**UNIVERSITÉ Dr YAHIA FARÈS DE MÉDÉA**

Faculté des Sciences et de la Technologie

*MÉMOIRE*

*Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER*

**Spécialité : Génie Civil**

**Option : Matériaux et Structures**

# Evaluation des performances d'un matériau composite à matrice minérale et fibres cellulosiques soumis à des ambiances climatiques instables

**Par**

**M^me^ : BELDJOUHAR. Née BLAIFI habiba**

**Devant le jury:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Pr. Kenaï Saïd** | **Professeur** | **Univ. de Blida** | **Président** |
| **Dr. Debieb Farid** | **MCA** | **Univ. de Médéa** | **Rapporteur** |
| **Dr. Bentchikou Mohamed** | **MCB** | **Univ. de Médéa** | **Co-rapporteur** |
| **Dr. Boukendakdji Othman** | **MCA** | **Univ. de Médéa** | **Examinateur** |
| **Dr. Menadi Belkacem** | **MCA** | **Univ. de Blida** | **Examinateur** |

**Mars 2012**

# Remerciements

Au terme de ce modeste travail, je tiens d'abord à remercie ALLAH le Miséricordieux de m'avoir donné la force et la patience à achever ce mémoire, ainsi que mes parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu durant toute la durée de mes études.

**J**'adresse mes profonds remerciements à mes directeurs de mémoire, Dr. BENTCHIKOU Mohamed et Dr. DEBIEB Farid qui ont bien voulu diriger ce travail et pour leurs aides et leurs conseils très précieux, qui m'ont été très bénéfiques.

**J**'adresse encore mes profonds remerciements à Mr. BENTCHIKOU Mohamed pour sa compréhension et sa patience

**M**es sincères remerciements vont à mon marie pour son soutient et ses encouragement pour voir le fruit de ce travail.

**J**e n'oublie pas aussi d'exprimer mes grands remerciements au professeur BALLI. Abderrahim de l'école polytechnique d'Alger pour avoir mis à disposition le CT mètre pour les mesures thermiques.

**T**ous les membres du jury, trouvent ici mes gratitudes pour avoir bien voulu évaluer et juger ce travail.

**M**es remerciements vont également à touts les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa.

**J**e remercie également Melle. Boukhelkhal .Dj pour son aide et sa présence au laboratoire "HALL technologie " de Médéa.

**E**ncore des remerciements à toutes les personnes du laboratoire "HALL technologie" pour leur aide durant toute la période expérimentale de ce travail.

**E**nfin je remercie tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

# مـــلـــخـــــص

الهدف من هذه الدراسة هو فحص إمكانيات دمج الألياف السليلوزية المستردة في مصفوفة أسمنتية وذلك لاستخدام المركب الناتج كخرسانة خفيفة الوزن.

لتقييم الأداء الميكانيكي والحراري و كذلك استمرارية هذه المادة المركبة نقوم بتعريضها إلى عملية دورية من ترطيب وتجفيف و تستعمل هذه الطريقة كاختبار سريع لمحاكاة الظروف البيئية الخارجية حيث تتعرض هياكل المواد المركبة لعملية التجفيف من الرياح والشمس و ترطيب بواسطة الأمطار أو الجريان السطحي للمياه الناتج عن ذوبان الثلوج.

أجرينا على هذه المواد المركبة اختبارات ميكانيكية وفيزيائية وحرارية وقد أعرب عن النتائج التجريبية بتقديم كل معلمة تدرس استنادا إلى تكوين المركب وعدد الدورات..

تحليل الظواهر و النتائج التجريبية تبين وتأكد أن المركب يمكن استعماله كعازل حراري في البناء



**كلمات مفاتيح** : مركب معدني الألياف السليلوزية، دورة ترطيب و تجفيف، العزل الحراري المقاومة الميكانيكية



# Résumé

*L'objectif de cette étude est d'examiner les possibilités de l'incorporation des fibres cellulosiques de récupération dans une matrice cimentaire en vue de l'utilisation du composite élaboré en tant que béton léger.*

*Pour l'évaluation des performances mécaniques et thermique ainsi que la durabilité de ce matériau composite on l'a exposé à différents cycles de vieillissement d'humidification-séchage qui a été utilisé comme une méthode de test accéléré pour simuler des conditions environnementales extérieures pour lesquelles les constructions comme les matériaux composites sont soumis à l'action desséchante du vent et du soleil et de mouillage par la pluie ou les eaux de ruissellement de fonte des neiges.*

*Sur ce matériau élaboré, on a effectué des essais mécaniques, physiques et thermiques. Les résultats expérimentaux ont été exprimés afin de prévoir chaque paramètre étudié en fonction de la composition et du nombre de cycle.*

*Les analyses des phénomènes en question montrent et confirment que le matériau à matrice minérale et fibres cellulosiques pourra être utilisé en isolation thermique*



**Mots clés** : Matrice minérale, Fibres cellulosique, Cycle de séchage-humidification, Isolation thermique, Résistance mécanique



# Abstract

The objective of this study is to examine the possibilities of incorporating the recycled cellulosic fiber in a cementitious matrix for the use of elaborate composite as lightweight concrete.

For the evaluation of thermal and mechanical performance and durability of this composite material, it was exposed to various aging cycles of wetting-drying which has been used as a method of accelerated testing to simulate external environmental conditions in which the constructions with this composite material are subjected to the drying action of wind and sun and wetting by rain or runoff from melting snow.

On this elaborated material, we conducted mechanical, physical and thermal tests. The experimental results were simulated to predict each parameter studied as a function of the composition and number of cycles.

Analyses of the phenomena in question show and confirm that this material may be used in thermal insulation.



**Key words:** Mineral matrix, Cellulosic fibres, Wet-dry cycling, Thermal insulation, Mechanical strength.

# *Sommaire*


| | |
|---|---|
| **Remerciements**<br>**Résumés**<br>**Sommaire**<br>**Liste des Tableaux**<br>**Liste des Figures**<br>**Notation et Abréviation**<br>**Introduction Générale** | **1** |
| ***CHAPITRE 1 : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE*** | ***PAGE*** |
| 1.1. Introduction …….. | **3** |
| 1.2. Matériaux composites…….. | **3** |
| 1.3. Matériaux composites renforcé de fibres ……. | **3** |
| 1.4. Le mortier …… | **3** |
| 1.4. 1.Types de mortier…… | **4** |
| 1.4.1.1. Mortier de ciment…….. | **4** |
| 1.4.1.2. Mortier de chaux……... | **4** |
| 1.4.1.3. Mortier bâtard…… | **4** |
| 1.4.4. Mortier de hourdage de maçonnerie…… | **4** |
| 1.4.5. Mortier composite…… | **4** |
| 1.5. Les constituants d'un mortier composite…….. | **5** |
| 1.5.1. Le sable…….…… | **5** |
| 1.5.1.1. Utilité de l'utilisation des sables dans les mortiers …… | **5** |
| 1.5.1.2. Propriétés d'un bon sable ……..... | **5** |
| 1.5.2. Le ciment …….. | **6** |
| 1.5.2.1. Ciment avec constituants secondaires …….. | **6** |
| 1.5.2.2. Hydratation du ciment……....…….. | **7** |
| 1.5.2.3. Le durcissement …… | **7** |
| 1.5.2.4. Classe des ciments …… | **8** |
| 1.5.2.5. Retrait et fissuration……... | **9** |
| 1.5.3. Les fibres…… | **9** |
| 1.5.3.1. Classification des fibres……. | **10** |
| A- Les fibres artificielles ……... | **11** |
| B- Les fibres naturelles ……..... | **11** |
| B.1. Classification des fibres naturelles……. | **11** |

| | |
|---|---|
| B.2. Les fibres végétales…… | **12** |
| B.3. Propriété des fibres végétales …… | **12** |
| B.4. Principaux constituants des fibres végétales……..... | **13** |
| B.4.1. La Cellulose…….. | **13** |
| B.4.2. L'hémicelluloses ……... | **14** |
| B.4.3. La lignine……... | **14** |
| 1.6. Les fibres de cellulose. ……. | **15** |
| 1.6.1. Structure d'une fibre cellulosique …… | **15** |
| 1.6.2. Source des fibres cellulosiques…….. | **17** |
| ✓ Les fibres de poils séminaux…….. | **17** |
| ✓ Les Fibres libériennes…… | **17** |
| ✓ Fibres dures ……... | **18** |
| ✓ La glume ou fibres de fruits……... | **18** |
| 1.6.3. Autre source de cellulose …….. | **18** |
| ✓ Les Herbes…… | **18** |
| ✓ Les déchets agricoles…… | **18** |
| ✓ Le bois……..… | **18** |
| 1.6.4. Propriétés des fibres de cellulose……..... | **19** |
| 1.6.5. Domaine d'utilisation des fibres cellulosiques…….. | **20** |
| A- L'industrie de pate et papier ……... | **20** |
| A.1. Fabrication du papier……. | **20** |
| A.2. Préparation des fibres naturelles (cellulosiques) pour la fabrication de papier ……. | **21** |
| A.2.1. La pate mécanique…….. | **22** |
| A.2.2. La pate chimique……..... | **23** |
| B-Les matériaux composites …… | **23** |
| 1.7. Recyclage……. | **24** |
| 1.7.1. Le papier recyclé ……... | **24** |
| 1.7.2. Les fibres cellulosiques de récupérations ……. | **25** |
| 1.7.3. Avantages attendus de recyclage…….. | **25** |
| 1.8. Matériaux composites renforcés de fibres végétales…… | **25** |
| 1.9. Méthode technologique de Mise en œuvre du composite a fibres dispersés…… | **26** |
| 1.10. Propriétés des composites renforcés par des fibres végétales …… | **27** |

| | |
|---|---|
| 1.10.1. Propriété à l'état frais…….. | **27** |
| ➢ Ouvrabilité, porosité et absorption……. | **27** |
| 1.10.2. Propriétés à l'état durci ……..…….. | **28** |
| 1.10.2.1. Propriétés physiques ……..... | **28** |
| a-1. Retrait et gonflement……... | **28** |
| a-2. Guérison autogène des fissures ……. | **29** |
| a-3. Limitation des fissures……..... | **30** |
| a-4. Formation différé de l'éttringite (DEF) …… | **31** |
| a-5. Principaux facteurs influençant la DEF…….. | **31** |
| 1.10.2.2. Propriétés mécaniques …….. | **31** |
| a-1. Résistance des composites à fibres végétale (traction et compression)…….. | **31** |
| a-2. Influence du mode de cure, du dosage et de la longueur des fibres sur la matrice cimentaire …… | **33** |
| a-3. Influence de l'orientation des fibres dans la matrice minérale… | **36** |
| 1.10.2.3. Durabilité des composites de fibres végétales……. | **37** |
| 1.10.2.4. Évolution des propriétés des composites de fibres végétales au cours de temps…… | **39** |
| 1.10.2.5. Phénomènes aux interfaces fibres/matrice…… | **41** |
| 1.10.2.6. Mode de rupture …… | **42** |
| 1.10.2.7. Propriétés thermiques…… | **43** |
| *Conclusion* ……..……. | **48** |
| ***CHAPITRE 2 :*** ***MÉTHODES D'ESSAIS ET CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX MIS EN ŒUVRE*** | |
| 2. 1.Introduction……... | **49** |
| 2.2. Essais effectués sur matériaux ……. | **49** |
| 2.2.1. Essais sur granulats: (sable)……... | **49** |
| A.1. Masse volumique …… | **49** |
| A.1.1.Masse volumique apparente …… | **49** |
| A.1.2.principe de détermination de la masse volumique apparente…….. | **49** |

| | |
|---|---|
| A.1.3.Masse volumique absolue …… | **50** |
| A.1.4.Principe de détermination de la masse volumique absolue…… | **50** |
| A.2. Porosité et compacité……... | **50** |
| A.2.1.La porosité…… | **50** |
| A.2.2.La compacité…… | **51** |
| A.2.3.Teneur en eau…… | **51** |
| A.3.Propreté des granulats……... | **52** |
| A.3.1. Essai d'équivalent de sable…… | **52** |
| A.3.2. Procédure de mesure de l'équivalent de sable …… | **53** |
| A.4. Granulométrie ……. | **54** |
| A.4.1. Objet de la norme…… | **54** |
| A.4.2. Le tamisage…… | **54** |
| A.4.3. Courbe granulométrique …… | **55** |
| A.4.4. Module de finesse …….. | **55** |
| 2.2.2. Essais sur ciment…… | **56** |
| **1-** Essais physiques ……. | **56** |
| **2-** Résistance mécanique …… | **56** |
| 2.2.3. Essais sur mortier …….. | **57** |
| 1. Mortier frais ……..... | **57** |
| ➢ Ouvrabilité du mortier……... | **57** |
| 2. Mortier durcis …….. | **59** |
| a. Essais mécaniques …….. | **59** |
| a1. Essai de traction par flexion ……. | **59** |
| a2. Essais de compression…….. | **60** |
| b. Essai de retrait ……... | **61** |
| c. Mesure des variations de masse …… | **62** |
| d. Essais thermiques……... | **62** |
| d.1 Description de l'appareil……..... | **63** |
| d.2 Principe de mesure…… | **63** |
| e. Équipement nécessaire …….. | **64** |
| 2.3. Matrice minérale……... | **65** |
| 2.4. Caractérisation des matériaux mis en œuvre……. | **65** |
| A- LE SABLE……... | **65** |

| | |
|---|---|
| A.1. Mélange des deux sables …… | **67** |
| A.2. Analyse granulométrique …… | **67** |
| B- LE CIMENT …….. | **67** |
| C- LES FIBRES ……... | **69** |
| C1-Préparation des fibres …… | **69** |
| C2-Taux d'absorption d'eau par les fibres…….. | **70** |
| D- L'eau de gâchage : …….. | **70** |
| E-Variables étudiés…….. | **70** |
| ***CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE*** | |
| ***PREMIÈRE PARTIE :*** ***ÉLABORATION DU MORTIER COMPOSITE*** | |
| 3.1. INTRODUCTION ……... | **72** |
| 3.2. Définition des différentes compositions employées ……..…….. | **72** |
| 3.2.1. Composition du mortier témoin (sans fibre) ……. | **72** |
| 3.2.2. Formulation du mortier (chargé de fibres)……. | **72** |
| - Définition de (E/C) théorique …….. | **72** |
| 3.3. Expérimentation……... | **75** |
| 3.3.1. Mode opératoire et condition de cure des éprouvettes ……. | **75** |
| A.1. Protocol d'essai ……. | **75** |
| A.2. Préparation des mélanges……. | **75** |
| A.2.1. Mortier témoin (sans fibres)…… | **76** |
| A.2.2. Mortier composite (avec fibres)…… | **76** |
| A.3. Mise en place du mortier composite …….. …… | **77** |
| A.4. Conservation des éprouvettes…… | **77** |
| 3.4. ESSAIS MECANIQUES ……. | **77** |
| 3.4.1. Essai de traction par flexion …….. ….. | **77** |
| 3.4.2. Essai de compression …… | **80** |
| 3.5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ……... | **82** |
| 3.6. CONCLUSION …… | **82** |

***DEUXIEME PARTIE :***

***INFLUENCE DES CYCLES HUMIDIFICATIONS- SÉCHAGE SUR LES PERFORMANCES DU COMPOSITE***


3.7. INTRODUCTION…… **84**

3.7.1. Expérimentation …… **84**

- Protocol d'essai …….... **84**
- Mode opératoire et condition de cure des éprouvettes…… **85**

*a.1-Mortiers sans fibres*……... **85**

*a.2-Mortiers chargé de fibres*…….... **85**

- Conservation des éprouvettes …….. **86**

3.7.2. Cycle humidification-séchage utilisé …….. **87**

3.7.3. Essai sur composite durcis……. **88**

a- Essais mécanique …… **88**

a1- Compression simple ……. **88**

a2- Traction par flexion…… **89**

a3- Interprétation des résultats……. **90**

a.3.1.Influence du dosage en fibres sur les performances mécaniques…….. **90**

a.3.2.Influence du nombre de cycle sur les performances mécaniques …….. **90**

b- Essais physiques ……... **91**

b.1. Variation dimensionnelles :( Retraits et gonflements)…….. **91**

b.1.1. Retrait des éprouvettes conservées à l'air……. **91**

b.1.2.Variations dimensionnelles des éprouvettes soumis aux cycles séchage / humidification……..... **93**

b.1.3. Interprétation des résultats…… **95**

b.2. Variations pondérales (gain et perte de masse)…… …… **95**

b.2.1. Éprouvettes conservées à l'air (sans cycle)…….. **96**

b.2.2. Éprouvettes soumis aux cycles séchage/humidification…….. **97**

b.2.3. Interprétation des résultats…… **99**

b.2.3.1.Éprouvettes conservé à l'air…… **99**

| | |
|---|---|
| b.2.3.2. Éprouvette soumis aux cycles séchage-mouillage … | **99** |
| c- Essais thermiques …… | **100** |
| c.1.1.Coefficient de conductivité thermique……..... | **100** |
| c.1.2.Chaleur massique……..... | **101** |
| c.1.3.Interprétation des résultats …… | **102** |
| **Conclusions Générales** | **103** |
| **Recommandations** | **104** |
| **Références Bibliographiques** | |


