  : l'allongement au point d'abscisse "x" de la fibre
- $\tau(x)$  : la contrainte d'adhérence
- $\sigma_{ft}(x)$  : la contrainte de traction de la fibre au point d'abscisse "x"
- $E_f$ : module d'élasticité de la fibre

$$- w'' = \frac{d^2 w}{d^2 x}$$

Vu l'analyse très complexe de répartition réelle de la contrainte d'adhérence pour les BF,  $\tau_{fu}$  est généralement pris égale à  $\tau_{au}$  (résistance ultime d'adhérence).

Si on considère le cas d'une fissure centrale de longueur  $l$ , dont le mécanisme est schématisé par la figure 2-8. Avec  $\sigma_{fU}$ : la contrainte à la traction ultime de la fibres

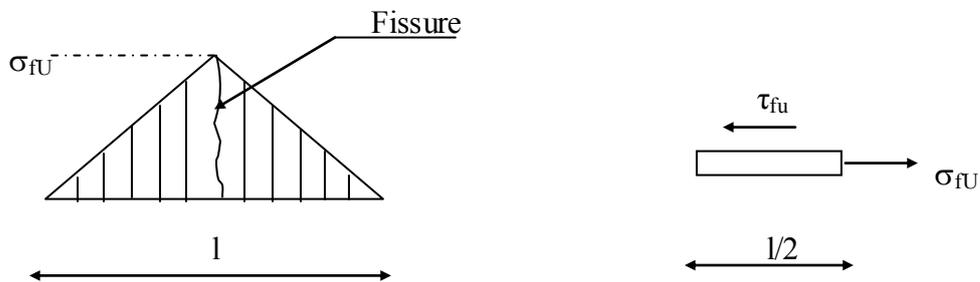


Figure 2-8 : Effort de traction cas d'une fissure centrée [60, 83]

L'équilibre statique conduit à :

$$\frac{1}{2} \pi D \tau_{fu} = \frac{\pi (D^2 - d^2) K}{4} \sigma_{fU} \quad (2-39)$$

$$\tau_{fu} = \frac{(D^2 - d^2) K}{2Dl} \sigma_{fU} \quad (2-40)$$

Posant :  $\alpha = \frac{(D^2 - d^2)}{2D}$

$$\tau_{fu} = \frac{\alpha}{l} \sigma_{fU} \quad (2-41)$$

Suivant la longueur d'encrage des fibres dans la matrice on aura :

- Une rupture par fracturation si
  - $\tau_{fu} > (\alpha / l) \sigma_{fU}$
- Une rupture par arrachement (glissement) si
  - $\tau_{fu} < (\alpha / l) \sigma_{fU}$ ; Avec  $\tau_{au} = (\alpha / l) \sigma_{fU}$ .

Remarque : L'équation (2-41) permet de définir la longueur d'ancrage critique ( $l_{cr}$ ) :

$$l_{cr} = \frac{\sigma_{fU}}{\tau_{fu}} \alpha \quad (2-42)$$

La figure 2-9 résume le comportement d'adhérence fibre-matrice pour  $\tau_{fu} < \tau_{au}$

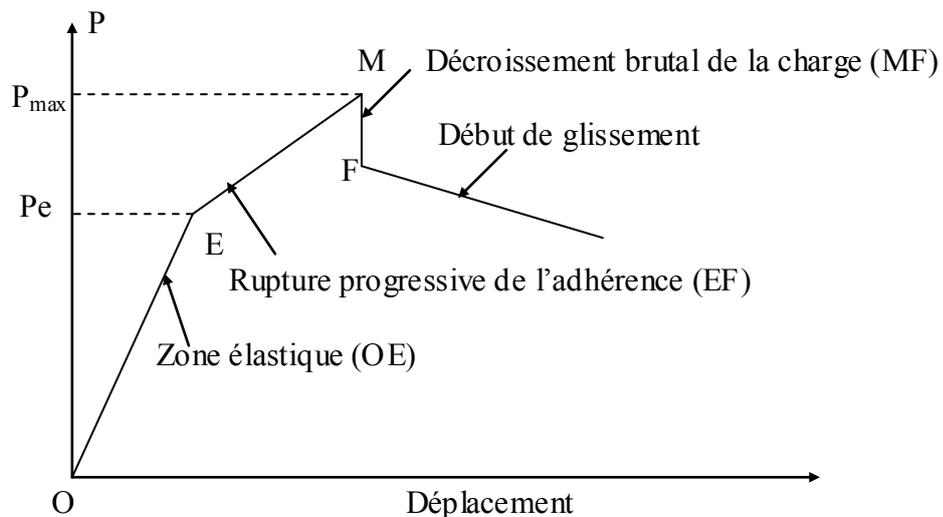


Figure 2-9 : Aspect de la force d'arrachement (P) en fonction de la déformation suivie de glissement  $\tau_{fu} < \tau_{au}$  [60, 88].

### 2-3-4-6. Comportement du BF après la première fissure en flexion

L'association des fibres au béton lui confère un comportement ductile. C'est à dire après l'apparition de la première fissure, le matériau composite continue à se déformer et à supporter des charges supplémentaires.

Parmi les modèles proposés pour la modélisation du comportement des BF après fissuration nous pouvons citer le modèle proposé par VAN GYSEL et al. [81], illustré par la figure 2-10. L'ouverture de la fissure commence juste à se produire lorsque la contrainte à la traction ultime de la matrice ( $\sigma_{mtu}$ ) est atteinte. Quand l'ouverture de la fissure ( $w$ ) augmente, la contrainte diminue progressivement. Mais lorsque l'ouverture atteint une valeur critique  $w_{crit}$ , il n'y aura plus de transfert à travers la fissure. Le diagramme de la figure 2-11 montre la relation entre la contrainte et l'ouverture de fissure.

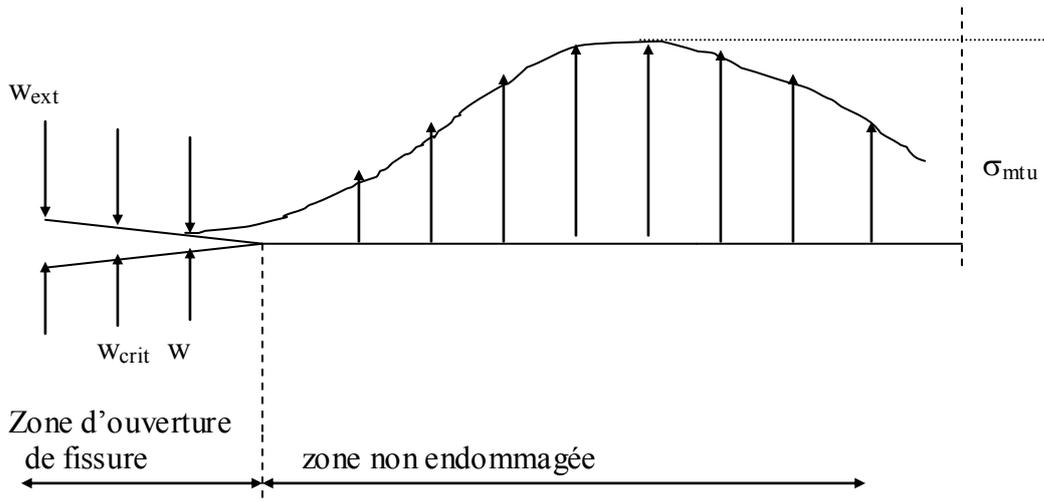


Figure 2-10 : Diagramme contrainte de traction de la matrice et d'ouverture de fissure dues à la flexion [81].

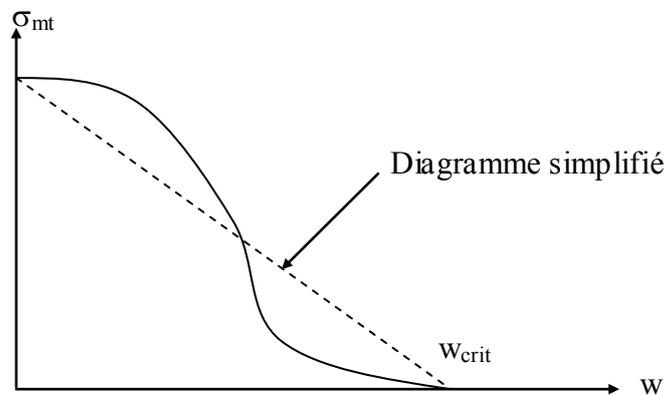


Figure 2-11 : Diagramme contrainte de traction de la matrice -ouverture de fissure [81].

### 2-3-4-7. Distribution des contraintes et des déformations après la première fissuration des BF en flexion.

Le diagramme de distribution de contrainte dépend de plusieurs paramètres tels que le type, la dimension, l'orientation, le dosage des fibres ainsi que le mode de fissuration.

HANNANT [89] a proposé sur la figure 2-12 quelques diagrammes typiques de distribution des contraintes et de déformations. Le diagramme (c) ou (d) conviennent plus pour les fibres métalliques pour un dosage en fibres inférieur au dosage critique tandis que le diagramme (d) ou (e) conviennent plus pour les fibres de verre pour un dosage respectivement inférieur et supérieur au dosage critique.

Dans ce qui suit nous allons donner deux exemples de diagramme de distribution de contrainte en fonction de l'orientation des fibres dans la matrice.

Pour des BF métalliques dans le cas où les fibres seraient alignées dans la direction de l'effort des tractions, VAN GYSEL [81] a proposé le modèle des répartitions des contraintes normales illustré sur la figure 2- 13. Il a aussi donné des hypothèses qui permettent de déterminer les variante ( $\sigma_{bc}$ ,  $\sigma_{bt}$ ,  $t$ ,  $s,a$ ).

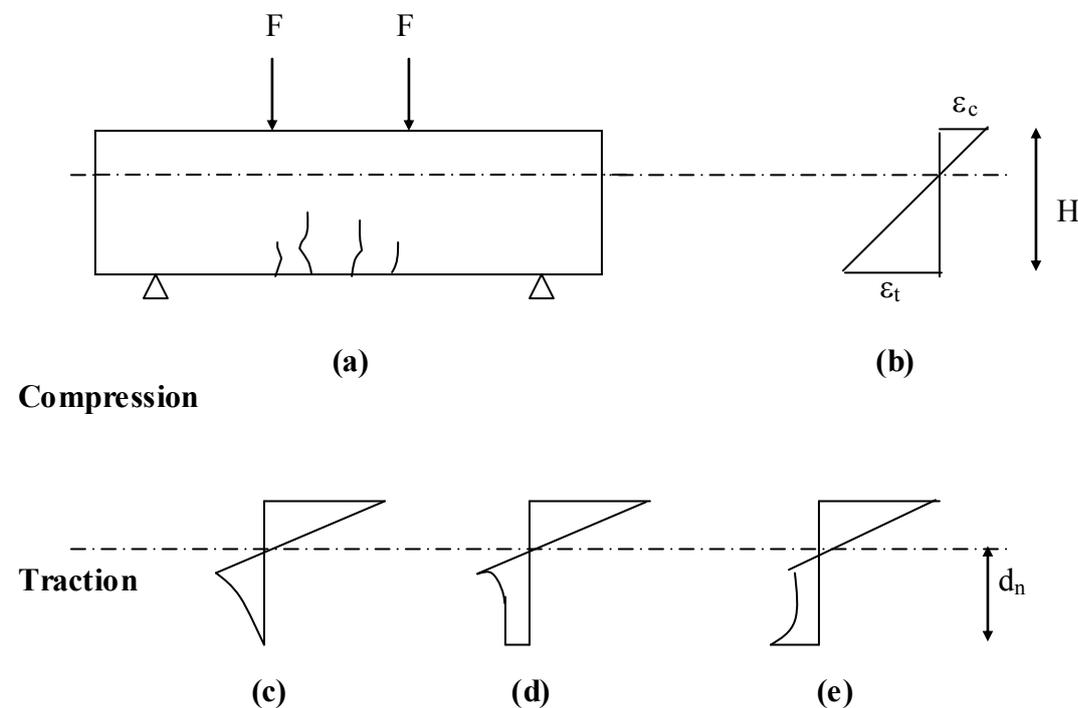


Figure 2-12 : Diagramme répartition de contraintes et de déformations en flexion (après fissuration) [89].

Avec : - **(a)** : Epreuve sous le chargement

- **(b)** : Diagramme répartition de déformations

- **(c), (d) et (e)** : Différents diagrammes de répartition de contraintes

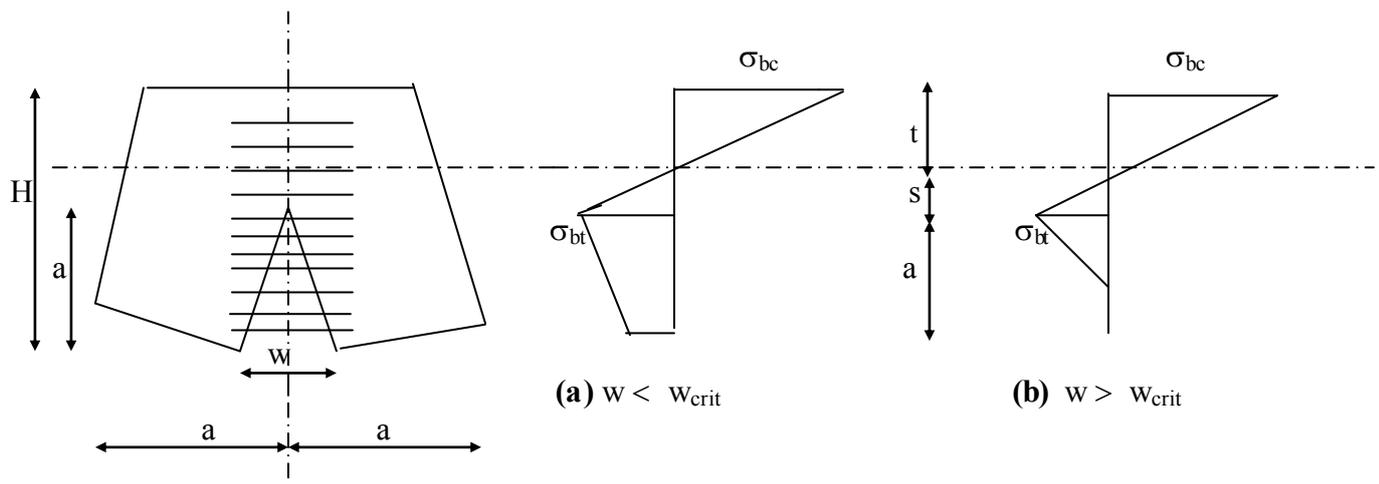


Figure 2-13: Modèle de répartition des contraintes normales dans la section du béton de fibres fissuré [81].

A titre d'exemple, pour les BF métalliques dans le cas des fibres courtes et dispersées, HANNANT [89], propose le modèle de répartition de contraintes représenté sur la figure 2-14 (b). Il a trouvé que  $\sigma_{bu}$  du diagramme 2-14 (b) peut être exprimé en fonction de  $\sigma_{bt}$  du diagramme 2-14 (a) par équations suivante :

$$\sigma_{bu} = \frac{16}{39} \sigma_{bt} = 0.41 \sigma_{bt} \quad (2-43)$$

Où :  $\sigma_{bc}$ ,  $\sigma_{bt}$  et  $\sigma_{bu}$  sont respectivement : Contrainte de béton en compression, Contrainte de béton en traction et Contrainte ultime de béton en compression.

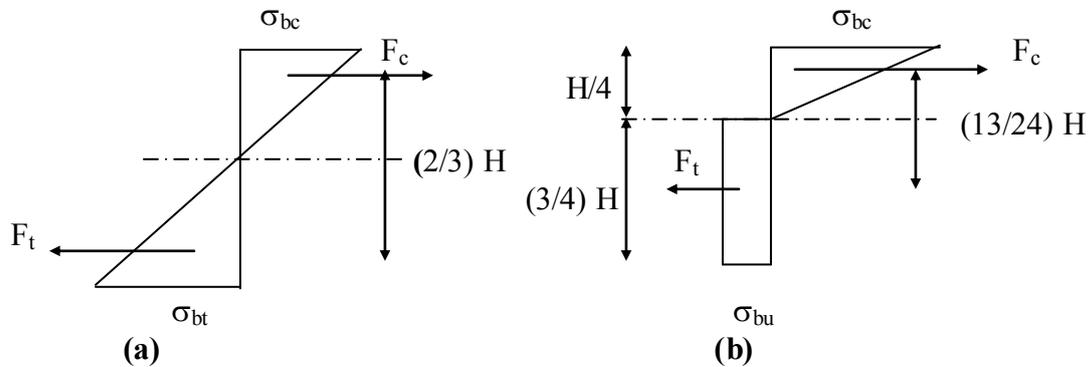


Figure 2-14: Modèle de répartition des contraintes dans la section du béton de fibres fissuré [89].

- (a) Modèle élastique
- (b) : modèle élastique en compression et plastique en traction

## 2-4. Propriétés des bétons de fibres durcis

Dans ce paragraphe seront exposés quelques résultats expérimentaux sur les bétons de fibres et particulièrement les bétons de fibres végétales.

### 2-4-1. Résistance à la compression

Pratiquement plusieurs chercheurs de la littérature confirment que l'ajout des fibres aux bétons n'a aucun effet bénéfique sur leur résistance à la compression, spécialement pour le cas des BF végétales [10, 19]. A titre d'exemple nous montrons par la figure 2-15, les résultats de RAMASWAMY [19] relative aux résistances à la compression des bétons de quelques fibres végétales dosés à 1% en volume, avec une composition 1 : 3.58 : 2.87 (ciment : sable : gravier) et  $E/C = 0.65$ .

Nous pensons qu'en général la chute de la résistance à la compression des béton de fibres est due à la présence des fibres dans la matrice et spécialement celles orientées dans la direction du chargement qui favorisent la formation des micro fissures et par conséquent une faible résistance à la compression. Pour cette raison, comme nous avons montré en 2-3-4-1,

une bonne orientation permet d'augmenter la résistance à la compression pour quelques bétons de fibres en l'occurrence les bétons de fibres métallique.

Nous pensons aussi que la chute de la résistance à la compression des bétons de fibres végétales par rapport au béton de fibre classique de la figure 2-15 est due à la baisse de la compacité des bétons de fibres. En effet, avec un E/C constant et sans l'utilisation d'adjuvant les bétons de fibres sont moins maniable que le béton classique ce qui diminue leur compacité et par la suite diminue leur résistance à la compression.

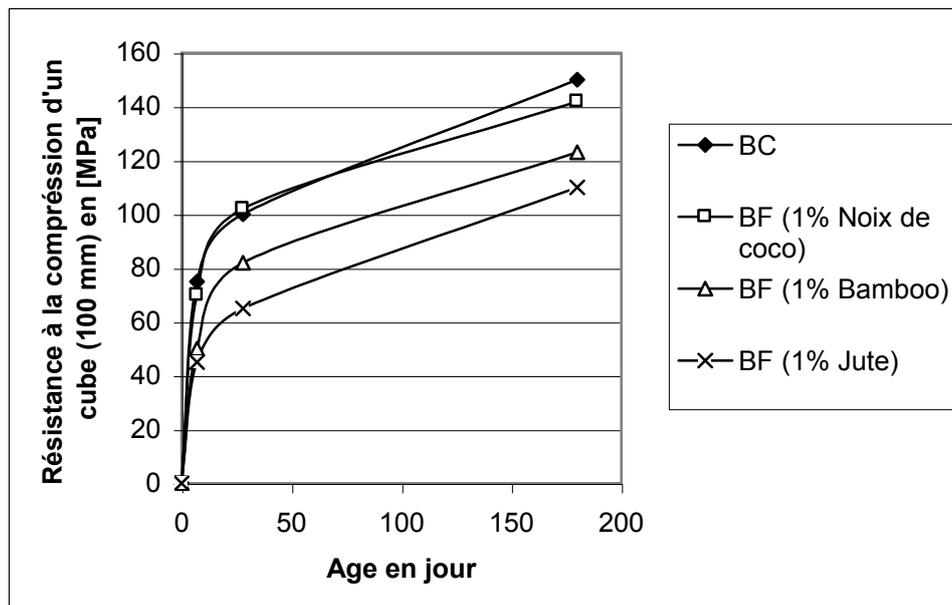


Figure 2-15 : Résistance à la compression de quelques bétons de fibres végétales en fonction de la durée de conservation [19].

#### 2-4-2. Résistance à la traction

La résistance à la traction des bétons de fibres varie en fonction la résistance à la traction des fibres ainsi que de leur dosage et longueur dans la matrice. De ce fait, MANGAT [91] constate que l'augmentation de la résistance à la traction des bétons de fibres par rapport aux bétons classiques peu atteindre 30% pour les fibres résistantes telles que les fibres d'acier, et elle est plus faible lorsque les fibres ont une résistance à la traction relativement faible. D'autre part, DAS GUPTA et al. [73] constatent que la résistance à la traction des bétons de fibres de noix de coco (coir) augmente avec l'augmentation du dosage des fibres jusqu'à un optimum et en suite elle chute. Ce même phénomène est constaté aussi avec l'augmentation

des longueurs des fibres. Comme le montre les figures 2-16 et 2-17. En effet, DAS GUPTA et al. [73] remarquent que le pourcentage optimal d'incorporation de fibre de coco dans les bétons est de 4% en volume, alors que la longueur optimale est de 37.5 mm. Au-delà du dosage et de la longueur optimale l'adhérence et la compacité des bétons de fibres diminuent, ce qui donne un béton de plus faible résistance.

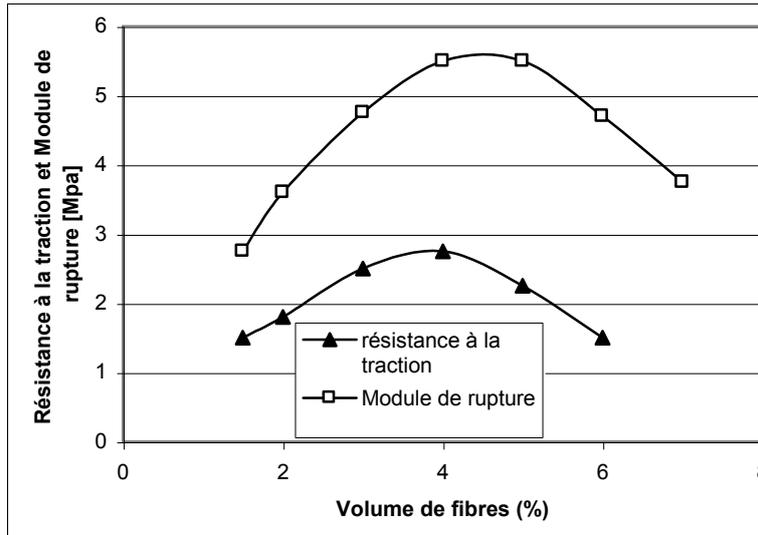


Figure 2-16 : Variation de la résistance à la traction et module de rupture du BF de noix de coco en fonction du volume de fibres (longueur de fibre est de 38 mm) [73].

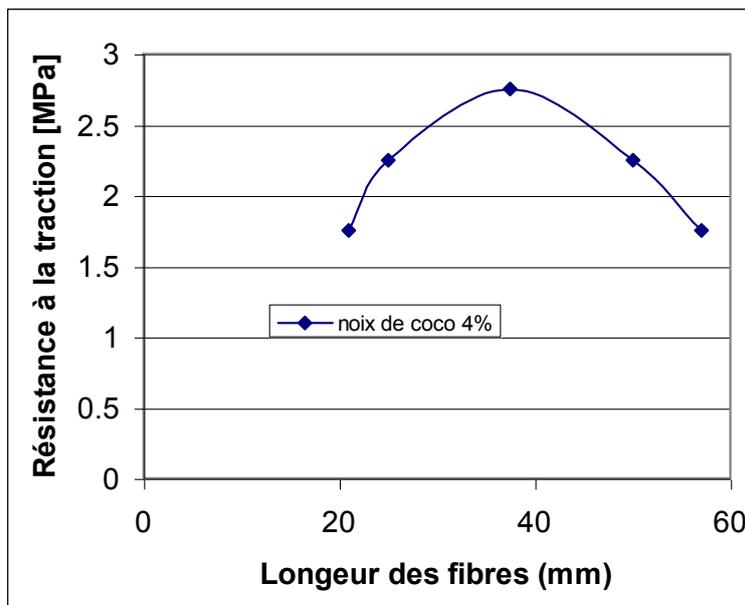


Figure 2-17 : Variation de la résistance à la traction en fonction de la longueur des fibres pour le BF de noix de coco (4% en volume) [73].

### 2-4-3. Résistance à la flexion

Plusieurs auteurs de la littérature s'accordent sur le fait que l'ajout des fibres améliore d'une façon remarquable leurs résistances à la flexion ainsi que leur ductilité.

Plus spécialement, les chercheurs [8, 10, 11, 19-24, 27-32, 73-91] ont montré que l'ajout des fibres végétales améliore plus particulièrement les propriétés de flexion du béton classique. A titre d'exemple le tableau 2-3 montre l'augmentation de la résistance à la traction et à la flexion des bétons de fibres par rapport au béton classique, en fonction du dosage en fibres

Dans le même sens, RAMASWAMY et al. [19] rapportent dans le tableau 2-4 que l'ajout de 1% de fibres végétales au béton améliore le module de rupture en flexion.

Tableau 2-3 : Résistance à la traction ( $R_t$ ) et à la flexion ( $R_f$ ) de quelques BF par rapport au béton classique (BC) [9]

Types de fibres	Volume de fibres en (%)	$R_t$ (BF) / $R_t$ ( BC)	$R_f$ (BF) / $R_f$ ( BC)
Acier	0.5	2.5-4.0	-
	1.0	4-5.5	-
	1.5	10.0-25.0	2.0
Verre	1.0	1.7-2.0	2.5-3.5
polypropylène	0.5	1.5-2.0	-
	1.0	2.0-3.5	-
	1.5	3.5-15	-
Nylon	1.0	1.5-1.7	-

Tableau 2-4 : Propriétés mécaniques de quelques béton de fibres [19]

Type de Fibre - % en (vol)	MOR/ $R_c$			
	3 jours	1 semaine	4 semaines	12 Semaines
Béton témoin - 0%	0.14	0.19	0.20	0.22
Jute - 1%	0.17	0.24	0.26	0.28
Coco - 1%	0.17	0.22	0.22	0.26
Bamboo - 1%	0.14	0.20	0.21	0.23

Avec:

- MOR: Module de rupture en flexion d'éprouvette 10x10x60 cm, donnée par l'équation suivante:

$$\circ \text{ MOR} = 6 M / b h^2 \quad [\text{MPa}] \quad (2-44)$$

Et avec:

- M: Moment de flexion maximal durant l'essai
  - b et h: Respectivement, largeur et hauteur de la section de l'éprouvette utilisée.
- $R_c$  : Résistance de compression d'éprouvette cubique de 10 cm [MPa].

D'autre part, les résultats de TOLÈDO FILHO et al. [29] relatifs aux mortiers des fibres de sisal et noix de coco dont la composition est donnée par le tableau 2-5, montrent que l'ajout de fibres améliore la résistance à la flexion et la ductilité. Comme le montre, à 28 jours, le tableau 2-6 et la figure 2-18. Nous constatons aussi sur le tableau 2-5 que l'augmentation de la longueur des fibres et l'alignement (compositions M1S2S et M1C2S1) contribuera à améliorer les propriétés de flexion. Le dispositif de flexion utilisé est un dispositif quatre points, les éprouvettes ont une dimension de 300x100x15 mm avec une distance entre appuis de 300 mm.

La figure 2-18 montre aussi la variation de la charge de flexion des différents types de mortiers de fibres conservés dans l'eau à une température de 18 °C, en fonction d'âge. La chute des charges de flexion en fonction d'âge sera discutée plus en détail dans le paragraphe durabilité.

Tableau 2-5: Composition des mortiers de fibres de sisal et de noix de coco selon TOLÈDO FILHO et al. [29]. (C: ciment, S: sable, E: eau)

Composition	Proportion C:S:E (poids)	Type de fibre	Vol (%) en fibre	Longueur de Fibres (mm)	Répartition des fibres
M1S325	1:1:0.4	Sisal (S)	3S	25	Aléatoire
M1S2S	1:1:0.4	Sisal (S)	2S + 1S	25 + 375	Aléatoire + aligné
M1C325	1:1:0.4	Coco (C)	3 C	25	Aléatoire
M1C2S1	1:1:0.4	C + S	2C + 1S	25 + 375	Aléatoire + aligné

Le tableau 2-6: Propriétés de flexion ( $\sigma_0$ ,  $\sigma_f$ ,  $T_{JCI}$ , et les coefficients de ductilités ( $D_n$ )) des mortiers de fibres de sisal et noix de coco conservés durant 28 jours dans l'eau. [29,30].

Compos.	$\sigma_0$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$T_{JCI}$ [kNmm]	$D_{0.5}$	$D_{1.0}$	$D_{1.4}$	$D_{2.8}$
M1S325	5.47	6.09	0.83	0.63	0.81	1.00	1.01
M1S2S	6.11	7.51	0.99	0.88	0.89	0.94	1.08
M1C325	4.96	5.85	0.83	0.99	0.84	0.79	1.01
M1C2S1	5.69	7.42	0.99	0.99	0.99	1.04	1.11

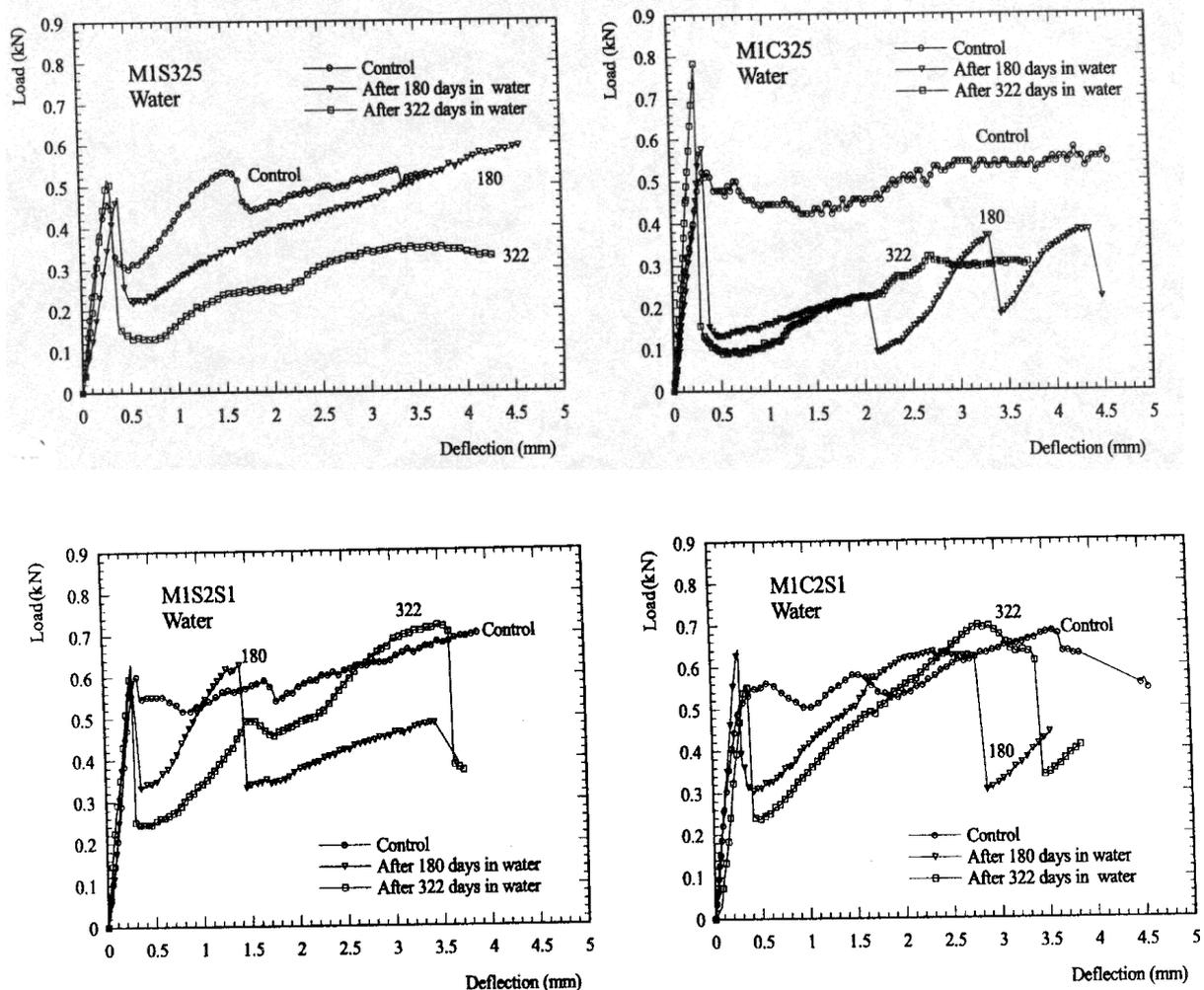


Figure 2-18 : Charge-flèche des mortiers de fibres de sisal et noix de coco conservées dans l'eau en fonction de l'âge [29].

#### **2-4-4. Résistance à la fissuration**

L'incorporation des fibres dans la matrice du béton augmente sa résistance à la fissuration et limite la propagation des fissures.

ANDONIAN et al. [74], constatent l'existence de peu des travaux de recherches qui traite de la fissuration des bétons de fibres végétales. En fait, la plupart des travaux de recherche ont été effectués sur les bétons de fibres d'amiante, d'acier ou de verre. Ils révèlent que le béton de fibres de cellulose résiste aussi à l'effort de fissuration mais reste inférieur à celui des bétons de fibres d'acier. Cela est probablement dû au pouvoir d'absorption d'eau des fibres de cellulose, qui influe sur l'humidité à l'intérieur du béton et diminue la résistance à la fissuration. Cette supposition a été critiquée par KHENFER et al. [75], qui constatent que la variation d'humidité dans la matrice béton de fibres de cellulose n'a aucune influence défavorable sur l'initiation de la propagation de fissure. En revanche, la variation de la longueur des fibres influe beaucoup sur le mécanisme de rupture. A cet effet, ils [75] concluent que les fibres de cellulose courtes donneraient une rupture par déchaussement alors que les fibres longues donneraient une rupture par fracture des fibres.

BALUCH [90], trouve que le béton de fibre de sisal présente le 1 / 10 de la résistance à la fissuration de celle des bétons de fibres d'acier.

#### **2-4-5. Module d'élasticité**

Plusieurs chercheurs [11, 19, 74] affirment que le module d'élasticité en traction ou en compression diminue avec l'augmentation du dosage en fibres dans la matrice. A titre d'exemple le tableau 2-4, illustre les résultats de ANDONIAN et al. [74], relatifs au module d'élasticité des BF de cellulose. Cependant, ils constatent que pour un dosage de fibres bien déterminé, les deux modules d'élasticité en compression ( $E_{mc}$ ) et en traction ( $E_{mt}$ ) ont presque la même valeur.

De même, KHENFER [11], a montré que le module d'élasticité en traction et en compression est resté constant avec la variation de la longueur des fibres de cellulose.

Tableau 2-4 : Module d'élasticité en compression et en traction des BF de cellulose [74]

Fraction des fibres de cellulose en masse	$E_{mc}$ [Gpa]	$E_{mt}$ [Gpa]
0.02	$12.75 \pm 0.46$	$12.47 \pm 2.11$
0.04	$12.75 \pm 0.75$	$13.62 \pm 3.54$
0.06	$12.18 \pm 0.73$	$12.9 \pm 3.48$
0.08	$10.86 \pm 0.31$	$11.76 \pm 1.34$
0.10	$9.87 \pm 0.24$	$8.60 \pm 0.75$

#### 2-4-6. Retrait des bétons de fibres : Propriétés et Modélisation

Plusieurs chercheurs affirment que l'ajout des fibres de toute nature y compris les fibres végétales est bénéfique pour la réduction du retrait du béton [15, 19, 24, 52, 92-100].

Les chercheurs [22, 92-96] lient la diminution du retrait hydraulique, à la fin de la prise et au début du durcissement, du béton de fibres par rapport au béton classique, à l'accélération du départ d'eau du béton par la présence des fibres métalliques. En effet, la présence des fibres métalliques dispersées augmente la grosseur des pores de la matrice, en diminuant ainsi l'intensité des éteintes capillaires tout en facilitant l'évaporation de l'eau libre. A titre d'exemple SWAMY et STAVRIDES [92] indiquent que l'ajout des fibres d'acier au béton permet de réduire le retrait hydraulique de 20%.

Quant à la relation qui lie le retrait à la perte en poids ou en eau des bétons, HOUARI [52] rapporte que EL HACHEM [95] a émis l'hypothèse suivante : tant qu'il y a perte en poids dans les échantillons de béton (perte en eau) le retrait continue à croître. Ainsi, il a constaté que le retrait des bétons de fibres de fontes est inférieur à celui du béton classique parce que la vitesse de la perte en poids (en eau) des bétons de fibres est plus grande que celle du béton classique. Il ajoute, qu'en effet, les fibres peuvent créer un chemin préférentiel pour le départ de l'eau. De ce fait, HOUARI [52] et VERBECK [96] révèlent que la fonction qui lie le retrait à la perte en poids d'eau dans les bétons peut prendre l'allure générale représentée par la figure 2-19. Sur cette figure il apparaît deux zones : Une zone OA avec une pente  $\alpha$  et une autre AB avec une pente  $\beta$ . VERBECK [96] précise dans ses résultats relatifs au retrait de la pâte pure, que dans la première zone le retrait est dû au départ de l'eau des capillaires et dans la deuxième zone le retrait est dû aux départ de l'eau des pores du béton.

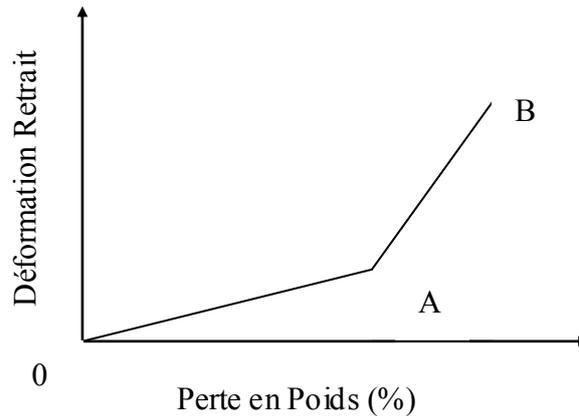


Figure 2-19 : Allure générale Retrait en fonction de la perte en poids [84]

Cependant, certains auteurs [96-100] précisent que cette diminution de retrait, pour les bétons de fibres, n'est pas automatique, mais elle dépend du type et du dosage de fibre ainsi que de la composition du béton et enfin du régime de conservation. A titre d'exemple les travaux de BARR et al. [100], relatifs au retrait des bétons de fibres métalliques conservés dans trois cures à savoir: dans une chambre contrôlée (HR=60±5%, T=23±2°C), à l'air libre (HR=77±8, T=23±7°C) et sur la terrasse du bâtiment (HR=71±8, T=25±7°C), montrent que dans toutes ces cures le béton de fibre d'acier dosé à 2% (en poids) avec une composition massique de: 1: 0.11: 2.12: 3.50: 0.65 (Ciment: Fumé de Silicate: Sable: Gravier: E/C), a un retrait inférieur à celui du béton sans fibre (avec la même composition) alors que le béton de fibre (2% en poids et sans fumé de silicate) avec la composition 1: 0.00: 2.00: 2.50: 0.65 a un retrait supérieur à celui du béton sans fibre. Cela est dû à l'absence de fumé de silicate et à l'augmentation du rapport E/C dans cette dernière composition. De plus, les mêmes auteurs constatent que les bétons de fibres conservés dans la chambre contrôlée ont présenté un retrait supérieur à celui des bétons conservés dans les deux autres types de cures. Nous pensons que cela est dû au fait que d'une part, l'humidité dans les cures (air libre ou terrasse) est supérieure à celle de la cure (chambre contrôlée), et d'autre part la température dans les deux premières cures n'est pas trop élevée.

Par ailleurs, une étude comparative du retrait entamé par RAMASWAMY et al. [19] a montré qu'après 60 jours de conservation à l'air libre, les bétons de fibres de jute et de coco (dosé à 1% en volume), ont présenté un retrait respectivement inférieur de l'ordre de 50 et 70% par rapport au béton classique. A noter qu'avant d'exposer les bétons à l'air libre, ceux-ci sont initialement conservés durant les premiers 21 jours dans une cure humide.

En outre, SOROKA [93] met en évidence que le retrait hydraulique des bétons classiques est souvent amplifié par les conditions climatiques chaudes et sèches, mais, il a constaté que dans ce climat, le renforcement des bétons par des fibres d'acier, de verre ou de polymère est efficace pour la réduction du retrait.

De même, ALEKRISH et ALSAYED [94] ont montré qu'en climat chaud et sec de l'Arabie Saoudite, le renforcement des bétons armés ordinaire par des fibres métalliques (1% en vol.) a permis de réduire leur retrait global de 30%, et cela après une durée de conservation de 200 jours.

En ce qui concerne la modélisation du retrait, dans la littérature, on trouve plusieurs modèles qui prédisent le retrait des bétons de fibres métalliques. A titre d'exemple, nous citons : Le modèle de MANGAT et AZARI 1984 et celui de YOUNG et CHERN 1991. Ces deux modèles prennent pour hypothèse les différences constatées entre les variations mesurées sur la matrice témoin et le composite qui sont dues à la seule action mécanique des fibres [52].

D'autre part nous citons aussi les modèles: ACI 209[101] et le modèle BP-KX[102]. Ces deux modèles donnent la même simulation de retrait pour les bétons ayant une résistance entre 30 à 40 MPa.

Pour le développement des modèles spécifiques pour le retrait des fibres végétales, nous pensons qu'il faut d'abord multiplier les travaux de recherches expérimentaux sur le retrait, et il faut aussi introduire d'autres hypothèses, du fait que le comportement des fibres végétales se distingue de celui des fibres d'acier, par la flexibilité et le grand pouvoir d'absorption d'eau.

Nous constatons que le retrait des bétons de fibres est aussi un axe de recherche intéressant, mais peu exploiter. Il est ainsi important d'intensifier les recherches sur ce sujet en vue d'élucider le retrait de ces bétons de fibres et de déterminer les facteurs qui influent sur ce retrait (le type de fibre, leur dosage, leur longueur, la composition du béton, les conditions de conservation ...). De sorte à rendre les fibres plus efficace dans la réduction du retrait des bétons de fibres, tout en développant de nouvelles méthodes pour la mesure du retrait par exemple les méthodes microscopiques (optique et électronique), les méthodes acoustiques (essais ultra sonique) et les méthodes électriques (résistivité).

Aussi, il est important de développer des nouvelles approches de modélisation basés sur des modèles physiques ou mathématique très avancés telle que la méthode des éléments finis.

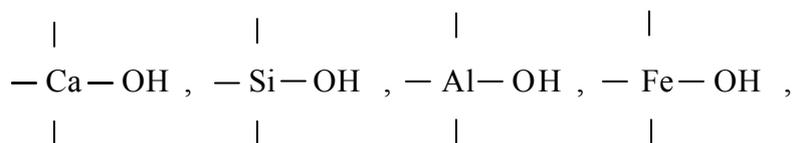
A ce titre les références bibliographiques [103-111] présentent des notions importantes concernant les méthodes et les modes de modélisation du retrait des bétons de fibres. .

## 2-5. Microstructure des bétons de fibres

Pour mieux comprendre le comportement mécanique, physique ou chimique des BF il est important de connaître leur microstructure. En effet, il est évident que les propriétés du BF dépendent directement de la nature, de la quantité des fibres et de la matrice du béton ainsi que de l'adhérence entre eux.

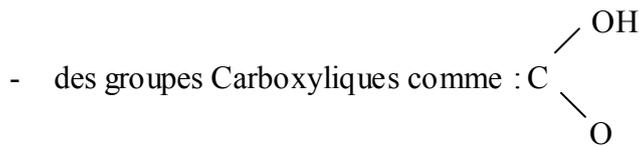
L'étude microstructurale des BF nous permet aussi d'élucider sa structure chimique, et de comprendre son comportement mécanique et son mode de rupture [11, 28, 55, 75, 90, 112-114].

Ainsi, les observations au microscope électroniques à balayage des surfaces de rupture des bétons de fibres de cellulose effectuées par KHENFER [11] ont montré que la liaison chimique entre les fibres et la matrice du ciment se justifie par la morphologie et la nature des constituants du composite, sachant que le ciment est un matériau fortement alcalin et contient des groupes d'hydroxydes de métal comme :



Alors que les fibres de cellulose comme toute fibre végétale contient :

- des groupes d'hydroxyde comme : 
$$\begin{array}{c}
 | \\
 - \text{C} - \text{OH} \\
 |
 \end{array}$$
- divers Phénoliques (provenant de la lignine résiduelle ou Alcooliques provenant de constituant de la cellulose



(Qui sont dus à l'oxydation de ces derniers groupes).

Les liaisons hydroxydes exercent une influence majeure sur l'adhérence dans ces matériaux.

KHENFER [11] conclut, qu'à l'état sec ou ambiant du matériau composite (matrice-fibre), les fibres sont liées à la matrice par plusieurs liaisons hydrogènes et hydroxydes. Le transfert du chargement aux fibres (après rupture de la matrice) passe par ces liaisons jusqu'à la fracture de la fibre. Cependant, dans le cas où le matériau est humide ou saturé, les liaisons hydrogènes entre fibres ou entre fibre-matrice seront détruites par l'insertion des molécules d'eau entre les groupes d'hydroxydes de la matrice, d'où une chute dans l'adhérence. A ce moment si les fibres se gonflent, des forces de friction seront développées, ce qui peut provoquer des fissurations.

Cette dernière constatation constitue un point fort pour les fibres végétales. En effet, dans un environnement humide, et contrairement aux fibres de verre et d'acier les fibres végétales sont poreuses et creuses donc par absorption elles permettent de réduire l'eau libre au voisinage de la matrice, ce qui augmente l'adhérence. De plus, les fibres de cellulose sont incompressibles, le risque de fissuration suite aux forces de frictions par gonflement est très minime. De ce fait, le pourcentage des vides à l'interface sera réduit et le composite sera homogène et résistant, et par conséquent, les fibres adhèrent bien à la matrice.

Cette dernière constatation est aussi révélée par TAIT et AKERS [112], qui affirment, qu'en fonction de l'âge, l'humidité n'a aucune influence significative sur le changement du mécanisme de rupture en flexion des bétons de fibres de cellulose et par conséquent sur sa résistance à la fissuration. Au contraire, l'humidité a beaucoup d'influence sur le changement du mécanisme de rupture en flexion des bétons de fibres synthétique polyvinyl alcool (PVA).

Cependant, BENTUR et AKERS [28] précisent dans leurs études, concernant les bétons des fibres de cellulose, que dans un environnement normal, à un jeune âge, la rupture du composite BF en flexion a lieu par arrachement des fibres, alors que pour un âge avancé la rupture vient plutôt par fracture des fibres ce qui explique l'évolution de l'adhérence. En effet,

ils constatent qu'au jeune âge les vides entre les fibres et la matrice à l'interface fibres-matrice sont présents ce qui diminue l'adhérence. Alors qu'en fonction de l'âge, ces vides seront progressivement remplis par les produits d'hydratation (la portlandite) ce qui augmente l'adhérence et donne une rupture par fracturation. Mais à long terme, ces produits d'hydratation d'origine alcaline vont attaquer les fibres de cellulose ce qui diminue leur durabilité et provoque une diminution dans la ductilité du composite.

Les observations de SAVASTANO et AGOPYAN [31] en zones d'interfaces fibres-matrice des bétons de fibres végétales (malva, sisal, coco), confirment les constatations de BENTUR et AKERS [28], en confirmant le remplissage progressif des vides par les produits d'hydratation.

Quant à l'influence de la longueur et de l'état de surface des fibres végétales sur le mode de rupture en flexion les observations effectuées par KHENFER [11,55] sur les bétons de fibres de cellulose montrent que l'augmentation de la longueur des fibres ainsi que le blanchissement permettent d'augmenter l'adhérence entre les fibres et la matrice en donnant un mode de rupture plutôt par fractures des fibres.

## **2-6. Durabilité des bétons de fibres**

La durabilité à long terme des BF est un problème inévitable qui se pose aux fabricants et aux utilisateurs. Elle dépend de la nature et du traitement des fibres [3,9-15,20-31, 114-117], de la qualité des ciments utilisés [10, 27, 117-120] ainsi que du mode de conservation [20-56, 121-123].

Plusieurs essais, effectués à long terme sur les résistances à la traction et à la flexion des bétons de fibres d'acier et de polymère, révèlent que ces types de bétons présentent une bonne durabilité dans les milieux secs ou humides. De plus, les fibres d'acier ou de polymère sont chimiquement inertes vis à vis des alcalis du ciment [9, 15, 56]. Cependant, la résistance en traction et au choc des bétons de fibres de verre diminue avec l'âge [9].

Par ailleurs, plusieurs chercheurs [10, 20, 28-31,57, 114-117, 120-122] ont montré que les performances mécaniques des bétons de fibres végétales en l'occurrence la résistance à la traction et à la flexion chute à long terme spécialement dans des environnements cycliques (sec/humide). Cette chute est due principalement à la cristallisation des fibres par les produits d'hydratation alcaline. En effet, avec le temps, la formation des produits d'hydratation alcalines autour des fibres et la pénétration d'une partie de ces produits dans leurs pores provoquent une dégradation dans la section des fibres et une diminution de leurs résistances et

de leur l'élasticité. De ce fait, les fibres deviennent moins résistantes et de plus en plus fragiles. Par la suite le BF deviendra faiblement résistant et moins ductile. A titre d'exemple les figures 2-18 et 2-20 montrent des exemples des travaux effectués par TOLÈDO FILHO et all. [29], concernant la durabilité des mortiers de fibres de sisal et noix de coco. Nous remarquons sur la figure 2-18 la chute de la charge de flexion en fonction d'âge, à long terme (180 et 322 jours). Tandis que sur la figure 2-20 nous constatons que le cycle mouillage-séchage influe défavorablement sur la résistance à la flexion de ces mortiers de fibres. Toutefois, les mortiers renforcés par les fibres longues et alignées (figures 2-20 (c) et (d)) ont présenté une durabilité relativement meilleure que celle des mortiers renforcés par les fibres courtes et aléatoires (figures 2-20 (a) et (b)) Cela confirme, que l'alignement des fibres améliore les performances mécaniques des mortiers ou bétons de fibres. Il est a rappeler que le mouillage est effectué dans l'eau à  $T= 18\text{ }^{\circ}\text{C}$  et le séchage est réalisé à l'air libre dans le laboratoire,  $T= 23^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR} = 40,1\%$ . De même nous constatons que l'augmentation des longueurs des fibres et leur alignement (composition M1S2S et M1C2S1) favorisent l'amélioration de la durabilité.

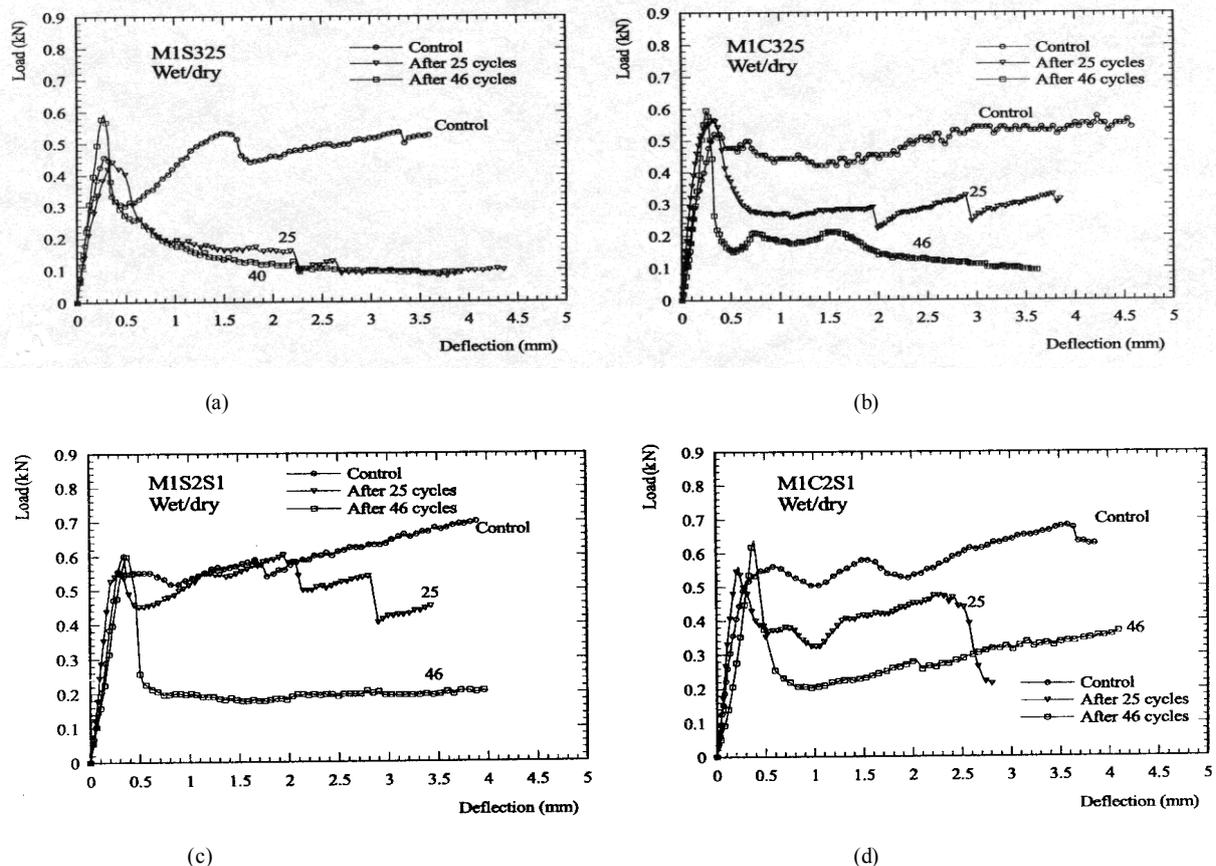


Figure 2-20: Effet de la cure cyclique (mouillage-séchage) sur la charge-flèche des mortiers de fibres de sisal et noix de coco [29].

Il est donc important de prendre ce problème de durabilité en charge et de trouver des solutions techniques pour y remédier. Ainsi, pour l'amélioration de la durabilité des bétons de fibres végétales, plusieurs chercheurs suggèrent un traitement séparé ou simultané des fibres ou de la matrice.

### **2-6-1. Le traitement de l'état de surface des fibres**

Les principales méthodes utilisées dans le traitement de l'état de surface des fibres sont :

- blanchissement par imprégnation des fibres dans des solutions chimiques comme le silicate de sodium. [11, 27, 122]
- imperméabilisation des fibres par des produits comme la résine ou le bitume protégeant ainsi la surface de ces dernières contre l'attaque des alcalis libérés par les ciments lors de l'hydratation [10-11, 20, 27].
- la combinaison des deux méthodes. Cette méthode a donné les résultats les plus satisfaisants [27].

En conclusion ces procédés offrent une bonne protection aux fibres mais elles augmentent le coût de leur exploitation [27].

### **2-6-2. Traitement de la matrice**

L'une des méthodes les plus utilisées est la réduction de l'alcalinité de la matrice. Cette solution est possible soit par :

- l'utilisation d'un ciment ayant une faible teneur en alcalis spécialement la chaux lors de sa réaction d'hydratation. Ainsi plusieurs chercheurs préconisent le remplacement d'une partie de CPA par l'ajout de laitier, de cendres volantes ou bien des produits pouzzolaniques. A titre d'exemple nous citons les travaux de [10, 27, 31, 117-120]. Cependant, seuls les produits à base de pouzzolane naturelle, tels que le métakaolin, ont contribué à l'amélioration de la durabilité [27, 29-30].
- la carbonatation de la matrice par le gaz carbonique. L'objectif de cette technique est de réduire le taux de chaux libérée lors des premiers jours d'hydratation [29-30, 123].
- la combinaison des deux méthodes

En conclusion, toutes ces méthodes visent l'augmentation de la durabilité des fibres végétales dans les milieux alcalins qui peuvent être utilisées séparément ou en combinaison. A titre d'exemple TOLEDO FILHO et al. [30] ont constaté qu'une combinaison entre les deux méthodes a nettement amélioré la durabilité des fibres dans la matrice.

Finalement une combinaison de traitement des fibres et de la matrice peut donner de meilleurs résultats sur la durabilité.

D'autres recommandations supplémentaires ont été proposées par d'autres chercheurs. C'est ainsi que LEWIS et al. [10] et AZIZ et al. [20], suggèrent la saturation des fibres végétales avant leur imperméabilisation par la colophane, le tannin ou l'huile végétale. Par ailleurs, NGALA et al. [123], proposent aussi l'utilisation d'additifs chimiques à caractère acide dans le malaxage des bétons pour réduire l'alcalinité des ciments. En outre, TOLEDO FILHO et al. [30] suggèrent la carbonatation de la matrice dans un environnement riche en gaz carbonique CO<sub>2</sub> durant le jeune âge (juste après le démoulage) et cela pour diminuer immédiatement l'alcalinité de la matrice.

En conclusion, bien que les problèmes de durabilité soient très complexes et nécessitent la multiplication des recherches pour l'améliorer, les solutions qui combinent le traitement simultané des fibres et de la matrice ont donné de bons résultats mais le coût de leur exploitation reste relativement élevé.

## **2-7. Domaine d'utilisation et Coût de production des BF**

Le béton de fibres est largement utilisé dans plusieurs types de constructions à usage d'habitation, d'hydraulique ou de travaux publics comme le montre le tableau 1-9 du chapitre 1, qui donne les domaines d'application par types de fibre. La combinaison de plusieurs types de fibres peut être utilisée pour des besoins particuliers.

Concernant le coût de production des BF, il est fonction du prix d'exploitation et de production des fibres utilisées. Ainsi, la valorisation des fibres naturelles locales diminuera d'une façon remarquable le coût de production.

## **2-8. Conclusion**

Le matériau composite BF est un matériau relativement nouveau dans le domaine de la construction. C'est vers les années 1900 qu'a eu lieu la première utilisation du béton de fibres

d'amiante. Les BF possèdent plusieurs avantages tels que une bonne résistance à la fissuration et à la traction, ainsi qu'une bonne ductilité. Par ailleurs, sa résistance à la compression est généralement inférieure à celle du béton classique. Mais, sa résistance à la compression peut être légèrement améliorée par une bonne orientation des fibres dans la matrice.

Par ailleurs, si la durabilité des BF de polymère et d'acier est acceptable, celle des BF de verre ou végétale ne l'est pas. En particulier les fibres végétales, sont fortement affectées par les alcalis de la matrice. En conséquence la résistance du composite BF chute avec le temps. Les recherches sont en cours pour améliorer la durabilité des fibres végétales vis à vis des alcalis par le traitement séparé ou simultané de la surface des fibres et de la matrice.

Dans la littérature spécialisée, il existe plusieurs lois qui modélisent le comportement des BF d'acier sous différents types de sollicitations, traction compression ou flexion. Ce n'était pas le cas pour les fibres végétales d'où la nécessité développer plus des lois qui interprètent le comportement des fibres végétales.

Actuellement, les types de fibres les plus utilisés dans le renforcement des bétons sont les fibres d'acier. Mais vu le problème de santé que présente les fibres d'amiante et le problème économique que présente la production des fibres d'acier, de verre ou de polymère, particulièrement pour les pays en voie de développement qui possèdent une grande richesse en fibres naturelles, l'avenir en terme de renforcement sera attribué aux fibres naturelles, ou bien à la limite aux fibres composite (polymère-végétales). Ainsi, il est tant d'orienter les axes de recherches vers la valorisation des fibres naturelles dans la construction d'une façon générale et dans le béton d'une façon particulière.

Dans le présent travail, nous allons utiliser un type de fibre naturelle local (fibre de palmier dattier) dans le béton, dans une région caractérisée par un climat chaud et sec. Dans un but de valoriser cette ressource naturelle et remédier aux problèmes de fissuration et de chute de performances mécaniques que rencontrent souvent le béton dans un tel climat.

## **Les Constituants des Bétons et Mortiers de Fibres de Palmier: Aspects Physico-Chimiques et Formulations**

### **3-1. Introduction**

Le béton de fibres végétales est un matériau composite relativement nouveau, se composant de deux matériaux non homogène à savoir le béton et les fibres végétales, ce qui rend sa caractérisation plus difficile. En effet, comme il a été montré au chapitre 2, hormis les conditions de conservation, les qualités fondamentales du béton de fibre (BF) sont largement marquées par divers facteurs tels que : la composition du BC, le dosage et les dimensions des fibres, le malaxage, la maniabilité, la mise en place du BF, la vibration, la dimension de l'échantillon ainsi que le mode et la vitesse de chargement.

En outre, le comportement de ce nouveau matériau composite est différent de celui de béton classique. Cela nécessite une amélioration des méthodes d'essais traditionnelles et le développement de nouveaux procédés d'expérimentation.

De ce fait, donner des détails des modes d'essais entrepris est très important pour avoir une bonne exploitation des résultats ainsi que pour une éventuelle comparaison de ces derniers avec d'autres essais déjà réalisés.

Cependant, il est important de noter que si, actuellement, il existe plusieurs normes relatives à la caractérisation du BC, et quelques normes relatives à la caractérisation des BF d'acier, il n'existe pratiquement aucune norme relative à la caractérisation des BF végétales, bien qu'il existe plusieurs travaux de recherches sur ce dernier. Il est ainsi nécessaire de penser à l'élaboration d'une norme propre au BF végétales pour normaliser les essais et faciliter la comparaison des résultats entre les chercheurs dans ce domaine.

Dans ce présent chapitre, seront exposées, les caractérisations des fibres végétales de palmier dattier, ainsi que les caractérisations des matériaux entrant dans la composition du béton à savoir le ciment et les granulats et enfin la composition des bétons et des mortiers de fibres. En outre, nous allons donner les modes opératoires des différents essais réalisés dans la partie expérimentale, dans un but de collaborer à la normalisation des essais.

## **3-2. Les fibres végétales de palmier dattier**

### **3-2-1. Introduction**

Le palmier dattier (*phonix dactylifera*) est l'un des palmiers les plus cultivé par l'homme. Il résiste aussi bien à la chaleur, à la sécheresse et au froid. Il se trouve généralement sur la bande aride afro-asiatique qui s'étend de l'Afrique du Nord au Moyen-Orient, plus précisément dans les Oasis du Sahara. Les phonix sont des palmiers dioïques, il existe donc des palmiers mâles et des palmiers femelles. Ces dernières donnent une multitude de variétés de dattes. [124-125].

L'Algérie possède plus de 800 variétés de palmiers dattiers dans ses Oasis. Parmi les variétés les plus connues nous mentionnons (en appellation locale), le Dokar (le palmier mâle), la Deglette Nour, Elghers et la Degla bida [126].

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant plusieurs types de fibres :

- fibres de bois par le broyage de son tronc
- fibres de feuille au niveau des pédoncules
- fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier
- fibres de surface autour de son tronc.

Cette étude s'intéresse aux fibres de surface. En effet, c'est le type de fibre le plus facile à exploiter.

Quatre types de fibres de surface sont testés. A savoir, les fibres de Dokar, de Daglette Nour, de Degla Bida et d'Elghers.

Les fibres de surface sont naturellement tissées. Elles sont formées par la superposition de trois plaques de treillis. Ces fibres sont extraites du tronc du palmier sous forme d'une plaque para rectangulaire de longueur 300-500 mm et de largeur 200-300 mm. Les photos 3-1 et 3-2 (Annexe) montrent une plaque typique des fibres de surface ainsi que quelques fibres séparées.

L'abréviation suivante (FSPD) : Fibre de Surface de Palmier Dattier sera utilisée dans ce chapitre et les chapitres qui suivent.

### **3-2-2. Traitement des fibres**

Les plaquettes de fibres sont séparées en fibres individuelles dans de l'eau, pour faciliter leur défilage. Les fibres individuelles sont bien lavées dans de l'eau pour enlever les impuretés et la couche de lignine qui entourent la fibre et qui gênent l'adhérence. Ensuite, elles sont coupées aux longueurs voulues.

### 3-2-3. Propriétés Physiques des fibres de surface de palmier dattier

Le tableau 3-1 et la figure 3-1 donnent les principales propriétés physiques des quatre types de fibres utilisées dans cette recherche.

La densité absolue a été mesurée au laboratoire URGC-Matériaux de l'INSA de Lyon à l'aide d'un porosimètre à mercure Micrometrics 9300. Ce dernier est muni de deux postes de dégazage et d'analyse basse pression et d'un poste haute pression pouvant atteindre 210 MPa.

La densité apparente est également mesurée au laboratoire URGC-Structures INSA de Lyon selon la norme européenne NF EN ISO 1973 [127], à l'aide d'une balance Mettler PM 200 ayant une précision de  $\pm 0.1$  %. Soixante fibres de longueurs 50 mm et de différents diamètres sont testées dans les conditions climatiques suivantes : température  $T= 20\pm 2^\circ\text{C}$  et humidité relative  $HR= 65\%\pm 2$ .

L'absorption d'eau est mesurée, au même laboratoire (URGC-Structures INSA de Lyon), comme le stipule la norme ASTM C 127/88 [128]. Pour cela soixante échantillons de fibres sous forme de treillis (plaquette 100x100 mm) de chaque type FSPD sont utilisés.

Tableau 3-1 : Principales propriétés physiques des FSPD (Dokar, Elgars, D-Nour et D-Bida).

Propriété	Maximum- Minimum	Moyenne-CV(%)
Diamètre (mm)	0.10-1.00	0.45-54.43
Densité Absolue ( $\text{kg/m}^3$ )	1300-1450	1383.33-5.52
Densité Apparente ( $\text{kg/m}^3$ )	512.21-1088.81	900-17.64
Teneur en eau naturelle (%)	9.50-10.00	10-5.00

Avec (CV) : Coefficient de variation

Nous constatons du tableau 3-1 que les quatre types de FSPD ont des propriétés physiques moyennes très voisines des résultats de la littérature relative aux fibres végétales [1, 8-11, 17-31]. D'autre part, la figure 3-1, montre que pratiquement, durant les premières cinq minutes, le taux d'absorption des deux types de fibres D-Nour et D-Bida dépasse celui de Dokar et Elghers. Tandis qu'après une heure et spécialement à la saturation (24 h), le taux d'absorption des quatre types de fibres est presque le même. A la saturation, en associant l'écart type, il apparaît que les fibres de Dokar et d'Elghers, ont un taux d'absorption relativement supérieur à celui des fibres de D-Nour et D-Bida. Cela est dû au fait que naturellement les treillis des fibres de Dokar ou d'Elghers contiennent un taux en grosses

fibres (diamètre supérieur à 0.4mm) supérieur à celui des fibres de D-Bida ou D-Nour. Ce qui augmente leur absorption, du fait que, le volume des pores augmente avec l'augmentation du diamètre des fibres. Cela explique aussi le fait qu'à court terme ( 5 min) l'absorption des fibres de D-Nour et D-Bida est plus élevée parce que, le fait d'avoir un pourcentage élevé en fibres de petit diamètre qui leur donne une absorption par capillarité plus grande. Comparativement avec les résultats de la littérature [29], le taux d'absorption des quatre fibres de FSPD se situe entre le taux relatif aux fibres de sisal (230%) et celui relatif aux fibres de coco (100%).

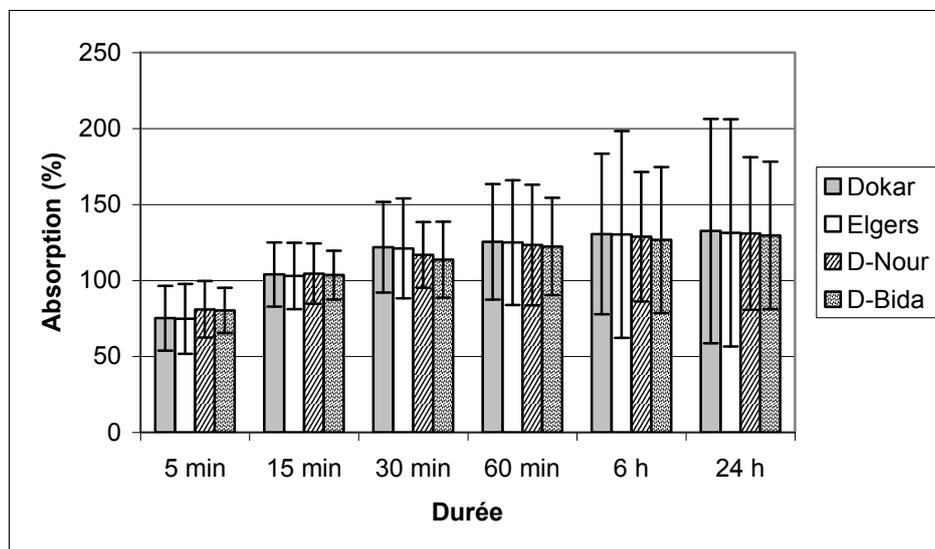


Figure 3-1 : Absorption moyenne d'eau des FSPD en fonction du temps d'immersion dans l'eau, en associant son écart type.

### 3-2-4. Propriétés Chimiques

La calcination, des quatre types de FSPD étudiés qui est réalisée dans un four à 400°C, a montré que ces fibres contiennent 77% de matières organique et 23% de matières minérales. Dans ce qui suit nous allons donner la proportion des matières organiques et des matières minérales pour la FSPD de Dokar.

### A/ Analyse des matières organiques

L'analyse des matières organiques des fibres de Dokar, au laboratoire de Biologie de l'Université de Ouargla, a donné les proportions de cellulose, d'hémicellulose et de Lignine illustrées sur le tableau 3-2. Nous constatons que ces fibres présentent des taux en cellulose et hémicellulose relativement faibles par rapport à celui des fibres de sisal. Par contre, les taux de cellulose et de lignine se rapprochent de celui des fibres de coco donné par la littérature [27, 31] (voir tableau 1-8 chap. 1). Rappelons que la cellulose est l'élément essentiel du point de vue résistance.

Tableau 3-2 : Les principaux constituants organiques des fibres de Dokar

Matière	Cendre	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Proportion (%)	1.2±0.3	43±2	8±2	35±5

### B/ Analyse des matières minérales

L'analyse de cendre de la fibre de Dokar, calciné à 400°C, par la technique ICP-AES au CNRS de Nancy, service d'analyse des Roches et des Minéraux a donné les résultats suivants : le pourcentage de chlore (Cl) est de 8630 ppm, le pourcentage de Soufre (S) est de 2.13 et le reste de la composition est illustrés sur le tableau 3-3. Nous rappelons que la cendre de fibres constitue 23% du poids des fibres.

Tableau 3-3 : Analyse minéralogique de la poudre de fibre de Dokar

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF	Total
%	48.04	6.12	2.51	0.05	4.88	14.21	1.81	2.8	0.42	0.45	18.08	99.37

Avec PF : Perte au Feu

Nous constatons que les fibres contiennent un taux remarquable de SiO<sub>2</sub> et de CaO. En parallèle, l'analyse des spectres DRX des cendres de trois types de fibres à savoir le Dokar, Elghers et D-Nour au centre de DRX à l'université de Lyon 1, donnée par les figures 3-2 à 3-4, montre que la composition minéralogique de ces trois types de fibres est plus ou moins différente. Cela est probablement dû à la différence des métabolismes de chaque fibre, sachant que les trois espèces de fibres sont plantées et se sont développées dans les mêmes conditions climatiques. Cependant, nous remarquons que toutes les trois contiennent des pourcentages relativement élevés en SiO<sub>2</sub> et en CaCO<sub>3</sub> (calcite). Le taux important de silice est sûrement dû à la pénétration de sable dans la structure et les pores des fibres, à cause des vents de sable dans des régions sahariennes.

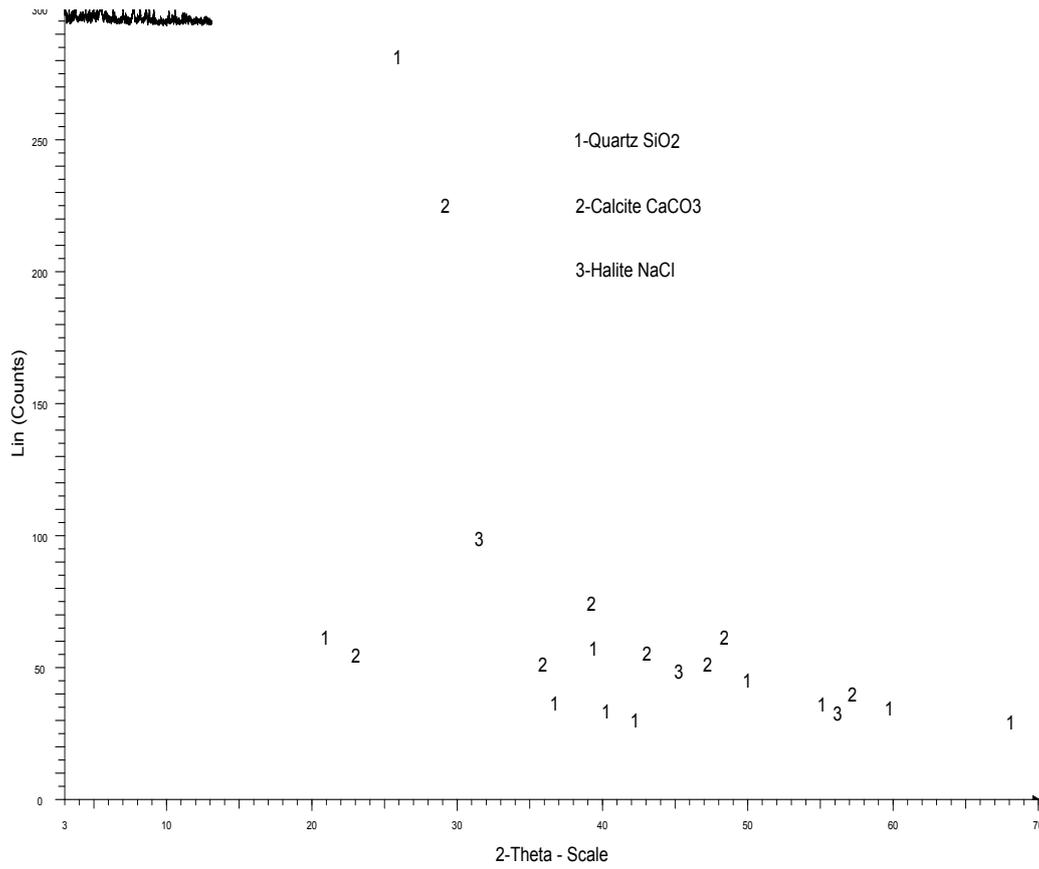


Figure 3-2 : DRX de cendre des Fibres de Dokar

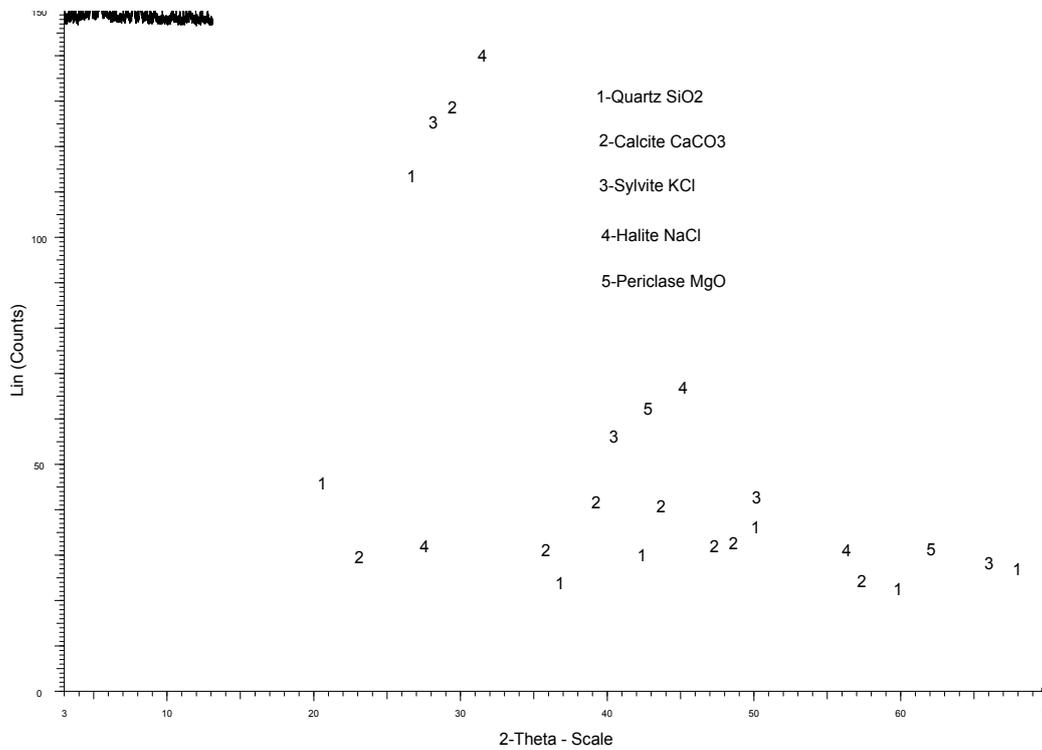


Figure 3-3 : DRX de cendre des fibres d'Elghers

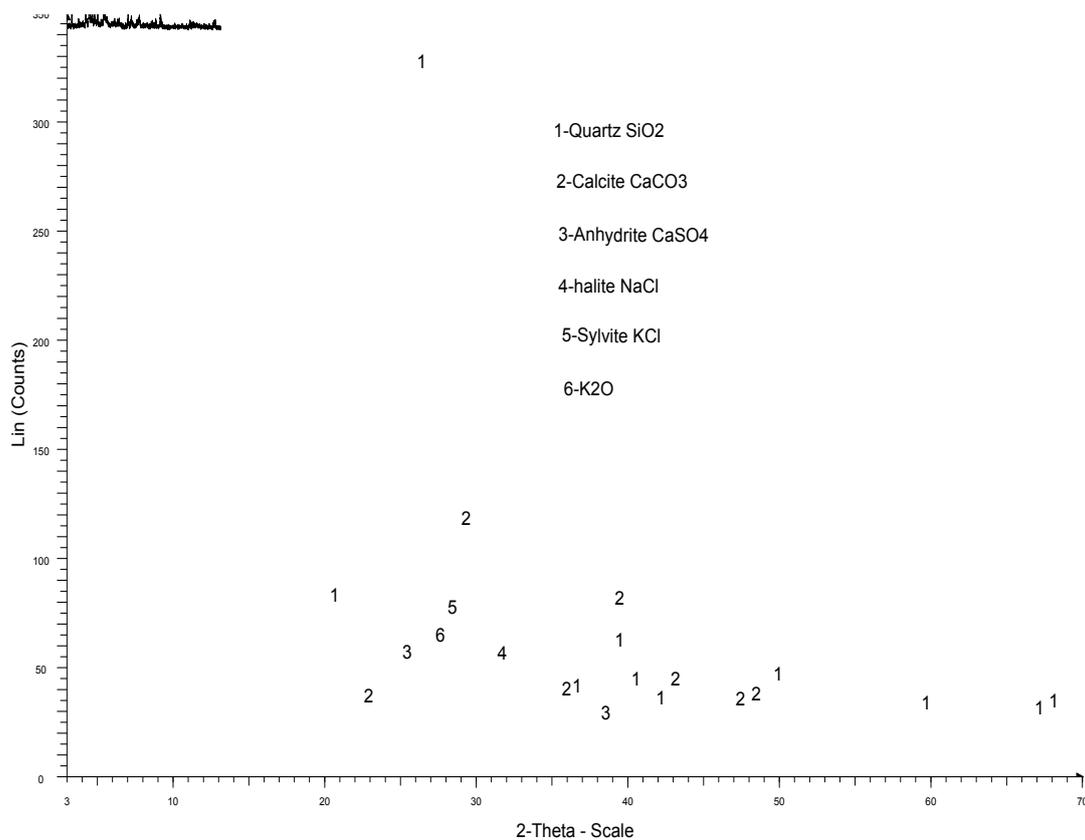


Figure 3-4 : DRX de cendre des fibres de Degletta Nour

### 3-2-5. Morphologie et structure interne des fibres

L'examen de la texture des différentes coupes internes des fibres a été réalisé à l'aide d'un microscope électronique à balayage MEB au Centre Microscopie Electronique de l'Université Claude Bernard Lyon 1, de marque HITACHI S.800 haute résolution.

Les échantillons, après fractionnement, sont collés sur des portoirs à l'aide d'une plaque d'argent conductrice puis métallisés par pulvérisation cathodique et recouverts d'une couche d'or de 20 à 30 nm par la technique d'observation en électrons secondaires. Dans ce type d'observation la tension d'accélération du faisceau est de 15 kV.

Dans ce qui suit nous allons présenter les textures, les coupe transversales et les coupes longitudinales typiques des quatre types de FSPD étudiés. Ainsi les figures 3-5 à 3-7 montrent respectivement des vues longitudinales générales, des coupes transversales et des coupes longitudinales des FSPD au MEB.

L'examen de la morphologie et de la structure interne des fibres représentées par les figures 3-5 à 3-7, montre que pratiquement les quatre types de FSPD étudiés ont une texture et une structure interne assez semblables. En effet, les quatre vues longitudinales typiques des

FSPD, (figures 3-5(a,b,c,d), montrent que la surface des fibres n'est pas lisse par contre elle possède des alvéoles qui lui permettent une bonne adhérence à la matrice. Par ailleurs, les différentes coupes transversales (figures 3-6(a,b,c,d,)) montrent que ces fibres ont une section poreuse, formée généralement par un à trois gros orifices qui forment les canaux centraux pour la circulation de l'eau et de plusieurs micropores, ce qui explique leur grand pouvoir hydrophile (absorption d'eau). En outre, les coupes longitudinales des ces fibres (figures 3-7(a,b,c,d), confirment que ces fibres sont creuses et montrent clairement la section centrale du canal et indiquent aussi que les filaments de ces fibres sont parallèles à la génératrice.

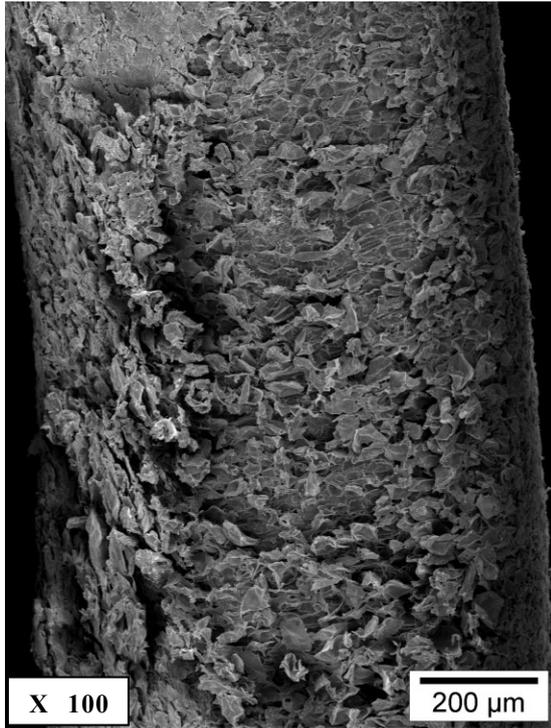
### 3-3 Propriété des Ciments

Selon les normes NA 442 [129] et NFP 15-301 [130], respectivement, trois types de ciments sont utilisés, à savoir le CPJ-CEM II/A 32.5, CPA-CEM I 52.5 et CHF-CEM III/B 32.5 et. Le tableau 3-4 donne la composition en % massique des trois ciments.

Tableau 3-4 : Constituants Principaux et Secondaires des Ciments (% en masse) [129-130]

Désignation	Notation	Constituants Principaux			Constituants Secondaire
		Clinker (K)	Laitier (S)	Autres Constituants D, Z, V, W, T, L	
Ciment Portland composé	CPJ-CEM II/A 32.5	80-94	21-35		0-5
Ciment Portland	CPA-CEM I 52.5	95-100	6-20		0-5
Ciment de Haut Fourneau	CHF-CEM III 32.5	20-34	66-80	--	0-5

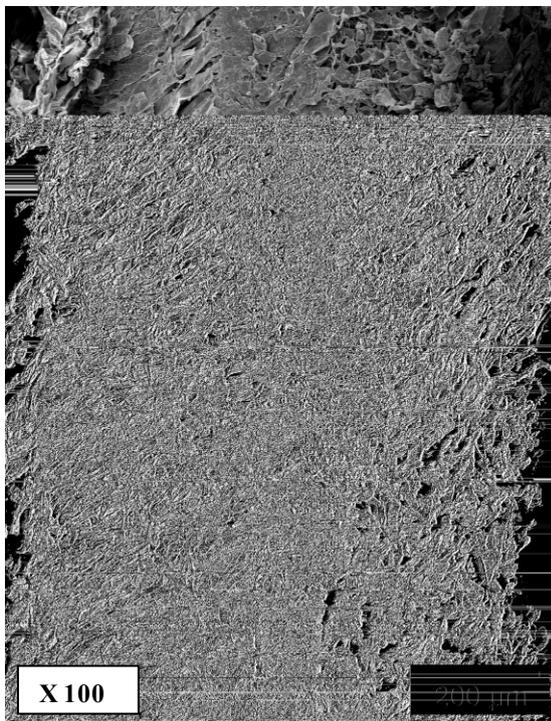
Avec la notation: Pouzzolanes (Z), Cendre volante Siliceuse (V), Cendre volante calcique (W), Schistes calcinés (T), Calcaire (L), Fumé de silice(D).