# *Liste des Tableaux*


| | | Page |
|---|---|---|
| **Tableau.1.1** | Résistances mécaniques des ciments courants…….. | 9 |
| **Tableau.1.2 :** | Composition et propriétés de différentes fibres végétales…….. | 13 |
| **Tableau.1.3 :** | Propriétés mécaniques de quelques fibres végétales naturelles ……..... | 19 |
| **Tableau.1.4 :** | Proportion des constituent chimiques des bois résineux et feuillus…….. | 21 |
| **Tableau.15 :** | Production de pate : rendement ou qualité…… | 22 |
| **Tableau.1.6 :** | Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales utilisées comme renforts de matériaux composites ……. | 24 |
| **Tableau.1.7 :** | Conception du mortier et propriétés mécanique ……. | 35 |
| **Tableau.1.8 :** | Indice de dureté……. | 35 |
| **Tableau.2.1 :** | Évolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge…… | 57 |
| **Tableau.2.2 :** | Propriétés physiques d'identification des sables utilisés…… | 66 |
| **Tableau.2.3 :** | Propriétés physiques d'identification du ciment utilisé…… | 68 |
| **Tableau.3.1 :** | Concentration de fibre en fonction de (E/C)……. | 73 |
| **Tableau.3.2 :** | Concentration de fibre en fonction du rapport (E/C) théorique……... | 73 |
| **Tableau 3.3 :** | Différents concentration de fibre en fonction de (E/C) théorique……. | 74 |
| **Tableau 3.4:** | Caractéristiques mécaniques des composites en fonction de rapports E/C expérimentale pour chaque % en fibre…….. | 82 |
| **Tableau.3.5 :** | Constituant du composite pour un Kilogramme…….. | 83 |
| **Tableau.3.6 :** | Constituant du composite pour 1 mètre cube de volume……. | 83 |
| **Tableau.3.7 :** | Opération de malaxage de mortier sans fibre……. | 85 |
| **Tableau.3.8 :** | Opération de malaxage de composite chargé de fibre…….. | 86 |

# *Liste des figures*


| | | *Page* |
|---|---|---|
| **Figure 1.1 :** | Évolution de la résistance dans le temps……. | **8** |
| **Figure 1.2 :** | Diagramme de classement des fibres…….. | **10** |
| **Figure 1.3** | Classification des fibres naturelle …….. | **11** |
| **Figure 1.4 :** | Coupe typiques Photomicrographies de quatre fibres végétales naturelles. (agrandie 500 x)…….. | **12** |
| **Figure 1.5 :** | Formule chimique de la cellulose ……. | **14** |
| **Figure 1.6 :** | Principaux motifs de base représentatifs de la structure des macromolécules des lignines ……. | **14** |
| **Figure 1.7 :** | Schéma de principe de la structure d'une fibre végétale ……... | **15** |
| **Figure 1.8 :** | Structure d'une fibre végétale au sein d'un faisceau…….. | **16** |
| **Figure 1.9 :** | Organisation d'une paroi fibreuse de lin……. | **17** |
| **Figure 1.10 :** | Effet de pourcentage de fibres sur l'ouvrabilité des composites renforcé par les fibres d'aramide …… | **28** |
| **Figure 1.11 :** | Taux d'auto-guérison d'un composites cimentaires sous cycle humidification et de séchage. (a) la récupération de fréquence de résonance en CR1 (cycle eau / air. (b) la récupération de fréquence de résonance dans CR2 (cycle eau / l'air chaud)……. ……..……... | **30** |
| **Figure 1.12 :** | Micrographe électronique à balayage des fibres résineux vierges (première utilisation). À l'état sec, les fibres en forme de ruban plat…….. | **32** |
| **Figure 1.13:** | Microscope électronique à balayage de fibres de cellulose noyées dans une matrice de ciment. Les fibres par rapport aux rubans représenté sur la figure, montrent clairement leur forme creuse……... | **33** |
| **Figure 1.14 :** | Résistance en flexion et ténacité de pâte et de mortier de ciment renforcés par la pâte kraft…….. | **33** |
| **Figure 1.15 :** | Influence du dosage et de la longueur des fibres de jute sur les propriétés du composite…… | **34** |
| **Figure 1.16:** | Effet des fibres alignées sur la résistance en flexion à 28 jours……... | **37** |
| **Figure 1.17 :** | Effet des cycles de vieillissement sur le comportement mécanique en flexion.. | **39** |
| **Figure 1.18 :** | Ductilité de fibre après 5 cycles mouillage séchage (450 x)……. | **40** |

| | | |
|---|---|---|
| **Figure 1.19:** | ESEM micrographe après 2 cycles de séchage / mouillages. (a) fibres de pâte kraft blanchie montrant la formation des aiguilles d'ettringite entre les couches S1 et S2 des fibres avec gros plan de cristaux d'ettringite. (b) composite de fibres de pâte kraft blanchie illustrant une reprécipitation denses des aiguilles éttringite qui restreint le gonflement de la fibre…… | **43** |
| **Figure 1.20 :** | Conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres……. | **44** |
| **Figure 1.21 :** | Résistance en compression du composites en fonction de la teneur en fibres… | **45** |
| **Figure 1.22 :** | Résistance en traction du composites en fonction de la teneur en fibres…… | **45** |
| **Figure 1.23 :** | Influence du pourcentage en poids de granulats de bois sur la conductivité thermique…… | **46** |
| **Figure 1.24:** | La conductivité thermique en fonction du contenu en bois……. | **47** |
| **Figure 1.25 :** | Resistance en traction en fonction du contenu en bois…….. | **47** |
| **Figure 2. 1 :** | Le cône et le récipient…… | **49** |
| **Figure 2. 2 :** | Les éprouvettes de mesure de la masse volumique absolue……... | **50** |
| **Figure 2. 3 :** | Détermination de l'équivalent de sable piston…… | **52** |
| **Figure 2. 4 :** | Essai de l'équivalent de sable…… | **53** |
| **Figure 2. 5 :** | Séries de tamis…… | **54** |
| **Figure 2. 6 :** | Maniabilimètre à mortier…… | **58** |
| **Figure 2. 7 :** | Principe de fonctionnement du maniabilimètre à mortier…….. | **59** |
| **Figure 2. 8 :** | Dispositif pour l'essai de résistance à la traction…… | **59** |
| **Figure 2. 9 :** | Dispositif de rupture à la compression…… | **60** |
| **Figure 2. 10 :** | Rétractomètre numérique……..…… | **62** |
| **Figure 2.11** | CT Mètre…… | **63** |
| **Figure 2. 12 :** | Équipement nécessaire…… | **65** |
| **Figure 2. 13 :** | Sable naturel de Bougazoul……. | **66** |
| **Figure 2. 14 :** | Sable concassé de Mont Guorno……. | **66** |
| **Figure 2. 15 :** | Courbe granulométrique des sables utilisées et leur mélange……. | **67** |
| **Figure 2. 16 :** | Ciment de Chlef…….…… | **68** |
| **Figure 2.17 :** | Fibres issues de la récupération des emballages d'œufs……. | **69** |
| **Figure 2. 18 :** | Schéma de principe des phases du traitement du déchet de papier …… | **70** |
| **Figure 2. 19 :** | Variables étudiées…….. | **71** |
| **Figure 3. 1 :** | Courbe représentatif de concentration de fibre en fonction de rapport(E/C)… | **73** |
| **Figure 3. 2 :** | Malaxeur à mortier ……..... | **75** |

| | | |
|---|---|---|
| **Figure 3. 3 :** | Table à chocs …… | **77** |
| **Figure 3. 4 :** | Effet de E/C sur la résistance en traction des composite à 7 jours pour une fraction de 5% de fibre cellulosique……... | **78** |
| **Figure. 3.5 :** | Effet de E/C sur la résistance en traction des composite à 7 jours pour une fraction de 10% de fibre cellulosique……... | **78** |
| **Figure 3. 6 :** | Effet de E/C sur la résistance en traction des composite à 7 jours pour une fraction de 15% de fibre cellulosique…… | **79** |
| **Figure 3. 7 :** | Effet de E/C sur la résistance en traction des composite à 7 jours pour une fraction de……... | **79** |
| **Figure 3. 8 :** | Effet de E/C sur la résistance à la compression des composite à 7 jours pour une fraction de 5% de fibre cellulosique……. | **80** |
| **Figure 3. 9 :** | Effet de E/C sur la résistance à la compression des composite à 7 jours pour une fraction de 10% de fibre cellulosique…….. | **80** |
| **Figure 3. 10 :** | Effet de E/C sur la résistance à la compression des composite à 7 jours pour une fraction de 15% de fibre cellulosique…….. | **81** |
| **Figure 3. 11 :** | Effet de E/C sur la résistance à la compression des composite à 7 jours pour une fraction de20% de fibre cellulosique…….. | **81** |
| **Figure 3. 12 :** | Schématisation des étapes d'1 cycle de séchage/humidification……..... | **87** |
| **Figure 3. 13 :** | Variation de la résistance en compression du composite en fonction du pourcentage en fibre……... | **88** |
| **Figure 3. 14 :** | Variation de la résistance en compression du composite en fonction de nombre de cycle séchage-humidification…… | **88** |
| **Figure 3. 15 :** | Variation de la résistance en traction par flexion du composite en fonction du pourcentage en fibre…….. | **89** |
| **Figure 3. 16 :** | Variation de la résistance en traction par flexion du composite en fonction du nombre de cycle séchage-humidification…… | **89** |
| **Figure 3. 17 :** | Retrait en fonction de l'âge pour les différentes concentrations (éprouvettes conservées à l'air)……... | **92** |
| **Figure 3. 18 :** | Variation de retrait en fonction de la concentration pour différents âges (éprouvettes conservées à l'air)……... | **92** |
| **Figure 3. 19 :** | Variation dimensionnelle en fonction du nombre de cycle (5 cycles) pour les différentes concentrations……... | **93** |
| **Figure 3. 20 :** | Variation dimensionnelle en fonction du nombre de cycle (10 cycles) pour les | |

| | | |
|---|---|---|
| | différentes concentrations…….. | **93** |
| **Figure 3. 21 :** | Variation dimensionnelle en fonction du nombre de cycle (15cycles) pour les différentes concentrations…….. | **94** |
| **Figure 3. 22 :** | Variation dimensionnelle en fonction du nombre de cycle (25cycles) pour les différentes concentrations…….. | **96** |
| **Figure 3. 23 :** | Variation relative de la masse (perte de masse) en fonction de temps …. ……. | **96** |
| **Figure 3. 24 :** | Variation de la masse relative (perte de masse) en fonction de concentration en fibres…….. | **92** |
| **Figure 3. 25 :** | Variation relative de la masse en fonction du nombre de cycle (5 cycles)……. | **97** |
| **Figure 3. 26 :** | Variation relative de la masse en fonction de nombre de cycle (10 cycles)….. | **97** |
| **Figure 3. 27 :** | Variation relative de la masse en fonction du nombre de cycle (15 cycles)….. | **98** |
| **Figure 3. 28 :** | Variation relative de la masse en fonction du nombre de cycle (25 cycles)….. | **98** |
| **Figure 3. 29 :** | Variation relative de la masse en fonction du nombre de mesure pour 25 cycles…….. | **99** |
| **Figure 3. 30 :** | **C**onductivité thermique en fonction de la concentration en fibres……. | **100** |
| **Figure 3. 31:** | Conductivité thermique en fonction du nombre de cycle …….. | **100** |
| **Figure 3. 32 :** | Chaleur massique en fonction de la concentration en fibres…….. | **101** |
| **Figure 3. 33 :** | Chaleur massique en fonction du nombre de cycle……. | **101** |

# *Notations et abréviations*

| | |
|---|---|
| **D** | Diamètre des granulats |
| **$R_J$** | Résistance moyenne en compression à J jours |
| **$R_{28}$** | Résistance moyenne en compression à 28 jours |
| **ΔL/ L** | Variation de longueur p/p à la longueur initiale |
| **L/d** | Longueur /diamètre |
| **E/C** | Eau / ciment |
| **CR1** | cycle de séchage- mouillage (eau/air) |
| **CR2** | cycle de séchage- mouillage (eau/air chaud) |
| **DEF** | Delayed ettringite formation |
| **ACI** | American concrete institute |
| **R traction** | Résistance caractéristique en traction |
| **R flexion** | Résistance caractéristique en flexion |
| **R compression** | Résistance caractéristique en compression |
| **OPC** | Ordinary portland cement |
| **ES** | Équivalent de sable |
| **C1-1** | Composition du mortier composite chargé de 5% en fibre avec E/C =0.92 |
| **C1-2** | Composition du mortier composite chargé de 5% en fibre avec E/C =0.87 |
| **C1-3** | Composition du mortier composite chargé de 5% en fibre avec E/C =0.82 |
| **C1-4** | Composition du mortier composite chargé de 5% en fibre avec E/C =0.97 |
| **C1-5** | Composition du mortier composite chargé de 5% en fibre avec E/C =1.02 |
| **C2-1** | Composition du mortier composite chargé de 10% en fibre avec E/C =1.3 |
| **C2-2** | Composition du mortier composite chargé de 10% en fibre avec E/C =1.25 |
| **C2-3** | Composition du mortier composite chargé de 10% en fibre avec E/C =1.2 |
| **C2-4** | Composition du mortier composite chargé de 10% en fibre avec E/C =1.35 |
| **C2-5** | Composition du mortier composite chargé de 10% en fibre avec E/C =1.4 |

| | |
|---|---|
| **C3-1** | Composition du mortier composite chargé de 15% en fibre avec E/C =1.87 |
| **C3-2** | Composition du mortier composite chargé de 15% en fibre avec E/C =1.82 |
| **C3-3** | Composition du mortier composite chargé de 15% en fibre avec E/C =1.77 |
| **C3-4** | Composition du mortier composite chargé de 15% en fibre avec E/C =1.92 |
| **C3-5** | Composition du mortier composite chargé de 15% en fibre avec E/C =1.97 |
| **C4-1** | Composition du mortier composite chargé de 20% en fibre avec E/C =2.28 |
| **C4-2** | Composition du mortier composite chargé de 20% en fibre avec E/C =2.23 |
| **C4-3** | Composition du mortier composite chargé de 20% en fibre avec E/C =2.18 |
| **C4-4** | Composition du mortier composite chargé de 20% en fibre avec E/C =2.33 |
| **C4-5** | Composition du mortier composite chargé de 20% en fibre avec E/C =2.38 |
| **$\sigma_C$ max** | Résistance maximale en compression. |
| **$\rho_t$max** | Résistance maximale en traction |
| **MT0 (0%)** | Composition de mortier témoin de 0% en fibre à (0, 5, 10, 15 et 25 cycles) |
| **MC1 (5%)** | Composition de mortier chargé de 5% en fibre à (0, 5, 10, 15 et 25 cycles) |
| **MC2 (10%)** | Composition de mortier chargé de10% en fibre à (0, 5, 10, 15 et 25 cycles) |
| **MC3 (15%)** | Composition de mortier chargé de 15% en fibre à (0, 5, 10, 15 et 25 cycles) |
| **MC4 (20%)** | Composition de mortier chargé de 25% en fibre à (0, 5, 10, 15 et 25 cycles) |

# Introduction générale

## 1. Généralité.

La protection de l'environnement, le recyclage des déchets et les problèmes d'économie d'énergie sont devenus parmi les défis les plus importants de la communauté scientifique et industrielle. Les efforts portent de plus en plus sur le développement de ces intérêts, il convient donc de suggérer des solutions efficaces au regard de ces problèmes.

Pour y parvenir, les scientifiques sont allés retour à l'introduction d'une nouvelle série de matériaux par le développement de composites aux ressources renouvelables, avec des propriétés physiques et mécaniques intéressantes nécessitant un examen attentif de l'impact sur l'environnement. Ces composites notamment destinés au secteur de l'habitat et de la construction apportent de nombreux avantages fonctionnels.