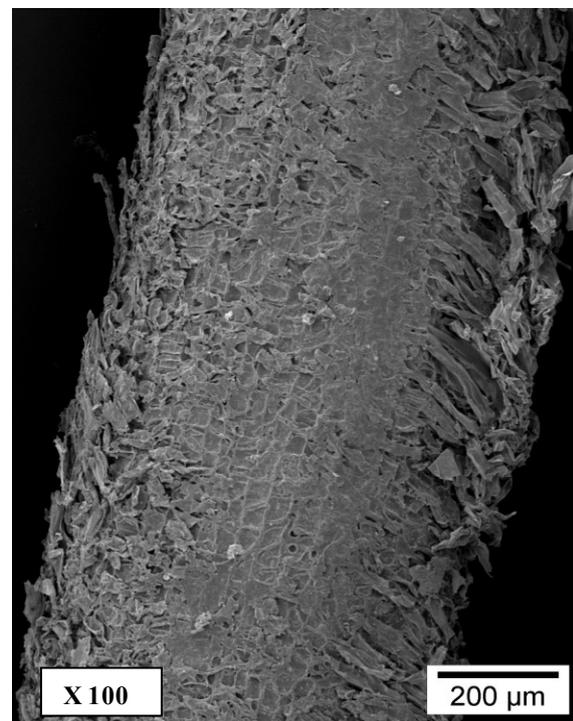
(a) : Dokar



(b): Elghers

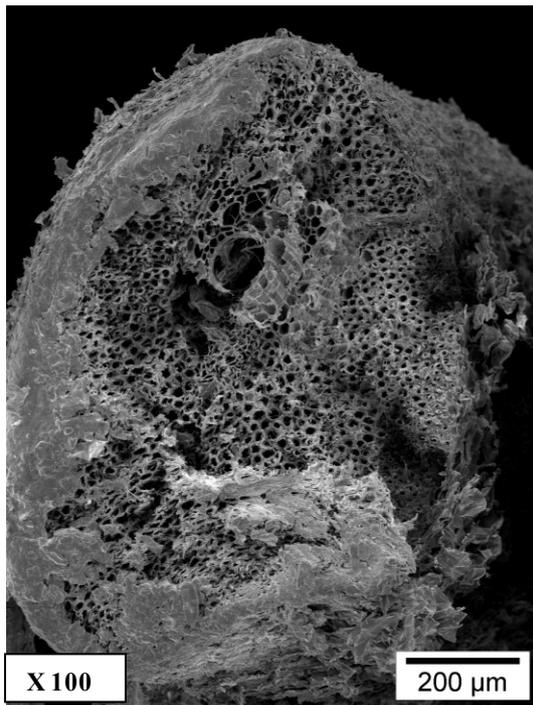


(c) : D-Nour

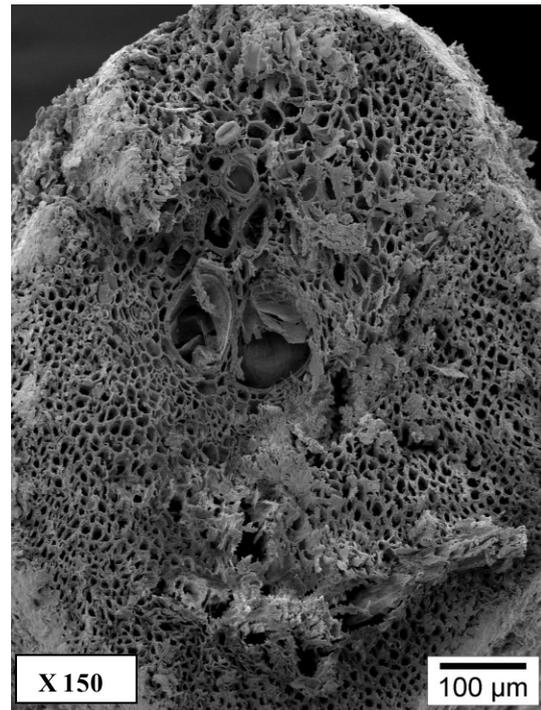


(d) : D-Bida

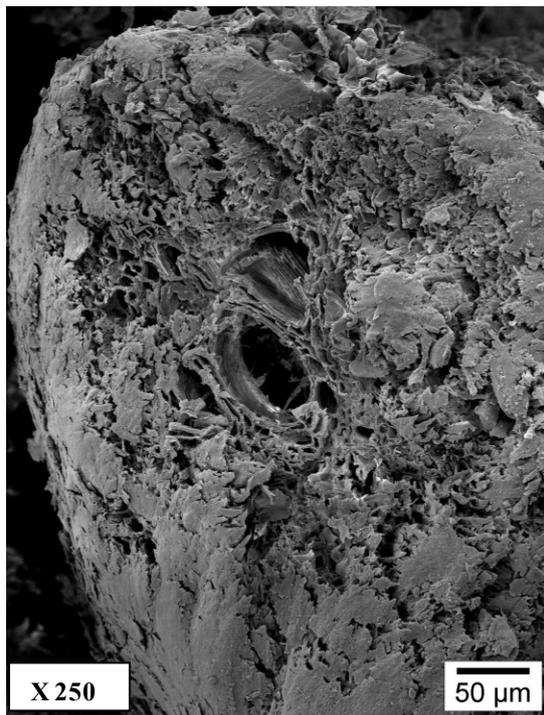
Figures 3-5(a,b,c,d) : Vue Longitudinale typique des FSPD au MEB



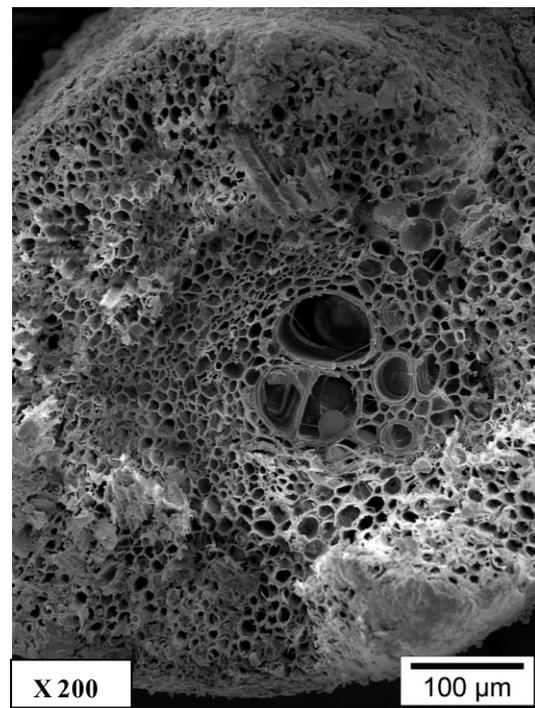
(a) : Dokar



(b) : Elghers

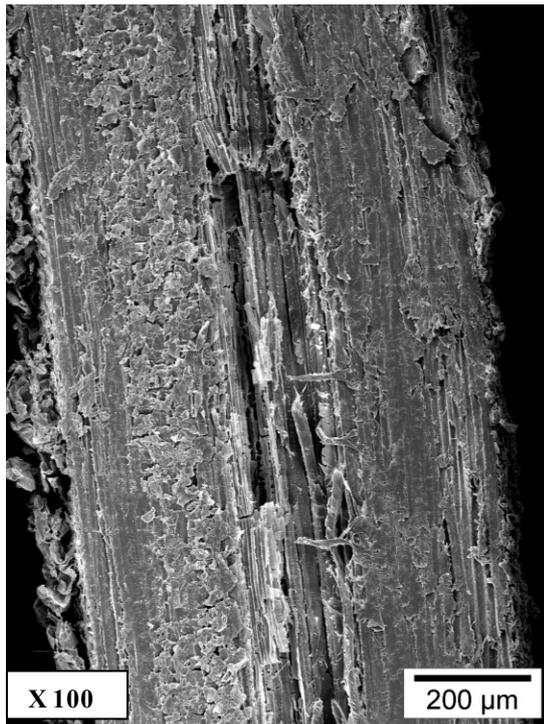


(c) : D-Nour

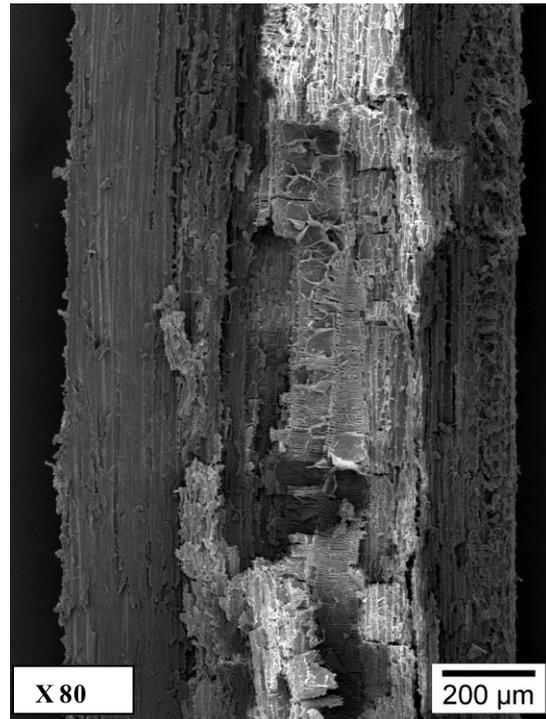


(d) : D-Bida

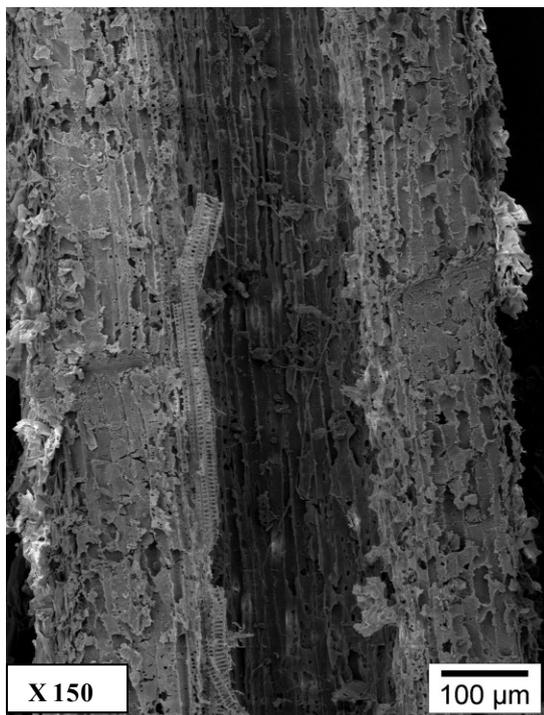
Figures 3-6(a,b,c,d) : Coupe Transversale typique des FSPD au MEB



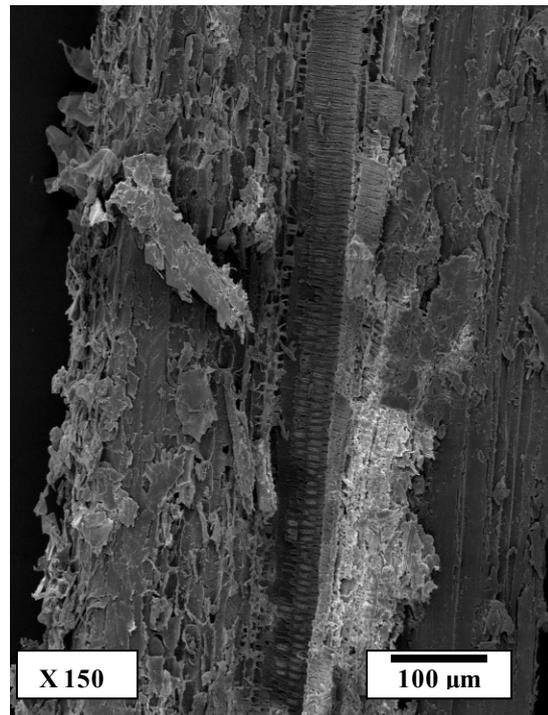
(a) : Dokar



(b) : Elghers



(c) : D-Nour



(d) : D-Bida

Figures 3-7(a,b,c,d) : Coupe longitudinale typique des FSPD au MEB

### 3-3-1 Composition Chimique des ciments

L'analyse chimique du ciment CPJ-CEM II/A 32.5 a été fournie par la cimenterie Aïn Touta, tandis que, l'analyse des ciments CPA-CEM I 52.5 et CHF-CEM III/B 32.5 a été réalisée par la technique ICP-AES au CNRS de Nancy, service d'analyse des Roches et des Minéraux. Les résultats d'analyse chimique sont illustrés sur le tableau 3-5.

Tableau 3-5 : Composition chimique des ciments utilisés en % massique.

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PF	Total
CPJ-CEM II/A	21.90	5.73	3.13	--	1.85	60.18	0.19	0.83	--	--	4.07	97.84
CPA-CEM I	20.29	4.60	2.98	0.04	1.66	65.24	0.30	0.99	0.27	0.07	2.80	99.24
CHF-CEM III/B	27.21	9.14	1.62	0.41	4.70	48.41	0.49	0.77	0.43	0.08	4.77	98.03

La teneur en SO<sub>3</sub> est respectivement de 2.22, 2.7 et de 3.04 pour les ciments CPJ-CEM II/A, CPA-CEM I et CHF-CEM III/B.

### 3-3-2 Composition minéralogique du clinker

Selon les normes NFP 15-301 [130], la composition chimique du clinker entrant dans la composition des ciments utilisés est donnée par le tableau 3-6.

Tableau 3-6 Composition minéralogique du clinker [130]

Elément	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
CPJ-CEM II/A	63.4	14.0	6.8	9.2
CPA-CEM I	63.4	14.0	6.8	9.2
CHF-CEM III/B	59.6	13.9	9.1	9.1

Remarque: ces compositions sont aussi vérifiées par la formule de BOGUE.

### 3-3-3. Propriétés physiques et mécaniques des ciments

Les principales propriétés physiques sont rassemblées sur le tableau 3-7.

Tableau 3-7 : Les principales propriétés physiques des ciment utilisés [129-130].

Propriété	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Début de prise (min)	Rc Minimale à 28jours (MPa)	Rc Moyenne à 28jours (MPa)
CPJ-CEM II/A (C1)	3.1	3859	175	32.5	43
CPA-CEM I (C2)	3.15	3700	200	52.5	59
CHF-CEM III/B (C3)	2.95	4550	270	32.5	48

Avec: Rc: Résistance à la Compression

### 3-4. Les Granulats et l'eau de gâchage

#### 3-4-1. Les Granulats

Le choix des granulats s'est porté sur les matériaux locaux disponibles. Leurs propriétés sont illustrées par les tableaux 3-8 et III-1 (annexe) ainsi que par la figure 3-8.

Tableau 3-8 : Propriétés des granulats utilisés

Propriétés	Type de granulat			
	Sable (S 1)	Sable (S 2)	Gravier (G 1)	Gravier (G2)
Nature	Naturel	Naturel	Concassé	Roulé
Provenance	Ouargla	Lyon	H-Messaoud	Lyon
Classe	0/5	0/5	5/16	5/10
D max (mm)	5	5	16	10
M <sub>f</sub>	2.70	2.76	-	-
ES (%)	88 (lavé)	propre	--	--
Masse volumique apparente. ( kg/m <sup>3</sup> )	1605	1600	1600	1610

D'après les résultats du module de finesse (Mf) les deux sables utilisés sont classés parmi les sables gros à granulométrie étalée et qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons ordinaires, parce que leur Mf est supérieur à 2.5 [131]. D'après l'équivalent de sable (ES) les deux sables conviennent pour les bétons de qualité.

La figure 3-8 donne les courbes d'analyse granulométrique des sables et graviers utilisés.

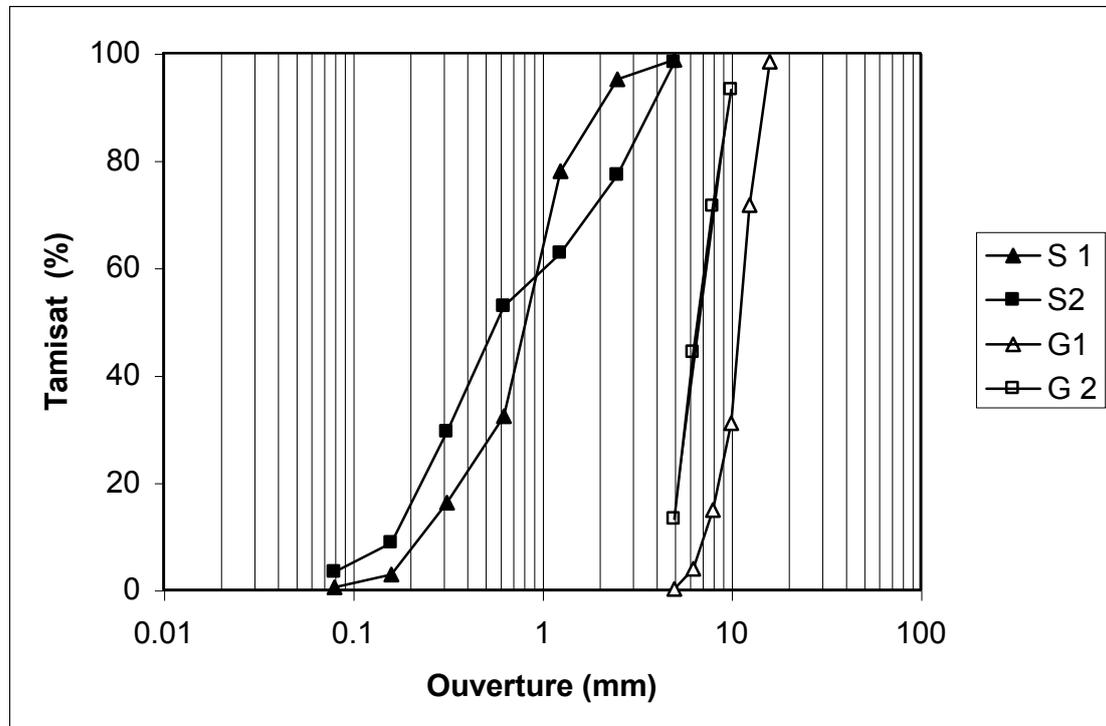


Figure 3-8 : Analyse granulométrique des granulats utilisés

### 3-4-1. Eau de gâchage

Suivant les lieux de préparation du béton ou du mortier, l'eau de gâchage utilisée est une eau potable de robinet.

## 3-5. Composition de Béton et de Mortier

### 3-5-1. Composition du Béton Classique

La méthode de composition du béton classique utilisée est celle de BARON-LESAGE [71] et GORISSE [72]. Pour un E/C minimal donné, ces méthodes visent l'optimisation du rapport S/G (Sable sur Gravier) pour obtenir une meilleure ouvrabilité. La composition du béton est déterminée selon les deux hypothèses suivantes de GORISSE [72]:

- Le poids du béton frais est de  $2350 \text{ kg/m}^3$
- La bonne ouvrabilité est obtenue pour un béton ayant un rapport  $K = S/G$  compris entre 0.58 et 0.83.

Ainsi, et selon la nature des matériaux deux compositions sont utilisées pour deux types de béton classique. A savoir :

- Béton Classique 1 (BC1) : Les matériaux utilisés sont le C1, S1, G1 (voir tableaux 3-7 et 3-8).
- Béton Classique 2 (BC2) : Les matériaux utilisés sont le C2, S2, G2 (voir tableaux 3-7 et 3-8).

Le rapport S/G est choisi de façon à obtenir une ouvrabilité normale ayant un affaissement au cône d'ABRAMS de  $70 \pm 10$  mm [132] avec un rapport E/C le plus petit possible. Le tableau 3-9 donne la variation de l'ouvrabilité en fonction du rapport S/G.

Tableau 3-9 : Affaissement du béton BC1 en fonction de S/G et E/C

Type de Béton	S/G	E/C			
		0.4	0.5	0.6	0.7
		Affaissement (mm)			
B 1	0.55	5	10	20	45
B 2	0.65	10	25	50	80
B3	0.75	10	30	70	90
B4	0.85	10	30	50	85

Ainsi, nous avons choisi le béton B3 avec un  $E/C = 0.6$  et  $S/G = 0.75$ . La composition du BC1 (pour  $1 \text{ m}^3$ ) est donc donnée par le tableau 3-10. Par ailleurs, pour la composition de BC2, nous avons gardé la même quantité de ciment, de sable et de gravier. Cependant, la quantité d'eau est choisie de sorte que l'affaissement du béton est de  $70 \pm 10$  mm.

Afin de réduire la quantité d'eau et par conséquent le rapport E/C à 0.55, nous avons utilisé un super plastifiant, le réducteur d'eau MEDAPLAS-SP de pH neutre et égal à 7 et de teneur en chlore faible ( $< 1 \text{ g/l}$ ). Le fabricant conseil de choisir un dosage de super plastifiant entre 0.5 et 1.5% du poids de ciment (pour le béton normal) [133]. Ainsi, un troisième béton classique BC3 est préparé avec les matériaux de base C1, S1, G1, et une quantité d'adjuvant égale à 0.5% du poids du ciment.

Le tableau 3-10 donne les compositions des trois bétons classiques utilisés. Les bétons BC1 et BC3 sont réalisés avec des graviers concassés, ils demandent plus d'eau pour obtenir une ouvrabilité ayant un affaissement de  $70 \pm 10$  mm.

Tableau 3-10 : Composition des bétons classiques

Type de béton	Ciment (kg)	Sable (kg)	Gravier (kg)	Eau (kg)	Adjuvant (kg)	Affaissement (mm)
BC1	400	750	1000	240	--	70±10
BC2	400	750	1000	200	--	70±10
BC3	400	750	1000	200	2	70±10

### 3-5-2. Composition des bétons de fibres

Pour la composition des bétons de fibres, nous avons opté pour la réalisation des bétons ayant des ouvrabilités moyennes normales, de sorte que l'affaissement au cône d'ABRAMS soit de  $70\pm 10$  [132] et le temps d'écoulement au VeBe test égal à  $20\pm 5$  s [134]. Les quantités de ciment et de sable au  $1\text{m}^3$  demeurent les mêmes que celles du béton classique. Le dosage en fibres varie en % volumique de 1% à 3%, par conséquent la quantité de gravier varie de telle sorte que la quantité pondérale de gravier plus fibres reste constante pour toutes les compositions. Cette dernière hypothèse est inspirée des méthodologies adoptées par ROSSI [59] concernant la composition des bétons de fibres métalliques.

Quant à la quantité d'eau, nous avons procédé de deux méthodes différentes : la première est inspirée de celle de SERNA-ROS, et la deuxième de celle de BARON-LESAGE.

#### 3-5-2-1. Première méthode

Elle s'inspire de la méthode de SERNA-ROS [67]. Pour travailler avec une ouvrabilité normale nous avons augmenté la quantité d'eau en fonction de l'augmentation du dosage en fibres, de sorte que la quantité d'eau réelle (quantité d'eau totale moins la quantité moyenne absorbée par les fibres) ne dépasse pas trop la quantité d'eau du béton classique correspondant. Les bétons confectionnés par cette méthode sont principalement destinés pour les conditions chaudes et sèches. En fait, nous voulons utiliser la quantité d'eau absorbée par les fibres comme une source d'humidité interne dans le béton qui assurera la continuité du processus d'hydratation. En effet, comme nous l'avons déjà montré les fibres de palmier possèdent un pouvoir d'absorption d'eau assez remarquable (132.5 % en poids en moyenne) et se comportent comme une éponge qui absorbe l'excédent l'eau dans le béton et le libère en cas de besoin.

### 3-5-2-2. Deuxième méthodes:

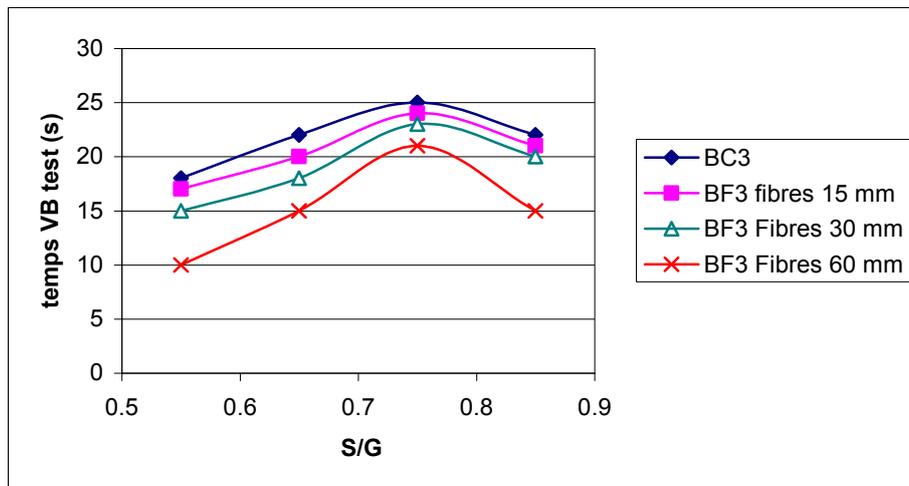
Cette dernière s'inspire de la méthode de BARON-LESAGE [71] qui a été adoptée par ROSSI [59] pour la confection des bétons de fibres métalliques. Elle consiste à optimiser l'ouvrabilité en fonction du rapport S/G, tout en travaillant avec un rapport E/C fixe. Pour notre cas, nous avons fixé les rapports E/C égal à celui utilisé pour le béton classique BC3. Cependant, pour pouvoir maintenir une maniabilité normale avec un VeBe de  $20 \pm 5$ , nous avons utilisé l'adjuvant MEDAPLAS-SP. La figure 3-9 (a, b et c) montre la variation de l'ouvrabilité (VeBe test) en fonction du rapport S/G. Nous constatons que le rapport S/G optimal est de 0.75.

Ainsi trois compositions de béton de fibres sont alors utilisées à savoir :

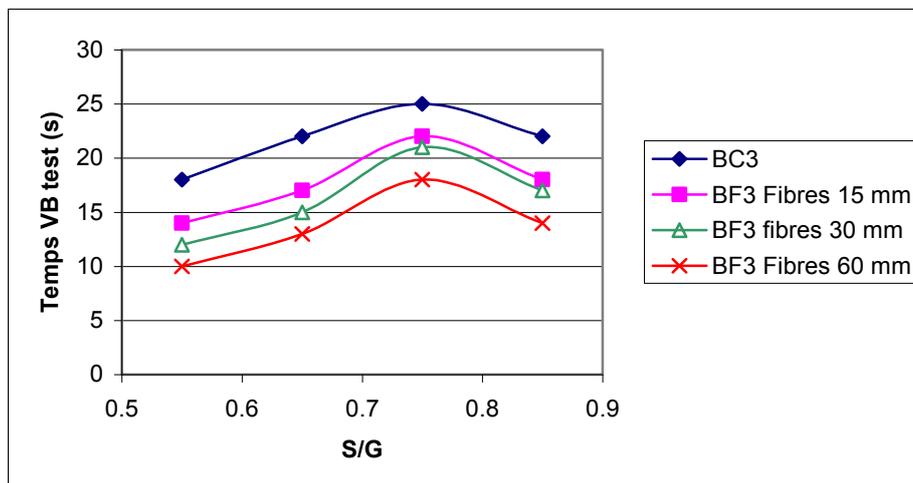
- Béton de Fibre 1 (BF1) : Les matériaux utilisés sont le C1, S1, G1 et les fibres de surface du palmier mâle. Ce béton est confectionné à Ouargla avec la première méthode.
- Béton de Fibre 2 (BF2) : Les matériaux utilisés sont le C2, S2, G2 et les fibres de surface du palmier mâle. Ce béton est confectionné à Lyon avec la première méthode.
- Béton de Fibres 3 (BF3) : Les matériaux utilisés sont le C1, S1, G1 et les fibres de surface du palmier mâle, plus l'adjuvant MEDAPLAS-SP. Ce béton est confectionné à Ouargla mais avec la deuxième méthode.

Le tableau 3-11 donne les compositions des trois bétons de fibres.

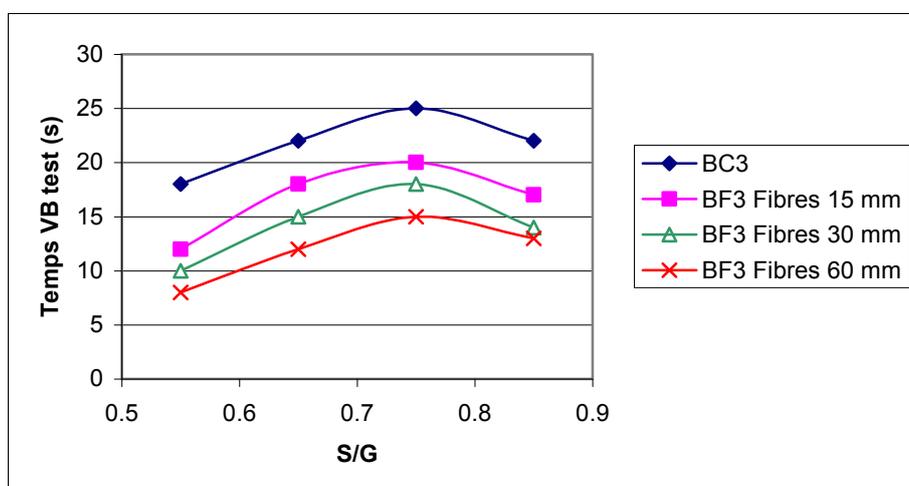
Nous constatons que les ouvrabilités des bétons de fibres BF1, BF2 et BF3 diminuent avec l'augmentation du pourcentage et des longueurs des fibres. En effet, l'augmentation du dosage et des longueurs des fibres dans le béton augmente la cohésion de la matrice, apportée par le réseau frottant des fibres. De plus, les fibres longues ont tendance à s'enchevêtrer ce qui empêche la masse de béton de s'écouler et diminue l'ouvrabilité. Cela explique l'augmentation de la quantité d'eau réelle et de la quantité de super plastifiant avec l'augmentation du dosage et des longueurs des fibres, pour maintenir une ouvrabilité normale.



(a) : volume des fibres égal 1%



(b) : volume des fibres égal 2%



(c) : volume des fibres égal 3%

Figure 3-9(a,b,c) : Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G

Tableau 3-11 : Composition des bétons de fibres pour un mètre cube

Type de béton	% de fibre en volume	Longueur de fibre en (mm)	Cim. (kg)	Sabl. (Kg)	Grav. (Kg)	Fibre (kg)	Eau Totale (kg)	Eau moy. Absorbée par les fibres (kg)	Eau Réelle (kg)	Adjuv. (kg)		
BF1 VeBe=20 ±5 s H <sub>af</sub> = 70±10	1	15	400	750	991	9	253	12	240	--		
		30					255		243			
		60					257		245			
	2	15			982	18	292	24	268			
		30			294		270					
		60			296		272					
	3	15			973	27	322	36	286			
		30					328		292			
		60					333		297			
BF2 VeBe=20 ±5 s H <sub>af</sub> = 70±10	1	15	400	750	991	9	212	12	200	--		
		30					213		201			
		60					216		202			
	2	15			982	18	252	24	228			
		30					254		230			
		60					260		236			
	3	15			973	27	280	36	244			
		30					284		248			
		60					288		252			
BF3 VeBe=20 ±5 s H <sub>af</sub> = 70±10	1	15	400	750	991	9	200	12	188	3.20		
		30							200	24	176	3.60
		60										4.00
	2	15			982	18	24	176				4.00
		30							4.40			
		60							4.80			
	3	15			973	27	36	164	4.80			
		30							5.30			
		60							5.80			

Avec: Eau réelle = Eau Totale – Eau moy. Absorbée par les fibres

De ce fait, la figure 3-10 donne la quantité d'eau qu'il faut ajouter pour maintenir une ouvrabilité constante, pour les bétons de fibres BF1 et BF2. Cette quantité d'eau à ajouter est calculée respectivement sur la base de celle des bétons classiques BC1 et BC2. Comparativement aux résultats de la littérature rapportés par COOK [17], les bétons de fibres de palmier demandent une quantité se rapprochant de celle des bétons de fibres de sisal comme indiqués par PERSSON et SKARENDAHL, cela confirme l'important pouvoir d'absorption d'eau par les fibres de palmier. Nous constatons aussi que l'ouvrabilité des bétons de fibres de palmier est largement influencée par l'augmentation du dosage en fibres

mais en revanche, elle est moins influencée par l'accroissement de leur longueur. Cela est dû au fait que ces fibres de palmier sont souples et flexibles. De ce fait, la longueur des fibres n'influe pas beaucoup sur l'ouvrabilité.

Par ailleurs, l'étude de l'ouvrabilité nous a montré que pratiquement le pourcentage maximum d'incorporation des fibres dans les bétons BF1, BF2 et BF3 est de 3%. Au-delà de ce pourcentage, pour maintenir une ouvrabilité moyenne constante, les bétons nécessitent une quantité importante d'eau, c'est le cas des BF1 et BF2 ou bien une quantité élevée en adjuvant, c'est le cas de BF3.

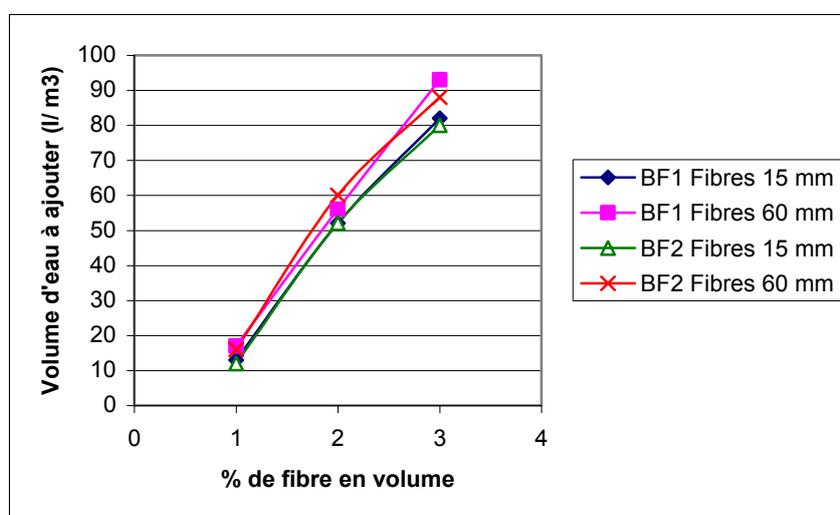


Figure 3-10 : Volume d'eau ( $l/m^3$ ) à ajouter au béton de fibres BF1 et BF2 pour maintenir l'ouvrabilité des bétons de fibres constante. Calculé respectivement sur la base des volumes d'eau des bétons BC 1 et BC 2

### 3-5-3. Malaxage des bétons de fibre de palmier

Le malaxage des deux bétons BF1 et BF3 ont été effectués dans un malaxeur à axe horizontal, de type « Zyklos » de capacité 150 l à l'université de Ouargla, alors que le béton BF2 a été confectionné dans un malaxeur « SED » de capacité 100 l à l'INSA de Lyon. La démarche de malaxage a été effectuée comme suit :

Malaxer les agrégats avec 30% d'eau de gâchage durant 30 s. Par la suite introduire progressivement les fibres humides en ajoutant encore 30% de l'eau de gâchage et cela durant 3 min. Il est à noter que les fibres sont initialement imbibées dans 10 % de l'eau de gâchage durant 5 min, avant leur incorporation dans la composition des bétons. A ce stade le taux de saturation des fibres est d'environ 56%. Cette démarche permet d'une part, d'empêcher les

fibres d'absorber brusquement une très grande partie de l'eau de gâchage ce qui gênerait l'opération de malaxage et d'autre part, elle permet de faciliter la séparation des fibres dans le but d'éviter leur groupement. Enfin ajouter le ciment et le reste de l'eau en continuant le malaxage durant 2.5 min.

Pour le béton BF3, l'adjuvant est mélangé au préalable dans la totalité de l'eau de gâchage. Ensuite nous avons procédé de la même manière que pour les deux précédents bétons de fibres.

#### **3-5-4. Composition du mortier classique**

Le mortier classique utilisé est un mortier normalisé. La confection et le malaxage sont effectués selon les normes EN 196-1 [136]. La composition massique d'un moule constitué de trois fois 40x40x160 mm :

- 03 parties de Sable normalisé (1350 g)
- 01 partie de Ciment (450g)
- 0.5 partie d'Eau (225g)

Ainsi, et selon la nature des matériaux entrant dans leur composition, deux types de mortier classique sont utilisés : à savoir :

- le mortier Classique 1 (MC1) : Les matériaux utilisés sont le C2, S2 (tableaux 3-7 et 3-8).
- Le mortier Classique 2 (MC2) : Les matériaux utilisés sont le C3, S2 (tableaux 3-7 et 3-8).

Par ailleurs, les deux compositions ont la même ouvrabilité, avec un temps d'écoulement du maniabilimètre pour mortier de 5 s.

#### **3-5-5. Composition du mortier de fibre**

Pour la composition des mortiers de fibre, nous avons adopté les mêmes démarches que celles suivies pour les bétons de fibres (première méthode). De ce fait, nous avons opté pour la confection de mortiers de fibres ayant une ouvrabilité constante avec un temps d'écoulement au maniabilimètre pour mortier de  $8 \pm 2$  s [136]. Pour cela, nous avons fait varier le rapport E/C.

Par ailleurs, la masse de ciment est maintenue constante, alors que le dosage en (volume) fibres varie de 1% à 3% pour les fibres de longueur 60mm et de 1% à 6% pour les fibres de 15 mm. La quantité de sable varie de sorte que la quantité totale en poids de fibres plus sable demeure constante pour toutes les compositions.

Deux compositions de mortier de fibres sont utilisées, à savoir :

- le mortier de Fibre 1 (MF1) : Les matériaux utilisés seront le C2, S2, et les fibres de surface du palmier mâle.
- Le mortier de fibre 2 (MF2) : Les matériaux utilisés seront le C3, S2, et les fibres de surface du palmier mâle.

Il est à noter que du point de vue ouvrabilité le pourcentage d'incorporation maximal des fibres dans le mortier est de 6% et 3% respectivement pour les fibres de longueur 15 et 60 mm.

Le tableau 3-12 donne les compositions des deux mortiers de fibres par moule. De même la figure 3-11 donne la quantité d'eau ajoutée pour maintenir l'ouvrabilité des mortiers constante. Elle nous permet par ailleurs de constater que l'ouvrabilité des mortiers de fibres est influencée par l'augmentation du dosage et par l'augmentation de la longueur des fibres. En comparaison avec le béton de fibre (figure 3-10) nous remarquons que l'ouvrabilité des mortiers de fibres est plus affectée par l'augmentation des longueurs des fibres que les bétons de fibres. Nous pensons que cela est dû aux petites dimensions de maniabilimètre à mortier utilisé. Les mortiers renforcés par des fibres de 60 mm sont donc plus gênés par les effets de paroi.

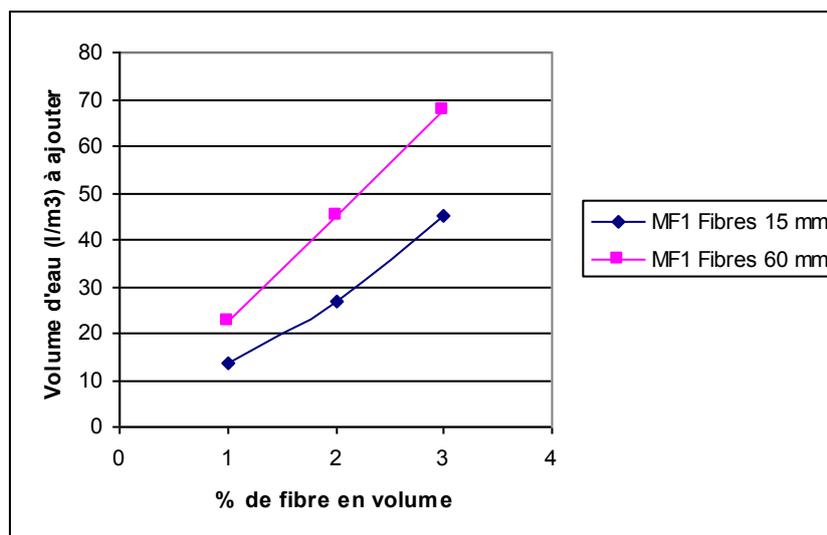


Figure 3-11: volume d'eau ( $l/m^3$ ) à ajouter pour maintenir l'ouvrabilité des mortiers de fibre constante. Calculé sur la base du volume d'eau du mortier classique.

Tableau 3-12 Les compositions des deux mortiers de fibres de palmier par moule

Type de Mortier	% en vol. de fibres	Longueur de fibre (mm)	Ciment (g)	Sable (g)	Fibre (g)	Eau Totale (g)	Temps d'écoulement (s)		
MF1	1.00	15.00	450.00	1343.09	6.91	238.50	8±2		
		60.00				247.50			
	2.00	15.00		1336.18	13.82	252.00			
		60.00		270.00					
	3.00	15.00		1329.63	20.37	270.00			
		60.00		292.50					
6.00	15.00	1308.54		41.46	301.50				
MF2	1.00	15.00		450.00	1343.09	6.91		238.50	8±2
		60.00						247.50	
	2.00	15.00			1336.18	13.82		252.00	
		60.00			270.00				
	3.00	15.00			1329.63	20.37		270.00	
		60.00	292.50						

### 3-5-6. Malaxage du mortier de fibre

Pour le malaxage du mortier de fibre, nous avons suivi la même méthode de malaxage du béton de fibre.

## 3-6. Préparation et conditions de conservation des éprouvettes

### 3-6-1. Eprouvettes de béton

Après l'opération de malaxage, vient l'opération de remplissage et de vibration des moules. Ainsi, selon les normes NFP 18-409 [141], les moules sont remplis en deux couches suivies d'une vibration à la table vibrante à béton de 30 s pour chaque couche. Après finition, les moules sont recouverts d'une toile en plastique et conservés dans les conditions de laboratoire ( $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$  et une humidité relative (HR) de  $65 \pm 5\%$ ) durant 24 h. Après l'opération de démoulage, les éprouvettes de béton sont conservées dans différentes cures jusqu'à la date de leur écrasement.

Selon le type d'essai quatre principales cures sont utilisées à savoir :

- CE : Conservation continue dans l'eau à une température de  $20 \pm 2$  °C
- CA : Conservation continue à l'air libre. Les conditions climatiques de cette cure sont données sur le tableau 3-13.
- CU : Conservation continue dans une étuve. Les conditions climatiques sont  $T = 32 \pm 2$ °C et  $HR = 28\% \pm 2$ , cette cure est utilisée pour simuler les conditions climatiques moyennes la cure CA.
- CE14 : Conservation durant les 14 premiers jours dans une chambre humide et saturé sous des conditions climatique de  $T = 20 \pm 2$ °C et  $HR = 100\%$ .

Les bétons sont désormais désignés comme suit :

- **Béton C-N%-L** : Où
  - o C : est le type de conservation,
  - o N : est le dosage des fibres en pourcentage volumique
  - o L : est la longueur des fibres.

A titre d'exemple :

- Béton CE-0%-0 : C'est le béton sans fibre conservé dans l'eau
- Béton CA-1%-60 : C'est le béton dosé à 1% de fibres de longueur 60 mm et conservé dans l'air libre.
- Béton CE14-CU-2%-15 : c'est le béton dosé à 2% de fibres de longueur 15 mm et conservé les 14 premiers jours dans l'eau ensuite dans l'étuve dans les conditions  $T = 32 \pm 2$ °C et  $HR = 28\% \pm 2$ .
- Béton CE14-CA 3%-60 : c'est le béton dosé à 3% de fibres de longueur 60 mm et conservé les 14 premiers jours dans l'eau ensuite à l'air libre dans les conditions climatique données par le tableau 3-13.

Table 3-13 : Données climatiques moyennes de la région de Ouargla [ANRH Ouargla 2001]

	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
$T_{max}$ (°C)	39.8	43.2	42.2	37.6	30.7	23.6
T (°C)	31.5	34.3	33.6	29.8	23.4	16.6
$T_{min}$ (°C)	23.2	25.3	25.0	22.0	16.0	9.6
HR (%)	28.5	24.4	26.4	34.4	47.6	56.5
VV (Km/h)	16.02	13.43	10.80	10.33	08.86	08.06

- Avec: -  $T_{\max}$ : Température Maximale
- T: Température moyenne
  - $T_{\min}$ : Température Minimale
  - HR: Humidité relative
  - VV: Vitesse du vent
    - o ANRH: Agence nationale des ressources hydrauliques

### 3-6-2. Eprouvettes de Mortier

La préparation des éprouvettes de mortier est effectuée selon les normes EN 196-1 [136]. Les moules (40x40x160 mm) sont remplis en deux parties, chacune des parties est vibrée durant 30 s à la table au choc pour mortier. Une fois le remplissage accompli, les moules sont recouverts d'une toile en plastique et conservés dans les conditions de laboratoire ( $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  HR =  $65 \pm 5\%$ ) durant 24 h. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans différentes cures jusqu'à la date de réalisation des essais. Les mêmes types de cures que ceux du béton sont utilisés. C'est à dire CE, CU et CE14-CU avec aussi CE7-CU. Cette dernière signifie : conservation durant les 07 premiers jours dans une chambre humide et saturé sous des conditions climatiques de  $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  et HR = 100% ensuite dans l'étuve sous les condition  $T = 32 \pm 2^{\circ}\text{C}$  et HR =  $28\% \pm 2$ . Pour la désignation des mortiers nous avons conservé les mêmes abréviations que celle utilisée pour les bétons. A titre d'exemple l'abréviation : Mortier CE 2%-15, signifie un mortier dosé à 2% en fibres de longueur 15 mm et conservé dans l'eau.

### 3-7. Conclusion

En conclusion sur les propriétés physico-chimique des quatre fibres de surface du palmier dattier (le Dokar, la Deglette Nour, Elghers et la Degla bida), nous constatons que ces fibres ont un pouvoir d'absorption d'eau assez élevé suite à leurs structures poreuses (123.5% en moyenne). En effet, les observations microscopiques au MEB montrent que ces fibres possèdent plusieurs pores. Leur surface n'est pas lisse et possède plusieurs alvéoles qui permettent une bonne adhérence avec la matrice. Par ailleurs, l'analyse biologique montre que ces fibres contiennent un pourcentage en cellulose et hémicellulose relativement faibles par rapport à la fibre de sisal. Rappelons que la cellulose est l'élément responsable de la

résistance. Enfin, leur analyse minéralogique révèle que ces fibres contiennent un pourcentage relativement élevé en  $\text{SiO}_2$  et en  $\text{CaCO}_3$  (calcite).

Trois types de ciments sont utilisés dans cette étude à savoir le CPJ-CEM II/A 32.5, CPA-CEM I 52.5 et CHF-CEM III/B 32.5.

Les deux sables locaux utilisés sont originaires de Hassi Sayah (Ouargla) et de Lyon, ils sont propres et ont une granulométrie étalée qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons ordinaires.

Les deux graviers locaux utilisés sont propres et originaires de Haoud El Hamra (Ouargla) et de Lyon.

L'eau de gâchage utilisée est l'eau potable du robinet.

En ce qui concerne la composition des bétons de fibres, nous constatons que la méthode de formulation des bétons de fibres végétales du palmier dattier diffère de celle utilisée pour la formulation des bétons de fibres métalliques du fait que, les fibres végétales sont flexibles et absorbent une grande quantité d'eau. De ce fait, nous avons utilisé deux méthodes qui se basent sur l'optimisation de l'ouvrabilité en fonction du rapport S/G. Ainsi :

- Dans la première démarche, nous avons adopté la composition du béton classique donnée par la méthode de BARON-LESAGE [58] et GORISSE [59]. Pour le béton de fibres nous avons utilisé une méthode inspirée de la méthode de SERNA-ROS, avec l'augmentation de la quantité d'eau en fonction de l'augmentation du dosage des fibres. La quantité d'eau ajoutée est égale ou légèrement supérieure à la quantité moyenne d'eau susceptible d'être absorbée par les fibres. Ces bétons sont destinés spécialement pour les conditions chaudes et sèches. En effet, nous visons à utiliser cette quantité d'eau qui est absorbée par les fibres comme une source d'humidité interne dans le béton qui assurera la continuité du processus d'hydratation.
- Dans la deuxième démarche, nous avons suivi la méthode de BARON-LESAGE [71] qui a été adoptée par ROSSI [72] pour la confection des bétons de fibres métalliques. Tout en travaillant avec un rapport E/C fixe. Pour notre cas, nous avons fixé le rapport E/C égal à celui utilisé pour le béton classique BC3. Cependant, pour pouvoir maintenir les rapports E/C et S/G fixes et égaux à celui du béton BC3, nous avons utilisé un super plastifiant le MEDAPLAS-SP à pH neutre égale à 7 et de teneur en chlore faible.

Le dosage volumique en fibres dans les bétons varie de 1% à 3%, et la longueur des fibres varie de 15 mm à 60 mm. En fait, nous avons constaté que l'ouvrabilité des bétons ou des mortiers diminue avec l'augmentation des dosages et des longueurs de fibres.

En outre, l'étude de l'ouvrabilité a montré que le pourcentage d'incorporation maximale en fibres pour les bétons est de 3%. Au-delà de ce pourcentage les bétons demandent une quantité énorme d'eau ou bien une quantité élevée en adjuvant et cela pour maintenir une ouvrabilité moyenne constante.

Le mortier de fibres utilisé a été confectionné en utilisant une méthode similaire à la première démarche suivie pour la confection des bétons de fibres. Le pourcentage en volume des fibres varie de 1% à 6%, et les longueurs varient de 15mm à 60 mm.

Les principales cures utilisées sont: une Conservation continue dans l'eau à une température de  $20 \pm 2$  °C (CE), une conservation continue à l'air libre (CA) dans un environnement chaud et sec, une conservation continue dans une étuve (CU) dans des conditions  $T = 32 \pm 2$ °C et  $HR = 28\% \pm 2$ , une conservation durant les 14 premiers jours dans une chambre humide ( $T = 20 \pm 2$  °C et  $HR = 100\%$ ) ensuite dans l'étuve et enfin une conservation durant les 7 premiers jours dans une chambre humide ensuite dans l'étuve.

Ce chapitre donne ainsi les caractéristiques physico-chimiques des matériaux entrant dans la composition des bétons et des mortiers de fibres de palmier dattier.

En outre, ce chapitre met en évidence les aspects technologiques liés à la confection des bétons et des mortiers de fibres. L'incorporation de ces fibres dans la matrice cimentaire présente des problèmes vis-à-vis de l'ouvrabilité, qu'on a résolu d'une part en ajoutant de l'eau, d'autre part en ajoutant un adjuvant un Super plastifiant SP MEDAPLAST.

## **Propriétés physico mécaniques des bétons et mortiers renforcés par les fibres de palmier dattier**

### **4-1. Introduction**

Les propriétés mécaniques des bétons et mortiers de fibres végétales sont largement affectées par les propriétés, le dosage et les longueurs des fibres de renforcement, ainsi que par la composition et la qualité des phases constituantes et enfin par les modes de conservation en cure. Les fibres sont généralement utilisées pour améliorer la résistance du composite.

Nous rappelons que le renforcement des bétons ou mortiers par les fibres de palmier dattier est un axe de recherche nouveau. De ce fait, nous allons dans la première partie de ce chapitre examiner les propriétés mécaniques de quatre types de fibres de surface de palmier dattier à savoir les fibres de Dokar, d'Elgers, de Deglette Nour et de Degla Bida (appellation locale). La deuxième partie est consacrée aux propriétés physico-mécaniques du béton et mortier renforcé par ces fibres, conservés dans deux types de cure: dans l'eau et en environnement chaud et sec. Dans ce chapitre seront aussi donnés les interprétations des résultats expérimentaux ainsi que leur comparaison avec les résultats des références.

### **4-2. Propriétés Mécaniques des fibres de palmier**

Les principales propriétés mécaniques des fibres de surface de palmier dattier (FSPD), à savoir la résistance à la traction, l'allongement à la rupture et le module d'élasticité sont déterminés selon les normes NF EN ISO 5079 [137], dans les conditions climatiques :  $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}=65\pm 2\%$ .

La machine de traction universelle utilisée est de type INSTRON (voir Photo 4-1 de l'Annexe). Cette machine est équipée d'un capteur de charge de 250 N et deux capteurs de déplacement LVTD, la vitesse de chargement a été de 0.5 mm/min. La machine est aussi équipée par un système d'acquisition automatique relié à un ordinateur qui permet de tracer la courbe contrainte/déformation. Le dispositif de fixation de la fibre à la machine de traction est donné par la Photo 4-2 (voir Annexe), ce dispositif est conçu et fabriqué au laboratoire URGC-Structures de l'INSA de Lyon. Les longueurs des l'échantillons de fibres sont de 20, 60 et 100 mm.

Les fibres sont testées à l'état naturel sec et à l'état humide saturé. Pour chaque type d'essai trente échantillons de fibres sont utilisés. Rappelons que la résistance à la traction des fibres est donnée par l'équation (4-1) suivant:

$$\sigma_{fi} = \frac{F}{S} \quad (4-1)$$

Avec: - F: charge maximale enregistrée par la machine de traction  
- S: section moyenne de la fibre

Remarque: comme la fibre de palmier n'a pas le même diamètre sur toute sa longueur; le diamètre pris dans le calcul de la section moyenne des fibres est le diamètre moyen de trois mesures au minimum à l'aide d'un pied à coulisse digital. En Pratique, nous mesurons les diamètres à ses deux extrémités plus quelques points intermédiaires tous les 10mm.

Le tableau 4-1 donne les résultats des propriétés mécaniques des quatre types de fibres. Ce tableau montre qu'avec l'humidité les fibres deviennent légèrement plus résistantes et plus allongeables à la rupture. Par contre à l'état sec, les fibres ont un module d'élasticité légèrement supérieur à celui de l'état humide. Les fibres les plus résistantes et les plus allongeables sont celles du Dokar. C'est pour cette raison que nous avons choisi ce type de fibres pour le renforcement du béton. A titre d'exemple, la figure 4-1 montre le comportement à la traction des fibres de Dokar. En fonction de ces courbes contraintes déformations, nous retrouvons les constatations notamment le module d'élasticité et l'allongement à la rupture des fibres naturelles et humides. D'autre part, nous remarquons que l'allure de ces courbes se rapproche de celle de la fibre de noix de coco donnée par SWAMY [32] (voir Fig. 1-4 au chapitre 1). Cela confirme les analyses physiques et chimiques du chapitre 3.

Par ailleurs, une comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature spécialisée [8, 17, 29-32], permet de constater que les fibres de Dokar se rangent parmi les fibres végétales moyennes du point de vue résistance à la traction et allongement à la rupture. Cela est dû à la texture de ces fibres, et à leur composition chimique. En effet, les photos au MEB des coupes longitudinales de ces fibres, présentées au chapitre précédent, ont montré que leurs filaments sont presque rectilignes et parallèle à la génératrice des fibres ce qui signifie que leur angle spiral est très petit ce qui diminue la déformabilité. Cela est aussi dû au fait que la teneur en cellulose est relativement faible par rapport à la plupart des fibres végétales, ce qui diminue la résistance à la traction. Aussi, nous constatons que ces fibres se rangent parmi les fibres faible du point de vu module d'élasticité. Cela est dû aux deux causes citées précédemment (l'angle spiral faible et la faible teneur en cellulose) aux quelles s'ajoute une troisième cause

qui est la faible teneur en hémicellulose de ces fibres (voir chapitre 2). En effet, nous avons vu au chapitre 1 que l'hémicellulose est le constituant responsable de l'élasticité.

Cependant, nous constatons que les propriétés mécaniques des fibres de surface de Dokar se rapprochent de celles des fibres de noix de coco données par la littérature. Nous pensons que cela vient peut être du fait que ces deux derniers types de fibres n'ont pas principalement un rôle de portance sur l'arbre mais plutôt un rôle de protection thermique et autre, c'est pour cela que leurs résistances à la traction sont relativement moyennes.

En outre, nous remarquons que la résistance à la traction dépend de la longueur de la fibre, cette dernière a un rôle important dans le renforcement des bétons. Comme le montre le tableau 4-1, la résistance à la traction de la fibre est proportionnelle à sa longueur. Ce résultat est en accord avec les résultats de BLEDZKI et al. [8]. En effet, la longueur de la fibre affecte directement l'homogénéité et par conséquent la résistance. Cela explique la dispersion des résultats des résistances à la traction donnés par les auteurs de la bibliographie pour un même type de fibre végétale. En réalité la plupart des auteurs ne travaillent pas avec la même longueur de spécimen et généralement ils ne spécifient pas ce paramètre dans les résultats, alors que ce dernier est une variable principale dans la détermination de la résistance.

Tableau 4-1 : Propriétés mécaniques des fibres de palmier

Type de Fibre	Longueur de l'échantillon de Fibre (mm)	Naturel Sec			Humide Saturé		
		$\sigma_{ft}$ (MPa)	$\epsilon_r$ (%)	$E_f$ (GPa)	$\sigma_{ft}$ (MPa)	$\epsilon_r$ (%)	$E_f$ (GPa)
Dokar	100	170.00±40.0	16.00±3.0	4.74±2.0	175.00±30.0	17.40±2.0	3.78±2.0
	60	240.00±30.0	12.00±2.0	5.00±2.0	250.00±25.0	13.00±2.0	3.25±1.5
	20	290.00±20.0	11.00±2.0	5.25±3.0	300.00±20.0	12.00±2.0	3.55±2.0
Elgers	100	88.75±20.0	11.10±2.5	3.50±1.2	90.10±18.0	12.00±3.0	3.10±1.5
D-Nour	100	72.34±18.0	8.70±2.2	3.15±1.5	74.34±15.0	9.5±2.5	2.30±2.0
D-Bida	100	71.15±16.0	7.50±2.3	2.50±1.0	73.19±13.0	8.50±2.7	2.10±1.0

- Avec : -  $\sigma_{ft}$  : Résistance à la traction de la fibre  
 -  $\varepsilon_f$  : Allongement à la rupture  
 -  $E_f$  : Module d'élasticité de la fibre.

C'est pour cette raison que BLEDZKI et al. [8] proposent de donner comme référence la résistance à la traction qui correspond à la longueur zéro. Cette dernière résistance est déterminée expérimentalement à partir de la courbe résistance- longueur de spécimen. La figure 4-2 montre que les fibres de Dokar à l'état naturel sec auront une résistance à la traction de 322 MPa pour une longueur de spécimen zéro. Comparativement avec les résultats de la référence [8] (voir figure 1-4 du chapitre 1), les fibres de Dokar sont relativement peu influencées par le changement de la longueur de spécimen que les autres fibres végétales examinées. A titre d'exemple la courbe (résistance à la traction - longueur de fibre) de la fibre de bois de pomme a une pente plus grande que celle de la fibre de palmier.

Nous constatons aussi que l'allongement à la rupture est inversement proportionnel à la longueur du spécimen. Par contre le module d'élasticité est peu influencé par la variation de la longueur de spécimen.

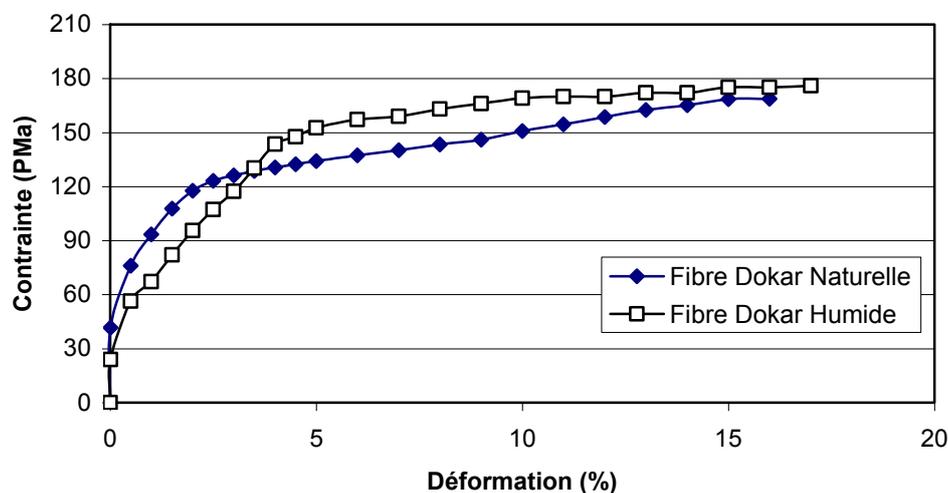


Figure 4-1 : Courbes Contraintes-Déformations moyennes des fibres de Dokar à l'état naturel et humide.

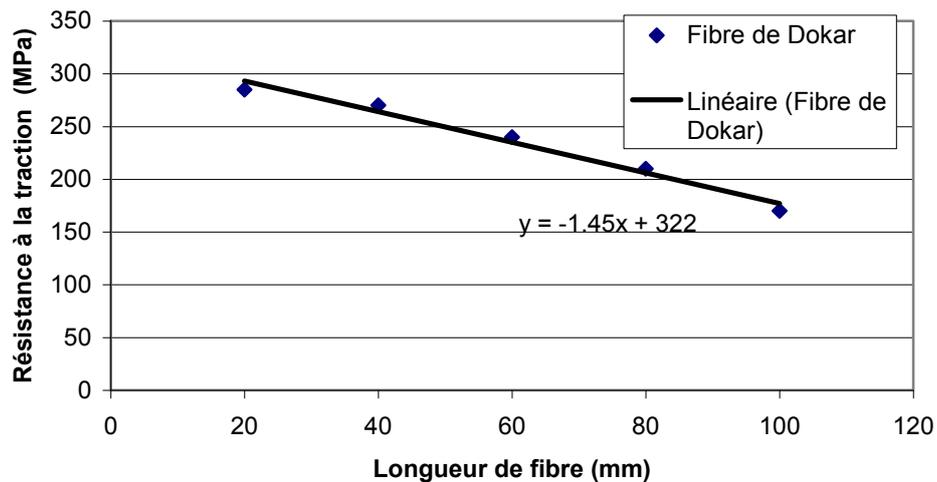


Figure 4-2 : Résistance à la traction des fibres de Dokar à l'état naturel en fonction de la longueur du spécimen du fibre.

### 4-3. Propriétés physico mécaniques des bétons de fibres de palmier

#### 4-3-1. Introduction

Dans le but d'une caractérisation mécanique des bétons de fibres de palmier dans le climat sec et chaud et afin de déterminer le pourcentage de renforcement et la longueur optimale des fibres, nous avons effectué plusieurs séries d'essais physiques et mécaniques à savoir la densité, la résistance à la flexion, à la compression ainsi que l'indice global des vides donné en fonction de la vitesse du son à travers le béton. Ces essais sont généralement réalisés à 7, 28, 90 et 180 jours. Des éprouvettes prismatiques (70x70x280 mm) sont utilisées pour l'essai de flexion et l'essai sonique. Tandis que des éprouvettes cubiques (100 mm) sont utilisées pour l'essai de compression. Pour chaque date d'essai six éprouvettes par désignation de béton et par type de test sont utilisées.

Le pourcentage et la longueur des fibres dans le béton varient respectivement de 0-3% en volume et de 0-60 mm. En effet, nous avons montré au chapitre précédent que dans notre cas le pourcentage d'incorporation maximal est de 3%. Les conditions de conservation examinées sont une conservation continue dans l'eau (CE), une conservation continue à l'air libre (CA), une conservation continue dans l'étuve (CU) durant 28 jours et une conservation durant les 14 premiers jours dans l'eau ensuite dans l'étuve (CE14-CU).

#### 4-3-2. Densité des bétons

La densité de béton est déterminée selon la norme NFP 18-409 [141]. Les éprouvettes étant essuyées ou nettoyées on mesure ses dimensions avec une erreur relative inférieure à 0.01 puis on détermine sa masse avec une erreur relative inférieure à 0.001, le calcul de sa masse volumique ou de sa densité se fait en divisant sa masse par le volume correspondant.

Les figures 4-3(a, b, c) illustrent les résultats de la densité moyenne (en associant l'écart type) du béton classique BC2 (0 % de fibres) ainsi que les bétons de fibres de palmier BF2 (2 à 3 % de fibres) pour une durée de conservation de 1 jour dans le laboratoire et 28 jours dans les différents régimes de cure (CE, CE14-CU ou CU). Six éprouvettes sont utilisées pour chaque type de béton, et chaque durée d'essai.

Les résultats montrent clairement que la densité des bétons est inversement proportionnelle au dosage des fibres. Ceci est lié à la composition, et à l'air entraîné par les fibres. Aussi, pour un même dosage, la densité diminue en fonction de l'augmentation de la longueur des fibres. Cela est dû au fait que les fibres de palmier dattier ont une densité plus faible que les autres constituants du béton et que la maniabilité du béton de fibre diminue avec l'augmentation des longueurs des fibres dans la matrice. D'où plus d'air entraîné, ce qui diminue la compacité du béton de fibres et par la suite leur densité. Par ailleurs, une simple comparaison entre la densité du même type de béton à 1 jour dans le laboratoire et à 28 jour à différents types de conservation, montre que pour la cure CE il y a eu un gain dans la densité, cela est dû à la saturation des bétons et à l'absorption des fibres. Par contre dans les cures CE14-CU ou CU il y a eu une perte dans la densité à cause de la perte d'eau par évaporation notamment dans la cure CU. Ainsi la densité dans la cure CU est plus faible que dans la cure CE14-CU.

#### 4-3-3. Vitesse du son et Indice de continuité (Ic)

La vitesse de propagation du son à travers le béton classique BC2 ainsi que les bétons de fibres de palmier BF2 est mesurée selon la norme NFP 18-418 [138], par un appareil sonique (voir photo 4-3 annexe) qui donne le temps de propagation (en  $\mu$ s) d'une impulsion sonique à travers le béton.

L'appareil utilisé fonctionne sur secteur ou sur batterie. Il comporte essentiellement une boîte de mesure, deux têtes (émettrice et réceptrice) et une pâte visqueuse pour faciliter la transmission du son. Deux méthodes sont possibles pour mesurer la vitesse du son soit la mesure en transparence soit la mesure en surface.

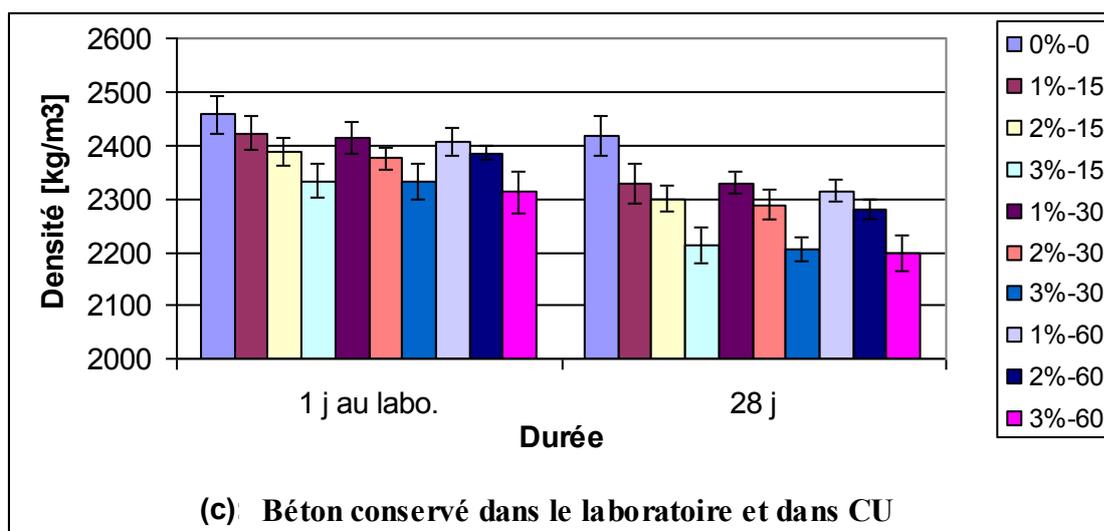
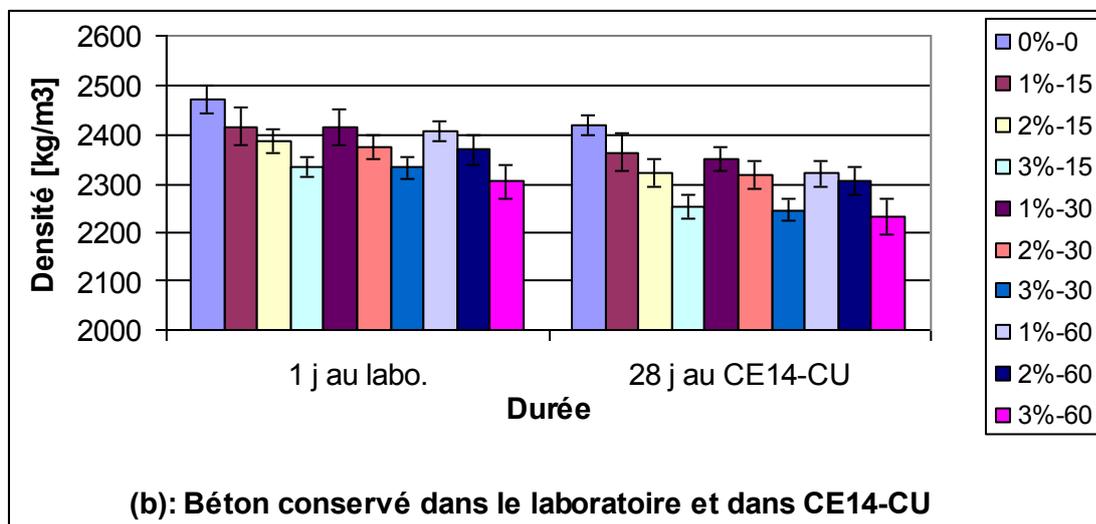
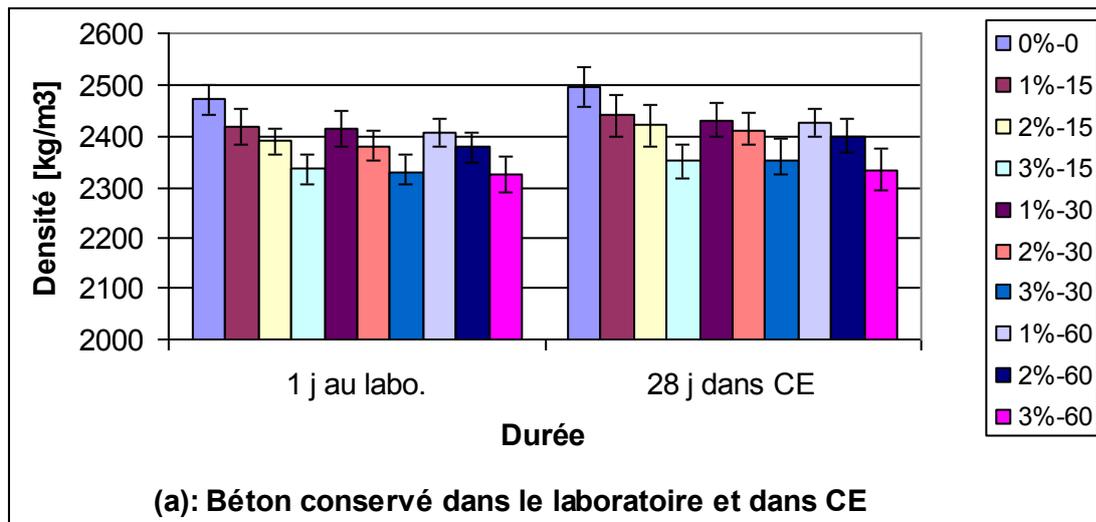


Figure 4-3 : Densité du béton de fibre à différents types de cures.

La première méthode (mesure en transparence) est la meilleure. Elle consiste à presser les deux têtes de mesure sur deux points du béton, en vis à vis (alignées mais sur deux surfaces opposées) en utilisant la pâte de contact. La surface du béton doit être raisonnablement plane et exempte de poussière.

Après avoir actionné l'appareil nous lisons le temps de propagation en  $\mu\text{s}$ . La vitesse de propagation du son à travers le béton par la mesure en transparence est donnée par la formule (4-2) suivante [138]:

$$V = \frac{S}{t} \times 10^6 \quad (4-2)$$

Avec :

- V : Vitesse de propagation en m/s
- S : Distance entre les têtes en m
- t : temps de propagation en  $\mu\text{s}$

Pour les bétons classiques la vitesse de propagation du son varie entre 4000 à 4800 m/s [139].

La détermination de la vitesse de propagation du son à travers le béton nous permet de calculer un indice appelé indice de continuité ( $I_c$ ) qui nous donne par la suite le degré global des vides dans le béton. En effet, le degré global des vides dans le bétons est inversement proportionnel à  $I_c$ .

L'indice de continuité utilisé est celui proposé par GORISSE [72] par l'équation (4-2):

$$I_c = V/V_r * 100 \quad (4-3)$$

- Avec :
- V : Vitesse de propagation du son à travers le béton en m/s
  - $V_r$  : Vitesse de référence ( $V_r = 4500$  m/s).

La détermination de la vitesse de propagation du son et par la suite le calcul de l'indice de continuité sont effectués dans le but de mettre en évidence le volume global des vides dans le béton durci, afin de bien interpréter les résultats de la résistance à la compression et à la flexion.

Les résultats des valeurs moyennes de  $I_c$  associées à leurs écarts types, en fonction de la variation du dosage et de la longueur des fibres, sont donnés par les figures 4-4 et 4-5. Nous rappelons que pour chaque durée et chaque type de béton six éprouvettes de dimension 70x70x280 mm sont utilisées.

Les résultats montrent que pour les deux types de cure et pour chaque durée d'essai (7, 28, 90 et 180 jours) les indices de continuité  $I_c$  du béton de fibres BF1 diminuent avec l'augmentation du dosage et de la longueur des fibres dans la matrice des bétons. L'indice de continuité maximal est donné pour le dosage minimum et la longueur la plus petite, dans notre cas c'est le béton de fibres 2%-15. Cela s'explique par le fait que l'augmentation du dosage et de la longueur des fibres dans la matrice diminue la compacité et augmente par contre le volume global des vides.

Par ailleurs, à court terme (7 jours) nous constatons, qu'à l'air libre, les bétons de fibres présentent des indices de continuité plus grands que celui du béton classique. Alors que dans l'eau, seuls les bétons à faible dosage (2%-15 et 2%-60) présentent des indices de continuité plus grands que celui du béton classique. Par contre à long terme après 7 jours, pratiquement tous les bétons de fibres conservés dans l'eau ou à l'air libre présentent des indices de continuité plus faibles que celui du béton classique.

Dans l'eau, l'augmentation des indices de continuité des bétons de fibres et du béton classique en fonction de l'âge (figure 4-4) est due à la progression du processus d'hydratation et au remplissage progressif des vides par les produits d'hydratation. Ce phénomène sera détaillé ultérieurement par des observations microscopiques au MEB.

A l'air libre, l'augmentation des indices de continuité des bétons de fibres à court terme jusqu'à 7 jours (figure 4-5) est due au fait que les fibres sont relativement saturées d'eau ce qui, par gonflement, augmente leur volume et diminue le volume global des vides dans le béton. En effet, la fibre se comporte comme une éponge qui absorbe et conserve des quantités importantes d'eau de gâchage. De ce fait, le maintien d'une partie de l'eau de gâchage par les fibres contribue à la diminution des volumes globaux des vides dans le béton de fibres à court terme. Cependant, à long terme, la chute de l'indice de continuité en fonction de l'âge et particulièrement entre 7 et 28 jours est due au phénomène d'évaporation de l'eau qui, par retrait, diminue le volume des fibres et par la suite augmente le volume global des vides dans le béton. De plus, comme nous allons le montrer ultérieurement, il faut indiquer que ce phénomène d'évaporation provoque un freinage dans le processus d'hydratation du ciment ce qui contribue à l'augmentation du volume des vides à l'interface fibre-matrice et à la réduction des indices de continuité.

Suite aux conséquences de l'évaporation de l'eau et de l'augmentation des volumes des vides dans les bétons, nous constatons que les indices de continuité des bétons conservés dans l'air libre sont très faibles par rapport à ceux conservés dans l'eau.

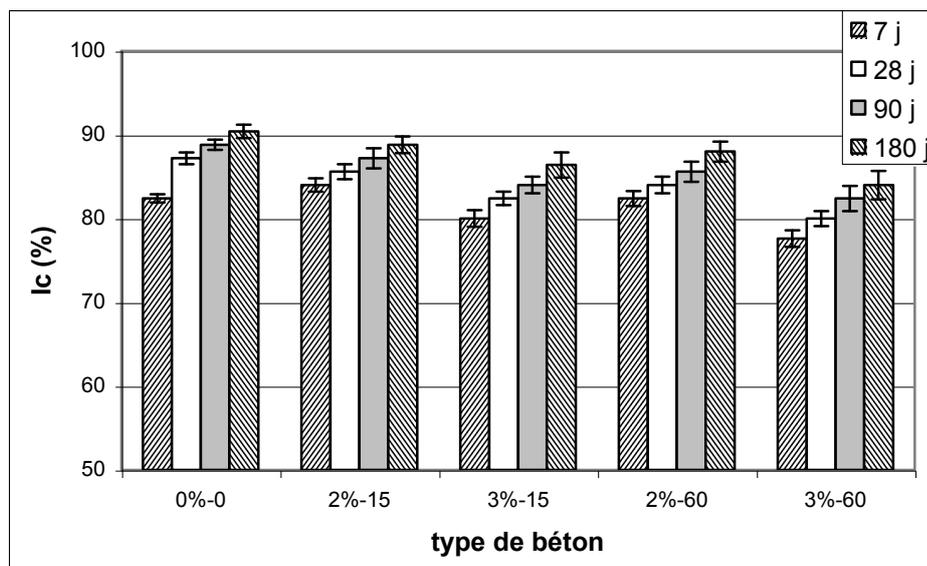


Figure 4-4 : Indice de continuité des bétons conservés dans l'eau (CE)

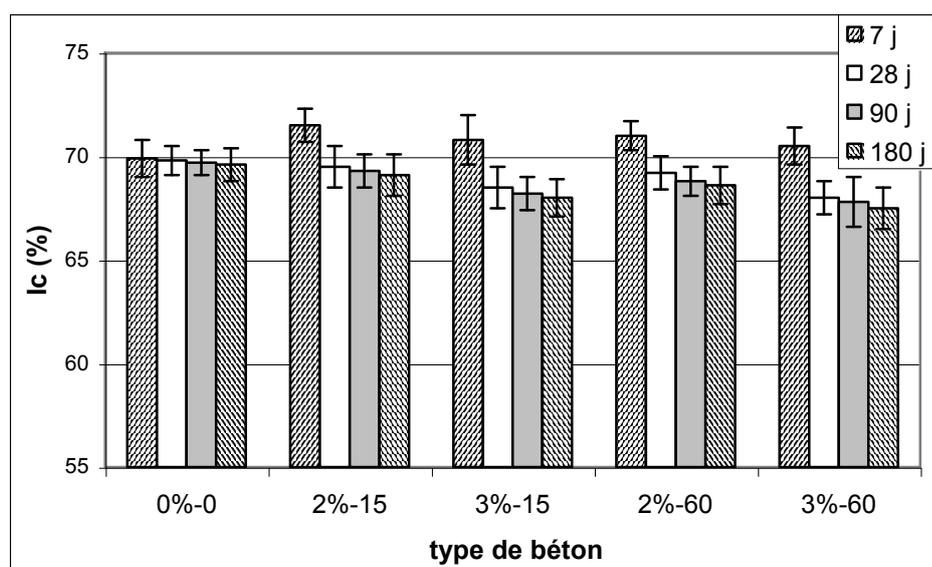


Figure 4-5 : Indice de continuité des bétons conservés à l'air libre (CA)

#### 4-3-4. Résistance à la compression du béton

La résistance à la compression des bétons BC1 (0% de fibres) et BF1 (2 à 3 % de fibres) est mesurée sur des éprouvettes cubiques (100mm d'arrête) conformément à la norme NF EN 12390-4 [140], par une presse de marque Controls (voir Photo 4-4 en Annexe) avec une vitesse de chargement de  $3 \pm 0.5$  kN / s. Six cubes (100mm), pour chaque durée et pour chaque type de béton sont utilisés.

Les figures 4-6 et 4-7 donnent la résistance moyenne à la compression des bétons en fonction de la variation du dosage et des longueurs des fibres ainsi que la variation du type de cure (dans l'eau et à l'air libre) tout en associant leur écart type.

Pour les deux types de cure CE et CA et pour chaque période (28, 90 ou 180 jours), nous constatons que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du dosage et des longueurs des fibres. Ainsi l'optimum de la résistance à la compression pour les bétons de fibres BF1 est obtenu avec le dosage le plus faible et la plus petite longueur (2%-15), qui reste inférieur à la résistance du béton classique BC1. De ce fait nous remarquons qu'à 28 jours par exemple, la résistance à la compression optimale du béton de fibre (2%-15) et conservé respectivement dans l'eau et à l'air libre ne constitue que 93% et 71% de la résistance du béton classique (0%-0).

Cette constatation est en accord avec les résultats de la littérature et spécialement [10, 19, 20, 32, 55, 62] qui affirment que l'ajout des fibres végétales au béton n'a aucun effet bénéfique sur la résistance à la compression. Dans notre cas, et comme nous l'avons montré par les essais soniques, cela est expliqué par le fait que l'incorporation des fibres de palmier dans la matrice du béton augmente le volume des vides et diminue la compacité du béton, d'où une diminution de la résistance à la compression.

Par ailleurs, bien qu'il y ait une évolution de la résistance en fonction de l'âge pour les deux types de cure CE et CU, une simple comparaison entre les bétons conservés dans l'eau et ceux conservés à l'air libre pour chaque type de béton et chaque période, montre que les résistances des bétons conservés dans l'eau dépassent celles des bétons conservés à l'air libre. Cela est dû aux causes que nous allons montrer dans ce qui suit par des analyses à la DRX ou bien par des observations au MEB. Ces causes sont principalement : le freinage du processus d'hydratation suite à l'évaporation rapide de l'eau à court terme, et l'extension des micro fissures ainsi que l'augmentation du volume global des vides dans le béton à long terme, causé par la température élevée de la cure à l'air libre.

Nous avons montré au paragraphe précédent par des essais soniques que le volume global des vides dans le béton de fibres augmente à long terme pour la cure à l'air libre suite au freinage du processus d'hydratation causé par l'évaporation de l'eau. En effet, la figure 4-8 montre une comparaison entre deux spectres au DRX des deux mortiers à base de ciment C2 conservés durant trois mois respectivement dans l'eau et à l'air libre. Nous relevons clairement que les pourcentages en  $C_3S$  et  $C_2S$  sur le spectre du mortier conservé à l'air libre sont plus élevés que celui conservé dans l'eau. Ce qui confirme la réduction du processus

d'hydratation dans l'air libre. Nous allons montrer dans le paragraphe qui suit, par des observations microscopiques au MEB, l'extension des micro-fissures et les volumes des vides dans la cure à l'air libre à long terme.

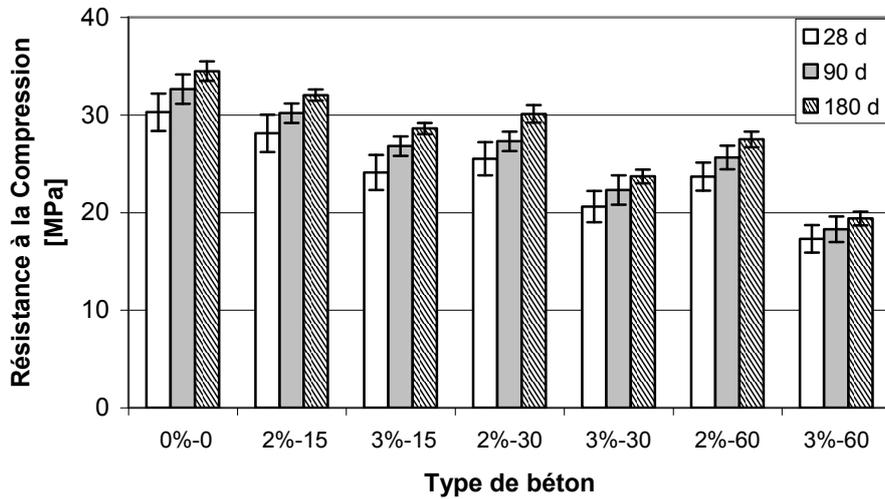


Figure 4-6 : Résistance à la compression des bétons conservés dans l'eau

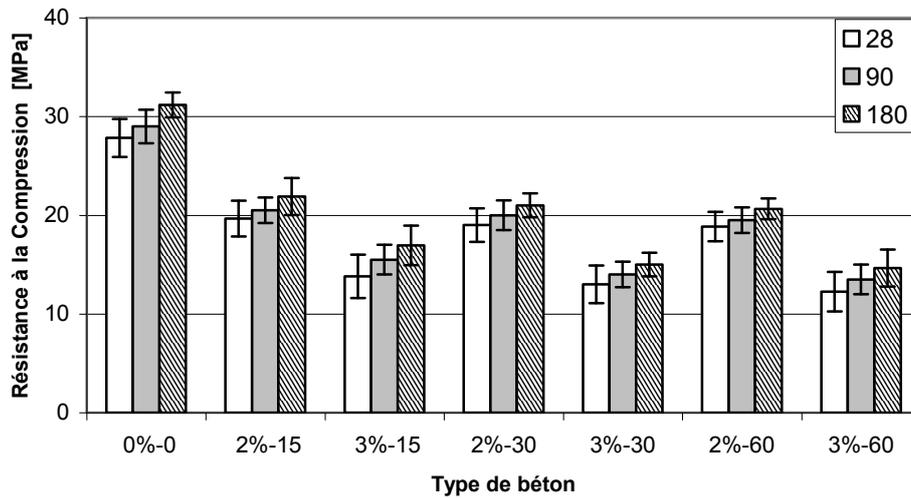


Figure 4-7 : Résistance à la compression des bétons conservés à l'air libre.

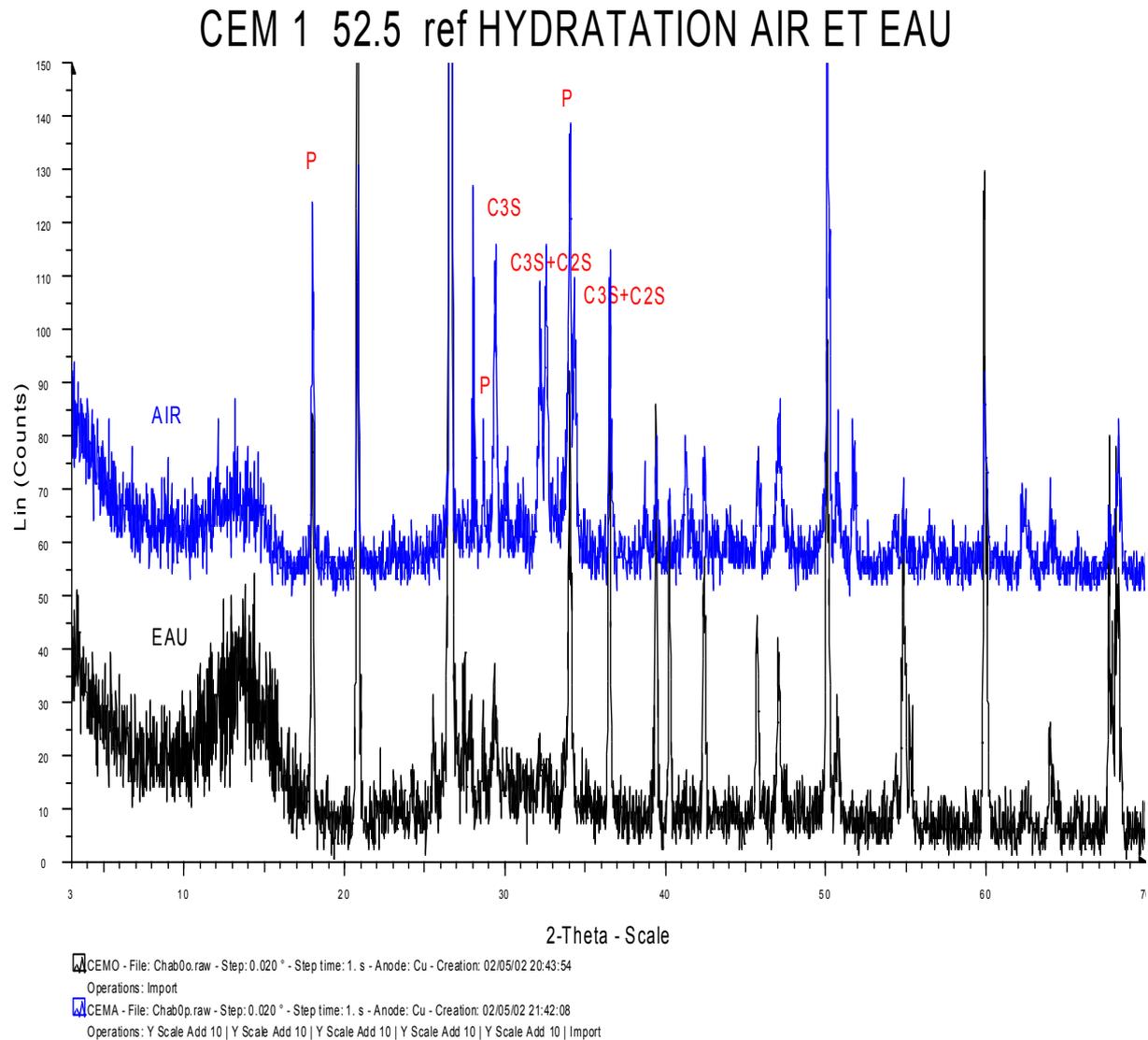


Figure 4-8 : Diffraction par des rayons X (DRX) d'un mortier conservé trois mois respectivement dans l'eau et à l'air libre

#### 4-3-5. Propriétés de flexion du béton

Les propriétés de flexion des bétons de fibres de palmier BF2 et du béton classique BC2 sont déterminées par un essai de flexion quatre points à l'aide d'un dispositif expérimental conforme à la norme NFP 18-409 [141]. La presse universelle utilisée est de type INSTRON (voir Photo 4-5 en annexe). La vitesse de chargement est de 0.1 mm / min. La presse est équipée d'un capteur de forces de 50 kN. Le système est muni d'un dispositif pour mesurer la flèche au milieu de l'éprouvette qui est formé de deux capteurs de

déplacement (LVTD). Afin de mesurer la flèche nette, ce dernier dispositif s'appuie directement sur l'éprouvette elle-même. Un système d'enregistrement des valeurs de la charge et de déplacement est continuellement assuré à l'aide d'une chaîne d'acquisition numérique, permettant de donner entre autre la courbe charge-flèche pour chaque éprouvette. La photo 4-6 (Annexe) montre le dispositif expérimental de flexion avant chargement, ce dispositif est conçu et fabriqué au laboratoire URGC-Structures de l'INSA de Lyon. Six éprouvettes de dimension 70x70x280mm, pour chaque durée et pour chaque type de béton sont utilisées.

Les propriétés de flexion sont évaluées par les trois paramètres suivants :

- La contrainte à la première fissuration ( $\sigma_0$ ) :

$$\sigma_0 = 6M_0 / bd^2 \quad (4-3)$$

Avec :  $M_0$  moment de flexion à la première fissuration, b et d sont respectivement la largeur et la hauteur de la section de l'éprouvette.

- La charge maximale après la première fissuration  $P_{max}$
- Les coefficients de ductilité  $D_n$  : Selon la norme NFP 18-409 [141],

$$D_n = P_n / P_0 \quad (4-4)$$

Avec :

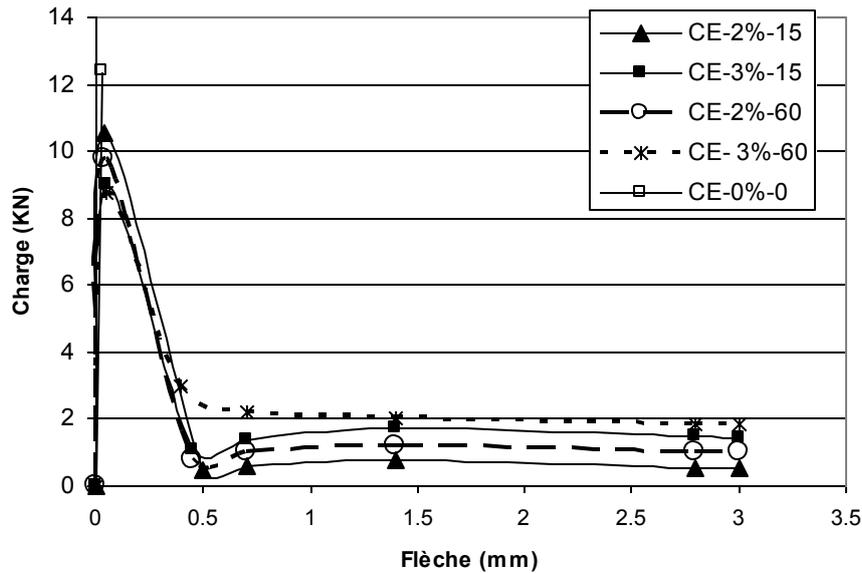
- $P_n$  : Les charges correspondantes aux déflexions (flèches) 0.7, 1.4 et 2.8 mm
- $P_0$  : La charge à la première fissuration

Il est à rappeler que les bétons utilisés sont confectionnés à l'INSA de Lyon. Pour simuler les conditions climatiques moyennes de la cure chaude sèche (CA) nous avons conservé les éprouvettes dans une étuve (CU) dans les conditions climatiques mentionnées au chapitre 3.