La production des matériaux composites se développe rapidement dans le monde, ces matériaux renforcés de fibres, apportent à leurs utilisateurs des avantages importants grâce à leurs propriétés de résistance, de légèreté ou de coût. Ces avantages leur ont ouvert des marchés importants notamment dans l'industrie automobile, l'aéronautique ou encore la construction de bâtiment. Une des applications techniques réussites dans le domaine de Génie Civil est le renforcement du béton ou du mortier par les fibres cellulosique d'origine végétale à partir de papiers recyclés.

L'incorporation des fibres de cellulose dans les matrices minérales (cimentaires) ou organiques a pris de l'importance car: (i) ces matériaux font le plus léger composite à haute teneur en fibres, (ii) ils ont un rapport coût-performance comparables avec les matériaux de construction similaires, et (iii) ils pourraient être fabriqués à partir de déchets de papier, élargissant ainsi les possibilités d'utilisation des déchets dans les matériaux cimentaires.

## 2. Objectif.

L'objectif de cette étude est d'examiner l'effet de l'incorporation des fibres cellulosiques de récupération, dans une matrice cimentaire sur les caractéristiques physique et mécanique en vue d'utilisation dans le domaine de construction en tant que bétons ou mortier.

L'examen de l'influence de la variation des ambiances climatiques sur le comportement physique et mécanique du composite est mis en exergue dans une seconde étape en soumettant ce dernier à des sollicitations thermo hygrométriques que sont les cycles mouillage séchage .

**3. Méthodologie de travail :**

Après avoir présenté une introduction générale montrant la problématique et l'objectif visé, une synthèse bibliographique est abordée au premier chapitre. Elle expose dans un premier temps quelque définition sur les fibres cellulosiques en général et les fibres cellulosiques de récupération en particulier et l'intérêt de leur utilisation dans le domaine de la construction des bâtiments. Dans un second temps, une revue des principales études sur le comportement des matériaux à base de fibres végétales est exposée

Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes d'essais générales effectués sur les bétons, les mortiers et/ou les mortiers composites, ainsi que les caractéristiques des matériaux mis en œuvre. On explique en détail dans notre cas, la méthodologie suivit, ainsi que les différentes procédures d'essais réalisés.

Le troisième chapitre est scindé en deux parties, la première est consacrée à l'élaboration du composite ou la définition de la composition de notre mortier chargé de fibres, alors que la deuxième partie présente l'influence du pourcentage en fibres et les cycles de séchage et d'humidification sur les performances mécaniques et thermiques du composite et la présentation et l'analyse des résultats obtenus

En fin, on clôture ce mémoire par des conclusions générales, en synthétisant les principaux résultats obtenus à travers cette étude. Quelques recommandations pour des futurs travaux sont présentées aussi.

# ***CHAPITRE 1 :***

# *Analyse bibliographique*

## 1.1. Introduction :

La technologie du béton est soumise à un degré croissant de spécialisation. L'incorporation de fibres dans des matrices cimentaires pour former des composites est un exemple de spécialisation au sein de la technologie du béton. Il nécessite une connaissance des concepts qui régissent les interactions entre les fibres et la pâte de ciment, mortier ou matrice de béton qui influencent la manufacture et les propriétés du produit final.

## 1.2. Matériaux composites.

En combinant divers types de matériaux normalement non miscibles, et tout en contrôlant leur morphologie et leur répartition, on obtient des matériaux composites, dont les propriétés sont différentes de celles des composants de base **[1]**

## 1.3. Matériaux composites renforcé de fibres :

On réserve de plus en plus la dénomination **"matériau composite"** aux matériaux constitués d'une matrice continue renforcée par des fibres. Ces fibres résistantes (selon l'application) sont noyés dans une matrice qui les maintient en place et assure la cohésion de l'ensemble **[2].**

Le rajout de fibres à une matrice est une technique très ancienne, en effet, nos prédécesseurs utilisaient la paille pour renforcer l'argile, et le crin (poils de chevaux) pour renforcer les différents mortiers ou le plâtre. Le renforcement des matériaux de construction, en l'occurrence les bétons et les mortiers, par des fibres est une technique de plus en plus utilisée à nos jours dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques **[3].**

Différents types de fibres synthétiques et naturelles sont utilisées dans des matrices cimentaires pour améliorer les propriétés mécaniques du composite comme la résistance à la traction et à la flexion, la ténacité, la résistance au choc, et l'énergie de rupture **[4]**

## 1.4. Le mortier :

On appelle mortiers les matériaux obtenus en gâchant dans un malaxeur des proportions convenables de ciment, d'eau et de granulats avec éventuellement un ou plusieurs adjuvants **[5]** C'est la dimension D du plus gros granulat qui détermine l'appellation : mortier pour $D \leq 4$ mm, béton pour $D \geq 4$ mm **[6].**

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier et le ciment, l'eau et l'adjuvant forment la pate liante. Lorsqu'il n'ya pas de squelette granulaire, on parle de pate pure de ciment **[7]**.

### 1.4.1. Types de mortier

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier:

#### 1.4.1.1. Mortier de ciment

Les mortiers de ciments sont très résistants, durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables **[8]**.

#### 1.4.1.2. Mortier de chaux

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment. La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments **[8]**.

#### 1.4.1.3. Mortier bâtard

Ce sont des mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée **[8]**.

#### 1.4.1.4. Mortier de hourdage de maçonnerie

On utilise des sables dont les grains les plus gros n'excèdent pas 5 mm, le dosage le plus usuel est de 1 volume de liant pour trois volumes de sable. La quantité d'eau qui joue un rôle important ne peut être fixée à priori, en règle générale on adopte une valeur voisine de la moitié du poids du liant qui peut être réduite lorsqu'on utilise un plastifiant **[8]**.

#### 1.4.1.5. Mortier composite :

Un mortier composite est un mélange de sable, de ciment et de fibres.

## 1.5. Les constituants d'un mortier composite:

### 1.5.1. Le sable :

Le sable est un produit naturel qui est obtenu à partir des rivières, des carrières (sablière), des dunes et de mer. Or le sable de mer ne devrait pas être utilisé pour les raisons suivantes **[9]**:

- Il contient du sel, et donc la structure restera humide. Le mortier est affecté par efflorescence et des cloques apparaissent.
- Il contient des coquilles et autres matières organiques, qui se décomposent après un certain temps, en réduisant la durée de vie du mortier.

Le sable peut être obtenu artificiellement par concassage des pierres dures. En général le sable artificiel est obtenu sous forme d'un sous-produit tout en écrasant les pierres pour obtenir la gelée (granulats grossiers).

#### 1.5.1.1. Utilité de l'utilisation des sables dans les mortiers :

Le sable est utilisé dans le mortier et le béton pour les objectifs suivants:

- Il subdivise la pâte de liant en films minces et lui permet d'adhérer et de se propager.
- Il remplit l'espace entre les blocs de construction et propage le liant.
- Il augmente la densité du mortier.
- Il empêche le retrait du matériau cimentaire
- Le coût du matériau cimentaires par unité de volume est réduit, puisque le matériau à faible coût (sable) augmente le volume de mortier.
- La silice de sable contribue à la formation de silicates résultant dans la masse durcie.

#### 1.5.1.2. Propriétés d'un bon sable

Les propriétés d'un bon sable sont les suivants **[9]**:

1- Il doit être chimiquement inerte.
2- Il doit être exempt de matières organiques ou végétales.
3- Il doit être exempt de sel.
4- Il devrait contenir des grains anguleux et grossiers.
5- Il doit être bien calibré.
6- Il doit être dur.

## 1.5.2. Le ciment :

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température d'un mélange de matériaux naturels de carrière (argile, calcaire, marne dans la proportion approximative de 20% d'argile et de 80% de calcaire). Ces matériaux sont d'abord concassés puis broyés, à sec ou en présence d'eau, pour obtenir un mélange intime et homogène comportant environ 65% à 70% de CaO ; ce mélange passe ensuite dans un four rotatif de grande longueur (200 m environ) où se produit, vers 1450°C une fusion partielle ou clinkérisation, au cours de laquelle ont lieu des réaction entre la chaux CaO et les oxydes acides présents dans l'argile, $SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$ formant des sels anhydres : silicate, aluminates et aluminoferrites de calcium, dénommés clinker **[9]**.

La cuisson terminée, le clinker , qui se présente sous forme de grains plus ou moins arrondis de 5 à 30 mm de diamètre, est refroidi rapidement et broyé dans des broyeurs à boulets, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse).on obtient ainsi le ciment Portland Artificiel (C.P.A), du nom d'une carrière anglaise de calcaire marneux naturels contenant de l'argile en bonne proportion et répartie de façon homogène, donnant par cuisson du ciment naturel.

**Les 4 principaux constituants du ciment portland ordinaire sont :**

- Le silicate tricalcique (40%) $Si\ O_2\ 3CaO$ ou ($C_3S$) (Alite)
- Le silicate bicalcique (30%). $Si\ O_2\ 2CaO$ ou ($C_2S$) (Belite)
- L'aluminate tricalcique (11%) $Al_2\ O_3\ 3CaO$ ou ($C_3A$) (Celite)
- L'aluminoferrite tetracalcique (11%) $4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$ ou($C_4AF$) (Celite)

### 1.5.2.1. Ciment avec constituants secondaires :

Dans un but d'économie, on mélange souvent au clinker des constituants secondaires consommant moins d'énergie pour leur fabrication (cette énergie intervient en effet actuellement pour près de 45% dans le prix de revient du ciment) on site **[9]** :

- **Le laitier**, résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux, sortant du trou de coulée de 1.750°C. Refroidi brusquement, il donne un produit granulé comportant 45 à 50% de chaux, 25 à 30% de silice, 15 à 20% d'alumine et 10% d'oxydes divers .c'est un véritable ciment lent.

- **Les cendre volantes**, fines poussières récupérées dans les dépoussiéreurs à la sortie des chaudières des centrales thermiques. Elle comporte de la silice amorphe.
- **Les pouzzolanes,** produits naturels d'origine volcanique, composés de silicates et aluminates.
- **Les fillers,** produits obtenus par broyage fin de certaines roches,agissant uniquement par leur propriétés physiques,inertes sur le plan chimique.

On obtient ainsi à partir du clinker de C.P.A un ciment portland composé,dénommé CPJ par la norme NF P15 301. Selon cette norme, le CPA contient au moins 97% de clinker, le reste etant du filler et le CPJ au moins 65% de clincker, le reste etant des constituants secondaire et éventuellement de 3% de filler.

On utilise également le ciment de haut fourneau CHF contenat entre 60 et 75% de laitier et le ciment de laitier au clinker CLK contenant au moins 80% de laitier.Pour ces deux ciments, le reste est constitué de clinker pur et éventuellement de 3% de filler.

Ces derniers ciments par oposition aux CPA, ont une bonne résistance aux eaux, pures ou chargées de certains sels agressifs, d'autant plus que leur pourcentage en laitier est important, ce qui les fait recommander pour les travaux de fondation.

### 1.5.2.2. Hydratation du ciment :

En présence d'eau, les sels minéraux amorphes, anhydres et instables, s'hydratent. Il se produit une cristallisation des sels hydratés stables formés d'aiguilles enchevetrées ; ainsi le silicate tricalcique anhydre Si $O_2$ 3CaO, donne un silicate hydraté, la toberm orite, et de l'hydroxyde de chaux, avec dégagement de chaleur **[9-10]**:

$$2\,(Si\,O_2\,3CaO)+6H2O \rightarrow Si_{\,2}O_7\,Ca_3\,3H_2O+3Ca(OH)_2 \qquad \textbf{(1.1)}$$

### 1.5.2.3. Le durcissement :

Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit ; c'est la période durcissement. La résistance à la compression augmente plus ou moins rapidement, et ceci pendant des mois.

La classification des ciments se fait à l'aide d'essai d'écrasement sur des éprouvettes de mortier dit normal, mélange à 1 pour 3 de ciment et de sable.

Les résistances sont mesurées à 28 jours : ces résistances présentent évidemment une certaine dispersion. C'est pourquoi la dénomination de la classe de résistance d'un ciment est définie par le milieu de la fourchette faisant intervenir la résistance maximale et la résistance minimale à 28 jours.

Cette valeur est exprimée en Méga Pascal (MPa). La fourchette retenue est de plus ou moins 10 MPa. C'est ainsi qu'un ciment 45 aura une résistance sur mortier normal à 28 jours comprise entre 35 et 55 MPa soit 350 à 550 bars. **(Fig.1.2)** **[10].**

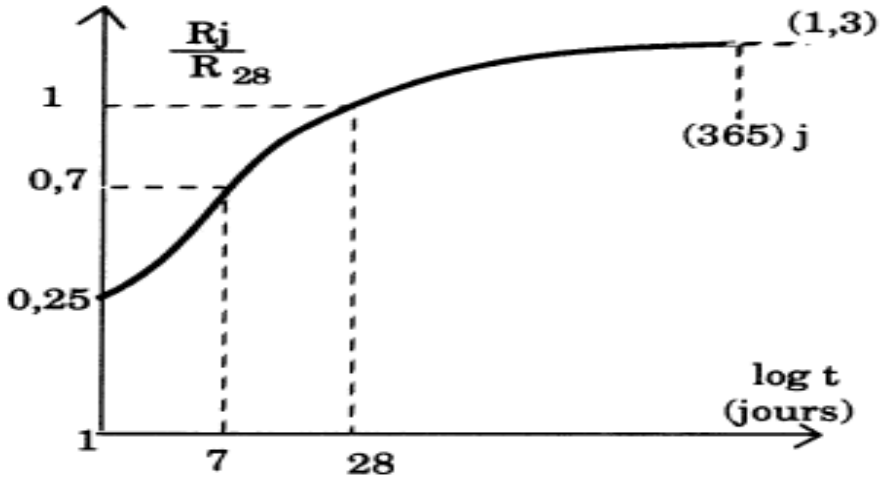



**Fig.1.1 :** Évolution de la résistance dans le temps **[10]**

### 1.5.2.4. Classe des ciments :

Il existe 3 classes de ciment courantes : 32,5 - 42,5 - 52,5. Pour ces deux dernières classes, sont prévue des sous classes éventuelles 45R et 55R R= rapide) dont la résistance à 2 jours est spécifiée. La résistance à 7 jours est de l'ordre de 2/3 de la résistance à 28 jours. Les résistances à la traction sont de l'ordre du dixième des précédentes **[10-11]**.

Dans chaque catégorie de ciment, l'augmentation de résistance à la compression est obtenue par l'augmentation de la finesse de mouture de clinker. Elle peut varier de 2700 à 4500 $m^2/g$ en surface développée dite surface de Blaine. Sa valeur moyenne est de l'ordre de 3000 $cm^2/g$ (le diamètre des grains est inférieur à 200 µ la majorité est de 50µ.

La chaleur accélère la prise et le durcissement, alors que le froid les ralentit. On peut compenser ces effets en utilisant des retardateurs ou des accélérateurs tels que le chlorure de calcium, qui permet de bétonner par temps froids.

La norme EN 196-1 spécifie une limite inférieure et une limite supérieure des résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours dont les valeurs sont les suivantes (**Tableau.1.1)**:

**Tableau.1.1:** Résistances mécaniques des ciments courants**. [11]**

| Classe des ciments | Résistance à 2 jours (MPa) | Résistance minimale à 28 jours (MPa) | Résistance maximale à 28 jours (MPa) |
|---|---|---|---|
| **32.5** | / | ≥ 32.5 | ≤ 52.5 |
| **32.5R** | ≥ 13.5 | ≥ 32.5 | ≤ 52.5 |
| **42.5** | ≥ 12.5 | ≥ 42.5 | ≤ 62.5 |
| **42.5R** | ≥ 20 | ≥ 42.5 | ≤ 62.5 |
| **52.5** | ≥ 20 | ≥ 52.5 | / |
| **52.5R** | ≥ 30 | ≥ 52.5 | / |

### 1.5.2.5. Retrait et fissuration :

Le ciment est toujours mélangé à une quantité d'eau très nettement supérieure à la quantité nécessaire à l'hydratation **[10 - 11]**. De ce fait, au cours de la prise et du durcissement, les éprouvettes de pate pure ou de mortier normal, subissent une diminution de volume apparent, appelée retrait hydraulique, due aux qualités hydrauliques du liant et à l'évaporation de l'eau. Ce retrait sur mortier normal peut atteindre :$\frac{\Delta l}{l}$ =3,5 x$10^{-4}$ à 7 jours et 6x$10^{-4}$ à 28 jours.

Lorsque le retrait est empêché, il crée donc des contraintes de traction, qui conduisent à une fissuration des éprouvettes : c'est ainsi que l'on caractérise parfois les ciments par le temps de fissuration d'un anneau de pate pur dont le retrait est gêné par un noyau central en acier .en général, ce délai doit être inférieur à 15 heures

### 1.5.3. Les fibres :

Le terme fibre est tout d'abord un terme générique désignant une matière textile de toute nature (naturelle, artificielle, synthétique…), d'une manière plus précise et rigoureuse, une fibre décrit un élément discontinu défini donc par sa longueur et son diamètre **[12].**

C'est un filament simple fin qui trouve une utilisation dans la fabrication des filés et de fils qui composent les éléments de base de tous les textiles tels que les tissus, les nattes, des cordes, et les ficelles **[13].**

### 1.5.3.1. Classification des fibres:

IL y a tellement différents types de fibres qu'il est nécessaire de les classer en groupes, où chaque fibre dans un groupe particulier a quelque chose en commun avec les autres fibres de ce groupe. Cette caractéristique commune peut être, par exemple, le type de source, la méthode de production et ainsi de suite. Une caractéristique qui est commune à de nombreuses fibres est qu'elles sont très fines, des matériaux semblables à des cheveux. Une autre caractéristique commune est qu'ils ont tous une longueur plusieurs fois supérieure à une section de leur largeur **[14]** Les fibres textiles sont normalement divisées en deux classes principales **(Fig.1.3) [15].**

- **Fibres artificielles.**
- **Fibres naturelles**

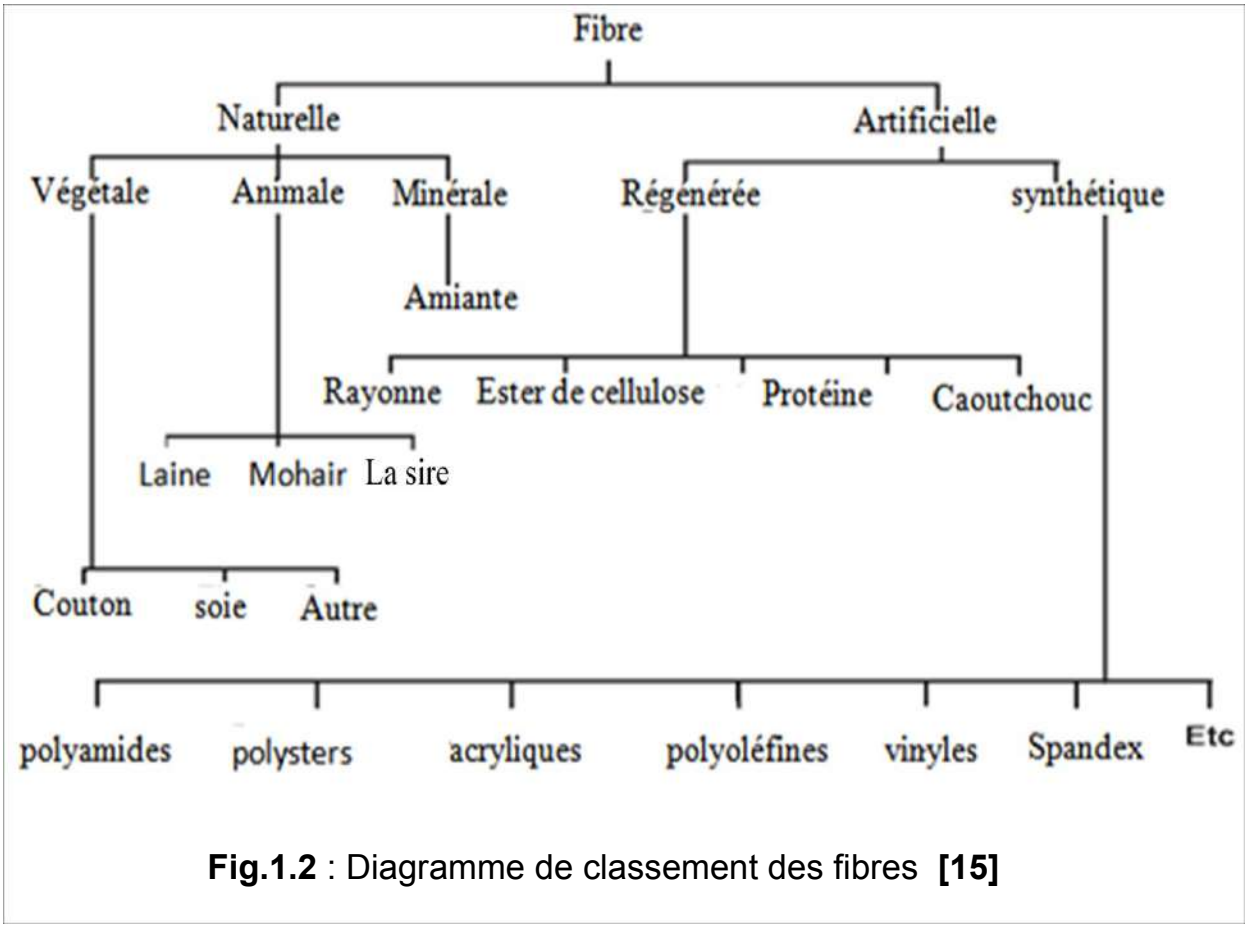



**Fig.1.2** : Diagramme de classement des fibres **[15]**

## A- Les fibres artificielles :

Les fibres synthétiques sont des fibres dans lesquels chaque unité chimique de base a été formé par synthèse chimique suivie par la formation de fibres ou de polymères à partir de source naturelle et régénérée après passage à travers une filière pour former des fibres **[15].**

## B- Les fibres naturelles :

Toutes les fibres qui viennent des sources naturelles (animaux, plantes, etc.) et n'exigent pas une transformation sont classées en tant que fibres naturelles **[15].**

Le terme «fibres naturelles » couvre une large gamme de fibres végétales, animales et minérales. Cependant, dans l'industrie des composites, on fait généralement référence à des fibres de bois et aux fibres libériennes, feuille, graine et tige. Ces fibres contribuent souvent considérablement à la performance structurelle de la plante **[16].**

## B.1. Classification des fibres naturelles :

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine **(fig.1.4) [17].**

1) ***Les fibres végétales (cellulosiques)***
2) ***Les fibres animales :***
3) ***Les fibres minérales :***

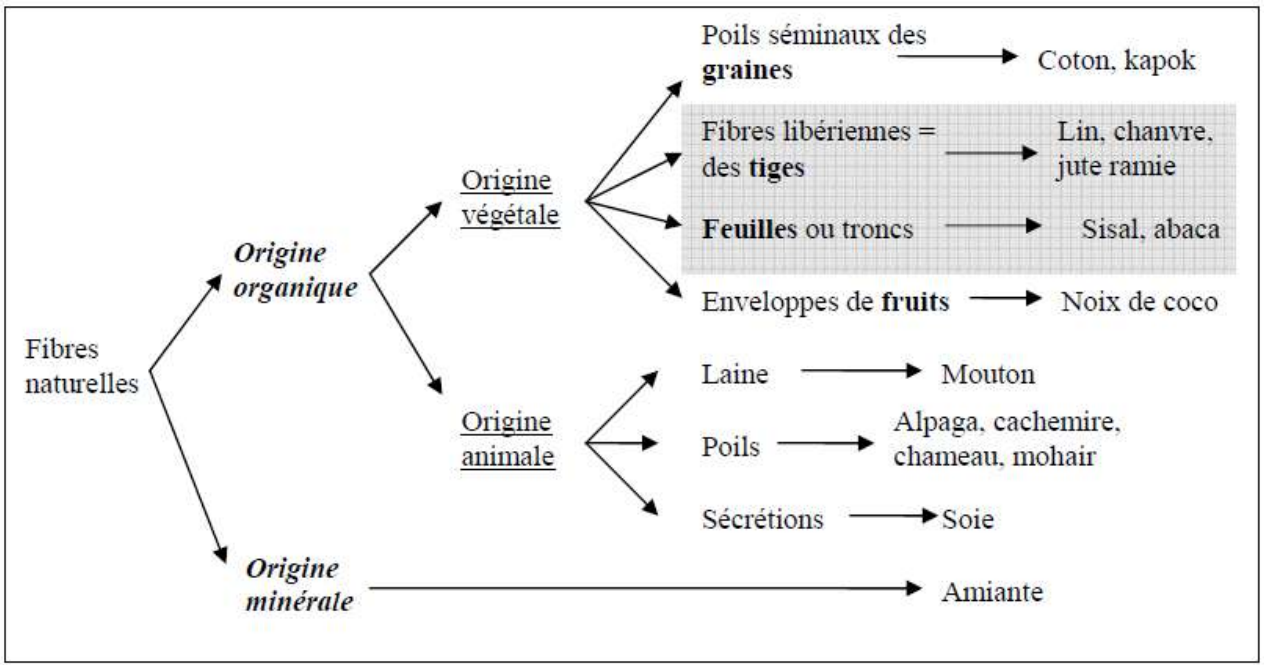



**Fig.1.3** : Classification des fibres naturelle **[17]**

## B.2. Les fibres végétales.

Les ingénieurs ont été longtemps intéressés par l'utilisation de fibres végétales naturelles pour des applications de technologie, des anciens, qui ont utilisé le papyrus pour retenir le sol, à des ingénieurs de nos jours qui utilisent des fibres de coton dans la mousse isolante. Aujourd'hui, l'intérêt de plantes naturelles a explosé avec la demande mondiale vu qu'elles sont plus efficaces, moins chers, légers, renouvelables (produit «vert»). **[18]**.

## B.3. Propriété des fibres végétales :

Les fibres végétales sont longues, de structure en forme de tube constitué de cellules. Leur structure de base se compose d'un vide central ou (lumen) entourée par une paroi cellulaire. La Figure (1.5) présente une coupe transversale photomicrographique de quatre différentes fibres végétales (noix de coco, bois, jute, et paille). Les fibres ont tous des pores qui permettent le transport d'eau à travers la fibre. Ces caractéristiques jouent un rôle important dans la résistance à la rupture et la durabilité des fibres végétales naturelles **[18]**

Les Fibres végétales varient considérablement dans leurs caractéristiques physiques, dont certaines sont très épais et rigides, tandis que d'autres sont très lisses, fines et souples. Certaines sont amorphes avec un arrangement lâche de fibres qui sont doux, élastique et absorbant **[19]**

**9**

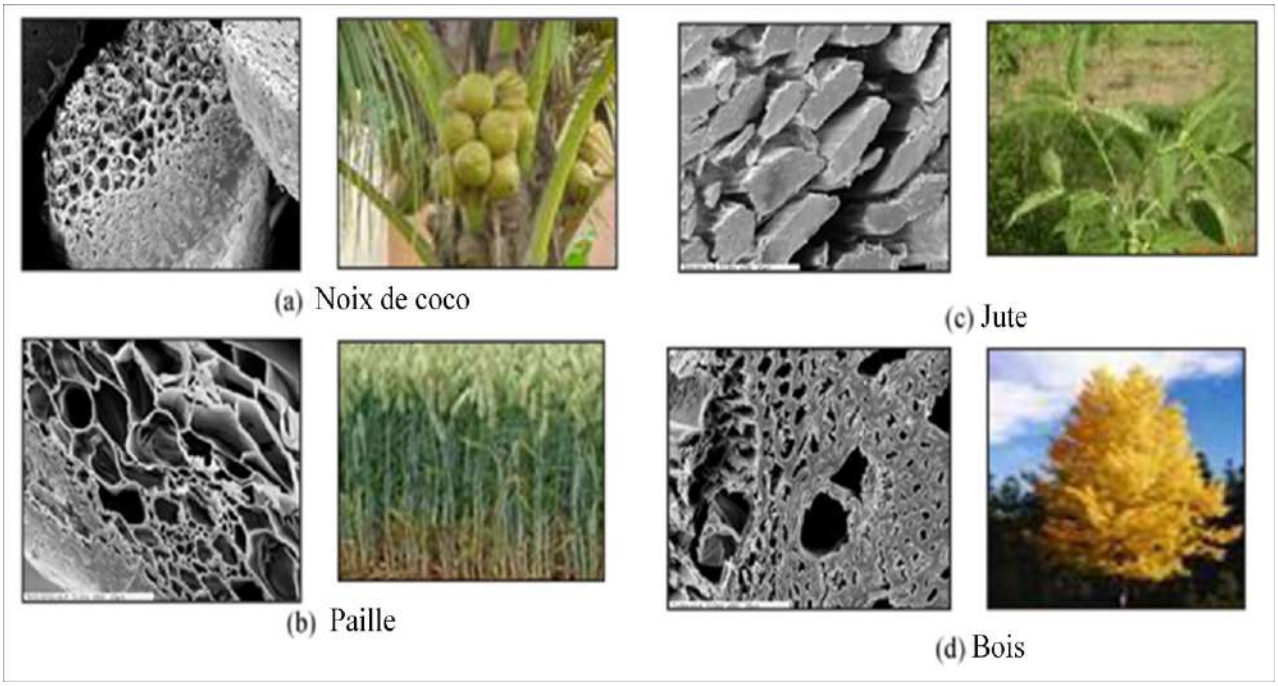



**Fig.1.4**: Coupe typiques Photomicrographiques de quatre fibres végétales naturelles (agrandie 500 x) **[18]**

## B.4. Principaux Constituants des fibres végétales:

La connaissance des propriétés et caractéristiques des fibres naturelles d'origine végétale est indispensable afin de relier la structure de ces fibres à leurs propriétés dans les matériaux. Les fibres végétales sont constituées principalement de celluloses, hémicelluloses et lignines en pourcentages différents (**Tableau 1.2).**

**Tableau 1.2:** Composition et propriétés de différentes fibres végétales **[20]**

| Nature des fibres | % de cellulose | Angle microfibrillaire (degrés) | Diamètre (µm) | Longueur (mm) | Rapport L/d |
|---|---|---|---|---|---|
| **Lin** | 64 - 71 | 10 | 5 - 76 | 4 - 77 | 1687 |
| **Ramie** | 83 | 7.5 | 16 - 126 | 40 - 250 | 3500 |
| **Chanvre** | 78 | 6.2 | 10 - 51 | 5 - 55 | 960 |
| **Jute** | 61 - 71 | 8 | 25 - 200 | | 110 |
| **Sisal** | 67 - 78 | 20 | 7 - 47 | 0.8 - 8 | 100 |
| **Noix de coco** | 43 | 45 | 12 - 24 | 0.3 - 1 | 35 |

### B.4.1. La Cellulose :

La cellulose est la matière la plus répandue dans la nature. Elle est présente dans les plantes, les algues, les bactéries et chez certains animaux. C'est un homopolysaccharide linéaire constitué d'unités β-D-glucopyranose reliées entre elles par des liaisons glycosidiques β-(1→4) **[21-22]**

C'est le composant principal de structure de la paroi cellulaire et après élimination de la lignine et de divers autres extractive, il est également le principal élément structurel de papier. La cellulose est un composant d'au moins un tiers des plantes avancées : 40-60% (en poids) de bois sec, et plus de 90% de coton brut (99,9% de coton purifié) et le lin. Par conséquent, la cellulose est sans contredit le plus abondant dans la nature **[22].**

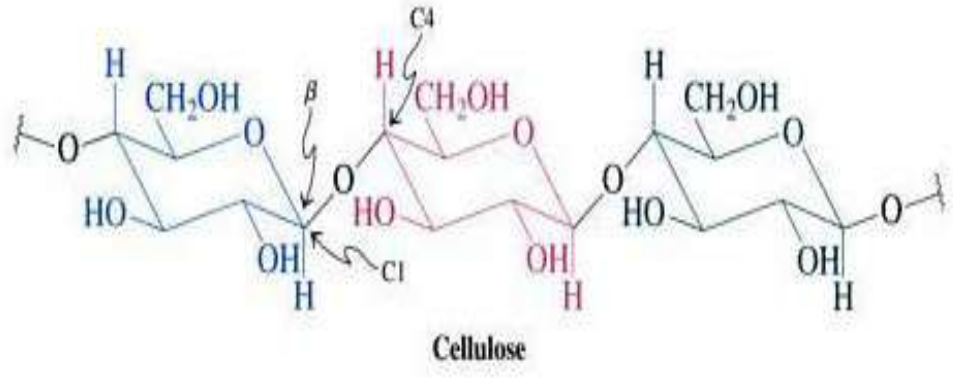


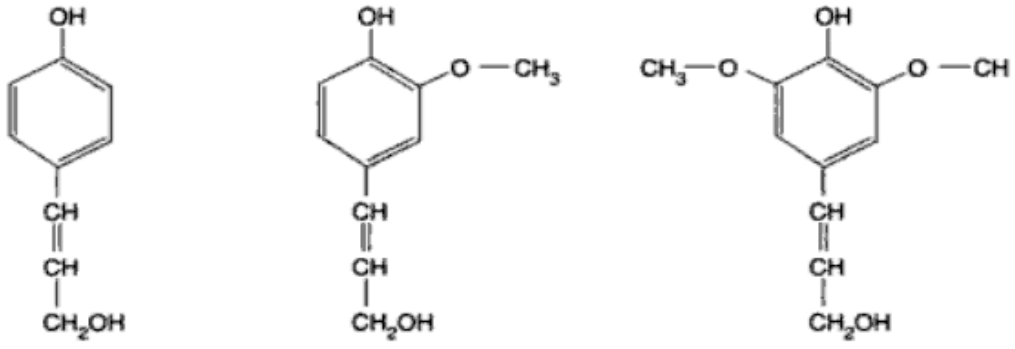

**Fig.1.5 :** Formule chimique de la cellulose **[23]**

### B.4.2. L'hémicelluloses :

L'hémicellulose est un hétéropolysaccharide amorphe ramifié. Il s'agit principalement d'un mélange de pentoses (surtout de la xylose), avec des quantités moindres de l'arabinose. Ainsi, les hémicelluloses ont aussi un composant hexose. Cette diversité de sucres et de leur structure amorphe sont les principales causes de diminution de la résistance mécanique de l'hémicellulose. **[24]**