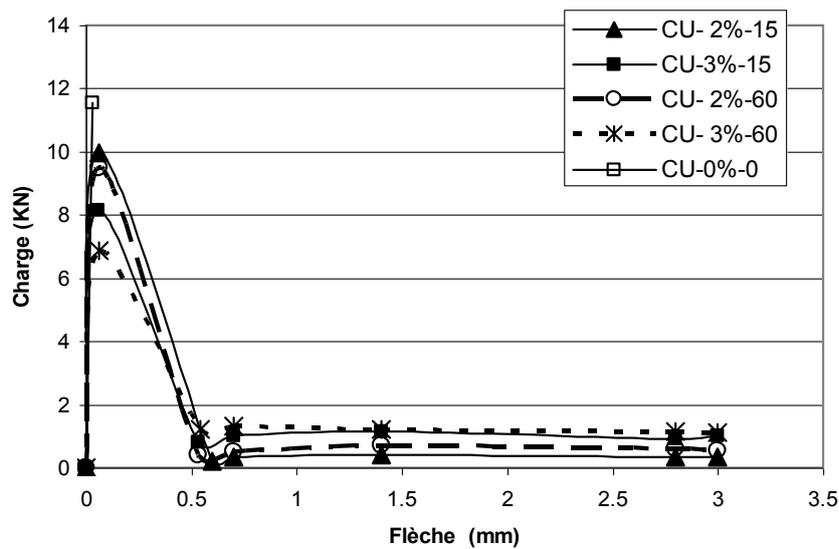
Les résultats sont donnés par les figures 4-9(a, b) et le tableau 4-2.

Les figures 4-9(a, b) donnent le comportement à la flexion représenté par les courbes flèche-charge des bétons BF2 conservés respectivement dans l'eau (CE) et dans l'étuve (CU), durant 28 jours. Au début de l'essai, nous remarquons que l'augmentation de la charge en fonction de la déflexion suit un comportement élastique et linéaire jusqu'à la première fissuration. A cet instant, les flèches pour tous les bétons de fibres, sont de l'ordre de 0.05 mm. L'intensité de la charge à la première fissuration ( $P_0$ ) dépend du pourcentage et de la longueur des fibres. Nous constatons que  $P_0$  diminue avec l'augmentation du dosage et des longueurs des fibres. Après la première fissuration de la matrice, nous constatons que les

efforts repris par les fibres de palmier sont très faibles et la chute des charges est très remarquable. Pratiquement la reprise progressive des efforts par les fibres commence après une ouverture de la fissure qui correspond à une déflexion de l'ordre de 0.5 mm. Nous remarquons aussi qu'entre les déflexions 0.7 mm et 3 mm la charge reste quasi-constante. L'interprétation de la variation des charges en fonction des flèches est la même que celle des coefficients de ductilité  $D_n$ , qui seront exposés dans ce qui suit.



(a) : (CE)



(b) : (CU)

Figure 4-9 : Courbes Charge-Flèche des bétons de fibres conservés durant 28 jours dans : (a) : CE, (b) : CU.

Les valeurs moyennes des  $\sigma_0$ ,  $P_{\max}$ , et  $D_n$  et leurs coefficients de variation (CV) sont mis sur le tableau 4-2. A chaque échéance (28, 90, 180 jours) nous remarquons que les contraintes à la première fissuration ( $\sigma_0$ ) des bétons de fibres conservés dans les différentes cures diminuent avec l'augmentation de la teneur et des longueurs des fibres dans la matrice. En effet, elles varient de la même façon que  $P_0$ . De plus,  $\sigma_0$  des bétons de fibres restent inférieurs à celle du béton classique BC2. Cette diminution en fonction de l'augmentation du dosage et de la longueur des fibres est probablement due aux causes suivantes : Premièrement, et nous pensons que c'est la cause principale, c'est l'augmentation de la quantité totale d'eau en fonction de l'augmentation du dosage en fibres dans la composition des bétons BF2 avec le maintien de la quantité de ciment fixe, ce qui a probablement diminué la résistance à la première fissuration. A cette cause principale s'ajoute une deuxième cause, qui est la qualité de résistance du ciment utilisé (CPA-CEM I 5 2,5) ce qui donne un  $\sigma_0$  élevé spécialement pour le béton classique BC2, et en conséquence l'élévation de son énergie de rupture à la première fissuration.

Par ailleurs, pour chaque type de béton nous constatons que les contraintes à la première fissuration ( $\sigma_0$ ) des bétons conservés dans l'eau sont plus grandes que celles des bétons conservés dans l'étuve. En outre, dans l'eau  $\sigma_0$  continue à évoluer en fonction de l'âge alors que dans l'étuve ces contraintes diminuent. L'évolution avec l'âge des contraintes  $\sigma_0$  dans l'eau est due à la continuité du processus d'hydratation. Alors que les principales causes de la réduction de ces mêmes contraintes dans l'étuve sont :

- la réduction du processus d'hydratation causé par l'évaporation rapide de d'eau de gâchage, comme nous l'avons montré précédemment.
- l'expansion des microfissures et l'augmentation du volume des vides à l'intérieur du béton notamment à l'interface fibre-matrice.

Ce qui diminue l'adhérence et la résistance à la flexion.

Pour mettre en évidence l'augmentation du volume des vides à l'intérieur du béton notamment à l'interface fibre-matrice, la figure 4-10 présente une photo au MEB d'un échantillon de béton extrait de la zone d'interface fibre-matrice du béton de fibres BF2 conservé à l'étuve pendant trois mois. Nous observons que le vide autour des fibres est assez large. Dans le même sens, la figure 4-11 montre une photo au MEB du trou laissé par quelques fibres du même béton BF2. Nous observons que ce trou est lisse et sans aucune trace d'adhérence fibre-matrice. Ce qui confirme le freinage du processus d'hydratation et l'augmentation du volume des vides dans le béton conservé dans ce type de cure.

Tableau 4-2 : Les caractéristiques mécaniques en flexion ( $\sigma_0$ ,  $P_{max}$ ,  $D_n$  et leurs CV) du béton classique (BC2) et des bétons de fibres de palmier (BF2).

Paramètres	Cure	Temps (j)	Type de Béton				
			0%-0	2%-15	3%-15	2%-60	3%-60
$\sigma_0$ (CV) (MPa)(%)	CE	28	7.60 (7.11)	6.47 (11.59)	5.50 (14.54)	6.02 (10.82)	5.34 (12.47)
		90	8.06 (4.96)	7.00 (11.00)	6.00 (14.66)	6.50 (10.66)	5.95 (11.76)
		180	8.35 (5.98)	7.40 (8.78)	6.30 (11.11)	6.82 (8.95)	6.21 (12.86)
	CU	28	7.07 (7.77)	6.09 (4.59)	5.00 (6.00)	5.81 (3.61)	4.20 (7.14)
		90	6.80 (7.35)	5.19 (7.70)	3.89 (11.56)	5.00 (8.00)	3.45 (11.59)
		180	5.82 (7.87)	3.82 (7.85)	2.86 (15.00)	3.00 (16.66)	1.94 (14.48)
$P_{max}$ (CV) (MPa)(%)	CE	28		0.80 (19.32)	1.69 (11.77)	1.18 (11.06)	2.96 (2.57)
		90		0.73 (14.25)	1.50 (23.96)	1.00 (15.32)	2.51 (17.73)
		180		0.70 (26.67)	1.40 (11.14)	0.99 (29.69)	2.02 (19.04)
	CU	28		0.40 (9.98)	1.14 (19.32)	0.70 (24.98)	1.29 (7.15)
		90		0.30 (12.56)	0.30 (15.87)	0.30 (23.34)	0.30 (8.85)
		180		0.30 (13.63)	0.30 (16.32)	0.30 (18.82)	0.30 (10.37)
$D_{0.7}$ (CV) (%)	CE	28		0.06 (19.64)	0.15 (57.58)	0.09 (11.68)	0.26 (66.60)
		180		0.04 (26.30)	0.10 (8.84)	0.06 (15.65)	0.12 (9.27)
	CU	28		0.04 (24.17)	0.12 (25.00)	0.05 (26.95)	0.19 (14.78)
		180		0.03 (13.72)	0.02 (27.28)	0.03 (19.43)	0.02 (17.84)
$D_{1.4}$ (CV) (%)	CE	28		0.08 (2.85)	0.19 (38.03)	0.11 (13.84)	0.23 (24.20)
		180		0.06 (15.76)	0.14 (10.32)	0.06 (24.30)	0.20 (18.45)
	CU	28		0.04 (9.24)	0.14 (14.28)	0.07 (28.98)	0.17 (28.36)
		180		0.04 (12.32)	0.03 (15.13)	0.03 (10.16)	0.03 (13.85)
$D_{2.8}$ (CV) (%)	CE	28		0.05 (18.64)	0.17 (20.00)	0.09 (17.69)	0.21 (10.23)
		180		0.04 (37.16)	0.12 (25.35)	0.06 (14.16)	0.16 (25.34)
	CU	28		0.03 (39.14)	0.11 (20.20)	0.06 (24.69)	0.17 (11.11)
		180		0.02 (15.73)	0.02 (14.27)	0.02 (37.28)	0.02 (32.54)

Par ailleurs, la photo au MEB d'un échantillon de béton extrait de la zone d'interface fibre-matrice du béton de fibres BF2 conservé dans l'eau durant trois mois (la figure 4-12) montre la bonne adhérence entre la fibre et la matrice. Nous observons les fractions de fibres et nous observons aussi que les fibres sont bien entourées par les produits d'hydratation. En outre la figure 4-13 montre le dépôt d'hydroxyde de calcium à l'interface.

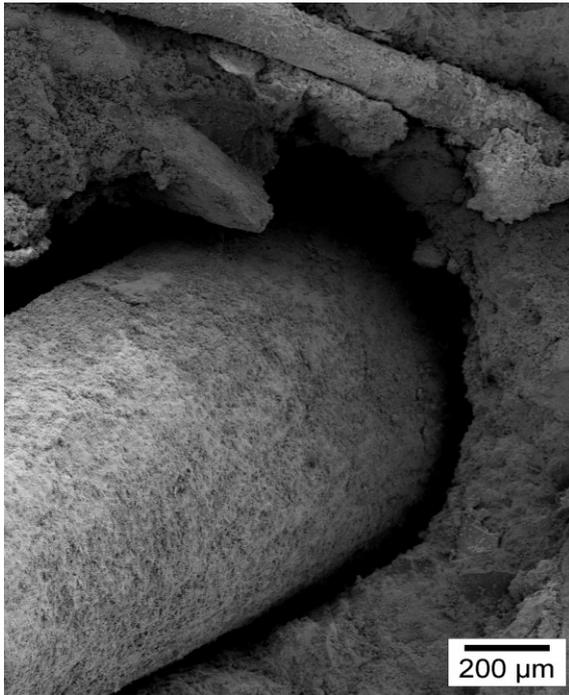


Figure 4-10: Photo au MEB d'un échantillon de béton extrait de la zone d'interface fibre-matrice du béton de fibres BF2 conservé à l'étuve pendant trois mois

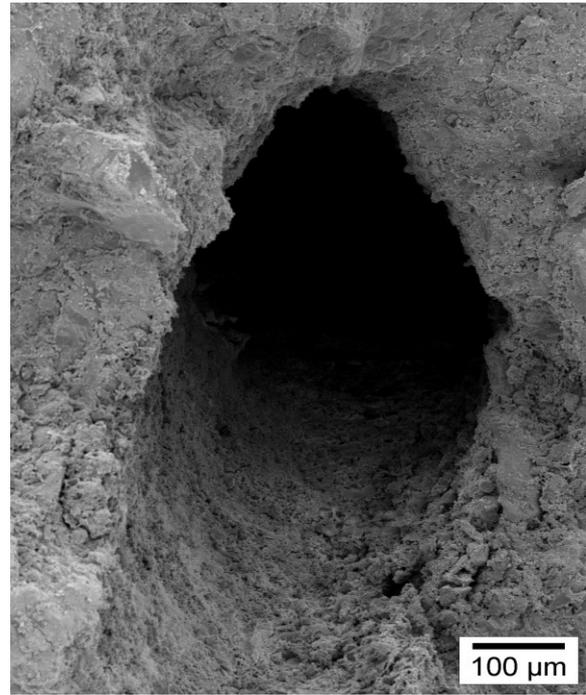


Figure 4-11: Photo au MEB du trou lissé par quelques fibres du béton BF2 conservé à l'étuve pendant trois mois

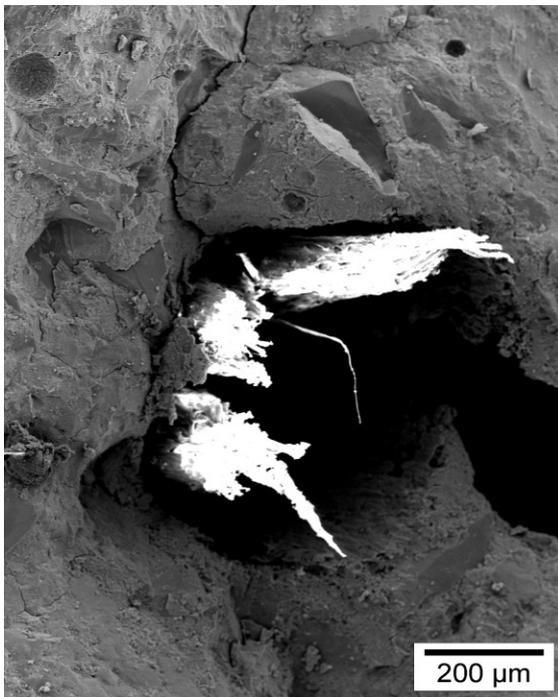


Figure 4-12: Photo au MEB d'un échantillon de béton extrait de la zone d'interface fibre-matrice du béton de fibres BF2 conservé dans l'eau durant trois mois

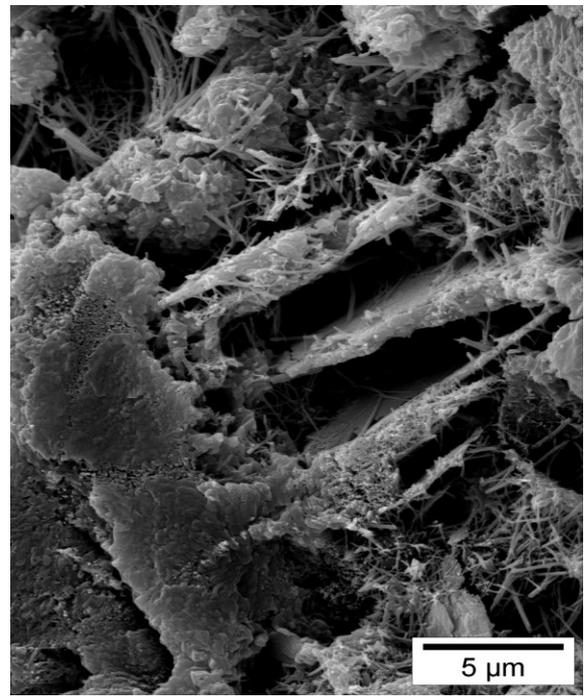


Figure 4-13: Photo au MEB montre le dépôt de l'hydroxyde de calcium à l'interface du béton de fibres BF2 conservé dans l'eau durant trois mois

Cette dernière observation est en accord avec les observations de BENTUR et AKERS [28] ainsi que TOLÈDO FILHO et al. [29], relatif au dépôt de produits d'hydratation autour des fibres dans une cure humide. Ce qui explique l'évolution des contraintes  $\sigma_0$  dans cette présente cure.

Concernant la ductilité, nous constatons que pour chaque période d'essai, les charges  $P_{max}$  et les coefficients de ductilité  $D_n$  des bétons de fibres augmentent avec l'augmentation du dosage et des longueurs des fibres. Ainsi le béton de fibre 3%-60 est le béton le plus ductile.

Par ailleurs, les charges  $P_{max}$  et les coefficients de ductilité  $D_n$  des bétons de fibres de palmier conservés dans l'étuve sont très faibles par rapport à ceux conservés dans l'eau. Cela est dû aux mêmes causes déjà exposées précédemment notamment : la réduction du processus d'hydratation, l'expansion des microfissures et l'augmentation du volume des vides à l'intérieur du béton plus précisément à l'interface fibre-matrice.

Cependant, une simple comparaison montre que les charges  $P_{max}$  et les coefficients de ductilité  $D_n$  des bétons de fibres de palmier conservés dans l'eau sont très faibles par rapport aux bétons de fibres de sisal étudiés par TOLÈDO FILHO et al. [29]. Cela est dû aux propriétés mécaniques moyennes des fibres de palmier mise en évidence au début de ce chapitre.

Concernant l'évolution des charges  $P_{max}$  et les coefficients de ductilité  $D_n$  en fonction de l'âge, le tableau 4-2 montre que dans l'étuve il y a une réduction remarquable de  $P_{max}$  et de  $D_n$  des bétons de fibres en fonction de l'âge. De plus, à long terme (à 180 jours), nous constatons que la ductilité des bétons de fibres, représentée par  $P_{max}$  et  $D_n$ , diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage et de la longueur des fibres dans la matrice. Ceci est dû à la réduction d'adhérence fibre-matrice causée par le freinage du processus d'hydratation et l'augmentation des vides, comme nous l'avons déjà montré. De la même manière, pour les bétons conservés dans l'eau, bien que la ductilité augmente en fonction de l'élévation du pourcentage et de la longueur des fibres dans la matrice, une réduction en fonction de l'âge des  $P_{max}$  et  $D_n$  est enregistrée; mais elle reste moins importante que celle des bétons conservés dans l'étuve. Cette chute de  $P_{max}$  et des coefficients de ductilité des bétons de fibres de palmier conservés dans l'eau est attribuée aux problèmes de durabilité de ces fibres de palmier dans les milieux alcalins de la matrice cimentaire, comme nous allons les développer dans ce qui suit. A titre d'exemple, la chute de  $P_{max}$ , entre 28 et 180 jours, du béton le plus ductile (3%-60) conservé dans l'eau et dans l'étuve est respectivement de 32% et 77%.

## 4-4. Propriétés mécaniques des mortiers de fibres de palmier

### 4-4-1. Résistance à la compression du mortier

La résistance à la compression du mortier classique normalisé MC1 et des mortiers de fibres MF1 est mesurée conformément à la norme EN 196-1 [136], par une presse Maurice Perrier et C<sup>ie</sup> (voir Photo 4-7 en l'Annexe) avec une vitesse de chargement de  $2.4 \pm 0.2$  kN / s. Pour chaque durée et pour chaque type de mortier six éprouvettes cubiques (40 mm) sont utilisées.

Les figures 4-14 et 4-15 donnent les résultats des résistances à la compression des mortiers ( $R_c$ ), en fonction de la variation du dosage et de la longueur des fibres et en fonction du régime de cure (en associant les écarts types). Nous constatons que ces résistances varient de la même manière que celles des bétons de fibres. Ainsi, les résistances à la compression diminuent en fonction de l'augmentation du pourcentage et de la longueur des fibres dans les mortiers et le mortier classique reste le plus résistant. De même, les résistances à la compression des mortiers conservés dans l'eau sont plus grandes que celles des mortiers conservés dans l'étuve. Cela est dû aux mêmes causes que dans le cas de la résistance à la compression des bétons de fibres.

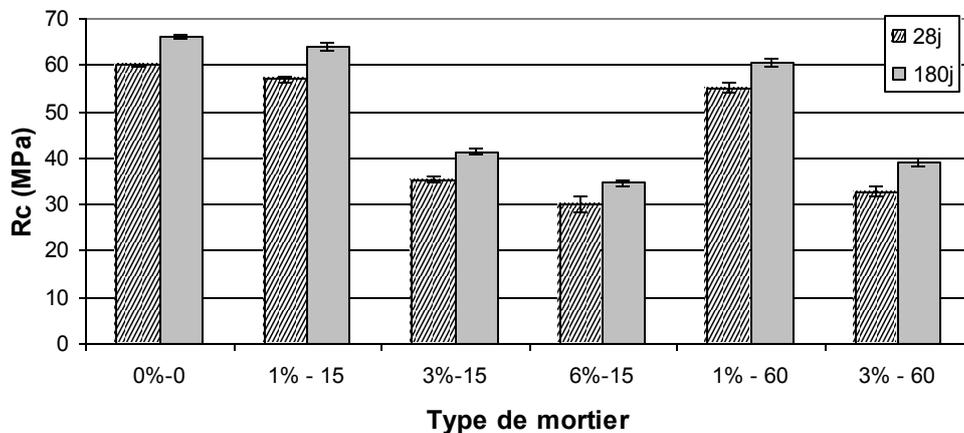


Figure 4-14 : Résistances à la compression ( $R_c$ ) des mortiers MC1 et MF1 conservés dans l'eau en fonction des dosages et des longueurs des fibres.

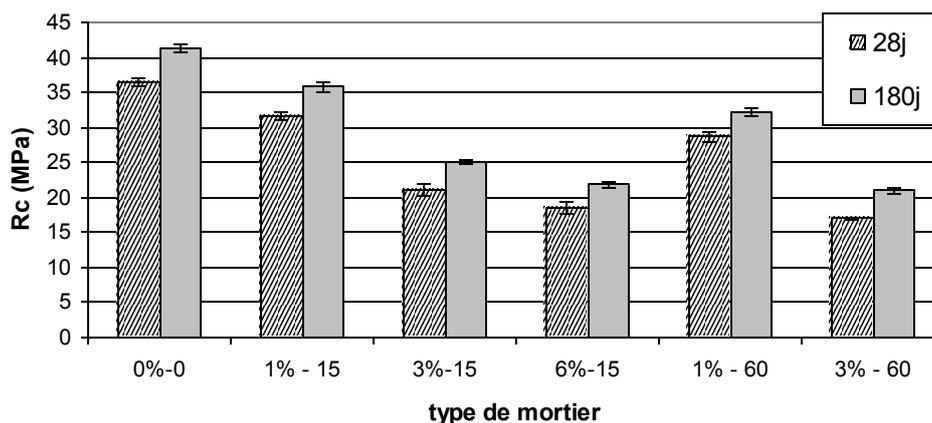


Figure 4-15 : Résistances à la compression (Rc) des mortiers MC1 et MF1 conservés dans l'étuve en fonction des dosages et des longueurs des fibres.

### 5-4-2. Résistance à la flexion du mortier

La résistance à la flexion du mortier classique normalisé MC1 et des mortiers de fibres MF1 est déterminée selon la norme EN 196-1 [136], par un dispositif de flexion trois points et à l'aide d'une machine de type Maurice Perrier et C<sup>ie</sup>, comme le montre la Photo 4-8 (Voir annexe) et la figure 4-16. La vitesse de chargement est de 50 N/s. La résistance à la flexion est donnée par la formule 4-5 :

$$R_f = 1.5FL/b^3 \tag{4-5}$$

avec :

- F : la charge appliquée au milieu de l'éprouvette à la rupture, en N.
- L : la distance entre les appuis en mm (L = 100mm).
- b : le côté de la section carrée de l'éprouvettes en mm (b = 40mm).

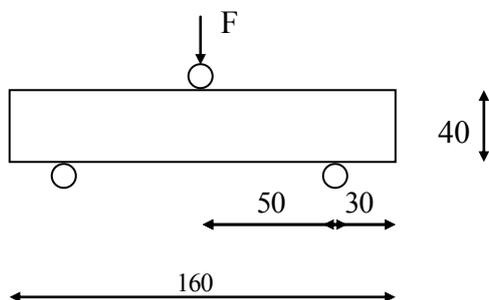
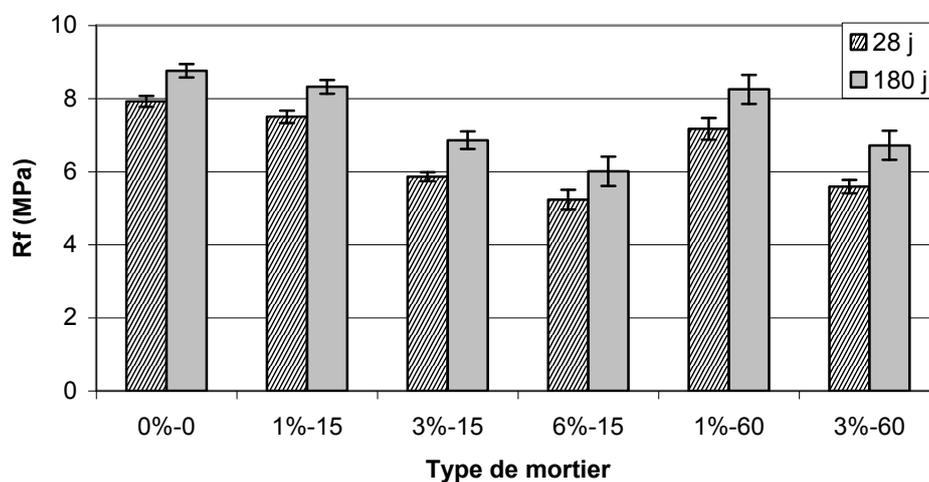


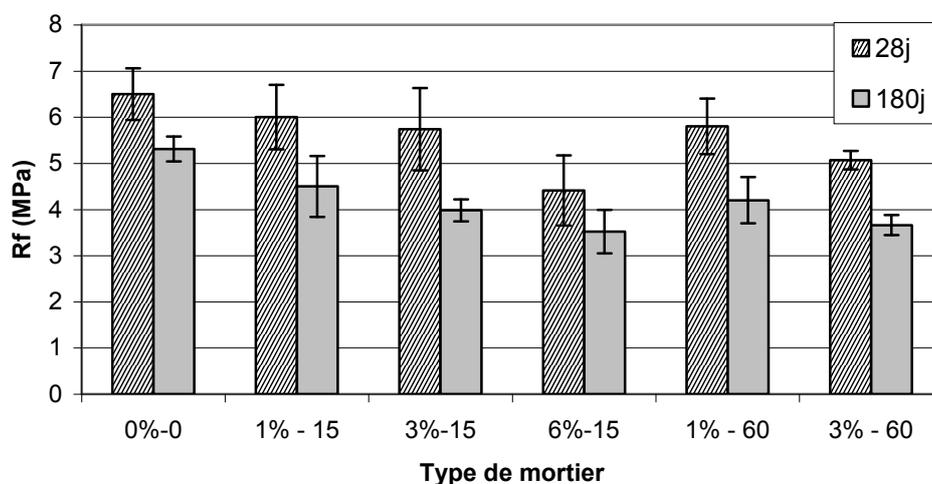
Figure 4-16: Dispositif de l'essai de flexion trois points

Les résultats de résistance à la flexion à la première fissuration du mortier ( $R_f$ ) sont donnés par les figures 4-17 et 4-18 (en associant les écarts types). Nous constatons aussi que la variation de ces résistances en fonction du dosage et de la longueur des fibres est la mêmes

que celle des bétons de fibres. En effet, dans l'eau bien qu'il y ait une évolution de ces résistances en fonction de l'âge pour chaque type de mortier, nous constatons que la résistance à la flexion des mortiers ( $R_f$ ) diminue avec l'augmentation du pourcentage des fibres. Le mortier classique reste le plus résistant. Cela est aussi dû aux mêmes causes que celles citées dans le cas de la résistance à la flexion à la première fissuration des bétons de fibres. Par contre dans l'étuve, nous relevons une chute de la résistance à la flexion ( $R_f$ ) en fonction de l'âge pour chaque type de mortier. En outre, dans cette cure,  $R_f$  diminue aussi en fonction de l'augmentation du dosage des fibres dans les mortiers. Enfin, la résistance à la flexion ( $R_f$ ) des mortiers conservés dans l'eau est plus grande que celle des mortiers conservés dans l'étuve à cause des mêmes paramètres cités dans l'étude des résistances à la flexion des bétons de fibres.



Figures 4-17 : Résistance à la flexion des mortiers MC1 et MF1 conservés dans l'eau en fonction des dosages et des longueurs des fibres.



Figures 4-18 : Résistance à la flexion des mortiers MC1 et MF1 conservés dans l'étuve en fonction des dosages et des longueurs des fibres.

## 4-5. Conclusion

L'étude des propriétés physico-mécaniques des quatre types de fibres de surface du palmier dattier utilisés montre que les fibres de Dokar sont les plus résistantes et les plus allongeables. Mais une comparaison avec les résultats de la littérature montre que ces fibres se placent parmi les fibres végétales moyennes du point de vue résistance à la traction et allongement à la rupture et elles sont rangées parmi les fibres à faible module d'élasticité. Par ailleurs, ces fibres comme toutes les fibres végétales ont un pouvoir hydrophile très élevé. Ces caractéristiques constituent des paramètres importants dans la caractérisation des bétons et mortiers de fibres

Pour compenser la quantité d'eau de gâchage susceptible d'être absorbée par les fibres, nous avons envisagé, dans un premier temps, d'augmenter la quantité d'eau en fonction de l'augmentation du dosage en fibres dans la confection des bétons de fibres BF1 et BF2.

Nous avons constaté que l'ajout des fibres de palmier aux bétons de fibres BF1 a un effet défavorable sur les résistances de compression. Cette constatation est en accord avec la plupart des auteurs de la bibliographie.

Pour les bétons de fibres BF2 conservés 28 jours dans l'eau, nous avons constaté que l'augmentation du dosage et des longueurs des fibres dans bétons permet d'améliorer les propriétés de flexion, après la première fissuration, ainsi que la ductilité. Par contre, l'ajout des fibres aux bétons provoque une diminution des contraintes à la flexion à la première fissuration. Cela est dû à l'augmentation de l'eau de gâchage dans la confection des bétons de fibres BF2 en fonction de l'augmentation du dosage des fibres ainsi qu'à la qualité supérieure du ciment CEM I 52.5.

Par ailleurs, l'ajout de fibres aux bétons BF2 soumis à un environnement chaud et sec n'a apporté aucun effet favorable. En effet, les performances mécaniques (la résistance à la flexion et à la compression ont diminué à court et à long terme en fonction de l'augmentation du dosage et de la longueur des fibres dans la matrice du béton. Cela est dû au freinage du processus d'hydratation. En effet, en environnement chaud et sec, l'évaporation rapide de l'eau de gâchage provoque le freinage du processus d'hydratation et l'arrêt des produits d'hydratation. En plus la température élevée provoque le retrait des fibres. Ceci augmente le volume global des vides à l'intérieur du béton et précisément à l'interface fibre-matrice et par la suite diminue l'adhérence fibre-matrice et réduit, enfin, la résistance à la flexion. En effet, nous avons montré par des essais soniques que le volume global des vides dans les bétons de fibres conservés à l'air libre dans un environnement chaud et sec augmente à long terme.

Nous avons aussi montré par des observations au MEB que dans l'eau les vides entre les fibres et la matrice à l'interface sont très réduits, alors qu'en environnement chaud et sec les vides à l'interfaces sont très remarquables.

La variation, en fonction du temps, des propriétés mécaniques des mortiers de fibres à base de ciment CPA CEM I 52.5 ( $R_c$  et  $R_f$ ), conservés dans les cures CE et CU, sont les mêmes que celles des bétons de fibres à base du même ciment.

## **Durabilité des bétons et mortiers de fibres de palmier dattier en climat chaud et sec**

### **5-1. Introduction**

Dans les matériaux composites à matrice cimentaire, le renfort fibreux doit non seulement améliorer l'effort après fissuration, mais aussi présenter une bonne durabilité dans diverses ambiances.

Nous rappelons que plusieurs chercheurs de la littérature [3,9-10,20-26, 33-36] ont remarqué que les fibres végétales (sisal, noix de coco) résistaient mal aux alcalis. La faible tenue, de ces fibres dans les milieux alcalins, en particulier dans la chaux libérée par les ciments lors de l'opération d'hydratation, constitue une contrainte qui limite le champ d'utilisation de ces fibres dans les ciments. Ce phénomène se manifeste au niveau de la fibre soit par détérioration soit par diminution de sa résistance à la traction.

La durabilité à long terme des BF dépend de la nature et du traitement des fibres, de la qualité des ciments utilisés, de la composition du mélange ainsi que du mode de conservation.

Ainsi, ce chapitre met en évidence la durabilité des fibres de palmier en milieu alcalin ainsi que celle des bétons et mortiers de ces fibres. Il examine aussi les possibilités d'amélioration de la durabilité des fibres ou du matériau composite (BF ou MF), notamment dans les conditions chaudes et sèches.

### **5-2. Durabilité des bétons de fibres de palmier**

La durabilité des bétons de fibres de palmier est donnée, dans cette partie, en fonction de l'évolution à long terme de leurs propriétés mécaniques et notamment celles après la première fissuration (la charge maximale  $P_{max}$ , et les coefficients de ductilités  $D_n$ ).

Les résultats des propriétés mécaniques des bétons de fibres de palmier donnés dans le chapitre 4 (4-3) montrent qu'à long terme les bétons de fibres conservés dans une cure chaude et sèche présentent une chute considérable dans la résistance à la compression ainsi que dans les propriétés de flexion. Par conséquent ces bétons de fibres ont une faible durabilité dans ce type de cure. Par ailleurs, pour les bétons de fibres conservés dans l'eau, nous avons montré que bien qu'il y ait eu une évolution positive en fonction de l'âge de leurs résistances à la compression et à la résistance en flexion à la première fissuration ( $\sigma_0$ ), il y a

eu en parallèle une régression à long terme dans leurs propriétés de flexion après la première fissuration ( $P_{max}$ , et  $D_n$ ), par conséquent une chute dans la durabilité. Nous avons constaté que la chute de durabilité des bétons de fibres de palmier conservés dans une cure chaude et sèche est due au freinage du processus d'hydratation causé par l'évaporation rapide de l'eau ainsi qu'à l'extension des microfissures qui augmentent le volume global des vides dans le béton à long terme et provoquent une chute d'adhérence fibres-matrice et par la suite une chute de résistance. Il est donc nécessaire de trouver une solution pratique pour maintenir l'humidité dans le béton surtout durant les premiers jours de conservation. Par ailleurs, la chute de durabilité des bétons de fibres conservés dans l'eau est fort probablement due à la chute de durabilité des fibres de palmier dans le milieu cimentaire alcalin. Cette dernière propriété sera mise en évidence dans ce qui suit.

### **5-3. Durabilité des fibres de palmier dans les milieux alcalins**

Pour étudier la durabilité des fibres de palmier dattier dans le milieu alcalin cimentaire, nous avons immergé ces fibres dans deux solutions alcalines à base de chaux ( $Ca(OH)_2$ ) et de soude (NaOH), les deux de pH 12.5, ainsi que dans la solution de Lawrence avec un pH de 12.95, (voir tableau 5-1). Selon HOUGET [142] la solution de Lawrence est parmi les solutions les plus adéquates qui simulent d'une façon acceptable la solution interstitielle des ciment CPA.

La durabilité des fibres de palmier est exprimée par :

- 1- la variation de leurs propriétés mécaniques à savoir la résistance à la traction et l'élongation à la rupture, en fonction du temps d'immersion, dans les deux solutions alcalines utilisées, respectivement à base de chaux ( $Ca(OH)_2$ ) et de soude (NaOH).
- 2- des observations microscopiques au MEB sur des fibres conservées dans les deux précédentes solutions ainsi que dans la solution de Lawrence.
- 3- de plus d'autres observations microscopiques sont effectuées sur des échantillons de fibres extraites de l'interface fibre-matrice des bétons. Il est à noter que le pH des différentes solutions alcalines est régulièrement ajusté.

Les tableaux 5-2 et 5-3 donnent les résultats de résistances à la traction et des élongations à la rupture des fibres de palmier en fonction du temps d'immersion dans les solutions  $Ca(OH)_2$  et NaOH de pH 12.5. Ces résultats montrent que les fibres de palmier utilisées résistent mal aux alcalis. En effet, leur résistance à la traction et leurs élongations à la

rupture chutent en fonction du temps d'immersion. Cette diminution est d'autant plus grande que la section initiale des fibres est petite. Par ailleurs, nous avons constaté que la chute de résistance des fibres immergées dans la solution de chaux est plus grande que celle des fibres immergées dans la solution de soude. Ce résultat est en accord avec celui de TOLEDO FILHO et al. [27]. En fait, à trois mois dans la solution de chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) les fibres de surface de palmier de diamètre 0.8, 0.6 et 0.4 mm conservent respectivement environ 76%, 48% et 45% de leur résistance initiale, alors qu'elles ne conservent que 69%, 40% et moins de 5% à six mois. Dans la solution de soude ( $\text{NaOH}$ ) les fibres de même diamètre conservent environ 83%, 55% et 40% à trois mois et 76%, 46% et 16% à six mois, respectivement. En outre, nous avons constaté qu'en fonction du temps d'immersion, les fibres deviennent de plus en plus dures et fragiles, à cause du phénomène de cristallisation des fibres par la pénétration des alcalis dans leurs pores. Cette constatation a été aussi faite par BENTUR et AKERS [28] et TOLEDO FILHO et al. [29]. De plus, une réduction dans la section des fibres en fonction du temps d'immersion dans les solution alcalines a été observée.

Bien que les fibres de palmier soient immergées dans des solutions alcalines de pH 12.5, si nous comparons les résistances à la traction en fonction du temps d'immersion avec les résultats de résistances donnés par LEWIS et al. [10] et aussi par AZZIZ et al. [20] relatives à quelques fibres végétales immergées dans une solution de chaux de pH 10, nous pouvons relever que la chute de résistance à la traction en fonction du temps d'immersion des fibres de palmier se situe entre celle des fibres d'herbe d'éléphant et celles de roseau. En effet, LEWIS et al. [10] rapportent que : les fibres d'herbe d'éléphant conservent d'environ 91% de leur résistance initiale à 3 et à 6 mois. Les fibres de roseau conserve environ 57% et 14 % de leur résistance initiale à trois et six mois respectivement.

Ces résultats nous permettent de conclure que les fibres de palmier, comme toutes les fibres végétales, présentent une faible durabilité dans les milieux alcalins et par conséquent dans les milieux cimentaires alcalins. Cela confirme la chute de durabilité des bétons de ces fibres. D'où la nécessité d'améliorer cette durabilité par l'une des propositions citées au paragraphe (2-3-4) du chapitre 2.

Tableau 5-1: Composition de la solution de LAWRENCE [142]

Elément	Na	K	Ca	pH
Composition	0.22 mol/l	0.061 mol/l	0.0065 mol/l	12.95 à 20°C

Tableau 5-2: Résistances à la traction des fibres de palmier en fonction du temps d'immersion dans les solution alcalines (longueur des fibres = 100 mm)

Temps (mois)	Solution Ca(OH) <sub>2</sub>			Solution NaOH		
	Diamètres des fibres (mm)					
	0.8	0.6	0.4	0.8	0.6	0.4
	$\sigma_{ft}$ (MPa)					
0	180±20	160±18	60±15	180±20	160±18	60±15
1	151±11	92±13	39±15	159±14	106±12	58±16
2	146±15	83±15	27±14	153±12	95±15	52±15
3	137±12	77±14	20±07	149±13	88±13	25±13
6	125±12	65±11	-	137±16	74±18	10±06

Table 5-3: Elongations à rupture (%) des fibres de palmier en fonction du temps d'immersion dans les solution alcalines (longueur des fibres = 100 mm)

Temps (mois)	Solution Ca(OH) <sub>2</sub>			Solution NaOH		
	Diamètres des fibres (mm)					
	0.8	0.6	0.4	0.8	0.6	0.4
	Elongations à rupture (%)					
0	20±2	18±2	12±3	20±2	18±2	12±3
1	19±2	16±3	09±2	19±2	17±3	10±2
2	17±2	15±2	07±2	18±2	16±2	08±3
3	15±2	13±3	06±2	17±2	14±3	06±2
6	12±2	08±2	--	13±2	10±2	02±3

Des observations au microscope électronique à balayage (MEB), selon la procédure donnée au chapitre 3 (3-2-5), ont été effectuées dans le but d'élucider le comportement des fibres de palmier utilisées dans les milieux alcalins. Ainsi, les figures 5-1(a,b,c,d) à 5-6(a, b,c,d) présentent les photos au MEB des échantillons typiques de fibres immergées respectivement dans les solutions alcalines suivantes : Ca(OH)<sub>2</sub>, NaOH et la solution de LAWRENCE durant six mois. De même, les figures 5-4 et 5-5 présentent des photos au MEB de fibres typiques extraites des bétons respectivement après douze et six mois de conservation dans l'eau. Par ailleurs, et pour faciliter la comparaison, la figure 5-6 montre les photos au MEB des fibres à l'état naturel. Ces figures visualisent l'état de surface des fibres avant

dégradation et mettent en évidence les alvéoles. Nous rappelons que ces dernières permettent une bonne adhérence fibre-matrice.

La figure 5-1 (a,b,c,d) montre le mécanisme d'attaque de la solution de chaux. Cette dernière se dépose latéralement sur toute la surface des fibres, en suite elle pénètre dans leurs vides et alvéoles, ce qui provoque une altération latérale, générale et continue, Ce mécanisme abouti à une disparition progressive des alvéoles et des filaments ainsi qu'à la réduction de la section des fibres et leur minéralisation. L'augmentation de la fragilité et la chute de la résistance à la traction des fibres, à long terme, dans cette solution alcaline sont dues au mécanisme en question.

La figure 5-2 (a, b, c) illustre le mécanisme d'attaque de la solution de soude. Contrairement à celui de la chaux, l'attaque de la soude est caractérisée par des pénétrations localisées et progressives. En fait, la soude pénètre dans les alvéoles et les vides des fibres et arrache de la matière organique de cette dernière, comme le montre la figure 5-2(d). Cette pénétration provoque des altérations localisées, qui entraînent une disparition progressive des alvéoles et la réduction de la section des fibres, ce qui explique la chute de la résistance à la traction à long terme dans cette solution.

La figure 5-3 (a,b,c,d) montre le mécanisme d'attaque de la solution de LAWRENCE. Nous remarquons que celui-ci est caractérisé par un dépôt de la chaux sur plusieurs parties de la surface des fibres et des pénétrations locales de la soude dans quelques alvéoles. Ainsi nous retrouvons les deux précédents mécanismes d'attaque: Celui de la chaux et celui de la soude. Cela est prévisible du fait que dans la composition de cette solution nous retrouvons la chaux et la soude.

Sur la figure 5-4 (a, b), nous distinguons une dégradation provoquée par un dépôt des produits d'hydratation sur quelques parties de la surface des fibres et par la suite une pénétration et une minéralisation de ces parties. La fig. 5-4(b) montre le dépôt et la pénétration des calcites. Ce mode d'attaque est similaire à celui de la chaux. Cependant, sur la figure 5-4(c, d) nous remarquons quelques dégradations localisées similaires à celles provoquée par la soude. Nous retrouvons ainsi les mêmes types de dégradations que celles causées par la solution de LAWRENCE. Ceci confirme que cette solution simule bien la solution interstitielle des ciments.

La figure 5-5(a) donne la photo au MEB d'un échantillons typique de fibre extrait d'un béton conservé durant six mois dans l'eau, et la figure 5-5(b) montre la zone d'interface fibre-matrice de ce béton. Nous relevons sur la figure 5-5 (a) l'absence des alvéoles et la fibre est devenue relativement lisse.