### B.4.3. La lignine :

Polymères tridimensionnels amorphes formés par l'association non répétitive et en proportions variables de trois unités monomères : les alcools coumaryliques, coniféryliques, et sinapyliques **[25]. (Fig.1.7)**




**Alcool coumarylique** **Alcool coniféryliqu** **Alcool sinapyliques**

**Fig.1.6 :** Principaux motifs de base représentatifs de la structure des macromolécules des lignines **[26]**.

## 1.6. Les fibres de cellulose :

Les fibres de cellulose sont largement disponibles dans la plupart des pays en voie de développement à partir de bois ou de plantes annuels. Elles présentent plusieurs avantages intéressants en particulier leur faible densité, leur caractère bio-renouvelable et leur disponibilité partout au coût modeste et dans une variété de morphologies et d'allongements. Toutes ces propriétés leur font des matériaux commodes pour le renforcement de matrice, comme les composites polymères ou les applications de fibre-ciment **[27].**

### 1.6.1. Structure d'une fibre cellulosique :

La Liaison de cellulose est rigide et ferme, donnant des propriétés intéressantes pour une utilisation comme matériau de structure. Le diamètre des fibres de cellulose est d'environ 12 µm, qui est similaire à la fibre de verre (et sans doute inspiré de ce dernier). Les fibres de cellulose sont constituées de fibrilles **(Fig.1.8)**. Les diamètres individuels des fibrilles de cellulose sont dans la gamme de 4 à 35 nm, selon la source de cellulose incluant : les linters de coton (de 0,007 à 0.009 µm), la ramie (0.010 à 0.015 µm), la pulpe (0,01 à 0,03 µm), et de la cellulose Valonia (0,001 à 0,035 µm) **[28].**

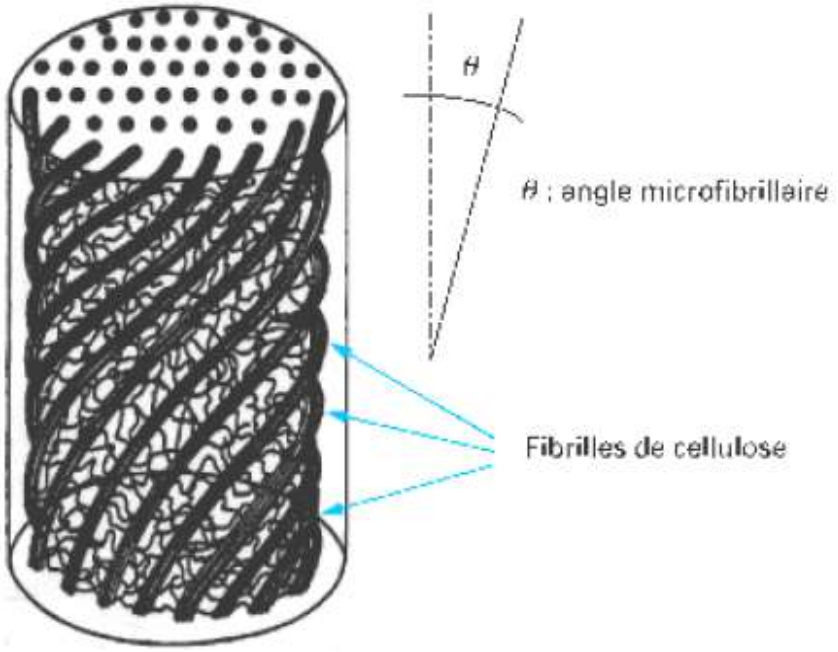



**Fig. 1.7 :** Schéma de principe de la structure d'une fibre végétale **[17]**

Au niveau microscopique, la structure concentrique des fibres végétales est plus précisément décrite dans [**29].**

Les fibres sont constituées d'une paroi primaire très fine, d'une paroi secondaire composée de trois couches (S1, S2 et S3) et d'un espace vide au centre, le lumen (Fig.1. 9). Il existe également des vaisseaux transversaux qui connectent les fibres entre elles. Les fibres sont liées les unes aux autres au sein de faisceaux par une couche appelée lamelle mitoyenne

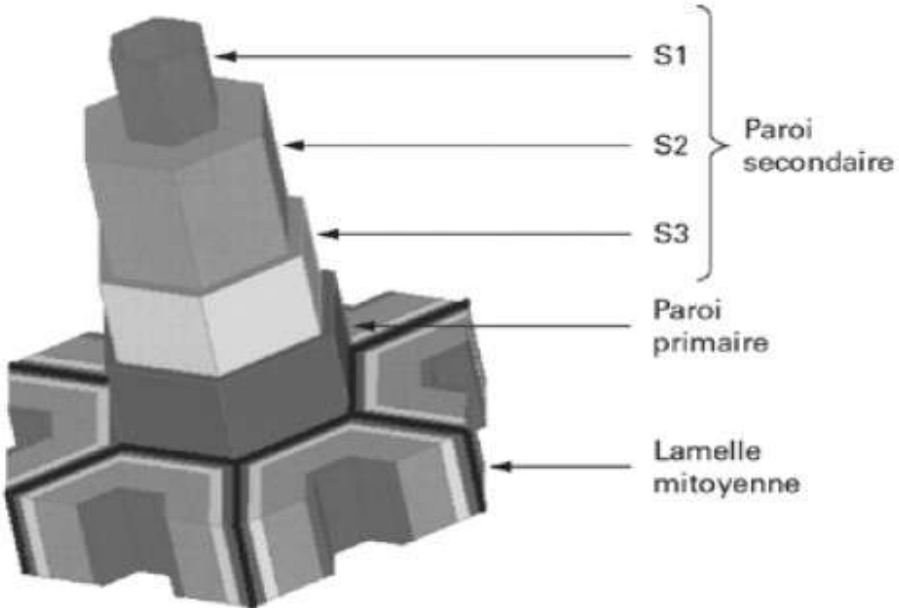



**Fig.1.8 :** Structure d'une fibre végétale au sein d'un

Les différentes couches sont composées en proportions variables de lignine, cellulose, hémicellulose et pectine. On trouve également des produits d'extraction (constituants secondaires des bois ou autres végétaux, pouvant en être extraits par dissolution dans l'eau, l'éther, l'éthanol ou le benzène, à froid ou à température peu élevée) et de la matière inorganique en faible quantité.

Les parois primaires et secondaires contiennent une armature formée de microfibrilles de cellulose, dans une matrice contenant des hémicelluloses et de la lignine ; cette structure simplifiée est représentée schématiquement sur la **figure.1.9.** Les

microfibrilles sont parallèles les unes aux autres et forment avec l'axe de la fibre un angle appelé angle microfibrillaire.

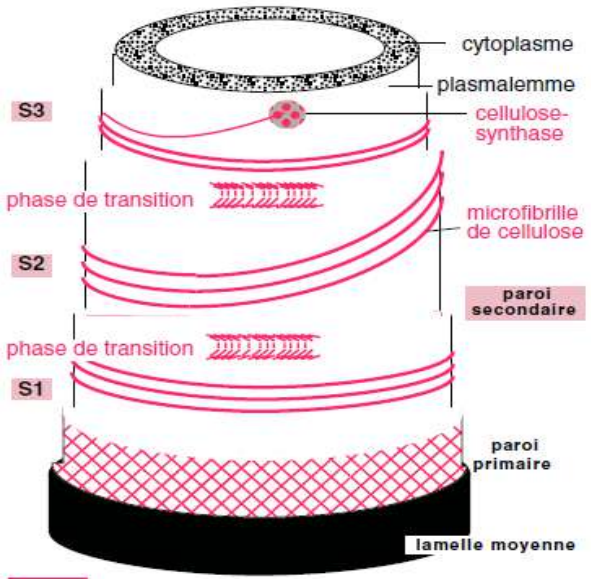



**Fig.1.9.** Organisation d'une paroi fibreuse de lin **[30]**

### 1.6.2. Source des fibres cellulosiques :

Les fibres peuvent être classées par leurs références à la partie de la plante à partir de laquelle ils appartiennent. Les sources importantes de fibres cellulosiques sont **[29]**

- ✓ **Les fibres de poils séminaux :**

  Les poils séminaux comme le coton contiennent de la cellulose avec de petites quantités de substances non cellulosiques (4-12%). Cela rend la purification plus simple que pour la plupart des autres fibres cellulosiques. Autres fibres séminaux sont le kapok et le coton bombax. Ces fibres contiennent 55-65% de la cellulose.

- ✓ **Les Fibres libériennes:**

  Ce sont des fibres longues de l'écorce de diverses plantes qui renforcent la tige de la plante. Ils comprennent le lin, le chanvre, jute, ramie, kenaf etc. Ces fibres sont intégrés avec de la gomme naturelle dans la structure de la plante. Les fibres sont séparées par le retrait de la gomme et le processus est généralement connu sous le nom «rouissage».

- ✓ **Fibres dures :**

  Beaucoup de fibres cellulosiques, comme le sisal, chanvre de Manille sont également obtenues à partir des feuilles des plantes. Les fibres s'étendent longitudinalement sur toute la longueur de la feuille et contribue au renforcement des feuilles. Ces fibres se trouvent dans les tissus des feuilles et peuvent être séparées du tissu par un processus connu sous le nom **"décortication"**

- ✓ **La glume ou fibres de fruits :**

  Les glumes de noix de coco, noix de bétel et palmnut qui protègent les fruits au cours du développement peuvent être traitées et utilisées comme des fibres. Après le retrait du fruit, la glume peut être extrait, roui et traitées.

### 1.6.3. Autre source de cellulose :

La Cellulose se trouve également dans de nombreux matériaux sous forme non-fibreux. Les substances contenant de la cellulose sont les suivantes **[29]**:

- ✓ **Les Herbes:** une autre source importante de cellulose sont les herbes et la paille. Sabai herbe, l'herbe Espato, Pailles de Céréales, Paille de Riz et la Paille de Blé etc. sont les principales sources de cellulose.

- ✓ **Les déchets agricoles:** la cellulose est le constituant majeur de la paroi cellulaire des végétaux. Ainsi, les déchets résiduels des plantes utilisées à partir d'une source potentielle contiennent une énorme quantité de cellulose. La tige de la canne à sucre concassé, petits maïs, les balles de riz, les céréales et les enveloppes de graines, les tiges de soja, les tiges de tournesol, les coquilles de noix etc. sont considérées comme des sources de la cellulose.

- ✓ **Le bois :** Les fibres de cellulose sont obtenues à partir de bois résineux et feuillus. Les fibres de bois résineux sont de 30-40 µm de diamètre et de 3-7 mm de long. Les fibres de bois feuillus sont plus fines (10-20 µm) et plus court (1-2 mm). Ces fibres sont extraites à partir de pulpe de bois par des procédés chimiques et des processus mécaniques différents **[31]**

### 1.6.4. Propriétés des fibres de cellulose:

Les propriétés collectives suivantes de fibres de cellulose végétale (**Tableau 1.3),** leur font le composant idéal pour le papier **[32]**

- ✓ Haute résistance à la traction
- ✓ Adaptabilité (la flexibilité et la capacité à se conformer)
- ✓ Conservation de la forme
- ✓ insolubilité dans l'eau
- ✓ qualité Hydrophile
- ✓ Large gamme de dimensions
- ✓ Aptitude à établir des liens entre les fibres
- ✓ Capacité de garder les additifs qui modifient leurs propriétés
- ✓ Stabilité chimique.
- ✓ Blancheur relative.
- ✓ des ressources renouvelables

**Tableau 1.3**: Propriétés mécaniques de quelques fibres végétales naturelles **[18]**

| Classification | Fibre | Resistance à la traction (MPa) | Module de YOUNG (GPa) | allongement à la rupture |
|---|---|---|---|---|
| Libériennes / tige | Lin | 343 - 100 | 27 - 100 | 1.6 – 3.2 |
| | Chanvre | 580 - 110 | 3 - 90 | 1.3 – 4.7 |
| | Jute | 187 - 73 | 3 - 55 | 1.4 – 3.1 |
| | Kénaf | 295 - 30 | 22 - 53 | 3.7 – 6.9 |
| Feuille | Abaca | 980 - 000 | 72 | 2.5 - 12 |
| | Sisal | 468 - 55 | 9.0 – 28.0 | 1.9 – 4.5 |
| Fruit | Coir | 106 - 70 | 3.0 - 6.0 | 15.0 – 47.0 |
| | Couton | 287 - 97 | 5.5 - 12.6 | 2.0 - 10.0 |
| Tige/herbe | Paille | ND | ND | ND |
| | Bambou | ND | ND | ND |
| | Canne à sucre | 20 - 90 | 2.7 -17.0 | 0.9 |
| Bois | Bois feuillus | 7-500 | ND | ND |

**ND : Non Disponible.**

### 1.6.5. Domaine d'utilisation des fibres cellulosiques :

Historiquement, les fibres végétales ont trouvé une utilisation dans une large gamme de produits. Y compris les textiles, les fils liés et articles tissés, les cordes et les ficelles, les farces et autres matériaux de rembourrage, le papier et les pinceaux.

Le bois est la source primaire de la pulpe pour la production du papier, papier cartonné, carton et les produits connexes **[33].**

### Les fibres cellulosiques peuvent être utilisé dans :

### A- L'industrie de pate et papier :

Le papier a une longue histoire d'utilisation, avec son invention créditée à Tsai Lun, en Chine, en 105. Depuis ce temps, il a été produit à partir d'une grande variété de matières premières, y compris le coton, le lin, l'écorce, le chanvre, le jute, la paille et le bois.

Le papier est une feuille constituée d'un réseau de fibres cellulosiques naturelles. Le produit obtenu est un réseau de fibres enchevêtrées avec une structure en couches sur approximativement 30-300 μm d'épaisseur. La largeur d'une fibre individuelle est dans la gamme de 10 à 50 μm **[34].**

### A.1. Fabrication du papier :

La fabrication des pates et papiers procède par transformation de fibres de cellulose, principalement issues du bois, en papier d'impression-écriture, papier journal, papier magazine, papier d'emballage, carton, papiers à usage sanitaires et domestique, et divers papiers industriels et spéciaux. La fabrication du papier comprend cinq grandes étapes **[35]** :

(i) la préparation du bois.

**(ii)** la mise en pate.

**(iii)** le blanchiment.

**(iv)** la régénération des produits chimiques.

**(v)** la fabrication du papier.

A titre d'illustration on donne ci-dessous **(Tableau 1.4)** la composition en constituants les plus importants, des bois résineux et feuillus **[35]** entrant dans la fabrication du papier.

**Tableau 1.4 :** Proportion des constituent chimiques des bois résineux et feuillus **[36]**

| Constituants principales | Résineux | Feuillus |
|---|---|---|
| | Pourcentage (en masse) | |
| **Cellulose** | 40 - 45 | 45 - 50 |
| **Hemicellulose** | | |
| Galactoglacomannan | 15 – 20 | - |
| Arabinoglucuronoxylan | 10 | - |
| Glucuronoxylan | - | 20 – 30 |
| glucomannan | - | 1 – 5 |
| **Lignine** | 26 – 34 | 22 - 30 |
| **Extractives** | 0 - 5 | 0 - 10 |

## A.2. Préparation des fibres naturelles (cellulosiques) pour la fabrication de papier :

Le matériau de base pour la fabrication de papier et du carton est constitué des fibres de cellulose du bois ou de certaines plantes annuelle. En effet l'objectif principale de ce processus industriel est de séparer la cellulose des autres constituants de la paroi pecto-cellulosique **[37].**

Pour extraire la cellulose du bois, notamment la lignine, plusieurs procédés on été mis au point. En effet, la lignine a la particularité de se ramollir sous l'effet de la chaleur, mais aussi de se dissoudre sous l'effet de certains produits chimiques.

Il est donc possible d'isoler les fibres de cellulose, soit par de moyen mécaniques, soit par des moyens chimiques **[38]**. Selon l'emploi de l'un ou de l'autre procédé, il est possible de distinguer deux grandes catégories de pate à papier **[38 - 39].**

- ✓ La pate mécanique.
- ✓ La pate chimique.

### A.2.1. La pate mécanique :

On obtient de la pâte mécanique en râpant le bois contre une pierre ou entre des plaques métalliques affin de séparer les fibres. Ce travail de cisaillement brise les fibres de cellulose, de sorte que la pâte qui en résulte est plus fragile que celle fabriquée par séparation chimique, la lignine qui fait le lien entre la cellulose et l'hémicellulose n'est pas dissoute : elle se ramollit simplement, ce qui permet d'extraire les fibres de la matrice de bois. Le rendement (proportion de bois contenue dans la pate) dépasse généralement 85%. **[40]**.

La pate mécanique fournit un papier fragile dont se plaignent d'ailleurs les imprimeurs de journaux. Elle est donc utilisable principalement pour la fabrication des papiers de consommation courante et surtout du papier journal **[41]**, (**Tableau 1.5).**

**Tableau 1.5** : Production de pate : rendement ou qualité **[44]**

| Qualité | Constituants retenus | | | Rendement -matière |
|---|---|---|---|---|
| | cellulose | hémicellulose | lignine | |
| **Pate chimique** | | | | |
| • À faible rendement (essentiellement de résineux) | Totalité | Peu | Pas | 45 - 55% |
| • À haut rendement (de feuillus ou de résineux), dite encore mi-chimique | Totalité | Une partie | Une partie | 55 – 70% |
| **Pate mécano-chimique de feuillus** | Totalité | Totalité sauf celles dissoutes | totalité | 85 - 95 % |
| **Pate mécanique** | Totalité | Totalité | Totalité | Supérieur à 95% |

### A.2.2. La pate chimique :

Pate de bois obtenus en soumettant du bois de trituration, des plaquettes et particules de bois ou des résidus de bois à une série de traitement chimique cette rubrique comprend :
Pate de bois au sulfate (Kraft), à la soude et au bisulfate. Elles peuvent être blanchies, mi-blanchies ou écrues **[42].**

Les pates chimiques sont des pates contenant un pourcentage élevé de cellulose pure. Pour éliminer la matière non fibreuse, on soumet les matières premières, réduites en coupeaux s'il s'agit de bois, à l'action dissolvante de produits chimiques. On obtient une pate de cellulose, de pureté variable avec les degrés d'attaque chimique. Le rendement de ces pates peut descendre de 40 à 45% du poids de matière première **[43].**

## B. Les matériaux composites :

Les Matériaux à base de ciment sous forme de mortiers ou de bétons (matériaux composites) sont intéressants pour les utiliser comme matériaux de construction, car ils ne sont pas chers, durable, ont une résistance à la compression et une rigidité adéquate pour des applications structurelles. Cependant, leurs déficiences se trouvent dans leurs caractéristiques fragiles-faible force de traction et d'impact.

Le renfort par des fibres peut offrir une méthode commode, pratique et économique de surmonter ces insuffisances. L'inclusion de fibres de renforcement dans le béton, le mortier et la pâte de ciment peut améliorer beaucoup de propriétés mécaniques telles que la résistance à la flexion, la ténacité, la résistance à la fatigue, le choc thermique ou la délitescence etc. **[45].**

Comme les fibres de verre ou les fibres de carbone, les fibres de cellulose sont souvent utilisées dans les matériaux d'isolation, en tant que fibres vierges ou recyclées. Ils sont également utilisés comme renfort dans des panneaux de construction à base de ciment **[46].**

**Tableau 1.6:** Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales utilisées comme renforts de matériaux composites **[17]**

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| Faible coût | Absorption d'eau |
| Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité) | Faible stabilité dimensionnelle |
| Non abrasif pour les outillages | Faible tenue thermique (200 à 230 °C max) |
| Neutre pour l'émission de $CO_2$ | Fibres anisotropes |
| Demande peu d'énergie pour être produite | Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo… |
| Pas de résidus après incinération | Pour des applications industrielles demande la gestion d'un stock |
| Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres | Renfort discontinu |
| Bonne isolation thermique et acoustique | |
| Ressource renouvelable | |

## 1.7. Recyclage

Le recyclage comprend la récupération, le tri et la valorisation des déchets constitués par les produits en fin de vie. On s'efforcera si possible de réutiliser le matériau qui les constitue chaque fois que son recyclage ne s'accompagnera pas d'une trop grande dégradation des propriétés d'usage. Indépendamment de sa facilité technologique, le recyclage est évidemment d'autant plus rentable que le matériau concerné a un coût énergétique d'élaboration élevé et un prix spécifique important. **[47].**

### 1.7.1. Le papier recyclé :

La production de pates et papiers participe à l'augmentation de déforestation, de la contamination de l'eau, de la pollution atmosphérique et des émissions de gaz à effet de serre **[48].** .Avec l'augmentation de la protection des ressources forestières et l'environnement écologique, la fabrication du papier à partir de déchets de papier devient une tendance de développement importante dans le monde. Les déchets de papier, en tant que matière premières de fabrication du papier ou de composite, est une importante ressource renouvelable, qui non seulement peut

remédier à la pénurie de matières premières et de réduire la consommation d'énergie, mais aussi de réduire la pollution grave de l'environnement **[49].**

### 1.7.2. Les fibres cellulosiques de récupérations :

Les vieux papiers et carton récupérés sous l'appellation fibre cellulosique de récupération sont principalement destinés aux industries papetières et cartonnières qui les réutilisent en remplacement des matières premières (bois). Le taux d'utilisation des fibres cellulosiques de récupération a considérablement augmenté en France par exemple au cours des derniers dix années pour dépasser les 50% **[50]**

### 1.7.3. Avantages attendus de recyclage.

- Obtenir un matériau moins coûteux que la matière première naturelle et qui en a les mêmes propriétés.
- L'avantage principal du recyclage du papier-carton est l'économie de la matière première : 1 tonne de papier-carton permet d'obtenir à quelques kilogrammes près la même quantité de pâte à papier, alors que 3 tonnes de bois seraient nécessaires pour obtenir le même résultat.
- L'autre avantage est représenté par l'économie réalisée sur les moyens de traitement : les opérations de coupe, de broyage, de cuisson, de défibrage, de lavage et de raffinage, indispensables dans le cas du bois ne sont pas nécessaires dans le cas du recyclage **[51].**
- Le recyclage du papier est un moyen de réduire la quantité de déchets dans les décharges.
- Le papier recyclé permet également d'économiser l'énergie et l'eau parce que la plupart de l'énergie et de l'eau dans la fabrication du papier est utilisé pour changer le bois en pâte.
- Le papier peut être recyclé uniquement de 4 à 6 fois c'est parce que à chaque recyclage, la pâte doit être mélangée avec des fibres recyclées pour maintenir la force et la qualité du papier **[52].**
- Le papier recyclé pollue au total quatre à cinq fois moins que le papier blanc vierge.
- Le papier recyclé présente la même qualité, mais coute 10 à 15% de moins que le papier blanc fait de fibres vierges **[53]**.

## 1.8. Matériaux composites renforcé de fibres végétales :

Les fibres végétales (jute, noix de coco, rami, sisal, canne à sucre,…etc.) sont utilisées depuis très longtemps, soit seules, par exemple pour la réalisation des textiles ou cordages, soit

associées avec un autre matériau. Les performances du composite tirent ainsi profit des avantages de la fibre et de la matrice.

L'association à une matrice minérale de fibres végétales a fait l'objet de nombreuses études en vue d'inciter à utiliser des matériaux locaux pour les constructions dans les pays en voie de développement **[54]**.

## 1.9. Méthode technologique de Mise en œuvre du composite à fibres dispersés.

Dans la production de béton renforcé avec des fibres, non seulement le choix et la combinaison rationnelle des matières premières est importantes, mais aussi leur technologie de fabrication. Les propriétés des composites résultantes, dépendent largement de la solution aux problèmes relatifs à la répartition uniforme des fibres dans le béton, leur orientation et leur ancrage, car ces aspects déterminent largement la capacité du composite pour résister à l'influence extérieure.

En dépit de la similitude de plusieurs aspects de la technologie de production des bétons avec renfort dispersés, il existe de nombreuses ramifications technologiques qui sont encore en cours de développement aujourd'hui **[55]**.

La méthode de mise en œuvre du composite doit permettre d'obtenir une dispersion homogène des fibres dans la matrice, éviter la formation de boules de fibres et assurer une adhérence optimale entre les fibres et la matrice. Parmi les méthodes de malaxage on cite :

- Méthode de pré mélange partielles : cette méthode a été utilisé pour empêcher l'agglomération des fibres. Pour la matrice de mortier, les composants secs sont d'abord mélangés avec environ 25% de l'eau avant d'ajouter les fibres. puis environ 50% de l'eau a été ajouté par intermittence pendant l'addition des fibres dans le mélange. Suite à une bonne dispersion des fibres, le reste de l'eau a été ajoutée. la même technique a été utilisée pour le mélange de béton, mais dans la première étape, une seul part des granulats grossiers (environ 25%) a été mélangé avec les autres composants secs, le reste des granulats grossiers a été ajouté pendant la dernière étape avec le reste de l'eau après une bonne dispersion des fibres dans le mélange **[56]**.

- une méthode par voie humide, qui se rapproche d'un malaxage conventionnel, avec mélange dans un premier temps du ciment, de l'eau et des adjuvants, puis ajout des granulats et enfin des fibres. Certains auteurs usent cependant de séquences de malaxage différentes : Kriker *et al.* **[57]** proposant par exemple de pré humidifier les fibres avec 10% de la quantité d'eau de gâchage totale, avant de les mélanger avec les granulats et 30% de l'eau, puis d'ajouter en fin de malaxage le ciment et le reste d'eau. La mise en place s'effectue par des moyens conventionnels comme la vibration interne ou externe.

- une troisième méthode qui consiste à mélanger les fibres préalablement saturées en eau avec le ciment et les granulats ainsi qu'une très faible quantité d'eau. La mise en forme de ce mélange très sec est alors obtenue par compactage. Cette méthode permet d'incorporer une quantité très importante de fibres (10 fois plus que pour le malaxage humide) mais elle nécessite un dispositif de compactage et est donc réservée à des applications industrielles ou semi industrielles. **[58].**

## 1.10. Propriétés des composites renforcés par des fibres végétales :

### 1.10.1. Propriété à l'état frais

- **Ouvrabilité, porosité et absorption**

Les tentatives d'utilisation de fibres organiques d'origine végétale ou animale comme matériaux de renforcement ont été connus depuis les temps anciens. Les fibres de Jute, sisal, noix de coco, cellulose et d'autres matières fibreuses ont été employées. Toutefois, les fibres de ce type ont une haute capacité d'absorption d'eau ce qui nécessitera une augmentation significative du rapport eau sur ciment pour assurer la maniabilité nécessaire du mélange de béton et/ ou mortier, ce qui entraîne à son tour une réduction perceptible de résistance du composite. La durabilité des composites renforcés avec telles fibres est également source de préoccupation. **[59]**

L'ajout de fibres végétales à une matrice minérale conduit à une diminution de sa maniabilité, compensable par un ajustement du rapport E/C ou l'usage de superplastifiant [**55**], cette perte d'ouvrabilité est d'autant plus importante que la relation d'aspect (rapport de la longueur sur le diamètre des fibres) et le dosage en fibres sont importants [**60**]. **(Fig.1.11)**

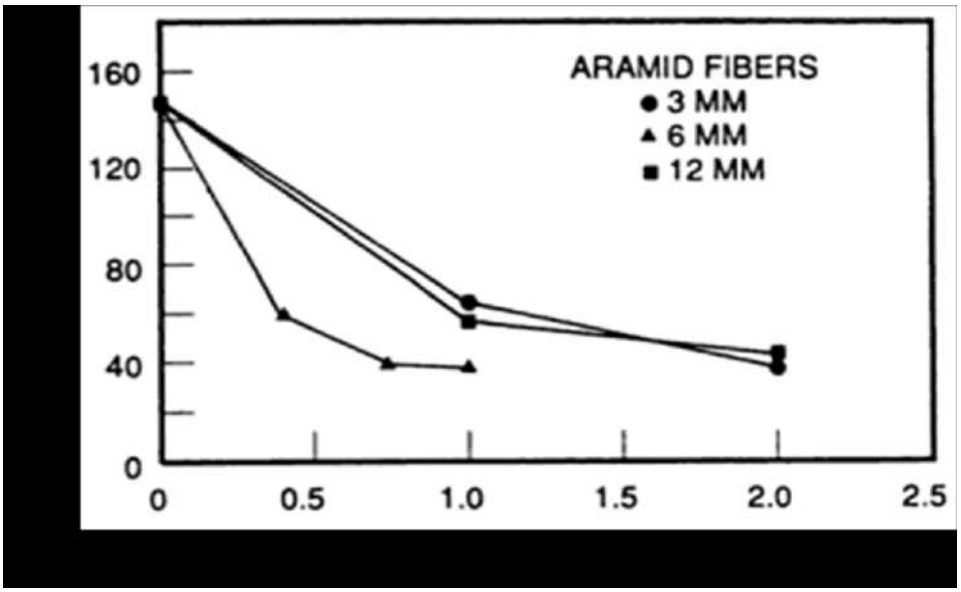



**Fig.1.10.** Effet de pourcentage de fibres sur l'ouvrabilité des composites renforcé par les fibres d'Aramide **[61]**.

La présence de fibres au moment du malaxage induit également une augmentation de la quantité d'air entraîné. [**62].**

## 1.10.2. Propriétés à l'état durci :

### 1.10.2.1. Propriété physique :

**a-1. Retrait et gonflement**

Le retrait plastique correspond à la variation dimensionnelle qui intervient dans tous les matériaux à base de ciment à l'état frais, pendant les premières heures qui suivent la mise en place. Dans le cas où le retrait est empêché, le phénomène conduit au développement de contraintes dans le ciment et à la création de fissures. Cette fissuration précoce peut conduire à terme à la dégradation des ouvrages notamment lorsqu'ils sont exposés à des cycles d'humidification-séchage ou de gel-dégel.

Afin d'identifier l'influence des fibres végétales sur ce phénomène, Toledo Filho ***et al*** [**63]** ont réalisé des mesures de retrait libre et empêché. Ils ont concluent que l'incorporation de fibres de sisal limite le retrait plastique libre et ce d'autant plus que le dosage en fibres est important. L'addition de 0.2% de fibres en volume réduit le retrait libre de 23 à 34%.

Concernant le retrait empêché, l'incorporation de fibres de sisal et de coco permet de retarder l'apparition de la première fissure, le délai passant de 90 minutes pour la matrice pure à 180 minutes pour la matrice renforcée. Elle permet également de contrôler l'ouverture de la fissure par la suite. Ce phénomène est attribué par l'auteur au module d'élasticité plus élevé des fibres ainsi qu'à l'effet de couture des fissures par les fibres qui empêchent leurs ouvertures au jeune âge.

Enfin, l'étude de Toledo Filho ***et al*** [**63] a** démontré que les fibres végétales facilitent l'autodicicatrisation des fissures. En effet, les fibres sont des éléments poreux à fort pouvoir absorbant qui lient les deux surfaces de la fissure, facilitant ainsi le dépôt de nouveaux produits d'hydratation qui conduisent à la fermeture de la fissure.

### a-2. Guérison autogène des fissures :

Les fissures peuvent se produire pendant n'importe quelle étape de la vie d'une structure en béton. Elles peuvent être dues au matériau béton lui-même comme dans le cas du retrait empêché, ou à cause de facteurs externes tels qu'un chargement excessif, une dure exposition environnementale, pauvres procédures de construction, ou erreur de conception **[64].**

Des études expérimentales et des expériences pratiques ont démontré que les fissures dans les matériaux cimentaires ont la capacité de se sceller. Par exemple l'eau qui coule à travers le béton fissuré se ralentit au cours du temps. Dans les cas extrêmes, ces fissures peuvent être scellées complètement. Ce phénomène est connu sous le nom « **auto- guérison** » ou « **guérison autogène** » des fissures. Parmi les mécanismes responsables de ce phénomène on site :

- L'hydratation continue du ciment.
- L'expansion du béton dans les flancs des fissures (gonflement des C-S-H).
- cristallisation (carbonate de calcium). dans la fissure qui est considéré comme le principal mécanisme d'auto-guérison de béton mature
- La fermeture des fissures par la matière solide (impuretés) dans l'eau et la fermeture des fissures par les particules lâches du béton résultant de l'éclatement fissure.