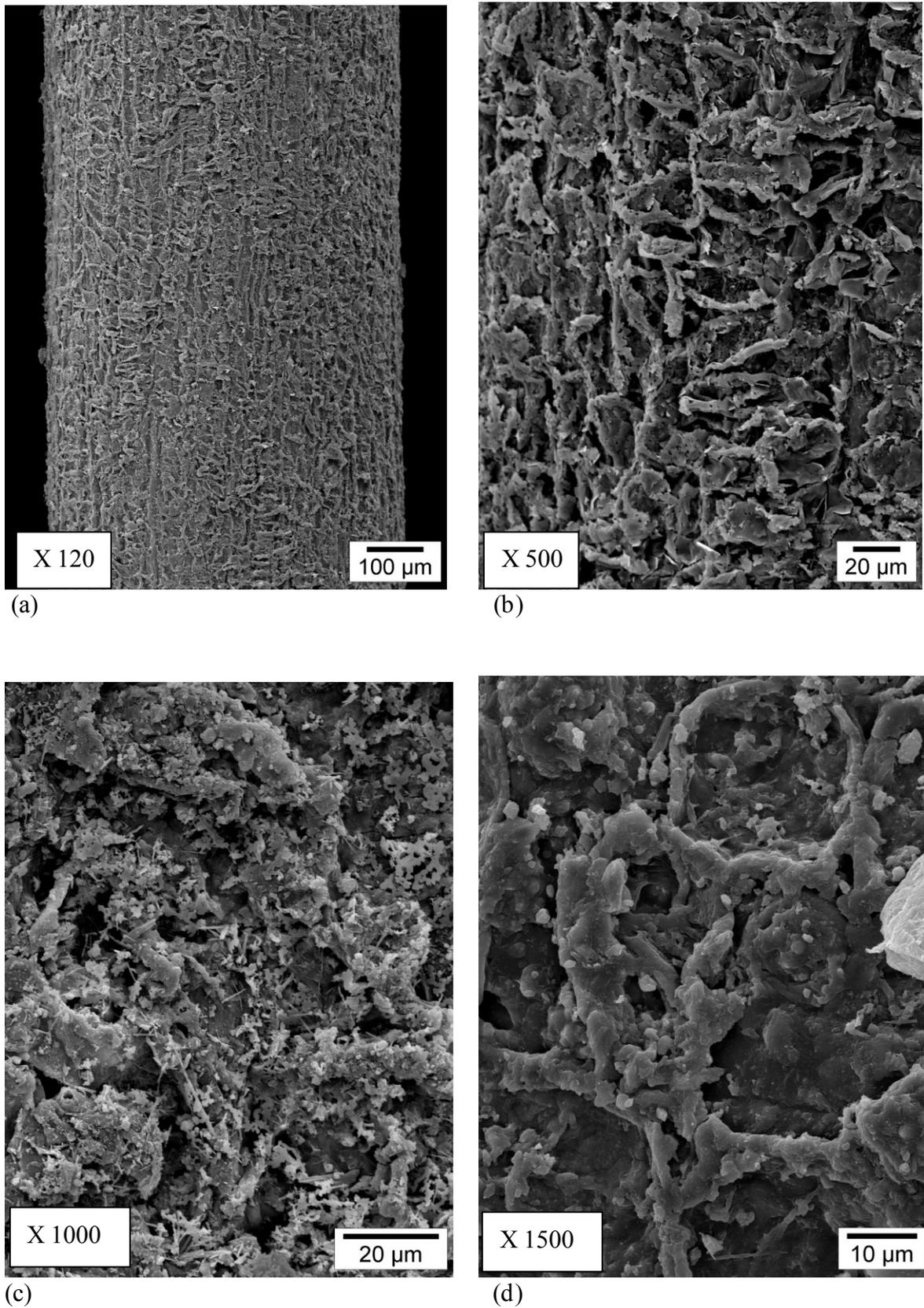


Figure 5-1(a,b,c,d) : Photos au MEB des fibres de palmier typiques immergées six mois dans la chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )

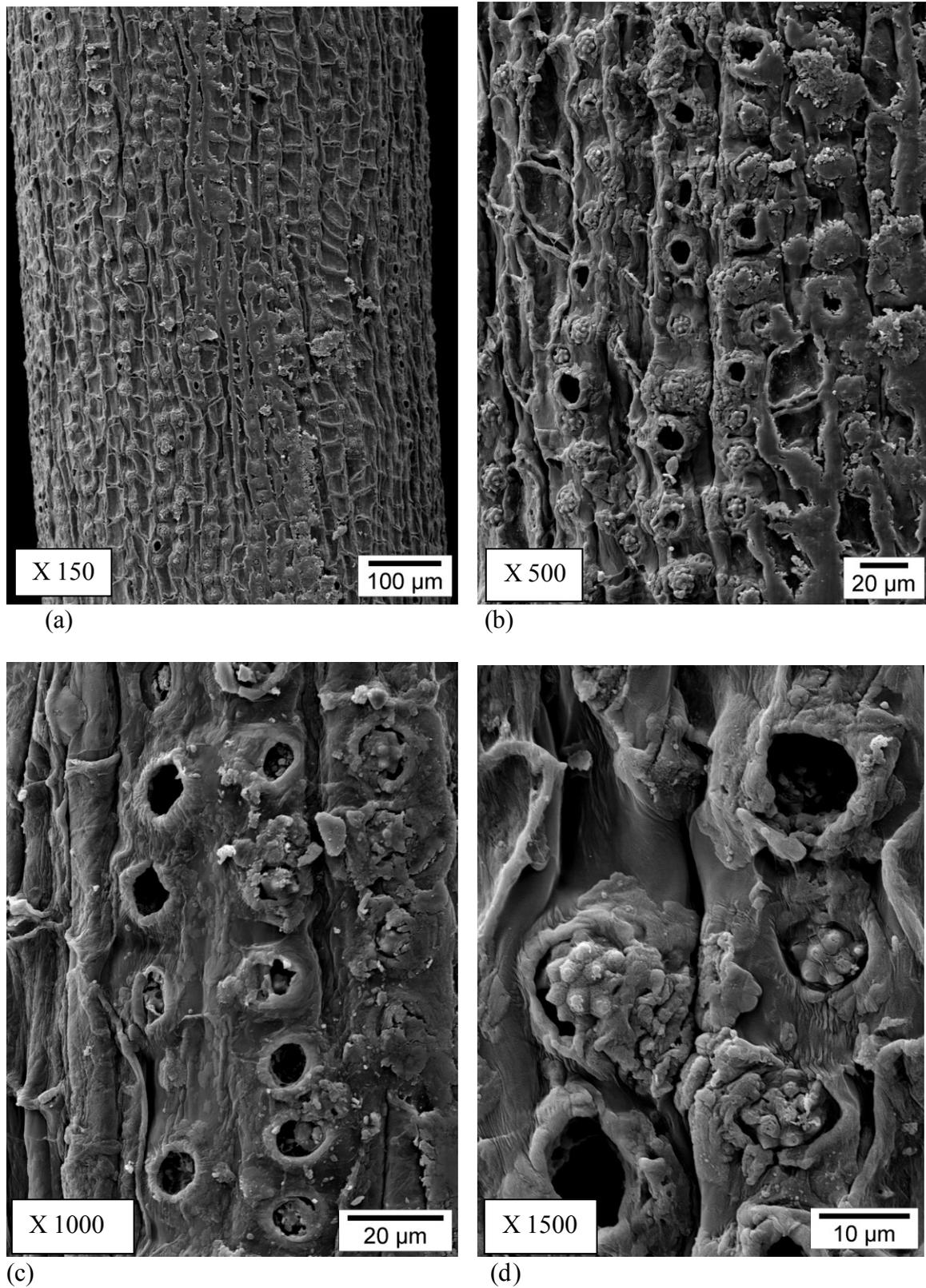


Figure 5-2(a,b,c,d): Photos au MEB des fibres de palmier typiques immergées six mois dans la soude (NaOH)

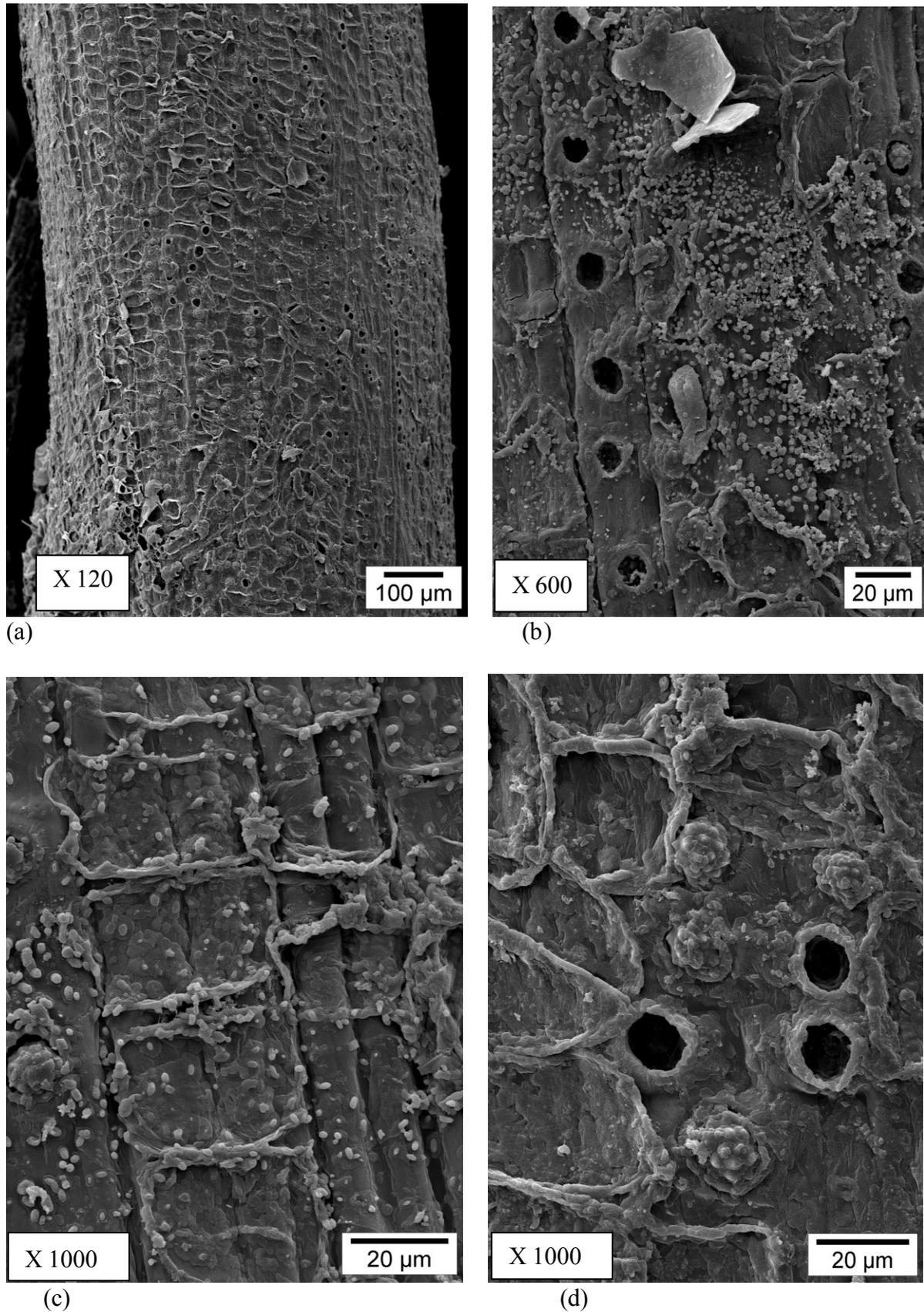
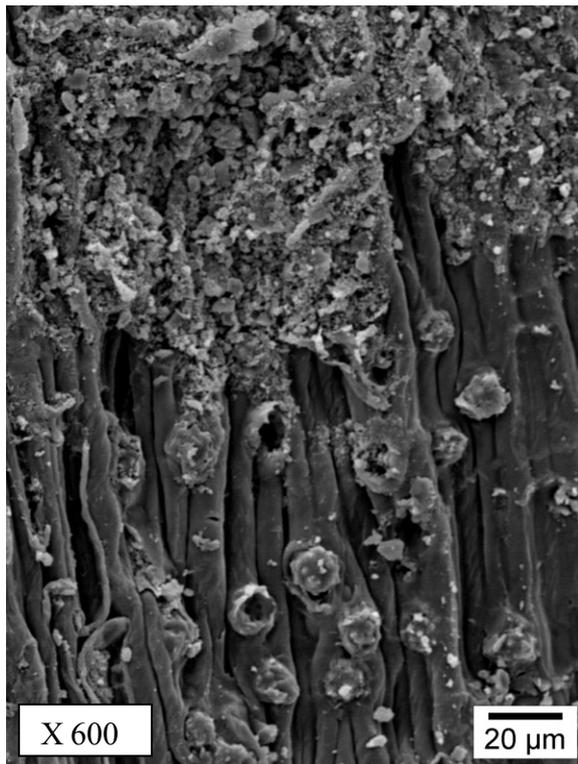
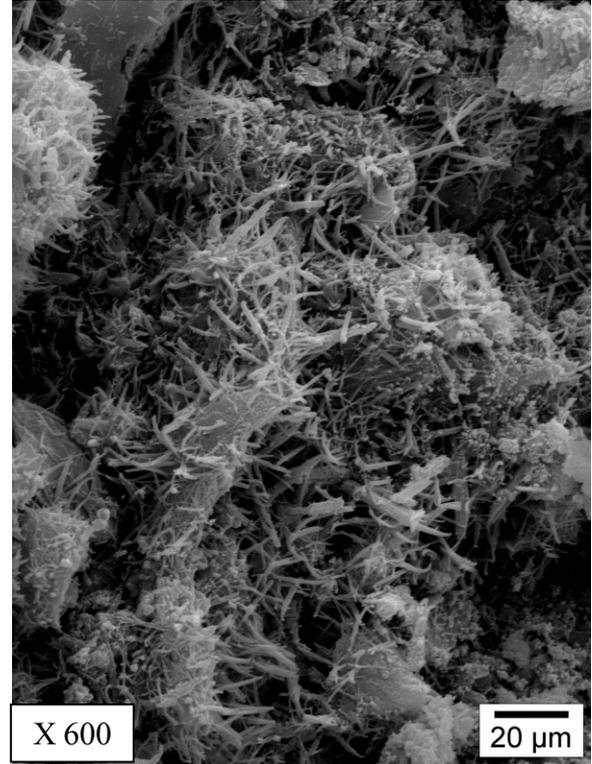


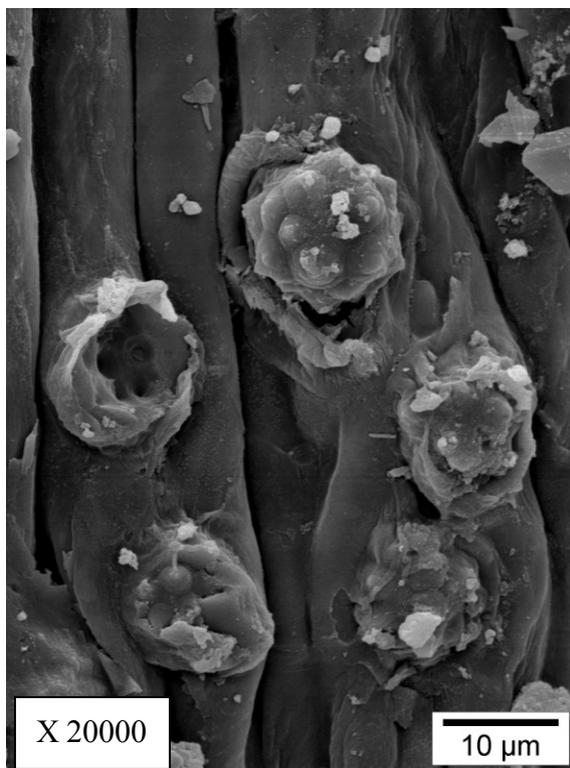
Figure 5-3(a,b,c,d): Photos au MEB des fibres de palmier typiques immergées six mois dans la solution Lawrence



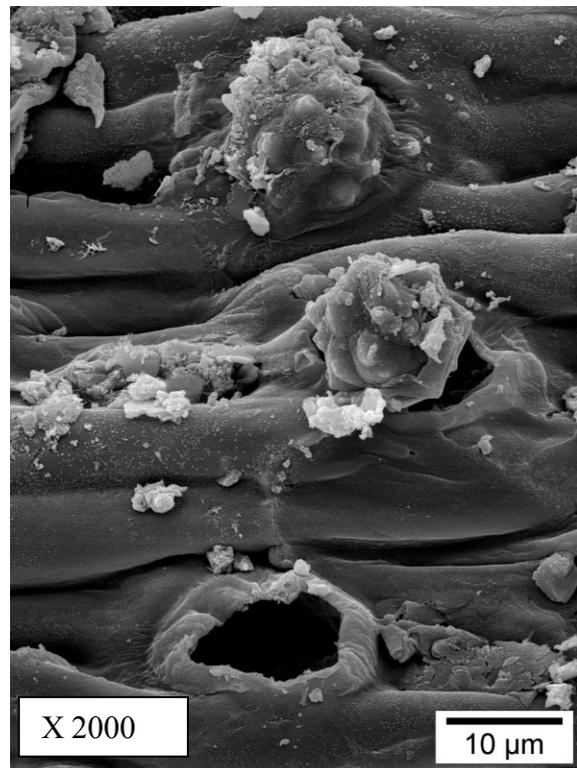
(a)



(b)



(c)



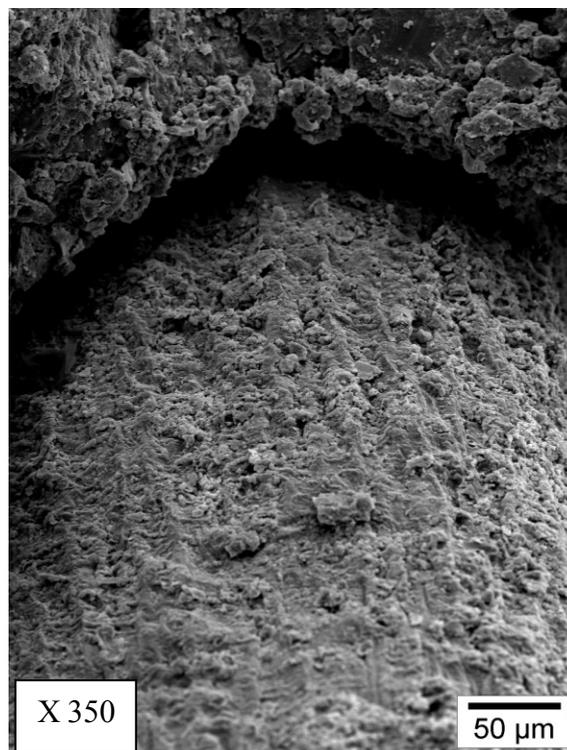
(d)

Figures 5-4(a,b,c,d) : Photos au MEB des fibres de palmier typiques extraites du béton conservé 12 mois dans l'eau

De même sur la figure 5-5(b) nous remarquons le dépôt des produits d'hydratation sur la fibre à l'interface.

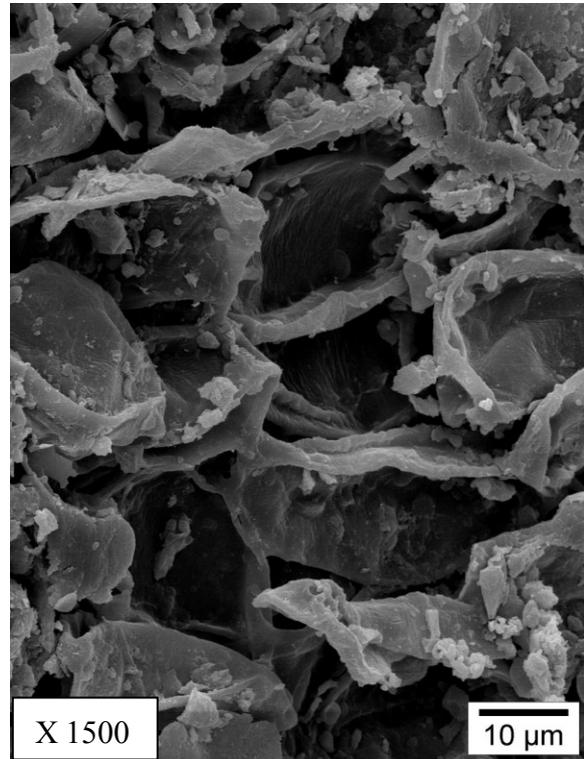
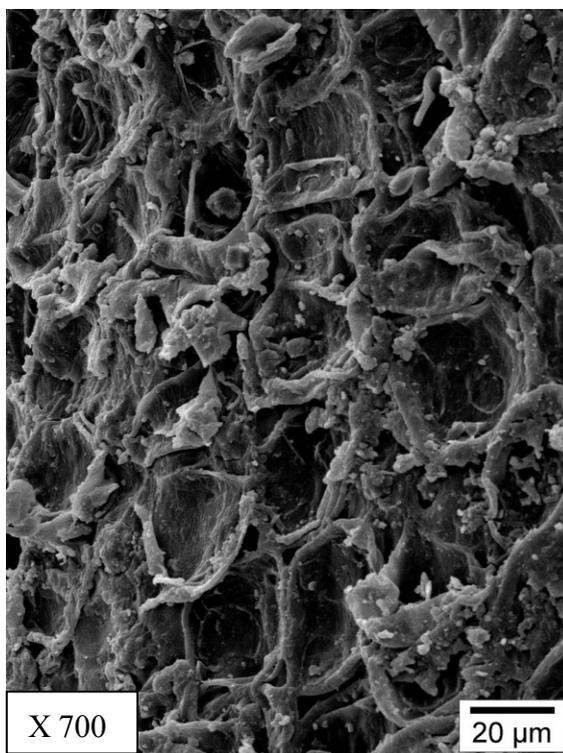
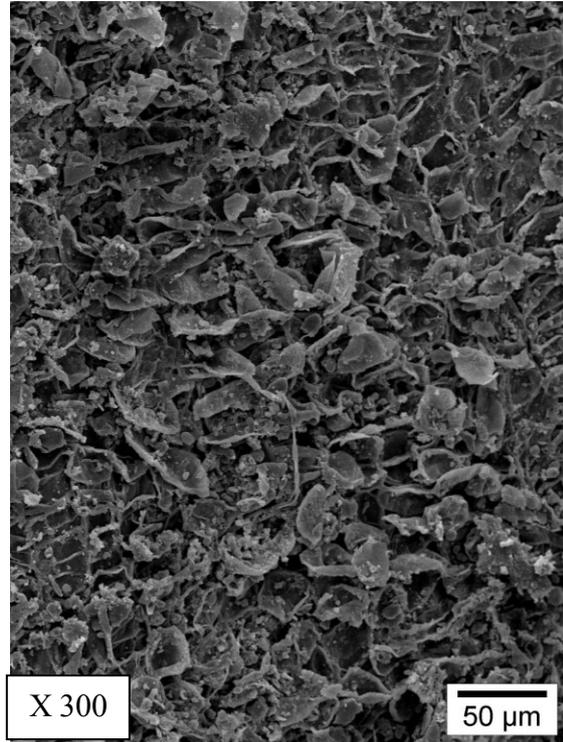
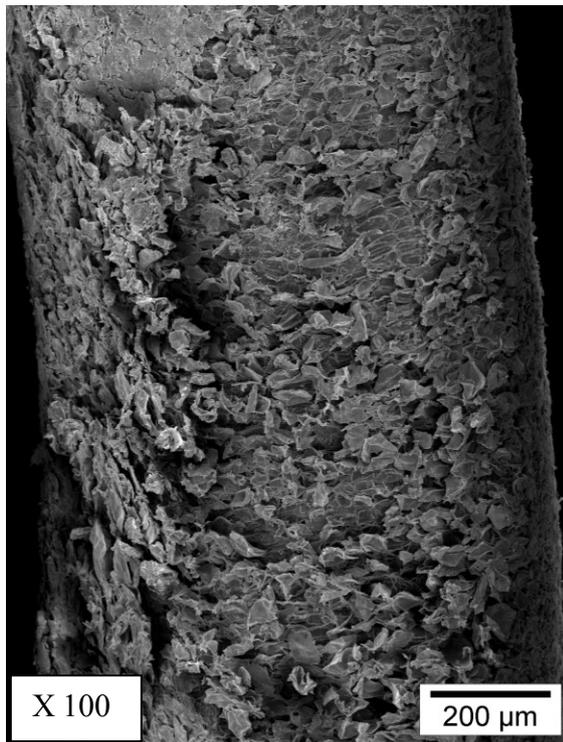


(a) : fibre



(b) : Interface fibre matrice

Figure 5-5(a,b) : Photos au MEB d'une fibre typique de palmier extraite du béton et de la zone d'interface pour un béton conservé six mois dans l'eau



Figures 5-6(a,b,c,d) : Photos au MEB des fibres naturelles.

Ceci explique la chute de la résistance à la flexion des bétons de fibres conservés dans l'eau à long terme. Cela confirme aussi les observations de BENTUR et AKERS [26], relatives à la déposition des produits d'hydratation autour des fibres dans une cure humide et la chute de durabilité des fibres, et par la suite des bétons de fibre.

#### **5-4. Amélioration de la durabilité des bétons de fibres en climat chaud et sec.**

Dans ce qui suit nous allons examiner les possibilités d'amélioration de la durabilité des bétons de fibres de palmier dattier sous l'influence du régime de cure, de la composition du béton et du type du ciment sur la durabilité des BF.

##### **5-4-1. Influence du régime de cure sur la durabilité en climat chaud et sec**

Afin d'améliorer la durabilité des bétons de fibres en climat chaud, nous avons envisagé de les conserver durant les premiers jours dans une chambre humide et saturée dans des conditions climatique ( $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $HR = 100\%$  avant de les exposer à l'environnement chaud-sec dans l'étuve. Pour examiner l'effet de la variation de la durée de cure initiale, dans la chambre humide, sur les propriétés mécaniques, nous avons étudié, dans un premier temps, l'influence de l'augmentation de la durée de cure initiale sur les performances mécaniques des mortiers de fibres. En effet nous avons montré que les propriétés mécaniques des mortiers et bétons de fibres varient de la même manière.

##### **5-4-1-1. Effet du régime de cure sur la résistance des mortiers**

Dans le but d'améliorer les performances mécaniques des mortiers de fibres dans les climats chauds et secs, nous les avons conservés initialement dans un environnement humide durant 7 et 14 jours avant de les exposer à l'environnement chaud et sec, référenciés respectivement par la notation CE7-CU et CE14-CU (voir chapitre 3).

Les résultats des résistances à la compression ( $R_c$ ) et à la flexion ( $R_f$ ), à long terme (180 jours), des mortiers MC1 et MF1 sont respectivement donnés par les figures 5-7 et 5-8. Sur la figure 5-7 nous constatons que la prolongation de la durée de cure initiale dans l'eau a effectivement amélioré les résistances à la compression des mortiers par rapport à celle des mortiers conservés directement dans l'étuve. En effet, les résistances à compression des mortiers conservés dans CE14-CU dépassent celles des mortiers conservés dans CE7-CU. Par

ailleurs, les mortiers conservés dans la cure CE14-CU présentent des résistances à la compression qui se rapprochent de celle des mortiers conservés continuellement dans l'eau. De même, la figure 5-8, montre que le prolongement de la durée de cure initiale dans l'eau a un effet favorable sur l'amélioration des résistances à la flexion des mortiers. En effet, les mortiers conservés dans la cure CE14-CU présentent des résistances aux flexions les plus grandes, dépassant celles des mortiers conservés continuellement dans l'eau. Cette amélioration dans les résistance à la compression et à la flexion par le traitement CE14-CU est attribué à l'activation thermique du processus d'hydratation, comme nous allons le montrer dans ce qui suit.

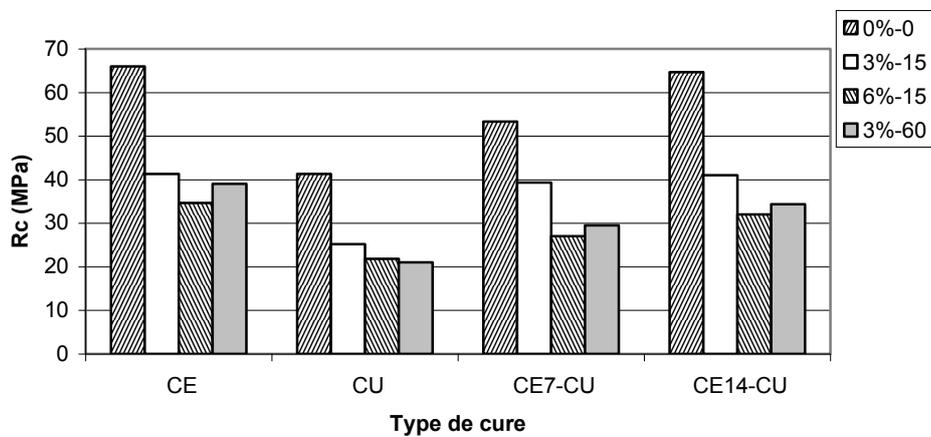


Figure 5-7 : Résistance à la compression ( $R_c$ ) des mortiers en fonction du régime de cure

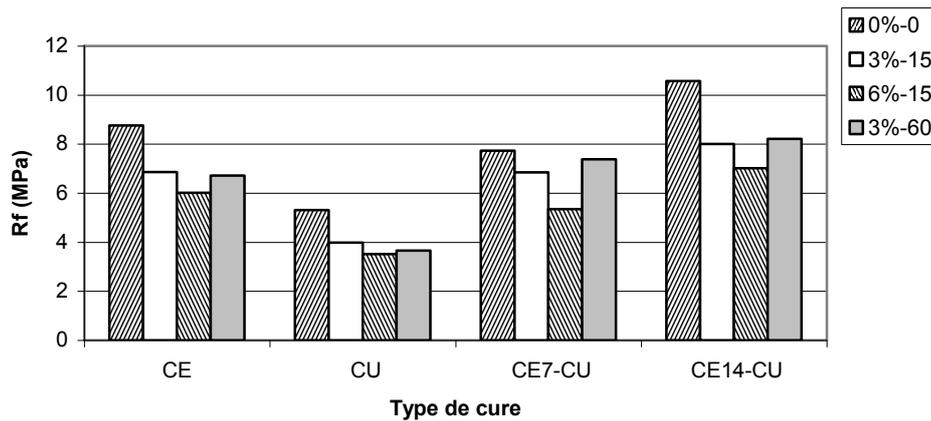


Figure 5-8 : Résistance à la flexion ( $R_f$ ) des mortiers en fonction du régime de cure

### 5-4-1-2. Influence du régime de cure sur la durabilité des BF en climat chaud et sec

Les éprouvettes de béton sont conservées durant 14 jours dans la chambre humide avant de les exposer à la condition chaude et sèche. En fait, nous avons constaté qu'une cure initiale de 14 jours dans une chambre humide a été plus bénéfique pour l'amélioration des propriétés mécaniques des mortiers en climat chaud et sec.

Les résultats de la durabilité des BF sont donnés en fonction de la variation des propriétés de flexion ( $\sigma_0$ ,  $P_{\max}$  et  $D_n$ ) ainsi que quelques observations microscopiques au niveau des fibres extraites des bétons et aux niveaux de l'interface fibre-matrice. Ces résultats sont illustrés sur le tableau 5-4 et par les figures 5-9 et 5-10(a,b).

Le tableau 5-4 montre une amélioration dans les propriétés de flexions ( $\sigma_0$ ,  $P_{\max}$  et  $D_n$ ) des bétons conservés dans la cure CE14-CU par rapport à celles des bétons conservés directement dans l'environnement sec et chaud dans l'étuve durant 180 jours (voir tableau 4-2). En outre, nous remarquons que les bétons conservés dans la cure CE14-CU présentent des contraintes à la première fissuration ( $\sigma_0$ ) qui dépassent légèrement celles des mêmes bétons conservés dans l'eau (CE). Cela est dû à l'activation thermique apportée par l'étuve aux bétons saturés. En réalité, nous avons déjà montré, dans une étude antérieure [51], qu'une activation thermique des bétons classiques et saturés était bénéfique pour l'augmentation de la résistance à la flexion à la première fissuration. Cette observation est en accord avec les travaux de GRAM [143] qui rapporte que le processus d'hydratation des bétons humides est accéléré par l'activation thermique, qui provoque une augmentation dans les produits d'hydratation. Cette conséquence, est à la base de la chute de la durabilité des fibres dans les bétons à long terme. De ce fait, nous constatons que les propriétés de flexion après la première fissuration ( $P_{\max}$  et  $D_n$ ) des bétons de fibres conservés dans la cure CE14-CU sont relativement plus faibles par rapport à celles des BF conservés dans l'eau. En effet, les fibres dans les bétons de la cure CE14-CU sont plus affectées par les produits d'hydratation que celles des bétons dans la cure CE. Cette dernière constatation est mise en évidence par les observations microscopiques au MEB. Aussi, la figure 5-11(a) montre que les fibres extraites du béton conservé dans CE14-CU durant six mois sont plus dégradées que celles extraites du béton de fibres conservé dans l'eau. De même, la figure 5-11(b) montre que les produits d'hydratation autour de la fibre à l'interface, sont plus denses pour les bétons conservés dans CE14-CU par rapport aux bétons conservés dans l'eau. Ceci confirme les observations de GRAM [143], et justifie la chute de durabilité des fibres et bétons de fibres à long terme dans la cure CE14-CU.

Tableau 5-4 : Propriétés de flexion ( $\sigma_0$ ,  $P_{max}$  et  $D_n$ ) du béton classique (BC2) et des bétons de fibres de palmier (BF2) conservés dans la cure CE14-CU.

Paramètres	Cure	Temps (j)	Type de Béton				
			0%-0	2%-15	3%-15	2%-60	3%-60
$\sigma_0$ (CV) (MPa)(%)	CE14-CU	28	7.90 (7.28)	6.74 (4.68)	5.80 (5.60)	6.30 (4.92)	5.60 (6.81)
		180	8.70 (3.08)	7.60 (4.15)	6.50 (3.54)	7.22 (6.12)	6.40 (2.66)
$P_{max}$ (CV) (MPa) (%)	CE14-CU	28	--	0.59 (25.22)	1.50 (25.62)	1.15 (17.84)	2.23 (20.15)
		180	--	0.49 (23.19)	1.20 (12.35)	0.96 (17.03)	1.50 (13.37)
$D_{0.7}$ (CV) (%)	CE14-CU	28	--	0.03 (15.30)	0.13 (09.02)	0.09 (3.91)	0.22(16.51)
		180	--	0.02 (16.36)	0.08 (11.96)	0.05 (34.82)	0.11(28.44)
$D_{1.4}$ (CV) (%)	CE14-CU	28	--	0.04 (41.21)	0.15 (38.03)	0.11 (21.01)	0.19 (10.22)
		180	--	0.03 (13.64)	0.11 (27.64)	0.06 (39.74)	0.15 (22.04)
$D_{2.8}$ (CV) (%)	CE14-CU	28	--	0.03 (38.95)	0.13 (18.35)	0.09 (16.73)	0.18 (26.51)
		180	--	0.02 (16.23)	0.10 (27.46)	0.06 (14.16)	0.13 (28.44)

A titre comparatif les figures 5-9 et 5-10 donnent le comportement à la flexion des bétons conservés dans CE14-CU respectivement durant 28 et 180 jours. Nous remarquons qu'à :

- 28 jours les bétons de fibres conservés dans la cure CE14-CU (figure 5-9) ont presque le même comportement que celui des bétons de fibres conservés dans l'eau (CE), cité au paragraphe 4-3-5 (figure 4-9(a)).

- long terme (180 jours), et avant la première fissuration, les figures 5-10(a, b) indiquent que les bétons de fibres conservés dans la cure CE14-CU et dans l'eau ont également presque le même comportement, élastique et linéaire jusqu'à la première fissuration avec des flèches, pour tous les bétons de fibres d'environ 0.05 mm. Mais, après la première fissuration, il apparaît que la reprise progressive des efforts pour les bétons de fibres conservés dans CE14-CU commence après une ouverture de la fissure correspondant à une déflexion autour de 0.5 mm. Alors que la reprise progressive des efforts pour les bétons de fibres conservés dans l'eau ne commence qu'après une ouverture des fissures qui correspond à une flèche de 0.7 mm. Globalement, après la déflexion de 0.7 mm, les bétons de fibres conservés dans l'eau sont plus ductiles que les bétons de fibres conservés dans CE14-CU.

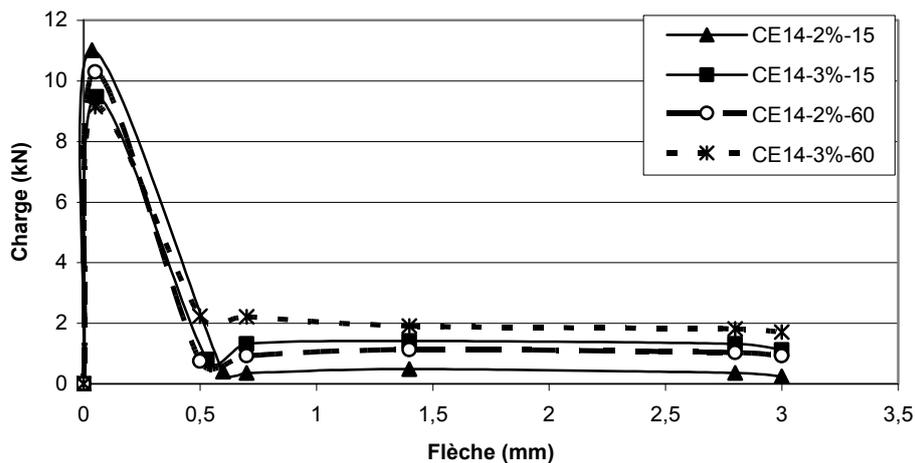
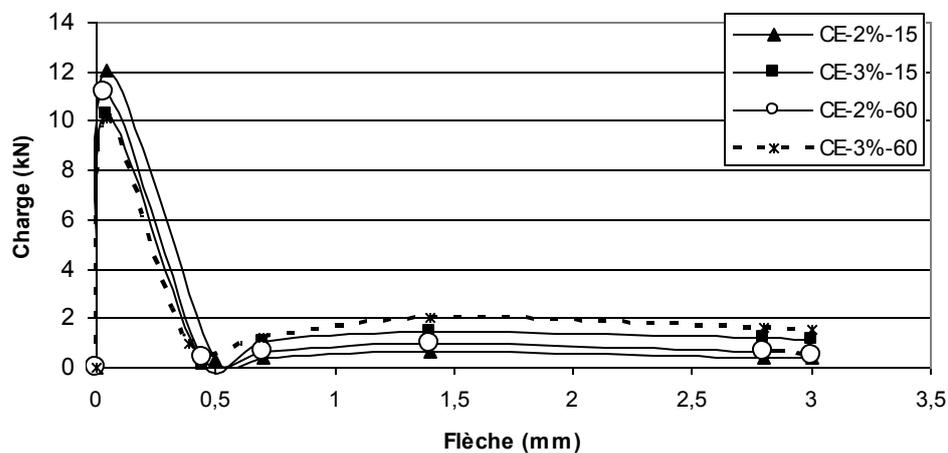
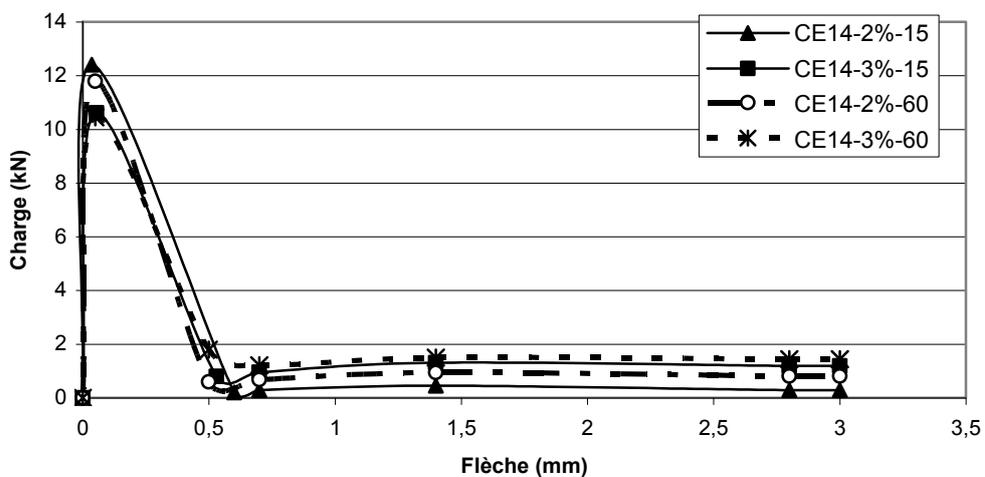


Figure 5-9 : Diagramme Charge-Flèche des bétons de fibres conservés durant 28 jours dans CE14-CU

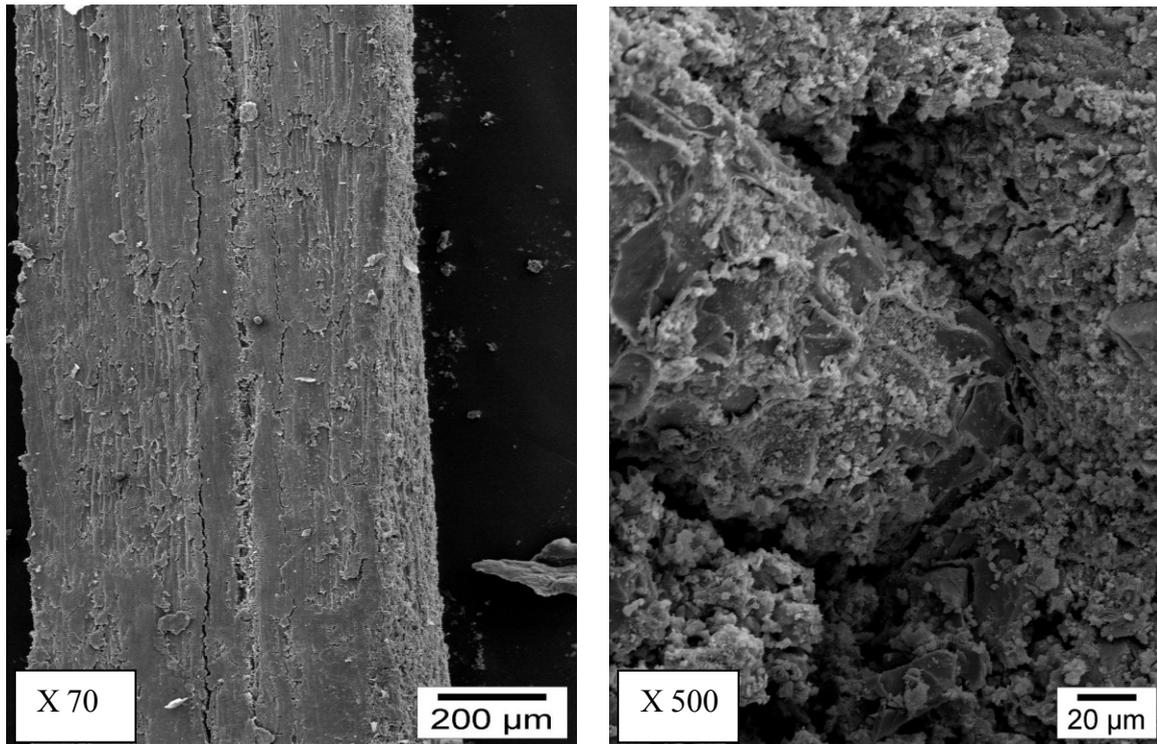


(a) : (CE)



(b) : (CE14-CU)

Figure 5-10 : Diagramme Charge-Flèche des bétons de fibres conservés durant 180 jours dans: (a) CE, (b) CE14-CU



(a) : fibre

(b) : Interface fibre-matrice

Figure 5-11(a,b) : Photos au MEB d'une fibre typique de palmier extraite du béton et de la zone interface fibre matrice pour un béton conservé six mois dans CE14-CU

#### 5-4-2. Influence de la composition des BF sur la durabilité

Les résultats de cette étude sont donnés en fonction de la variation des résistances à la flexion à la première fissuration seulement. La variation des autres propriétés de flexion (après la première fissuration) sera donnée dans une étude ultérieure.

Nous avons constaté que la contrainte à la première fissuration  $\sigma_0$  des bétons de fibres de palmier utilisés BF2 a diminué avec l'augmentation du dosage et de la longueur des fibres dans la matrice des bétons. Cela est probablement dû à deux causes :

- 1- à la composition des bétons de fibres; plus précisément à l'augmentation de la quantité d'eau en fonction de l'augmentation du dosage en fibres, avec le maintien du dosage en ciment fixe.
- 2- à la qualité du ciment ; en effet, le ciment utilisé est un ciment très résistant (CPA-CEM I 5 2,5).

Pour vérifier ces hypothèses et remédier à cette situation, nous avons adopté une autre méthode de composition des bétons de fibres, avec un ciment moins résistant (CPJ-CEM II/A 32.5). La composition adoptée est BF3, avec maintien de la quantité d'eau fixe et utilisation d'un adjuvant. Les fibres individuelles sont bien lavées dans de l'eau plus un faible dosage de

javel (2 ml/l), pour bien enlever la couche de lignine qui entourent la fibre et qui gênent l'adhérence. Les caractéristiques du ciment utilisé et la composition de BF3 sont données au chapitre 3, paragraphe 3-3-3 (tableau 3-7) et 3-5-2-2.

Le tableau 5-5 donne les résistances à la première fissuration à 28 jours des bétons en fonction du type de conservation, pour les bétons classiques BC3 et les bétons de fibres BF3. Les bétons sont conservés dans l'eau (CE) et dans la cure mixte (CE14-CA): conservation durant les 14 premiers jours dans une chambre humide, ensuite à l'air libre.

Tableau 5-5 : Contrainte à la première fissuration ( $\sigma_0$ ) à 28 jours du béton classique (BC3) et des bétons de fibres de palmier (BF3) conservés dans CE et CE14-CA

Cure	Type de béton						
	0%-0	2%-15	2%-30	2%-60	3%-15	3%-30	3%-60
	$\sigma_0$ (MPa)						
CE	3.46±0.43	3.65±0.53	3.73±0.56	3.98±0.58	3.56±0.61	3.66±0.65	3.85±0.58
CE14-CA	3.47±0.39	3.67±0.43	3.75±0.47	4.00±0.24	3.60±0.47	3.70±0.52	3.92±0.56

Les résultats du tableau 5-5 montrent que les contraintes à la première fissuration des bétons de fibres dépassent celle du béton classique, et la contrainte optimale est donnée par le béton de fibre 2%-60. De plus, l'activation thermique des bétons de fibres saturés est toujours bénéfique pour l'augmentation de la résistance à la première fissuration. De ce fait les contraintes à la première fissuration des bétons dans la cure CE14-CA dépassent celles des bétons conservés dans l'eau. Ainsi une amélioration dans la contrainte à la première fissuration à 28 jours pour les bétons de fibres de palmier peut être obtenue par une composition appropriée avec utilisation d'un ciment de moyenne résistance et la réduction dans la quantité globale de l'eau de gâchage.