Les résultats obtenus par Yingzi Yang ***et al*** **[64]** sur des éprouvettes pré-endommagées basée sur le test non destructive de la fréquence de résonance ainsi que les résultats des tests de rigidité et qui à utilisé deux différents régimes de cycle séchage-mouillage (régime CR1 et CR2) sur des échantillons préalablement préchargés à différents niveaux de contraintes de traction

uniaxiale prédéterminées de 0,3% à 3%, à l'âge de 6 mois, montre que la qualité de l'auto-guérison avec CR2 à plus haute température apparaît plus faible que celui des CR1.

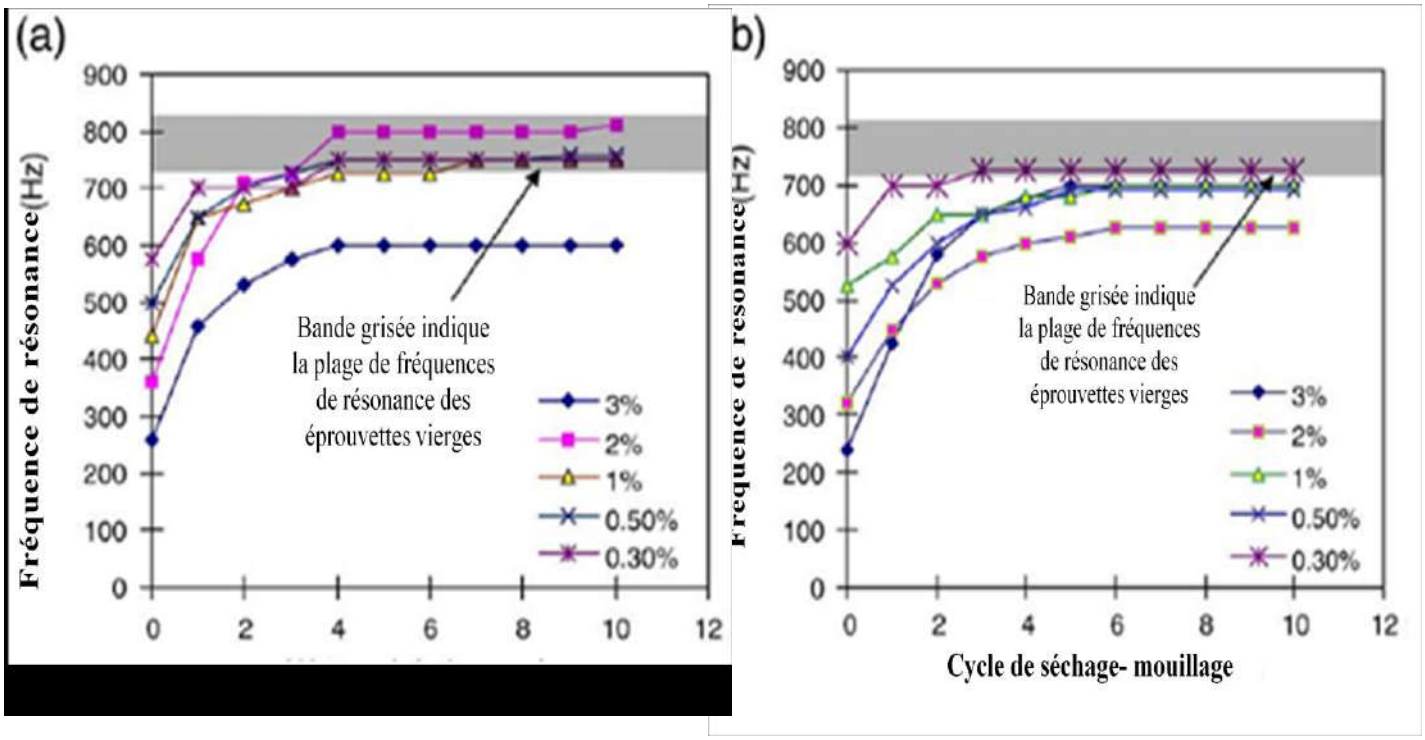



**Fig.1.11 :** Taux d'auto-guérison d'un composites cimentaires sous cycle humidification/séchage.
(a) la récupération de fréquence de résonance en CR1 (cycle eau / air. (b) la récupération de fréquence de résonance dans CR2 (cycle eau / air chaud).

D'après les figures (a) et (b) on remarque que plus on augmente le nombre de cycle de séchage mouillage plus la fréquence de résonance augmente pour atteindre une valeur stable après 4 cycles. Plus que le matériau est poreux et fissuré, la vitesse de propagation dans les bétons diminue. Ceci est lié au fait que la densité globale et la rigidité du milieu diminue avec l'augmentation de la porosité et de la fissuration. Ainsi quatre à cinq cycles de mouillage-séchage est nécessaire pour atteindre le plein avantage de l'auto-guérison.

### a-3. Limitation des fissures

Comme dans les bétons conventionnels, les fibres agissent en limitant la propagation et l'ouverture des fissures qui conduisent finalement à la rupture. Les principales propriétés obtenues par incorporation de fibres végétales sont donc l'augmentation des résistances en traction, en

flexion et au choc, la limitation de la fissuration au jeune âge par diminution du retrait plastique et l'amélioration de la ductilité.

### a-4. Formation différé de l'éttringite (DEF) :

La formation différée de l'ettringite est une réaction endogène qui peut parfois être à l'origine de la dégradation d'ouvrages en béton. A l'heure actuelle nous ne disposons d'aucun outil prédictif sélectif vis-à-vis de cette pathologie. **[65].**

### a-5. Principaux facteurs influençant la DEF

Plusieurs facteurs contribuent à initier et à développer la formation d'ettringite dans le béton ou le mortier. Le rôle précis et le degré d'influence de ces derniers sont souvent mal connus. La plupart du temps, la réaction résulte d'une combinaison de ces facteurs. D'après l'ensemble de la communauté scientifique, on note que les facteurs importants dans la formation tardive de l'ettringite sont :

- la température de cure et sa durée de maintien,
- Les cycles de séchage et d'humidification
- l'exposition à l'eau,
- les caractéristiques du ciment,
- les caractéristiques des granulats,
- les vides dans le béton (porosité, perméabilité et rapport E/C),
- une microfissuration préexistante.

### 1.10.2.2. Propriétés mécaniques :

#### a-1. Résistance des composites à fibres végétale (traction et compression) :

Des études récentes ont suggéré que les fibres dérivées de sources de recyclage peuvent être efficacement utilisés comme renfort dans des matrices de ciment. À l'état sec elles sont sous forme de ruban plat (**Fig.1.13)**, quand elles sont exposées à l'humidité, comme par exemple lorsqu'elles sont placées dans la pate de ciment humide elles gonflent et ressemblent à des tubes creux. (**Fig1.14**), (**[66]** cité dans **[67]).**

Les fibres de cellulose ont été trouvées d'être efficace dans l'amélioration de la résistance à la flexion des matrices cimentaires et dans l'amélioration de la ténacité.

Les mécanismes possibles par lesquels les fibres contribuent à la performance mécanique du composite sont les suivantes:

1- La fracture de la fibre sans faillir la liaison interfaciale, ce qui contribue peu à la ténacité du composite, mais il peut augmenter la force à partir de la résistance à la traction des fibres du bois qui est égale à 900 MPa, beaucoup plus élevé que la résistance à la traction du ciment qui est égale à 3,7 MPa.

2- L'énergie peut être consommée pendant l'arrachement des fibres (**fibres pull out**) de la matrice contribuant à la ténacité et la capacité de déformation du composite.

3- Seulement une partie de la fibre peut être séparé de la matrice. Les chemins des fissures peuvent être disloqué par conséquent, stopper la propagation des fissures

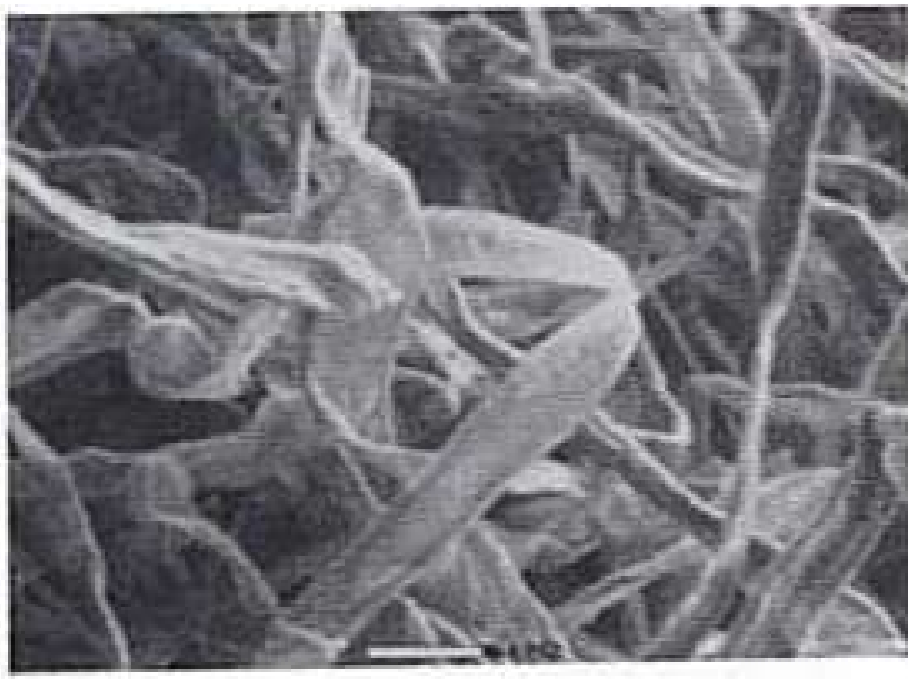


**Fig.1.12**. Micrographe électronique à balayage des fibres résineux vierges. À l'état sec, les fibres sont en forme de ruban plat. **[66]**




**Fig1.13.** Microscope électronique à balayage de fibres de cellulose noyées dans une matrice de ciment. Les fibres par rapport aux rubans représenté sur la F**ig.1.13**, montrent clairement leur forme creuse **[66].**

## a-2. Influence du mode de cure, du dosage et de la longueur des fibres sur la matrice cimentaire

L'incorporation de fibres permet d'obtenir un matériau ductile, à la résistance en flexion et surtout à la ténacité nettement plus élevées que la matrice non renforcée. En incorporant 12% en masse de fibres de sisal à une matrice fragile, Savastano *et al* [**68]** obtiennent une résistance en flexion et une ténacité respectivement 5 et 43 fois plus élevées que celles de la matrice seule.

La (**Fig.1.15)**, présente par exemple les résultats de résistance en flexion et de ténacité obtenus avec des pâtes ou des mortiers de ciment renforcés par une pâte kraft de fibres de bois a différents modes de cures.

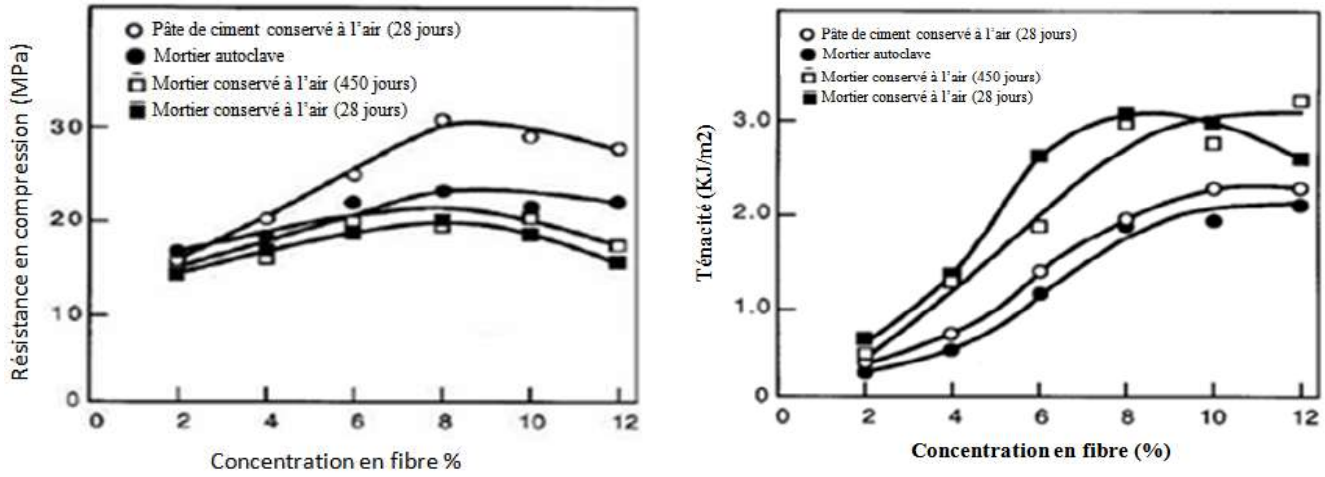



**Fig. 1.14.** Résistance en flexion et ténacité de pâte et de mortier de ciment renforcés par la pâte kraft **[ACI96]**

Les performances du composite dépendent aussi du dosage et de la longueur des fibres. Mansur ***et al*** [**65],** ont étudié le renforcement de mortiers de ciment par des fibres de jute **(Fig.1.16).**

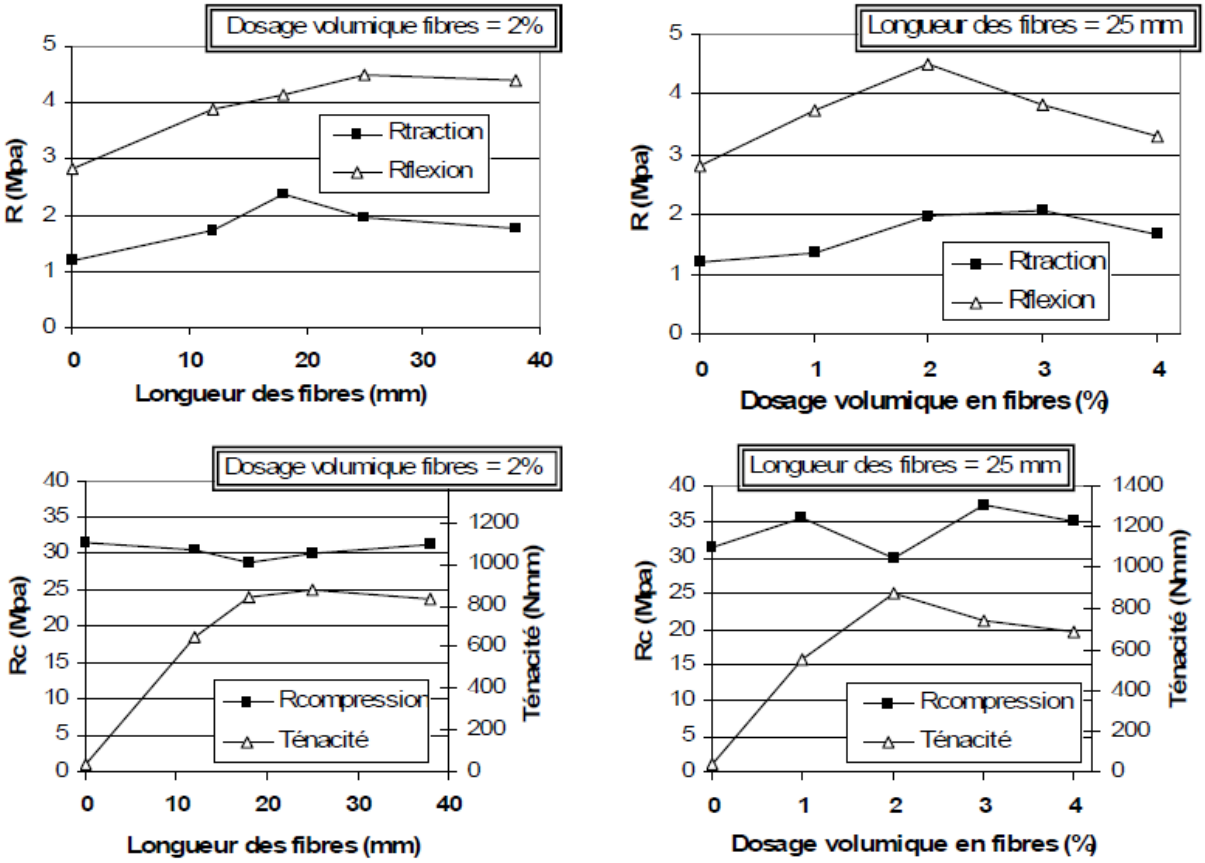



**Fig. 1.15 :** Influence du dosage et de la longueur des fibres de jute sur les propriétés du composite **[69].**

Les résultats de la (**Fig.1.16)** montrent que l'incorporation de fibres végétales permet d'améliorer les résistances en traction et en flexion ainsi que la ténacité du composite sans modifier fortement la résistance en compression.