Par ailleurs, les résultats de l'évolution de la contrainte à la première fissuration en fonction de l'âge, pour le béton le plus résistant 2%-60, est donnée par la figure 5-12. Contrairement aux bétons de fibres BF2, nous remarquons que la contrainte à la première fissuration du béton de fibre 2%-60 avec la composition BF3 diminue avec l'âge. Cette chute de résistance est probablement due d'une part à la résistance moyenne du ciment utilisé (C1: CPJ-CEM II/A) et d'autre part à la chute de durabilité des fibres dans la matrice cimentaire.

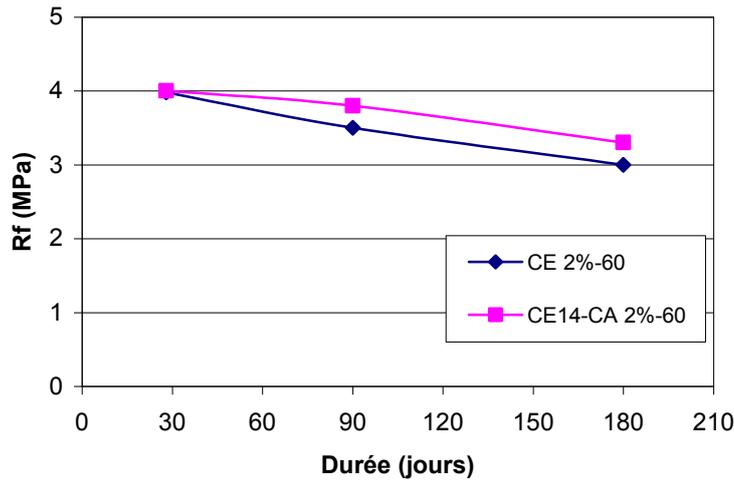


Figure 5-12 : Influence de l'âge et du régime de cure sur la résistance à la première fissuration du béton de fibre 2%-60 confectionné par la composition BF3

#### 5-4-3. Effet du type de ciment sur la résistance et sur la durabilité des mortiers

Nous avons vu au chapitre précédent que les fibres de surface de palmier dattier sont très affectées par les alcalis des ciments ce qui provoque une chute des performances mécaniques (résistances et durabilités) des matériaux composites à base de ces fibres, qu'ils soient bétons ou mortiers. Nous avons vu aussi que l'une des solutions pratiques pour remédier à ce problème, consistait à utiliser un ciment à faible teneur en chaux. A cet effet, le ciment utilisé dans notre étude, est le CHF CEM II 32.5 et les mortiers préparés sont les MC2 et MF2 dont les caractéristiques sont données au chapitre 3.

##### 5-4-3-1. Effet du type de ciment sur la résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression en fonction du régime de cure des mortiers ( $R_c$ ) sont donnés par les figures 5-13 et 5-14. Nous constatons, qu'en général, les résistances à la compression du mortier classique à base de ce ciment CFH sont relativement faibles par rapport à celles à base de ciment CPA CEM I 52,5. Cela est dû au fait que la classe de résistance de ciment CHF utilisée est inférieure à celle du ciment CPA CEM I.

Cependant, à l'étuve, nous retrouvons les mêmes constatations que celles établies sur les mortiers ou les bétons à base de CPA CEM I 52.5 conservés à l'air libre, à savoir une chute de résistance et de durabilité en fonction de l'augmentation du dosage et de la longueur des fibres. Cela est dû aux mêmes causes citées dans le paragraphe 4-3-4 du chapitre 4.

Par ailleurs, dans l'eau, bien que les résistances des mortiers de fibres diminuent toujours en fonction de l'augmentation du dosage et de la longueur des fibres (dans la matrice). La chute

des résistances des mortiers de fibres MF2 par rapport au mortier classique MC2 reste moins importante que celle des mortiers de fibres MF1 par rapport au mortier classiques MC1. A titre d'exemple la chute relative de résistance à la compression de MF2 par rapport à MC2 du mortier de fibre le moins résistant (3%-60) est de 20% et 16% respectivement à 28 et 180 jours. Alors que celle du MF1 par rapport à MC1 est de 45% et 41%. Cela est certainement dû à la bonne tenue des fibres, du point de vue durabilité, dans la matrice cimentaire CHF ce qui augmente leur adhérence avec la matrice et diminue leur porosité et leur indice des vides et par conséquent augmente leur résistance à la compression.

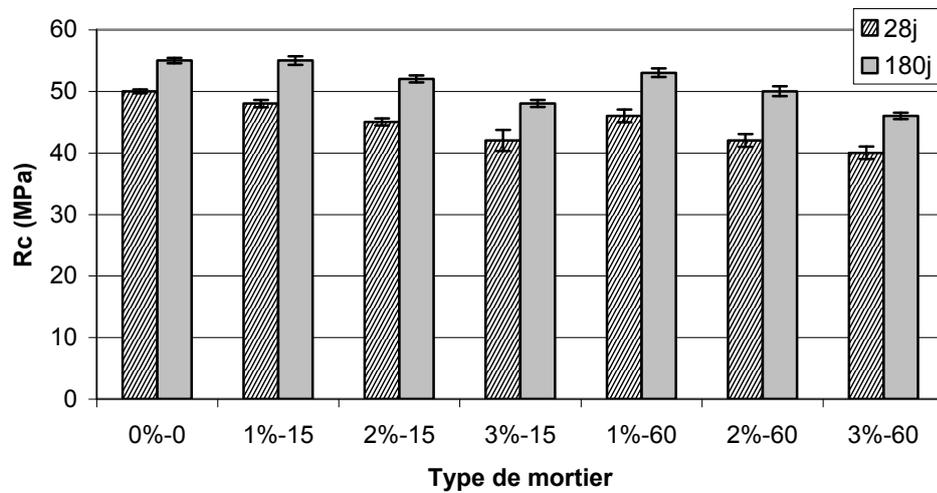


Figure 5-13 : Résistance à la compression des mortiers MC2 et MF2 conservés dans l'eau en fonction des dosages et des longueurs des fibres.

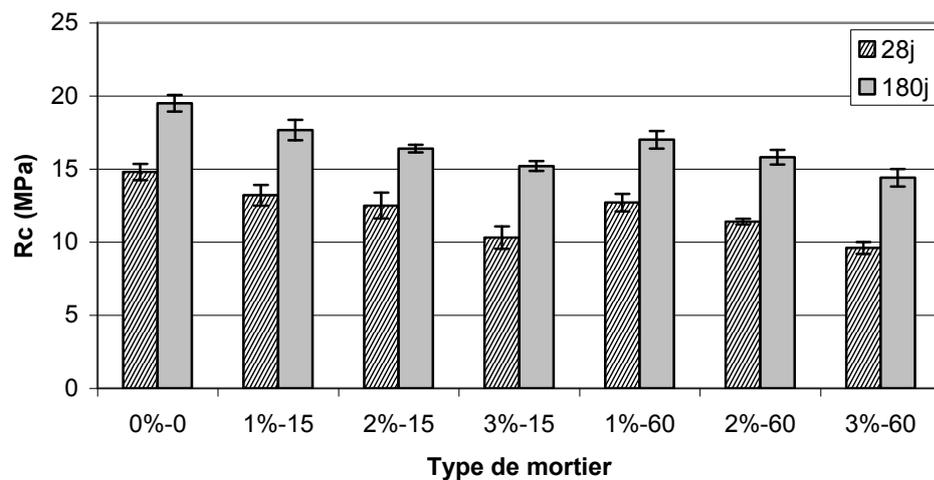


Figure 5-14 : Résistance à la compression des mortiers MC2 et MF2 conservés dans l'étuve en fonction des dosages et des longueurs des fibres.

### 5-4-3-2. Effet du type de ciment sur la résistance à la flexion

Les résultats de cette étude sont illustrés par les figures 5-15 et 5-16. Nous constatons qu'à l'étuve, le changement de ciment n'améliore pas la résistance à la flexion des mortiers ( $R_f$ ) (figure 5-16). En effet, les mêmes constatations ont été faite que pour les mortiers à base de CPA CEM I 52,5, conservés dans l'étuve (voir Figure 4-18 et paragraphe 4-2-2). Principalement le mortier classique reste le plus résistant, et la résistance des mortiers de fibres diminue en fonction de l'augmentation des dosages et des longueurs de fibres dans la matrice. Par ailleurs, pour chaque type de mortier, la résistance à la flexion diminue avec l'âge.

Cependant, nous remarquons une relative amélioration dans les résistances à la flexion des mortiers conservés dans l'eau (figure 5-15). Ainsi, pour chaque durée de cure et chaque type de mortier, nous constatons que les résistances à la flexion du mortier classique à base de ce ciment CHF se rapprochent de celle du mortier classique à base du CPA CEMI 52.5 (figure 4-17), malgré que la classe du ciment CHF utilisé soit de 32.5 MPa. Nous notons cependant, les résistances à la flexion des mortiers de fibres à base de ciment CHF dépassent celles des mortiers de fibres à base de CPA CEM I 52.5. Cela est aussi du à la bonne durabilité des fibres dans la matrice cimentaire CHF, ce qui augmente leur adhérence avec la matrice et augmente ainsi leur résistance à la flexion. De ce fait, nous constatons aussi que pour chaque durée de cure, les résistances à la flexion des mortiers de fibres 2%-15 et 2%-60 dépassent celles du mortier classique et l'optimum est obtenu par le mortier 2%-60. Ce qui confirme les révélations des chercheurs de la bibliographie concernant la bonne durabilité des fibres végétales dans les ciments à faible teneur en chaux.

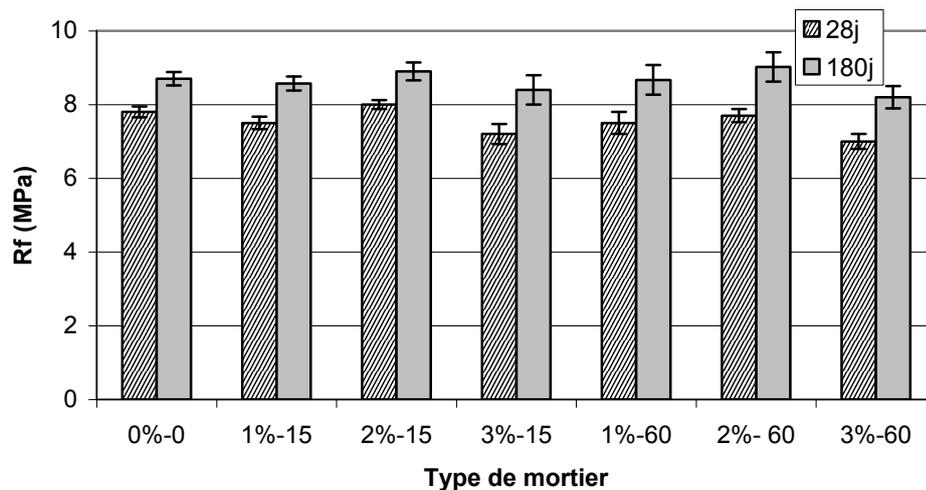


Figure 5-15 : Résistance à la flexion des mortiers MC2 et MF2 conservés dans l'eau en fonction des dosages et des longueurs des fibres.

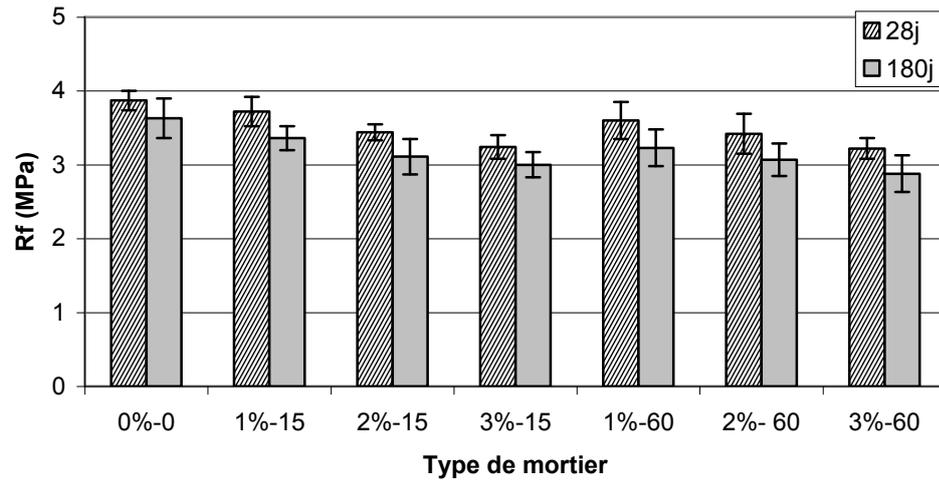


Figure 5-15 : Résistance à la flexion des mortiers MC2 et MF2 conservés dans l'étuve en fonction des dosages et des longueurs des fibres.

Ainsi, si nous exprimons la durabilité des mortiers de fibres par la variation de leur résistance à la flexion à long terme (180 jours). Nous remarquons que l'utilisation du ciment CHF à faible teneur en chaux a un effet favorable sur la durabilité des mortiers de fibres plus notablement dans un environnement humide et saturé. Dans le climat chaud et sec une conservation initiale d'au moins 14 jours dans une cure humide est nécessaire pour avoir une bonne durabilité à long terme.

### 5-5. Conclusion

La durabilité des bétons de fibres (BF2), est très faible en environnement chaud et sec. Elle est relativement faible dans les environnements humides. La chute de durabilité des bétons de fibres dans le premier environnement est due au freinage des processus d'hydratation à court terme et à l'extension des micro-fissures et des vides à long terme. Alors que la chute relative de la durabilité dans les environnements humides est due à la chute de la durabilité des fibres dans la matrice cimentaire.

Les fibres de palmier, comme toutes les fibres végétales, présentent une faible durabilité dans les milieux alcalins et par conséquent dans les milieux cimentaires alcalins. Cela confirme la chute de durabilité des bétons de ces fibres dans les cures humides.

Nous avons montré que la chaux attaque les fibres de palmier par un dépôt et une pénétration dans les vides et alvéoles des fibres de l'hydroxyde de calcium, qui provoquent une altération générale et une réduction de la section des fibres ainsi qu'une chute de leur

résistance. Alors que la soude attaque localement en plusieurs endroits les fibres, elle pénètre dans quelques vides et dans les alvéoles des fibres et arrache de la matière organique entraînant ainsi la chute de leur résistance à la traction. Enfin, dans la solution de LAWRENCE le mécanisme d'attaque est la réunion des deux précédents mécanismes (la chaux et la soude). Ce mécanisme est similaire au mécanisme d'attaque des fibres par les produits d'hydratation des ciments.

Quant à l'effet du mode et régime de cure (CE7-CU ou CE14-CU), nous avons constaté que la prolongation de la durée de cure initiale dans l'eau avait un effet favorable sur l'amélioration des propriétés mécanique des mortiers de fibres. De ce fait, les mortiers des fibres conservés dans la cure CE14-CU ont présenté :

- 1- des résistances à la compression qui dépassent sensiblement celles des mortiers conservés dans l'étuve et qui se rapprochent de près celles des mortiers conservés dans l'eau.
- 2- des résistances à la flexion qui dépassent celles des mortiers conservés dans l'eau.

Pour remédier à la chute de durabilité des bétons de fibres BF2 dans les cures chaudes et sèches nous avons conservé le béton durant les 14 premiers jours dans un environnement humide et saturé avant de les exposer à l'environnement chaud et sec. Nous avons enregistré une relative amélioration dans les contraintes à la flexion aux premières fissurations. Cependant, nous avons relevé une chute dans leurs propriétés de flexion après la première fissuration, autrement dit une chute dans leur ductilité. Cette dernière est due à la chute de durabilité des fibres dans le milieu cimentaire alcalin suite à l'activation de l'hydratation du béton saturé dans l'environnement chaud.

Nous avons constaté que l'utilisation d'un réducteur d'eau et d'un ciment de moyenne résistance dans la composition des bétons de fibres (BF3) a permis d'améliorer les contraintes aux premières fissurations des bétons de fibres par rapport au béton classique BC3.

L'étude comparative de la durabilité des mortiers de fibres à base du ciment CHF CEM III 32.5 (à faible teneur en chaux) et à base de CPA CEM I 52.5 a montré qu'à long terme (180 jours), les mortiers de fibres à base de CHF ont une bonne durabilité, par rapport aux mortiers à base de CPA, uniquement dans la cure CE. En effet, dans l'environnement chaud et sec (CU) l'utilisation des CHF n'avait aucun effet bénéfique pour l'amélioration de la durabilité. De ce fait dans le climat chaud et sec une cure humide initiale est fortement recommandée.

## **Retrait des mortiers de fibres de palmier en climat chaud et sec**

### **6-1. Introduction**

Les matériaux à base de ciment, en l'occurrence le béton et le mortier classiques résistent très mal à la traction et à la fissuration. Les environnements chauds et secs, tels que les régions sahariennes de notre pays dessèchent ces matériaux hydrauliques ce qui induit des retraites importants sur les matériaux et des fissures dans les structures. En effet, les constructions en béton dans ces régions sont très fragiles, le renforcement de ces matériaux par des fibres peut offrir des solutions techniques pour l'amélioration des performances mécaniques et rhéologiques.

De la littérature nous avons tiré quelques exemples de réduction des retraites des bétons par le renforcement de ce matériau par des fibres métalliques, entre autre, les travaux de SOROKA [93] et ALEKRISH et ALSAYED [94].

L'objectif de ce présent chapitre est l'examen de l'effet de l'ajout de fibres de surface de palmier dattier sur le retrait des mortiers de fibres en climat chaud et sec.

Nous rappelons les cures utilisées sont: une conservation continue dans l'eau (CE), une conservation continue dans l'étuve (CU), une conservation mixte dans la chambre humide durant les 7 premiers jours ensuite dans l'étuve (CE7-CU) et une autre conservation mixte, dans la chambre humide durant 14 jours puis dans l'étuve (CE14-CU). Les mortiers utilisés sont:

- Mortier Classique 1 (MC1) : Les matériaux utilisés sont le C2 (CEM I 52.5), S2.
- Mortier Classique 2 (MC2) : Les matériaux utilisés sont le C3 (CHF), S2.
- Mortier de Fibre 1 (MF1) : Les matériaux utilisés seront le C2, S2, et les fibres de surface du palmier mâle.
- Mortier de fibre 2 (MF2) : Les matériaux utilisés seront le C3, S2, et les fibres de surface du palmier mâle.

Le dosage en volume des fibres varie de 1% à 3% pour les fibres de longueur 60mm et de 1% à 6% pour les fibres de 15 mm.

## 6-2. Retrait des mortiers de fibres

Des éprouvettes 4x4x16 mm, munies de plots aux extrémités, sont utilisées pour mesurer le retrait sur mortier normalisé avec ou sans fibres de palmier, selon la norme NF 15-433 [144], et à l'aide d'un rétractomètre numérique E0078 M (CONROLAB) (Voir la photo 6-1 en Annexe). Les mesures de retrait de référence et des poids initiaux des différentes éprouvettes étaient faites à 1 jour au moment du démoulage. En suite les éprouvettes sont conservées dans différentes cures (CU, CE7-CU et CE14-CU) jusqu'à la date de mesure : 7, 14, 28, 90, et 180 jours. Pour chaque période trois éprouvettes par type de mortier sont testées. Avant les mesures du retrait, les éprouvettes sont pesées, avec une erreur relative inférieure à 0.001, pour calculer la perte en eau.

### 6-2-1. Retrait des mortiers de fibres conservés dans un climat chaud et sec

La figure 6-1 donne les résultats du retrait des mortiers classiques et des mortiers de fibres de surface de palmier dattier conservés dans l'étuve (CU).

Nous remarquons qu'au delà de 28 jours, le retrait des mortiers de fibres augmente avec l'augmentation du dosage et des longueurs de fibres dans la matrice mortier. Le mortier 1%-15 présente le retrait le plus petit parmi tous les autres types de mortiers de fibres testés y compris le béton classique. Contrairement au fibres d'acier, l'augmentation du dosage (plus de 1%) des fibres de palmier, qui se caractérise par un pouvoir hydrophile très élevé, augmente le retrait. Cela est probablement dû aux causes suivantes :

- 1- Nous avons vu au chapitre 3 que pour compenser le pouvoir hydrophile très élevé des fibres de palmier, nous avons augmenté, en fonction de l'accroissement du dosage en fibre, et d'une façon significative la teneur en eau dans le composite. Ce qui augmente le taux des pores saturés et par évaporation, augmentant ainsi le retrait.
- 2- Les conditions climatiques sévères de la cure CU provoque aussi le rétrécissement des fibres, ce qui amplifié le retrait du composite surtout pour les mortiers de fibres avec des dosage élevés (supérieur à 1 %).

C'est pour cela que seul un renforcement avec des dosages faibles (1%) peut relativement améliorer le retrait.

De ce fait, les mortiers de fibres 1%-15 et 1%-60 présentent à 28 jours des retraits inférieurs au mortier classique respectivement de l'ordre de 11% et 8%. Alors qu'à 180 jours

les réductions dans les retraits des mortiers sont respectivement de l'ordre de 6% et 5% seulement. Ces observations sont en accord avec la plupart des chercheurs de la littérature. Cependant, les taux de réduction des retraits et notamment ceux à long terme (6% ou 5%) restent très faibles par rapport à ceux obtenus par RAMASWAMY et al. [19] relatifs aux bétons de fibres de jute et de noix de coco, avec le même dosage volumique en fibre (1%). Par ailleurs, au delà de 28 jours, nous relevons que les mortiers de fibres 3%-15 et 3%-60 présentent des retraits légèrement supérieur a celui du mortier classique. Alors que celui du mortier 6%-15 est largement supérieur au retrait du mortier classique.

Les variations qui lient le retrait à la perte en poids ou en eau des mortiers sont données par la figure 6-2. Nous constatons que les courbes présentent des allures proches de celles données par HOUARI [52] et VERBECK [96] (voir figure 2-19 du chapitre 2). En effet, chaque courbe de la figure 6-2, est caractérisée par une première zone linéaire de pente  $\alpha_i$ , correspondant à une durée de conservation de 1 à 7 jours et une deuxième zone non linéaire correspondant à une durée de conservation de 7 à 180 jours. Des interpolations linéaires de pentes  $\beta_i$  de la deuxième zone sont obtenues, comme le montre les figures 6-3(a,b).

Nous remarquons que les pentes  $\alpha_i$  des courbes de la figure 6-2, diminuent en fonction de l'augmentation du dosage en fibres dans la matrice. Nous rappelons que les  $\alpha_i$  interprètent la cinétique du retrait dû à l'évaporation de l'eau des capillarités des mortiers. Cela signifié que durant la période (de 1 à 7 jour), les retraits diminuent en fonction de l'augmentation du pourcentage en fibres..

Par ailleurs, sur les figures 6-3(a,b) nous relevons que les pentes  $\beta_i$  des mortiers 0%-0, 1%-15, 1%-60, 3%-15, 3%-60 et 6%-15 sont respectivement 172, 123, 122, 212, 274 et 691. Ainsi, à l'exception des mortiers dosés à 1% de fibres, les pentes  $\beta_i$  des mortiers de fibres sont supérieures à celle du mortier classique. Nous rappelons aussi, que les pentes  $\beta_i$  interprètent plutôt, la cinétique des retraits dus au départ de l'eau des pores du mortier. Ce qui signifie que les dosages élevés en fibres des mortiers (au delà de 1%) entraînent l'augmentation des taux de pores saturés. Cela explique les valeurs élevées des retraits finaux des mortiers de fibres dosés à 3% et 6% de fibres par rapport au mortier classique et cela explique aussi pourquoi les mortiers de fibres dosés avec 1% de fibres ont des retraits légèrement inférieurs à ceux du mortier classique.

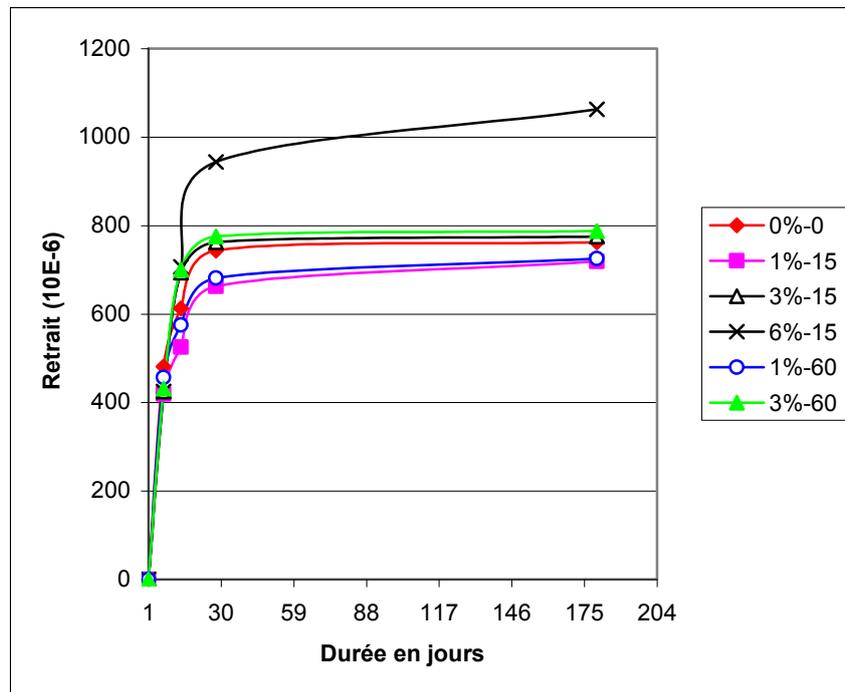


Figure 6-1 : Retrait des mortiers de fibres de palmier conservés dans l'étuve (CU)

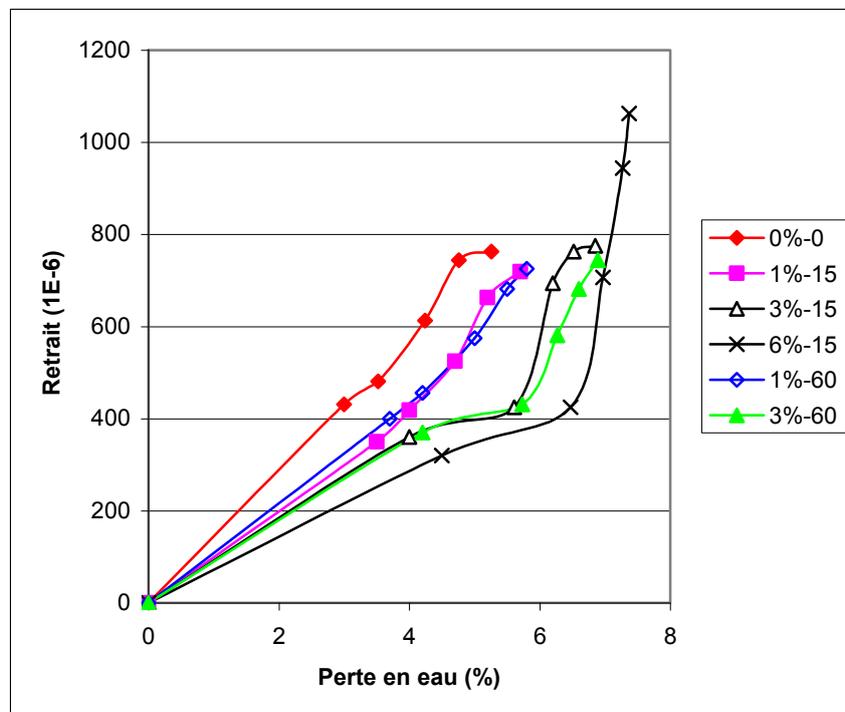
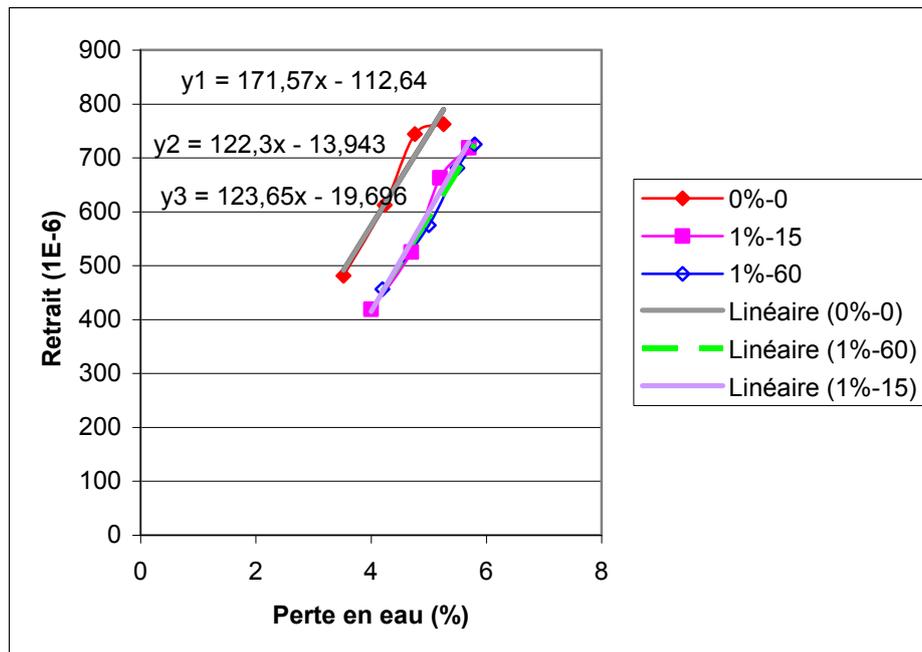
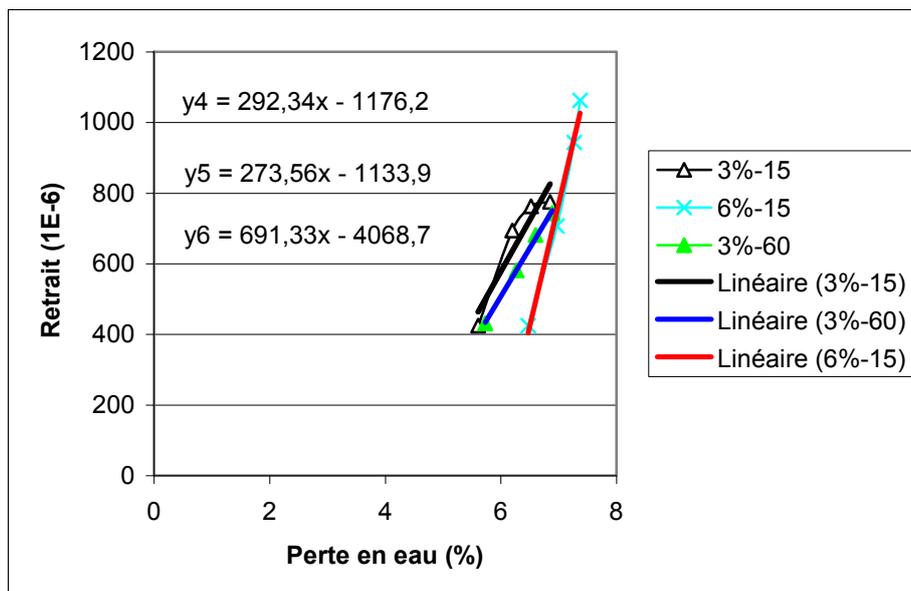


Figure : 6-2 : Relation retrait-perte d'eau des mortiers conservés dans CU



(a)



(b)

Figure 6-3(a,b) : Interpolation linéaire des courbes retrait-pertes dans des mortier conservés dans CU

Avec :

- y1 : Courbe linéaire (0%-0)
- y2 : Courbe linéaire (1%-60)
- y3 : Courbe linéaire (1%-15)
- y4 : Courbe linéaire (3%-15)
- y5 : Courbe linéaire (3%-60)
- y6 : Courbe linéaire (6%-15).

### 6-2-2. Effet du régime de cure sur le retrait

Afin de réduire le retrait des mortiers de fibres dans les climats chauds et secs nous avons envisagé de les conserver durant les premiers jours dans une cure initiale humide avant de les exposer à la cure chaude et sèche. Pour cela deux modes de conservation sont utilisés :

- CE7-CU: conservation les 07 premiers jours dans une chambre humide et saturé sous des conditions climatique de  $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $HR = 100\%$  ensuite dans l'étuve sous les condition  $T = 32 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $HR = 28\% \pm 2$ .
- CE14-CU: conservation les 14 premiers jours dans une chambre humide et saturé sous des conditions climatique de  $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $HR = 100\%$  ensuite dans l'étuve sous les condition  $T = 32 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $HR = 28\% \pm 2$ .

Les résultats de cette étude sont rapportés sur les figures 6-4 et 6-5.

Nous constatons que pour les deux régimes de cure CE7-CU ou CE14-CU, les mortiers de fibres dosés à 3% et 6% de fibres présentent toujours des retraits supérieurs au mortier classique. Par contre les mortiers de fibres 1%-15 et 1%-60 présentent des retraits relativement inférieurs au mortier de référence. De ce fait, les taux de réduction du retrait pour le mortier 1%-15 conservé dans la cure CE7-CU par rapport au mortier classique conservé dans la même cure sont de 20,5%, et de 15% respectivement à 28 et 180 jours. Par contre, les taux de la réduction de retrait pour le mortier de fibre 1%-60 sont seulement de 14.8% et 10%. De même dans le régime de cure CE14-CU, les taux de réduction du retrait des mortiers de fibres par rapport au mortier classique dans la même cure sont de 10.7% et 6.7% pour le mortier de fibre 1%-15 respectivement à 28 et 180 jours, et ils sont uniquement de 2.3% et 1.5% pour le mortier de fibre 1%-60 respectivement à 28 et 180 jours. Cela signifié que le régime de cure CE7-CU est plus bénéfique pour la réduction de retrait que le régime CE14-CE. Cela est probablement dû :

- Premièrement : au fait qu'au moment de leur conservation dans l'étuve, les mortier conservés initialement 14 jours dans une cure humide sont plus saturés que ceux conservés initialement 7 jours dans la même cure. Ainsi la durée de dessiccation des mortiers conservés dans le régime CE14-CU sera plus longue. Ce qui augmente probablement les retraits finaux.
- Deuxièmement : à la suite de la prolongation de la durée de conservation initiale dans l'eau, le degré d'hydratation des mortiers dans la cure CE14-CU est plus élevé que dans la cure CE7-CU (voir 5-3-2). Ce qui augmente le taux de pores

saturés en eau et augmente par le suite les retraits finaux des mortier conservés dans CE14-CU.

Nous constatons aussi que les fibres courtes ont un effet bénéfiques pour la réduction du retrait que les fibres longues. Ainsi le retrait le plus faible est obtenu par les mortiers de fibres 1%-15.

Par ailleurs, et malgré qu'à 180 jours les retraits des mortiers dans la cure CE14-CU sont légèrement plus grands que ceux des mortiers conservés dans CE7-CU. Nous remarquons que les retraits obtenus dans la première cure restent légèrement inférieurs à ceux des mortiers conservés directement dans la cure CU.

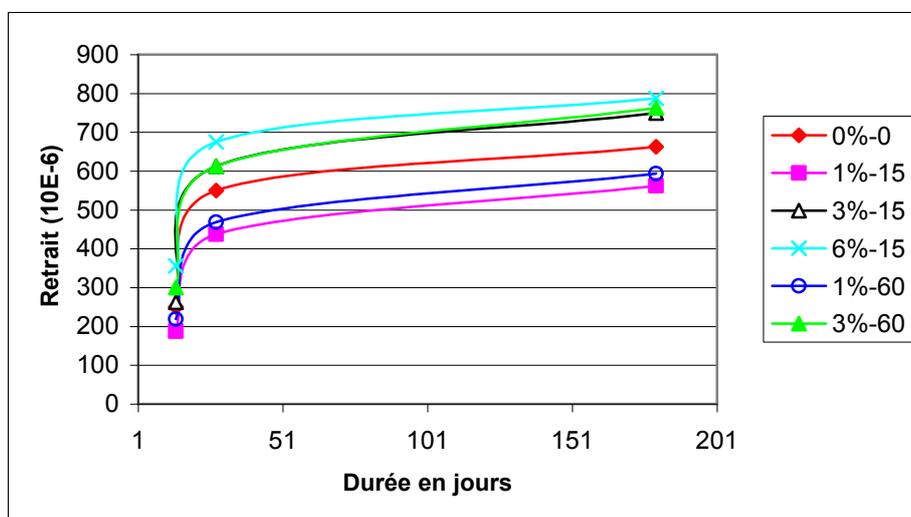


Figure 6-4 : Retrait des mortiers conservés dans la cure CE7-CU

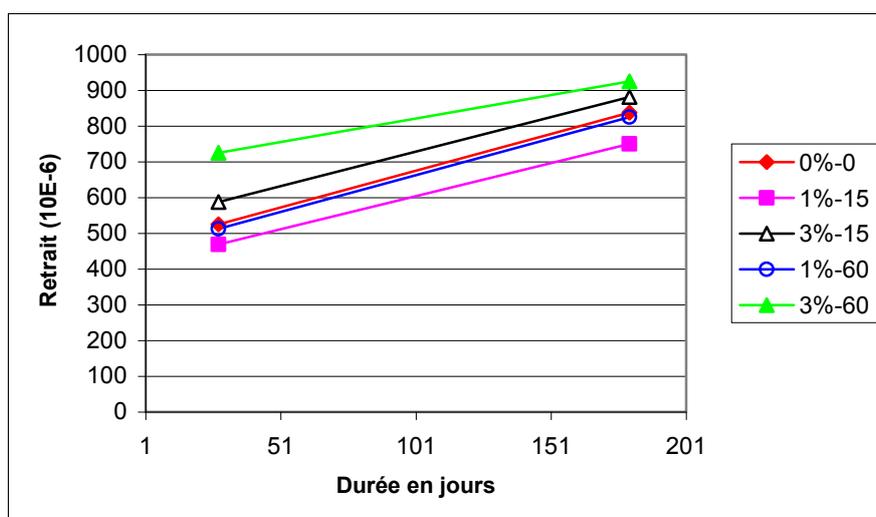


Figure 6-5 : Retrait des mortiers conservés dans la cure CE14-CU

### 6-2-3. Effet du type du ciment sur le retrait

Dans le but d'examiner l'effet du changement des ciments sur les retraits des mortiers de fibres en climat chaud nous avons remplacé le ciment CPA CEM I 52.5 par un ciment CHF-CEM III 32.5. Les résultats de cette étude sont illustrés par la figure 6-6.

Nous constatons que pour chaque durée de conservation et pour chaque type de mortier, les retraits des mortiers à base de ce ciment (MC2 ou MF2) sont plus élevés que ceux des mortiers à base de CPA (MC1 ou MF1). Cela est dû au fait que la cinétique d'hydratation des mortiers à base de ciment CHF est généralement plus lente par rapport à celle des mortiers à base de CPA. Par conséquent la quantité d'eau libre dans les mortiers MC2 ou MF2 est plus grande que celle dans les mortiers MC1 ou MF1. Ce qui prolonge la durée de dessiccation et probablement augmente les retraits. Ce résultat est en accord avec la norme NFP 15-301 [130]. Selon cette norme, à 28 jours, le retrait du mortier classique à base de CHF est de 810  $\mu\text{m}/\text{m}$ , alors que celui du mortier classique à base de CPA CEM I 52.5 n'est que de 620  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

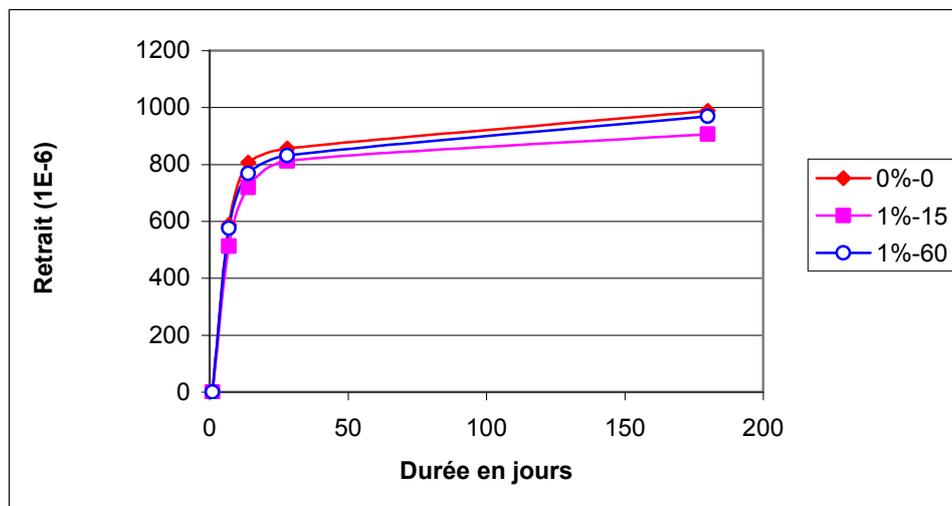


Figure 6-6 : Retrait des mortiers de fibres à base de ciment CHF conservés dans la cure CU

### 6-3. Conclusion

L'étude du retrait a permis de constater que pour les mortiers conservés dans l'étuve, seuls ceux renforcés de fibres à 1% ont présenté des retraits inférieurs au mortier classique. En effet vu le grand pouvoir hydrophile des fibres de palmier, l'augmentation du dosage en fibres dans la matrice (plus de 1%) augmente le taux des pores saturés en eau augmentant

ainsi le retrait. Par ailleurs, les fibres courtes ont un effet bénéfique sur la réduction du retrait. Ainsi le retrait le plus faible est obtenu avec le mortier de fibres 1%-15.

Nous avons remarqué aussi, que les régimes de cure CE7-CU et CE14-CU ont permis de réduire les retraits des mortiers par rapport à ceux conservés directement dans l'étuve (CU). Mais, les taux de réduction de retrait les plus élevés sont obtenus avec le régime CE7-CU.

Quant à l'effet du ciment, nous avons constaté que les mortiers de fibres à base de ciment CHF et conservés dans l'étuve ont présenté des retraits supérieurs à ceux des mortiers à base de CPA. De ce fait, l'utilisation des CHF n'a aucun effet bénéfique sur l'amélioration du retrait. Ceci est dû au fait que la cinétique d'hydratation des mortiers à base de ciment CHF est plus faible par rapport à ceux à base de CPA, ce qui augmente la quantité d'eau libre dans la matrice des mortiers CHF et par conséquent leurs retraits.

Dans les conditions climatiques chauds et secs, les mortiers de fibres à base de ciment CHF, conservés selon le mode CE14-CU peuvent donner de bon résultats sur le côté résistance à la flexion. Cependant, d'autres traitements complémentaires sont nécessaires pour améliorer leurs retraits.

## Conclusion Générale et Recommandations

### Conclusion Générale

L'étude sur les fibres de palmier dattier, les bétons et mortiers renforcés par ces mêmes fibres nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les pays Afro-asiatiques, dont l'Algérie, possèdent d'énormes richesses en fibres végétales de palmier dattier, mais la valorisation de cette ressource naturelle dans le domaine de la construction reste insuffisante.
- Les résultats des propriétés physiques des quatre fibres de surface de palmiers dattiers utilisées (Dokar, Deglette Nour, Elgers et Degla bida), nous a permis d'avancer que, suite à leurs structures très poreuses, les fibres ont un pouvoir d'absorption d'eau assez élevé (132,5 % en moyenne). En effet, les observations microscopiques au MEB montre que ces fibres possèdent plusieurs pores. Leur surface n'est pas lisse et possède plusieurs alvéoles qui permettent une bonne adhérence avec la matrice
- Parmi les quatre type de fibres de surface de palmier dattier, les fibres de Dokar (le palmier mâle) sont les plus résistantes et les plus déformables. C'est pour cela qu'elles sont choisies pour le renforcement des bétons et des mortiers dans cette étude.
- Les teneurs en cellulose et hémicellulose des fibres de surface de palmier Dokar sont relativement faibles par rapport aux fibres de sisal, en revanche elles se rapprochent de celles des noix de coco. C'est pour cela que les propriétés mécaniques des fibres de palmier sont relativement moyennes par rapport à la plupart des fibres végétales et proches de celles de la fibre de noix de coco.
- L'augmentation des dosages et des longueurs des fibres de palmier dans les bétons ou mortiers provoque une chute considérable de l'ouvrabilité du mélange. Cependant, l'ouvrabilité des bétons est beaucoup plus influencée par l'augmentation des dosages que par la longueur des fibres dans la matrice, alors que celle des mortiers est influencée par l'augmentation des deux (dosages et longueurs). De ce fait, le pourcentage volumique maximal de fibres dans les bétons est de 3% pour toutes les longueurs de fibres utilisées (15-60 mm), alors que pour les mortiers de fibres, il est de 6% pour les longueurs de fibres de 15 mm et de seulement 3% pour les longueurs de 60 mm.

- Les dosages volumiques des fibres dans les bétons varient de 1% à 3% et les longueurs de fibres varient de 15 mm à 60 mm. Pour les mortiers de fibres, les dosages varient de 1% à 6% et de 1% à 3%, respectivement pour les fibres de longueur de 15 mm et de 60 mm.
- Pour la confection des bétons de fibres de palmier, il faut tenir compte du fait que ces fibres sont très flexibles, difficiles à séparer et ont un pouvoir hydrophile très élevé. Pour cela deux démarches, qui se basent sur l'optimisation de l'ouvrabilité en fonction du rapport S/G, sont suivies pour la confection du composite béton de fibres.
  - Dans la première démarche, nous avons adopté la composition du béton classique donnée par la méthode de BARON-LESAGE [71] et GORISSE [72], avec l'augmentation de la quantité d'eau en fonction de l'augmentation du dosage en fibres. Cette procédure est inspirée de la méthode de SERNA-ROS [67]. Dans notre cas, la quantité d'eau ajoutée est égale, ou légèrement supérieure, à la quantité moyenne d'eau susceptible d'être absorbée par les fibres. Les bétons confectionnés selon cette démarche sont plutôt destinés pour la conservation directe dans la cure chaude et sèche. En effet, nous prévoyant utiliser la saturation des fibres comme une source d'humidité interne qui assurera la continuité du processus d'hydratation des ciments, en considérant que les fibres végétales se comportent comme une éponge qui absorbe de l'eau et la libère en cas de besoin.
  - Dans la deuxième démarche, nous avons suivi la méthode de BARON-LESAGE [71] qui a été adoptée par ROSSI [59] pour la confection des bétons de fibres métalliques, tout en travaillant avec un rapport E/C fixe. Dans notre cas, nous avons fixé le rapport  $E/C = 0.55$  et  $S/G = 0.75$ , égaux à ceux utilisés pour le béton classique BC3. Pour pouvoir maintenir les rapports E/C et S/G fixes, nous avons utilisé un super plastifiant le MEDAPLAS-SP de pH neutre égale à 7 et de faible teneur en chlore.
- Selon le type d'essai cinq principales cures sont utilisées à savoir:
  - CE : Conservation continue dans l'eau, ou dans une chambre humide à une température de  $20 \pm 2$  °C, et HR 100%
  - CA : Conservation continue à l'air libre. Les conditions climatiques de cette cure sont données sur le tableau 3-14 du chapitre 3.

- CU : Conservation continue dans une étuve dans les conditions climatiques sont  $T = 32 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $\text{HR} = 28\% \pm 2$ , cette cure est utilisée pour simuler les conditions climatiques moyenne la cure CA.
- CE7: Conservation durant les 7 premiers jours dans une chambre humide et saturé sous des conditions climatique de  $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $\text{HR} = 100\%$ .
- CE14 : Conservation durant les 14 premiers jours dans une chambre humide et saturé sous des conditions climatique de  $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $\text{HR} = 100\%$ .
- Concernant la résistance à la compression des bétons de fibres de palmier, comme tous les bétons de fibres végétales, cette résistance diminue en fonction de l'augmentation du dosage en fibres.
- Quant à la résistance à la flexion dans la cure chaude et sèche, nous avons espéré que le pouvoir hydrophile des fibres apportera un effet favorable pour le maintien d'une quantité minimale d'eau qui sera nécessaire à la continuité du processus d'hydratation dans les bétons de fibres et, par la suite à l'évolution de leur résistance mécanique. Malheureusement, la température assez élevée et l'humidité assez faible de cette cure, ont provoqué l'évaporation de l'eau des fibres, et n'ont pas permis ainsi aux fibres de maintenir un environnement humide pour le béton. En effet l'évaporation rapide de l'eau, a causé non seulement l'arrêt du processus d'hydratation mais aussi le rétrécissement des fibres qui ont provoqué à leur tour, l'augmentation des vides dans le béton des fibres et notamment à l'interface fibre-matrice et par la suite une chute d'adhérence et enfin la réduction des résistances mécaniques, en l'occurrence celle en flexion. L'arrêt du processus d'hydratation à été confirmé par des essais DRX. L'augmentation des volumes des vides entre la fibre et la matrice à l'interface ont été mis en évidence par des photos MEB et par des essais ultrasoniques.
- L'étude des propriétés de flexion des bétons de fibres conservés dans l'eau, a permis de constater qu'à 28 jours, la ductilité des bétons de fibres confectionnés par la première démarche, augmente en fonction de l'élévation du dosage et des longueurs des fibres dans la matrice. La résistance à la flexion, à la première fissuration, diminue en fonction de l'augmentation du dosage et des longueurs des fibres. Cette diminution de la résistance à la flexion, à la première fissuration, est due à l'augmentation du rapport E/C dans la matrice. En effet, la réduction de E/C par utilisation d'un adjuvant permet d'améliorer la résistance à la flexion à la première fissuration par rapport au béton classique. Par conséquent, pour les bétons de fibres confectionnés selon la

deuxième procédure, la résistance à la flexion optimale est obtenue pour le béton de fibres 2%-60, qui dépasse celle du béton classique.

- Les résultats de durabilité montrent que les fibres de palmier se situent parmi les fibres végétales qui présentent une résistance moyenne aux alcalis. Une chute de durabilité des bétons de fibres conservées dans l'eau est relevée. Cette chute est due à la dégradation des performances mécaniques des fibres dans les milieux cimentaires alcalins. En effet, la résistance à la traction de ces fibres diminue en fonction du temps d'immersion dans les trois solutions alcalines utilisées. Ces chutes sont visualisées par des observations au MEB, qui mettent en évidence les mécanismes d'attaque des trois solutions à savoir celle de la chaux, de la soude et de Lawrence. On peut ainsi voir que la chaux attaque par altération généralisée, la soude attaque par des picages localisés alors que la solution de Lawrence, qui simule le mieux la solution cimentaire, attaque par des altérations et des picages généralisés.
- Le traitement des bétons de fibres par la cure mixte CE14-CU, permet d'améliorer les résistances à la flexion, à la première fissuration, par rapport aux bétons conservés dans la cure CU et dans la cure CE. Cela est dû à l'augmentation des produits d'hydratations causées par l'activité thermique de la cure CE14-CU. Cette conséquence est à la base de la chute de durabilité des bétons de fibres dans cette dernière cure par rapport aux bétons conservés dans l'eau.
- L'étude des propriétés mécaniques et des retraits de mortiers de fibres a permis de constater que :
  - la variation des résistances mécaniques des mortiers de fibres conservés dans l'eau ou dans l'étuve en fonction du temps est similaire à celle des résistances des bétons de fibres. Par ailleurs, dans les cures mixtes (CE7-CU et CE14-CU), la prolongation de la durée initiale de conservation dans l'eau a permis d'améliorer les propriétés mécaniques des mortiers de fibres par rapport à celles des mortiers conservés directement dans l'eau. Quant à l'effet du ciment, l'utilisation des ciments CHF a permis d'améliorer la durabilité des mortiers de fibres, ce qui confirme la bonne tenue des fibres végétales dans les milieux à faible alcalinité.
  - Les retraits des mortiers de fibres augmentent en fonction de l'augmentation du dosage des fibres dans la matrice. Cependant, seuls les mortiers avec le dosage volumique de 1% de fibres ont présenté un retrait inférieur à celui du

mortier classique. En effet, vu le grand pouvoir hydrophile des fibres de palmier, l'augmentation du dosage des fibres dans la matrice (plus de 1%) augmente le taux des pores saturés en eaux ce qui augmente le retrait. De plus, les fibres courtes sont bénéfiques pour la réduction du retrait. Par ailleurs, les cures mixtes CE7-CU et CE14-CU, ont bien contribué à la réduction des retraits des mortiers par rapport à ceux des mortiers conservés directement dans l'étuve. La cinétique d'évaporation de l'eau dans la cure CE7-CU étant supérieure à celle dans la cure CE14-CU, les meilleurs taux de réduction ont été obtenus pour la cure CE7-CE. La faible cinétique d'évaporation, constitue la raison pour laquelle les retraits des mortiers de fibres de ciment CHF sont supérieurs à ceux du ciment CPA.

Cette étude sur ces nouveaux matériaux composites (le béton et le mortier renforcé par des fibres de palmiers) a été relativement compliquée et a nécessité plusieurs types d'essais, avec utilisation de plus de 2000 échantillons de fibres individuelles, plus de 1500 éprouvettes de béton et plus de 500 éprouvettes de mortier, ainsi que la coopération de plusieurs laboratoires nationaux et internationaux. Il faut noter que la durée moyenne de la fabrication de chaque dispositif expérimental et de la préparation de chaque type essai a varié entre deux à trois mois. Les principaux laboratoires dont l'étude expérimentale a été réalisée sont : Le laboratoire de Génie Civil et de Biologie de l'université de Ouargla, le laboratoire L.C.E. de l'E.N.P., le laboratoire LTPS de Ouargla, l'URGC-Structures et URGCMatériaux de l'INSA de Lyon.

## **Recommandations**

D'après les résultats obtenus par cette recherche, et en vue d'une future utilisation rationnelle de ces matériaux composites, nous recommandons de compléter cette recherche par les axes suivants :

- Amélioration des propriétés mécaniques et de durabilité des fibres par des traitements chimiques ou biologiques.
- Introduction de nouvelles méthodes pour le maintien de l'humidité pour les bétons conservés dans la cure chaude et sèche. Par exemple la couverture des bétons par des toiles de jute saturée.
- Amélioration de la durabilité du matériau composite ciment-fibre par un traitement séparé ou simultané des deux matériaux comme par exemple:

- l'imprégnation des fibres par une matière résistante à l'alcalinité du milieu cimentaire. Les régions sahariennes sont très riches en déchets pétroliers qui peuvent être utilisés à cet effet.
- diminution de l'alcalinité des ciments par l'ajout de produits spéciaux. Les régions sahariennes renferment des gisements importants en matières argileuses qui peuvent être utilisés pour cette cause. En plus, le laitier d'El-Hadjar (Annaba, Algérie) peut offrir une adéquate solution pour la réduction de l'alcalinité des ciments.
- Etude du fluage des bétons de fibres de palmiers
- Modélisation des comportements (résistance, retrait et fluage) des bétons et mortiers de fibres de palmier.

Ces axes de recherches qui concernent l'amélioration de la durabilité et la réduction du retrait des bétons de fibres de palmier sont en cours de réalisation. Une partie des résultats fait l'objet actuellement de publications et de communications [145-147].

Enfin, nous espérons que ce travail constituera une base de travail préliminaire pour la caractérisation des fibres de surface du palmier dattier, des bétons et des mortiers renforcés par ces fibres. Nous souhaitons aussi qu'il contribue de façon rationnelle, à une vulgarisation de l'utilisation des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier dans le domaine de la construction.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] DUNSTAN, I., “Fibre Reinforced Cement and Concrete Research into practice”, Third RILEM International Symposium on Development in Fibre reinforced Cement and Concrete, 14-17 July 1986, UK.
- [2] BARTHELEMY, F., “La fibre de verre: un point sur le renforcement des nouveaux matériaux”, BRGM, revue ECOMINE, janvier 2004.
- [3] COUTTS, R.S.P., “From Forrest to factory to Fabrication”, Fibre Reinforced cement and Concrete, Edited by SWAMY R.N., RILEM, 1992.
- [4] LACROIX, R., FUENTES, A. et THONIER H., « Traité de Béton Armé », Edition Eyrols Paris 1982.
- [5] KHALOO, A.R. and KIM, N., “Mechanical Properties of Normal to High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete”, Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 18, N° 2, pp.92-97, 1996.
- [6] SWAMY, R.N., “Properties of High-Strength Concrete”, Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 8, N° 1, pp. 33-41, 1986.
- [7] LOLA, C.R., “Fibre Reinforced Concrete Roofing Sheets Technology appraisal”, In RILEM FRC 1986.
- [8] BLEDZKI, A.K. and GASSAN J., “Composite reinforced with cellulose based fibres”, Progress in Polymer Science, 24, pp. 221-274, 1999.
- [9] BEAUDOIN, J.J., “Béton renforcé de fibres”, Institut de Recherche en Construction (IRC), Conseil National de Recherche, Canada, p. 04, 1982.
- [10] LEWIS, G. and PREMAL, M., “Natural Vegetable Fibre as Reinforcement in Cement Sheets ”, Magazine of Concrete research, Vol. 31, N°107, pp. 104-108, June 1979.
- [11] KHENFER, M.M., “Caractéristique Structurale et Rhéologique des Ciments et Plâtres Renforcés de fibres de cellulose”, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France, 1990.
- [12] DEBICKI, G., “ Contribution à l’étude du rôle de fibres dispersées anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement, les critères de résistance et la fissuration du matériau”, Thèse de Doctorat d’Etat Es-Sciences, INSA de Lyon, France, 1988.
- [13] AIT AMEUR, M.M., “Contribution à l’étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d’acier locales”, Thèse de Magister, Université de Tiaret, Algérie, 1998.

- [14] CALMUS, M.L. et BORET, J., "Evaluation de la pénibilité des opérations de désamiatage", *Archive des Maladies Professionnelles*, Vol. 63, N°2, pp. 67-76, France, 2002.
- [15] BOUCHEKOUK, M., " Etude du béton renforcé par des fibres de verre enduites de polymères thermoplastiques ", Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 1992.
- [16] GROTH, P., "Fibre Reinforced Concrete", Doctoral Thesis, Lulea Tekniska Universitet, Sweden, 2000.
- [17] COOK, D.J., "Concrete and Cement Composites Reinforced with Natural Fibres", *Proc. Symp. On Fibrous Concrete*. Construction Press Ltd., Lancaster, pp. 99-114, April. 1980.
- [18] KHENFER, M.M., "Plâtre renforcé de fibres cellulosiques", *Materials and Structures*, Vol. 32, pp. 52-58, January-February 1999.
- [19] RAMASWAMY, H.S., AHUJA, B.M. and KRISHAMOORTHY, S., " Behaviour of Concrete reinforced with Jute Coir and Bamboo Fibre", *The International Journal of cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 5, N°1, February 1983.
- [20] AZIZ, M.A., PARAMASIVAM, P. and LEE, S.L., "Prospect for Natural Fibre Reinforced Concretes in Construction", *The International Journal of cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 3, N°2, May 1981.
- [21] NILSON, L., "Reinforced Concrete with Sisal and other Vegetable Fibre", *Swedish Council for Building research*, Document D 14, 1975.
- [22] AYYAR, T.S.R., and MIRIHAGALLA, P.K., "Elephant grass fibres as reinforcing fibre", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 28, N°96, pp. 162-167, September 1976.
- [23] COUTTS, R.S.P., "Flax Fibre as a Reinforcement in Cement mortar", *The International Journal of cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 5, N°4, pp. 257-262, August 1983.
- [24] BOURZAM, A., "Effet des Fibres de Palmier et de Halfa sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres Naturelles" , Thèse de Magister, ENP, 1999.
- [25] Mc GOVERN, J.N., "Vegetable", *Kirk-Othmer, Encyclopaedia of Chemical technology*, 3 rd Edition, Vol. 10, pp. 189-197, Wiley Interscience, 1980.
- [26] MONTIES, B., "Les Polymères Végétales", Gauthier Villars, Bordas, Paris, 1980.
- [27] MOKHTARI, F., "Contribution à l'étude de composites a base de liant pouzzolaniques et de bambou", Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 1991.

- [28] BENTUR, A. and AKERS, S.A.S., "The micro Structure and ageing of cellulose fibre reinforced cement composites cured in a normal environment", *The International Journal of cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 11, N° 2, May. 1989.
- [29] TOLÈDO FILHO, R.D., SCRIVENER, K., ENGLAND, G.L., and GHAVAMI, K., "Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites", *Cement and Concrete, composites*, 22, pp.127-143, 2000.
- [30] TOLÈDO FILHO, R.D., GHAVAMI, K., ENGLAND, G.L. and SCRIVENER, K., "Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability", (Article in Press), *Cement and Concrete, composites*, 25, 2003.
- [31] SAVASTANO Jr.H. and AGOPYAN, V., "Transition zone studies of vegetable-cement paste composites", *Cement and Concrete, composites*, 21, pp. 49-57, 1999.
- [32] SWAMY, R.N., "New reinforced concrete", *Concrete Technology and design*, Vol. 2, 1984.
- [33] CANOVAS, M.F., SELVA, N., KAWICHE, G.M., "New economical solution for improvement of durability of Portland cement mortars reinforced with sisal fibre", *RILEM, Vom* 25, 1992.
- [34] HASSAN, K.E., ROBERY, P.C. and AL-ALAWI, L., "Effect of hot-dry curing environment on the intrinsic properties of repair materials", *Cement and Concrete, composites*, 22, pp. 453-458, 2000.
- [35] THEODORAKOPOULOS, D.D., "Shrinkage Behaviour of GRC Thin Sheets", *Cement and Concrete, composites*, 17, pp. 229-238, 1995.
- [36] THEODORAKOPOULOS, D.D., "Creep characteristic of Glass Reinforced Cement under Flexural Loading", *Cement and Concrete, composites*, 17, pp. 267-279, 1995.
- [37] FUKUYAMA, K. HIGASHIBATA, Y. and MIYAUCHI, Y., "Studies on Repair and Strengthening Methods of Damaged Reinforced Concrete Columns", *Cement and Concrete Composites* 22, pp.81-88, 2000.
- [38] GAGNE, R., AITCIN, P.C. et TAGNIT-HAMOU, A., "Evaluation a long terme des dalles d'essais des autoroutes 15, 25 et 40", *Centre de Recherche Inter universitaire sur le Béton*, Québec, 60p., 1994.
- [39] FAM, A.Z., RIZKALLA, S.H. and TADROS, G., "Behaviour of CFRP for Prestressing and Shear Reinforcement Cement of Concrete Highway Bridges", *ACI Structural Journal*, February 1997.

- [40] ASSIH, T., LI, A. and DELMAS, Y., "Repairing of reinforced concrete beams by bonded carbon fibres composite plates", Recent Advances in Bridge Engineering, Edition. MEIER U. and BETTI R., pp. 121-128, 1997.
- [41] BALOUT, C. et COUTERET, F., « Le progrès technologique dans les Textiles », Maitrise de science de Gestion, 2<sup>ème</sup> Année, mai 1999.
- [42] PANDE, H., "Non-Wood Fibre and Global Fibres Supply", An internat. Journ. Of forestry and food, Unasylva 193, Vol. 49, pp. 44-50, 1988.
- [43] Food and Agricultural Organisation (FAO), "The outlook for pulp and paper to 1995. Paper products and industrial update", FAO, Rome, 1991.
- [44] BOLTON A.J., "Natural Fibres for Plastic reinforcement", Materials Technology 9, pp. 12-20, 1994.
- [45] LEAO, A.L., ROWELL, R., and TAVARES, N., "Applications of fibres in automotive industry in Brazil-Thermoforming process", Science and Technology of Polymers and Advanced Materials, Edited by PRASSD P.N. et al, Plenum Press, New York, 1998.
- [46] BAHLOULI, N., CAVAILLE, J.V., GARCIA-RAMIREZ, M., CAMARA, A., "Mechanical behaviour of lingo-cellulosic fillers/ PE materials", Fifth Chemical Congress of North America, Cancun, Mexico, Nov. 11-15, 1997.
- [47] Yahoo! Encyclopédie, "Les fibres textiles", [http:// www.europe-habita.com/](http://www.europe-habita.com/), 03/06/03, Copyright © 2001 Hachette Multimédia.
- [48] ENGLISH, B., CHOW, P. and BAJWA, D.S., "Paper and Composites from Agro-Bbased Resources. Processing into Composites", Lewis Publishers, Edited by ROWEL R.M., et al, Boca Raton, New York, London, Tokyo.
- [49] SAMARAI, M., "La durabilité du béton en climat chaud", Proceeding, Séminaire International sur la Qualité du Béton en Climat Chaud, Université de Blida et CTC sud Ghardaïa, Algérie, 1994.
- [50] LACHMAT, L. et KENAI, S., "Effet de cure sur les propriétés du béton en climat chaud", Proceeding, Séminaire International sur la Qualité du Béton en Climat Chaud, Université de Blida et CTC sud Ghardaïa, Algérie, 1994.
- [51] KRIKER, A., et BALI, A., "Effet de cure sur la résistance mécanique des bétons au laitier d'El-Hadjar", Proceeding, Séminaire International sur la Qualité du Béton en Climat Chaud, Université de Blida et CTC sud Ghardaïa, Algérie, 1994.

- [52] HOUARI, H., "Contribution a l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métallique soumis a l'action des charges maintenues et cycliques", Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 1993.
- [53] ROSSI, P., HARROUCHE, N. et LEMAOU, F., "comportement mécanique des bétons de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et précontraint", Annale de l'ITBTP, N°479, Dec. 1989.
- [54] COUTTS, R.S.P., WARDEN, P.G., "Effect of compaction on the properties of air cured wood fibre reinforced cement", Cement and Concrete Composites 12, pp;151-156, 1990.
- [55] KHENFER, M.M., et MORLIER, P., « Caractérisation et microstructures des ciments renforcés de fibres de cellulose », Bulletin de laboratoire des Ponts et Chaussées (LCPC), 224, Réf. 4236, pp. 49-58, Jan.-Fev. 2000.
- [56] AKERS, S.A.S., STUDINKA, J.B., MEIER, P., DOBB, M.G., JOHNSON, D.J. and HIKASA, J., "Long term durability of PVA reinforcing fibres in a cement matrix", The International Journal of cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 11, N°2, May 1989.
- [57] ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", ACI Journal, Tit. N°75-30, July 1978.
- [58] GROTH, P. and THUN, H. "Influence of steel fibre on the workability of self-compacting concrete", Concrete Science and Engineering, Vol. 21, pp. 65-70, June 2000.
- [59] ROSSI, P., HARROUCHE, N. et BELLOC, A., "Méthode de composition des bétons de fibres métalliques", Annales de l'ITBTP, N° 475, Juin-Juillet 1989.
- [60] ABSI, E., "Béton de fibres (synthèse des études et des recherches réalisées au CEBTP)", Annales de l'ITBTP, N° 520, pp. 85-120, Jan. 1994.
- [61] EDINCTON, J., HANNANT, D.J., "Steel fiber reinforced concrete", GB Building 1974.
- [62] SWAMY, R.N. and MANGAT, P.S., "Compactibility of steel fibre reinforced concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 8, N° 5, 1974.
- [63] BOUCHEKOUK, M., DEBICKI, G., HAMELIN, P. et CLASTRES, P., "Etude de possibilités de renforcement du béton avec des fibres de verre enduites de polymères thermoplastiques", In Mortier et Béton de fibres en France, CSBT, Ministère de la recherche et de l'enseignement supérieur, Plan Construction, 1987.

- [64] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR, P.C III 2210.12 – CIII. 2210.16, 1989-1991
- [65] JOHNSTON, C.D., “Measures of workability of steel fiber reinforced concrete and their precision”, Cement and concrete aggregates, Vol. 6, N°2, pp.74-83, 1984.
- [66] LIM, T.Y., PARAMSIVAM, P. and LEE, S.L., “Bending behaviour of steel fiber concrete beams”, A.C.I., Structural Journal, Nov.-Dec. 1987.
- [67] SERNA-ROS, P., “Etude de la contribution des fibres métallique à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement”, Thèse de Docteur-Ingénieur, LNPC, France, 1884.
- [68] A.C.I., COMITE 544, “State of the art report of fiber reinforced concrete”, USA, A.C.I. 1982.
- [69] BANTHIA, N., and DUBEY A., “measurement of flexural toughness of fiber-Reinforced Concrete using a novel technique – Part. 1: Assessment and Calibration”, ACI Materials Journal, Nov.-Dec. 1999.
- [70] SACHAN A.K., KAMESWARA RAO C.V.S., “A cone penetration test for workability of reinforced concrete”, RILEM, Vol. 21, N° 126, pp. 448-452, Nov. 1988.
- [71] LESAGE, R., “Etude expérimentale de la mise en place du béton frais”, Rapport de Recherche N° 37, LCPC, 1974.
- [72] GORISSE, F., “Essais et Contrôle des bétons”, Edition Eyrolles, 1978.
- [73] DAS GUPTA, N.C., PARAMASIVAM, P. and LEE, S.L., “ Mechanical Properties of Coir Reinforced Concrete Paste Composites”, Housing Science, Pergamon Press Inc., Vol. 2, N°5, pp. 391-406, London, 1978.
- [74] ANDONIAN, R., MAI, Y.W. and COTTERELL B., “Strength and fracture properties of cellulose fibres reinforced cement composites”, The International Journal of Cement Composites, Vol. 1 N° 3, pp. 151-158, 1979.
- [75] KHENFER, M.M., BALI A and MORLIER, P., “ The effect of water and fibre length on the fracture resistance of cellulosic fibre cement”, Concrete Science and Engineering, Vol. 2, pp; 56-62, March 2000.
- [76] MAZAR, J., “Nouveau concepts dans la modélisation du Comportement du béton composite – application au calcul des structures”, Annales d'ITBTP, N° 461, Janv. 1988.
- [77] DAVENNE, L., SAOURIDIS, C. et PIAU, J.M. “Un code de calcul pour la prévision du comportement de structures endommageables en béton, en béton arme, ou en béton de fibres”, Annales d'ITBTP , N° 478, Nov. 1989.

- [78] NGOLLE IV MOUSSOLE, A.D., "Modélisation du comportement mécanique des composites ciment-fibres en tenant compte de la microstructure", Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 1997.
- [79] ALLEN, H.G., "The Strength of thin composites of finite width, with brittle matrices and random discontinuous reinforcing fibres", J. phys. D: Appl. Phys., Vol. 5, Printed in Great Britain, 1972.
- [80] FARUQI, M.A., PLEIMAN, L.G. and LEELANI P., "A mathematical evaluation of compressive behaviour of steel tubular structure filled with composite materials", Construction and Building Materials, 14, pp; 1-5, 2000.
- [81] VAN GYSEL A. et TAERWE L., "Principe de base d'une méthode pour calculer le comportement après fissuration des bétons renforcés de fibres métalliques soumis à la flexion ", Colloque Francophone, Bethune, (Pas-de-Calais), 4-5 Juillet, 1994.
- [82] CASANOVA, P., LEMAOU, F., RENWEZ S., and ROSSI, P., "Calcul du béton de fibres métalliques : poutre en flexion", Bulletin de liaison LCPC, N° 191, Mai-Juin 1994.
- [83] VALAD, T., "Comportement des bétons armés de fibres", Mémoire de DEA, LCPC, Dec. 1987.
- [84] MANGAT P.S. and AZARI M., "Influence of steel fiber reinforced on the fracture behaviour of concrete", The International Journal of cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 6, N° 6, Nov. 1984.
- [85] BONZEL, J. and SCHMIDT L., "Distribution and orientation of steel fibers in concrete and their influence on the characteristics of steel fiber concrete", RILEM, Sym. 1986.
- [86] HORNAIN N., "Aspects micro structuraux des bétons de fibres métalliques", Colloque Francophone, Bethune, (Pas-de-Calais), 4-5 Juillet, 1994.
- [87] CASANOVA P., LEMAOU, F., et SCHALLER I., "Les fibres d'acier peuvent-elles remplacer les armatures transversales dans le bétons armé ?", Bulletin de liaison LCPC, N° 195, Jan.-Fev. 1995.
- [88] SWAMY, R.N., and MANGAT P.S., " Influence of fiber geometries on the properties of steel fiber reinforced concrete", Cement and Concrete, Research, Vol. 4, N° 3, 1974.
- [89] HANNANT, D.J., "Fibre cement and fibre concretes", Edition JOHN WILLEY & SONS, USA, 1978.

- [90] BALUCH, H., ZIRABA, Y.N. and AZAD, A., "Fracture Characteristics of Sisal Fibre Reinforced Concrete", *The International Journal of cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 9, N°3, August 1987.
- [91] MANGAT, P.S., "Tensile strength of reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, N° 2, USA, mars 1976.
- [92] SWAMY R.N. and STAVIDES H., "Influence of fibre reinforcement on restrained shrinkage and cracking", *ACI journal*, 76(3), pp. 443-460, March 1979.
- [93] SOROKA I., "Concrete in Hot Environments", Edition E & FN SPON, London.
- [94] ALEKRISH A.A. and ALSAYED S.H., "Shrinkage of Fibre and reinforced Fibre Concrete Beams in Hot Dry Climate", *Cement and Concrete, composites*, 16, pp. 229-307, 1994.
- [95] EL HACHEM M., "Etude de l'influence de la fibre amorphe sur le retrait et fluage du béton", Thèse Doct, école Centrale Paris, pp. 165, 1990,
- [96] VERBECK G.J., "Carbonatation of hydrated portland cement", *ASTM, Sp. Tech. Publ.205*, pp. 17-36, 1958.
- [97] BANTHIA, N and YAN, C., "Shrinkage cracking in polyolefin fiber-reinforced concrete", *ACI Materiels Journal*, N° 97, pp. 432-437, 2000.
- [98] CHEN, P-W and CHUNG, D.D.L., "Low-drying-shrinkage concrete containing carbon fibers", *Composites*, 27B, pp.269-274, 1996.
- [99] TOLÊDO FILHO, R. D and SANJUAN, M. A., "Effect of low modulus sisal and polypropylene fiber on the free and restrained shrinkage of mortars at early age", and *Concrete Research*, 29, pp.1597-1604, 1999.
- [100] BARR, B., HOSEINIAN, S.B. and BEYGI, M.A., "Shrinkage of concrete stored in natural environments", *Cement and Concrete Composites*, 25, pp.19-29, 2003.
- [101] ACI Committee 209, "Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures", *ACI SP 76-10 Detroit*, pp.255-261, 1982
- [102] BAZANT, Z.P., PANULA, L., KIM, J. and XI, Y., "Improved prediction model for time-dependent deformation of concrete: Part 6- Simplified code type formulation", *Mater Struct. Vol.25, N°150*, pp. 219-223, 1992.
- [103] KANNA, V., OLSON, R.A. and JENNING, H.M., "Effect of shrinkage and content on the physical characteristics of blended cement mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, N° 10, pp. 1467-1477, 1998.

- [104] VANDEWALLE, L., "Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions", *Cement and Concrete, composites*, 22, pp.201-208, 2000.
- [105] LURA, P., BREUGEL, K. and MARUYAMA, I., "Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp.1867-1872, 2001.
- [106] LOUKILI, A., CHOPIN, D., KHELIDJI, A. and LE TOUZO, J.Y., "A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 915-922, 2000.
- [107] BISSOCHOP, J. and VAN MIER, J.G.M., "How to study drying shrinkage microcracking in cement-based materials using optical and scanning electron microscopy", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 279-287, 2002.
- [108] BISSOCHOP, J., SHIOTANI T., and VAN MIER, J.G.M., "Evaluation of shrinkage microcracking in concrete", *Cement and Concrete Research*, 2003, Article in Press.
- [109] BOLANDER Jr, J.E., and BERTON, S. "Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays", *Cement and Concrete, composites*, 2003, Article in Press.
- [110] QI, C., WEISS, J. and OLEK, J. " Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified weibull function" , *Materials and Structures*, VOL. 36, pp.386-395, 2003.
- [111] CAO, J. and CHUNG, D.D.L., "Micro structural effect of the shrinkage of cement-based materials during hydration, as indicated by electrical resistivity measurement", *Cement and Concrete Research*, Article in Press, 2004.
- [112] TAIT, R.B. and AKERS, S.A.S., "Micro mechanical Studies of fresh and weathered fibre cement composites", Part 2, Wet Testing, *The International Journal of cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 11, N° 2, Nov. 1989.
- [113] AKERS, S.A.S., CRAWFORD, D., SCHUTES, K., and GERNEKA, D.A., "Micro mechanical Studies of fresh and weathered fibre cement composites", Part 1, Dry Testing, *The International Journal of cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 11, N° 2, May 1989.
- [114] COUTTS, R.S.P. and KIGHTLY, P. "Microstructure of autoclaved refined wood-fibre cement mortars", *Journal of materials Science*, N° 17, pp.1801-1806, 1982.
- [115] BLANKENHORN, P.R., SILSBEE, M.R., BLANKENHORN, B.D., DICOLA, M. and KESSLER, K., "Temperature and moisture effects on selected properties of wood fiber-cement composites", *Cement and Concrete, Research*, 29, pp. 737-741, 1999.

- [116] SAVASTANO, Jr.H., WARDEN P.G. and COOTTS, R.S.P., "Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites", *Cement and Concrete, composites*, 22, pp. 379-384, 2000.
- [117] SHARMAN, W.R. and VAUTIER, B.P., "Durability on wood fibre reinforced cement sheet", *Third International Symposium on Development in Fibre-Reinforced Cement and Concrete*, Edited by SWAMY, R.N. et al, Vol. 12, 1986.
- [118] KRIKER, A. et BALI, A., "Durabilité des ciments à base de laitier d'El-Hadjar", *Congrès International en Science et Génie Matériaux*, USTHB, Algérie, 1999.
- [119] KRIKER, A., "Durabilité des bétons à base de laitier d'El-Hadjar", *Thèse de Magister*, ENP. Algérie 1992.
- [120] MESSI, A., "Propriétés des ciments pouzzolaniques élaborés a partir de latérite activée thermiquement", *Thèse de Doctorat*, INSA de Lyon, France, 1988.
- [121] MAC VICAR, R., MATUANA, L.M. and BLATINECZ J.J., "Aging mechanism in cellulose fiber reinforced cement composites", *Cement and Concrete, composites*, 21, pp. 189-196, 1999.
- [122] BLANKENHORN, P.R., BLANKENHORN, B.D., SILSBEE, M.R. and DICOLA, M. "Effect of fiber surface treatments on mechanical properties of wood fiber-cement composites", *Cement and Concrete, Research*, 31, pp. 1049-1055, 2001.
- [123] NGALA, V.T. and PAGE, C.L., "Effect of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, N° 7, 1997.
- [124] JONES, D.L., "Palms throughout the world", *Editor Reed book*, 1995.
- [125] DELENZE J., "Palmier pour le climat méditerranéen vibroscope", *Edition Champ flour*, 1995.
- [126] DARI K., "Analyse des systèmes agronomiques dans les OASIS Algériennes", *Etude Technico-Economique*. Département Agronomie Université de Ouargla, 1997.
- [127] Norme Européenne NF EN ISO 1973, "Fibres textiles - Détermination de la masse linéique - Méthode gravimétrique et méthode au vibroscope", *l'Association Française de Normalisation (AFNOR)*, p. 16, France, 1996.
- [128] ASTM C 127/88, "Standard test method for density, Relative Density (specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate", p.6, 2001.
- [129] Norme Algérienne (NA 442), "Ciment CPJ", *Edition Alger*, 2000.

- [130] Normalisation Française NFP 15-301, "Liants hydrauliques- Ciments courants- Composition, Spécifications et critères de conformité", AFNOR, p. 28, France, 1994
- [131] NFP 18-560, "Analyse granulométrie per Tamisage", AFNOR, p. 09, Sept. 1990.
- [132] NF1999EN 12350-2, "Essai pour béton frais - Partie 2 : Essai d'affaissement", AFNOR, France Dec. 1999.
- [133] Fiche Technique MEDAPLAS-SP, "Adjuvant du béton", Société Granitex Nouveau Produit, Oued Smar ALGER.
- [134] NF EN 12350-3, "Essai pour béton frais- Partie 3 : Essai Vébé", AFNOR, France Dec..
- [135] EN 413-2, "Ciment à maçonner – Partie 2 Méthodes d'essais", AFNOR, France, p. 20, Nov. 1994
- [136] EN 196-1, "Méthodes d'essais des ciments", AFNOR, p. 26, Dec. 1994.
- [137] Norme Européenne NF EN ISO 5079 Fibres textiles - Détermination de la force de rupture et de l'allongement de rupture des fibres individuelles. AFNOR, France, 1996. p. 20.
- [138] NF P 18-418 Béton - Auscultation sonique - Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton. AFNOR, France, 1989. p. 12..
- [139] Instruction pour l'utilisation de l'appareil de mesure vitesse du son E46. CONTROLS, 1990.
- [140] Norme Européenne NF EN ISO 12390-4 Essais pour béton durci -Partie 4 : Résistance en Compression - Caractéristiques des machines d'essai. AFNOR, France, 2000. p. 19.
- [141] NFP 18-409, "Béton avec fibres métalliques- Essai de Flexion", AFNOR, France, p. 8, 1993.
- [142] HOUGET V., "Etude des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques de composites ciments-fibres organiques", Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 1992.
- [143] GRAM H.E., "Durability of natural fibres in concrete", Swedish Cement and Concrete Research Fo. 1:83, p. 255, Stockholm, 1983.
- [144] NF P 15-433 Mortier -Détermination du retrait et du gonflement. AFNOR, France, p. 5.
- [145] KRIKER, A., DEBICKI, G., BALI, A., KHENFER, M.M. and CHABANNET, M. "Mechanical properties of date palm fibres and reinforced date palm fibre concrete in hot-dry climate". Cement and Concrete Composites, 2004, (Article in Press).

- [146] KRIKER, A., DEBICKI, G., BALI, A., KHENFER, M.M. and CHABANNET, M. "Valorisation of date palm fibres in reinforcement of concrete at hot dry climate". Sixth Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concrete, 20-22 September 2004, Italy.
- [147] KRIKER, A., BALI, A., DEBICKI, G. et KHENFER, M.M. "Retrait des mortiers de fibres de palmier en climat chaud et sec", Journées Scientifiques Algéro-Française, Colloque International de Ouargla, Université de Ouargla 11-13 Dec. 2004.

Tableau III-1 : Analyse granulométrie des granulats utilisés

	Tamisas (%) du Sable			Tamisas (%) du Gravier	
Ouverture (mm)	S 1	S 2	Ouverture (mm)	G 1	G2
0.08	0.5	3.36	5	0.15	13.2
0.16	2.87	8.75	6.3	3.9	44.23
0.315	16.25	29.45	8	14.85	71.47
0.63	32.37	52.8	10	31.08	93.13
1.25	78	62.7	12.5	71.66	
2.5	95.13	77.28	16	98.4	
5	98.75	98.3			



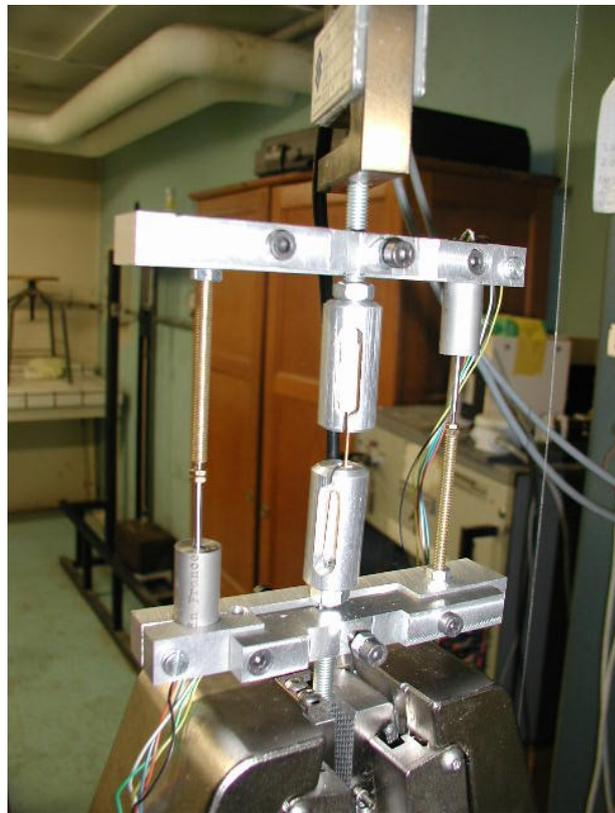
**Photo 3-1 : Plaque typique de fibres de surface de palmier dattier**



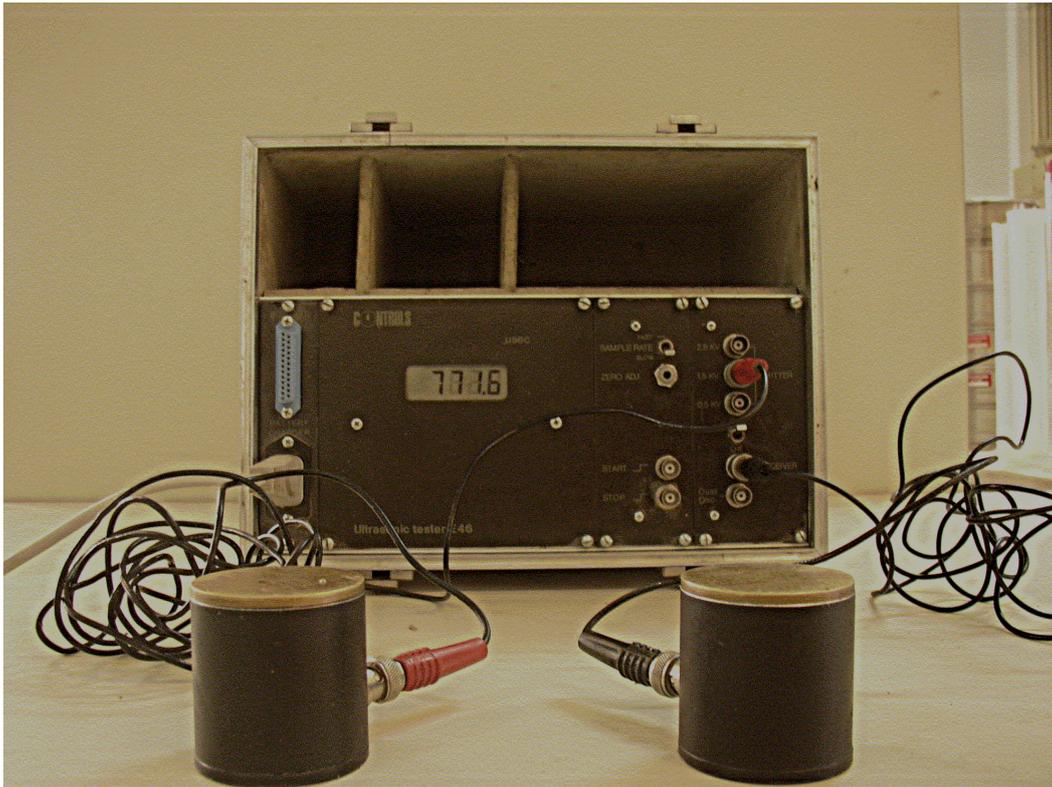
**Photo 3-2 : Fibres de surface de palmier dattier individuelles après dé-fibration et lavage**



**Photo 4-1 : Machine de traction universelle « INSTRON » utilisée pour l'essai de traction**



**Photo 4-2 : Dispositif expérimental de traction de la fibre avant charge ment**



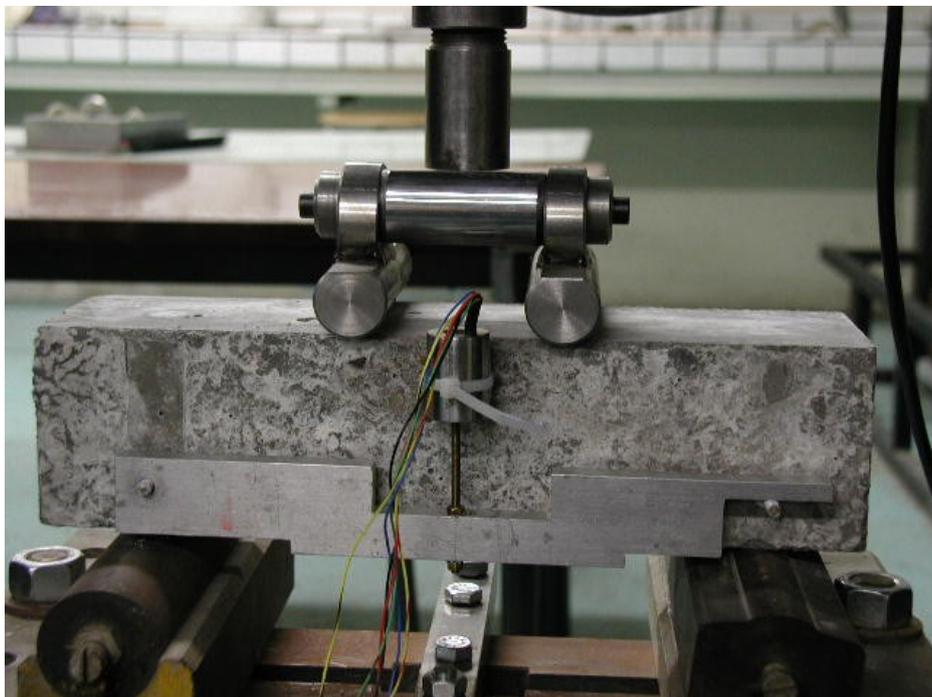
**Photo 4-3 : Appareil ultrason utilisé pour le béton**



**Photo 4-4 : Machine de compression utilisée pour le béton**



**Photo 4-5 : Presse universelle « INSTRON » utilisée pour l'essai de flexion sur béton**



**Photo 4-6 : Dispositif expérimental de flexion avant chargement**



**Photo 4-7 : Machine de compression utilisée pour le mortier**



**Photo 4-8 : Machine de flexion utilisée pour le mortier**



**Photo 6-1 : Rétromètre numérique**