Ces résultats différent de ceux de A.J .Morano *et al* ([**70]** cité dans **[71])** qui a utilisé des fibres de Fique (fibres naturelle extraite d'une plante appelée « Fique ») de pourcentages et de longueurs différents (0%,2% et 4% en poids du ciment), leurs résultats montre que l'ajout de fibres influent les propriétés mécaniques, elles diminuent la résistance en flexion et compression. Tandis que lorsque la longueur de la fibre est augmentée en utilisant les mêmes pourcentages, les résistances sont améliorées, (**Tableau.1.7**).

**Tableau.1.7.** Conception du mortier et propriétés mécanique **[70]**

| Conception | Fibre | | Résistance en flexion (MPa) | | Résistance en compression (MPa) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | (%) en Poids | Longueur (cm) | 7 jours | 28 jours | 7 jours | 28 jours |
| Patte | 0,0 | - | 8,8 | 13,30 | 45,84 | 53,70 |
| 1 | 2,0 | 1,0 | 6,14 | 9,15 | 28,74 | 32,97 |
| 2 | 4,0 | 1,0 | 3,04 | 5,74 | 13,57 | 17,11 |
| 3 | 6,0 | 1,0 | 1,99 | 4,69 | 6,44 | 13,83 |
| 4 | 2,0 | 3,0 | 5,62 | 10,11 | 33,33 | 36,14 |
| 5 | 4,0 | 3,0 | 5,19 | 6,42 | 22,76 | 21,32 |

Lorsque le contenu en fibre et la longueur est augmentée, L'indice de ténacité est augmenté. Cela pourrait être justifié par l'augmentation de la friction mécanique entre les fibres et la matrice de ciment.

Concernant la ténacité, (**Tableau.1.8**) l'addition des fibres plus longue permet une amélioration de cette propriété à cause des fibres qui rend plus difficile la propagation de la fissure. Cependant les fibres sont seulement fixées mécaniquement et sont retirées sans aucune fracture. Alors il n'ya pas une bonne liaison chimiques entre les fibres et la matrice. Cela diminue l'efficacité de la fibre sur le composite du ciment.

**Tableau.1.8.** : Indice de dureté

| Conception | Fibre | | Indice de dureté | |
|---|---|---|---|---|
| | (%) en Poids | Longueur (cm) | 7 jours | 28 jours |
| Patte | 0,0 | - | 2.52 | 2.02 |
| 1 | 2,0 | 1,0 | 14.03 | 7.04 |
| 2 | 4,0 | 1,0 | 25.84 | 22.2 |
| 3 | 6,0 | 1,0 | 39.47 | 18.64 |
| 4 | 2,0 | 3,0 | 13.43 | 11.04 |
| 5 | 4,0 | 3,0 | 27.96 | 26.37 |

Concernant la résistance en compression, ces résultats diffèrent de ceux de Kriker ***et al.*** **[57],** dont l'étude met en évidence une diminution de la résistance en compression avec l'augmentation du dosage en fibres et de la longueur des fibres. La résistance d'un béton renforcé par 2% en volume de fibres de palmier dattier de longueur 15 mm représente 90% de celle du béton non renforcé alors que celle d'un béton renforcé par 3% de fibres de 60 mm de longueur ne représente plus qu'environ 55% de celle du béton seul. L'auteur attribue cette diminution à l'augmentation du nombre de défauts et à la non-uniformité de la répartition des fibres.

### a-3. Influence de l'orientation des fibres dans la matrice minérale :

En renforçant les matériaux cimentaires avec des papiers composées de fibres de cellulose alignée, des avantages supplémentaires peuvent être eu en termes d'adaptation de la conception du composite pour le comportement mécanique souhaité. Autrement dit, la fonctionnalité de renforcement peut être adaptée pour obtenir des caractéristiques de performance spécifiques dans les matériaux structurelles et non structurelles à base de ciment.

Par exemple, en alignant les fibres de pulpe, la force et la rigidité en fibre-ciment peut être améliorée directionnellement. Dans les composites à fibres discontinues aligné unidirectionnel la résistance du composite et la rigidité est généralement plus importante dans le sens des fibres, et beaucoup moins dans la direction transversale à la fibre. D'autre part, l'orientation de façon aléatoire des fibres présentent trois dimensions isotropique. En d'autres termes, la résistance et la rigidité de ce type de composite ne peut être modifiée qu'au changement de la fraction volumique de fibres et des proportions, étant donné la même fibre et la même matrice.

La proportion des fibres joue un rôle important dans les performances du composites de fibres distribuées au hasard, mais a également été montré pour avoir un effet négligeable sur la force et la rigidité des composites. D'après la (**Fig.1.17),** les résultats obtenus par B.J. Mohr et al **[72],** ont montré que la flexion des composites renforcés de fibres alignées possèdent une résistance nettement supérieure par rapport aux composites à fibres distribuées de façon aléatoire pour des quantités équivalentes.

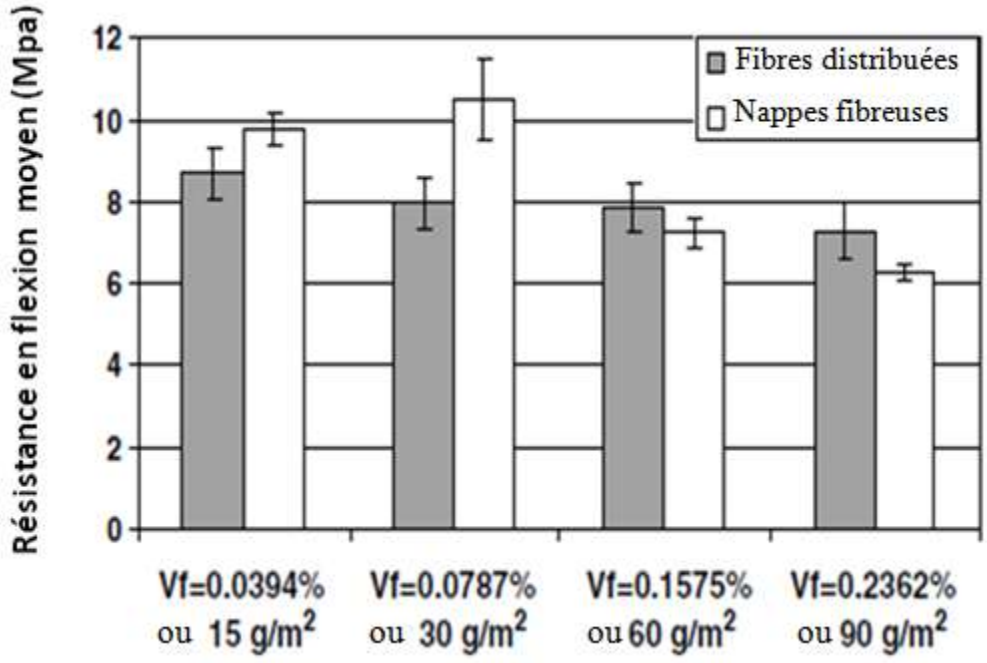



**Fig.1.16** : Effet des fibres alignées sur la résistance en flexion à 28 jours **[72].**

### 1.10.2.3. Durabilité des composites de fibres végétales

Les pâtes de ciment et des mortiers peuvent être renforcés avec des fibres végétales pour la fabrication des éléments de construction à paroi mince avec des formes variables. Toutefois, les matériaux composites en fibres végétales subissent un processus de vieillissement dans des environnements humides dans lesquels ils peuvent souffrir d'une diminution de la résistance et la ténacité.

Ce problème de durabilité est associée à une augmentation de la fracture de la fibre et diminution dans l'arrachement de fibre (fibre pull-out) en raison d'une combinaison d'affaiblissement des fibres par attaque alcaline, la minéralisation des fibres due à la migration des produits d'hydratation de lumens et d'espaces et de la variation de volume dans ces fibres en raison de leur forte absorption d'eau ce qui est nécessaire de comprendre le comportement à long terme des composites en ciment renforcés de fibres de cellulose due à l'alternance des cycles mouillage /séchage des changements climatiques qui se produisent dans des conditions naturelles. **[73]**.

La durabilité des composites renforcés de fibres de cellulose a été jugée directement liés aux : types de fibres, la teneur en fibres, les types de matrice, et les méthodes de vieillissement.

Les résultats expérimentaux obtenus par R. MacVicar et all **[73]** ont montré que la résistance en compression des composites soumis à des cycles de vieillissement naturel et accéléré (l'environnement de CO2) étaient liés à des microstructures dans les matériaux composites. Les deux types de vieillissement dans l'environnement CO2 réduit la porosité, l'absorption d'eau, et la perméabilité de l'azote dans la matrice cimentaire, et améliore la durabilité des composites cimentaire renforcés par les fibres cellulosique **[74].**

La diminution de la porosité des composites de ciment renforcés des fibres cellulosiques a été attribué soit à la densification de la matrice de ciment résultant de retrait provoquée par la carbonatation et / ou la densification due à la poursuite du processus d'hydratation dans la matrice.

Les composites renforcés de fibres contenant de grandes quantités de lignine sont plus sensibles à l'altération naturelle que ceux avec des quantités négligeables de la lignine. C'est parce que la lignine et les hémicelluloses existant dans la lamelle moyenne de la fibre sont plus sensibles aux attaques alcalins et la dégradation chimique dans le ciment alcalin que la cellulose.

Narayanan Neithalath **[75]** , a étudié la durabilité des fibres de cellulose par l'emploi de plusieurs approches pour améliorer les performances de durabilité des mortier composites renforcés de fibres végétales incorporant le sisal et les fibres de noix de coco, Il s'agit notamment de :

- La carbonatation de la matrice dans un environnement riche en CO2.
- L'immersion des fibres dans une suspension de fumées de silice avant leur incorporation dans la matrice en ciment Portland ordinaire (OPC).
- Remplacement partiel de la matrice en ciment Portland ordinaire par les fumées de silice non densifiée ou le laitier de haut fourneau.
- une combinaison d'immersion de fibres dans une suspension de fumées de silice et le ciment remplacé.
-

La durabilité des mortiers composites renforcés de fibres végétales modifiée a été étudiée en déterminant :

- Les effets du vieillissement dans l'eau,
- Exposition aux cycles d'humidification-séchage
- En plein air.

Sur les microstructures et le comportement en flexion des composites.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'immersion des fibres naturelles dans une bouillie de fumées de silice, avant leur ajout au composite à base de ciment a été trouvé un moyen efficace de réduire la fragilisation du composite dans les environnements étudiés. Le début de cure des composites dans un environnement riche en CO2 et le remplacement partiel de ciment Portland ordinaire par les fumées de silice non densifiée ont été également des approches efficaces dans l'obtention d'un composite de durabilité améliorée. L'utilisation de scories en remplacement partielle du ciment n'avait pas d'effet sur la réduction de la fragilisation du composite.

### 1.10.2.4. Évolution des propriétés des composites de fibres végétales au cours de temps :

L'ensemble des travaux réalisés font état d'une chute de la ductilité des matériaux fibrés par des fibres végétales au cours du temps. Ce résultat est de même obtenu par Mohr *et al.* [**76],** sur des composites de ciment renforcés par de la pâte kraft de conifères. Les éprouvettes soumises à des cycles de saturation en eau/séchage présentent une perte de la résistance maximale de 50.8 à 72.4% et une chute de la ténacité de 97.5 à 98.8%. La (**Fig 1.18**) présente l'évolution typique du comportement en flexion d'échantillons soumis à 0, 5, 10 et 25 cycles de vieillissement.

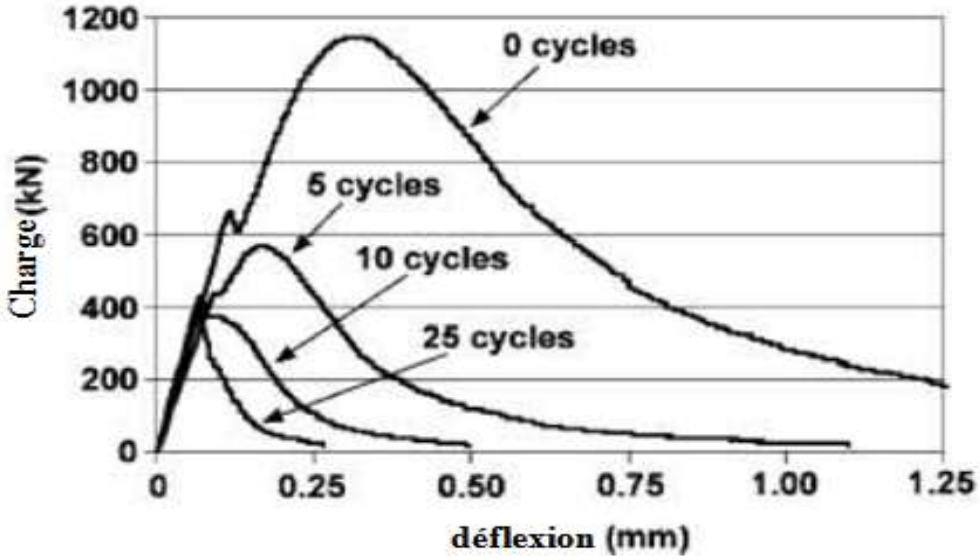



**Fig.1.17 :** Effet des cycles de vieillissement sur le comportement mécanique en flexion. [**76].**

D'après la (**Fig.1.18),** L'aire sous la courbe typique (charge-déformation) représente l'énergie absorbée par l'éprouvette lors de sa flexion **[76].** La capacité d'absorption de l'énergie du

composite diminue avec l'augmentation de nombre de cycle. Il convient de noter que la valeur maximale de résistance à la flexion obtenue dans la figure .1.18 et à 0 cycles.

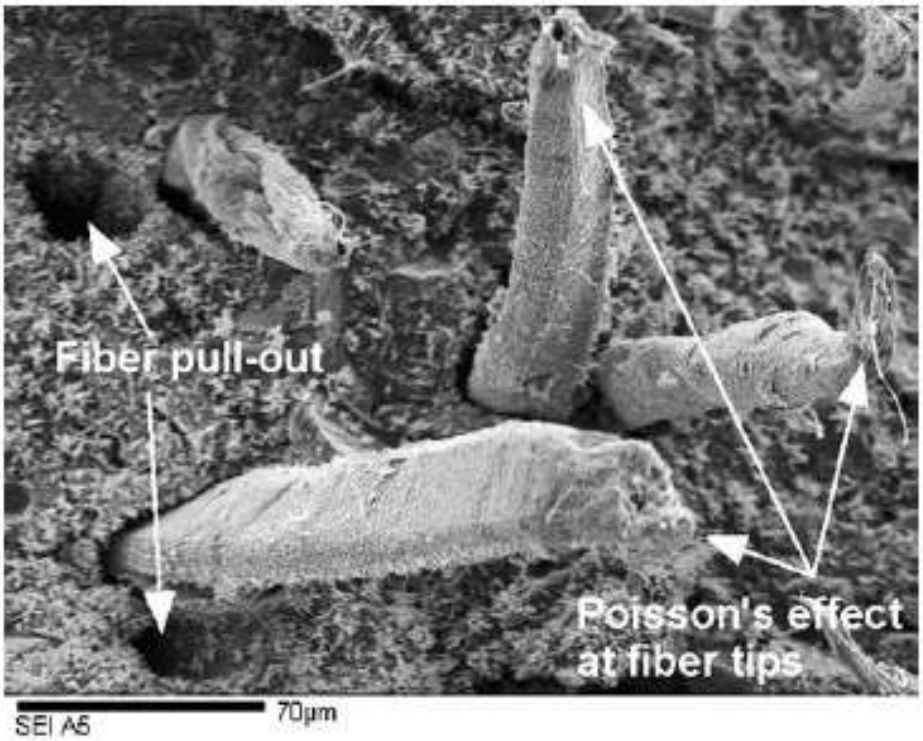



**Fig.1.18.** Ductilité de fibre après 5 cycles mouillage séchage (450 x). **[76]**

Même si la majorité des pertes de résistance et de la ténacité ont été mesurées après 5 cycles mouillage-séchage, l'examen micrographique MEB, comme le montre la (**Fig.1.19),** des surfaces de rupture montre un peu de « striction » ou un effet de Poisson de la fibre à proximité de la région de défaillance de la fibre. Cette fonctionnalité qui est observée pour de nombreuses fibres arrachées après 5 cycles de mouillage-séchage, suggère que le comportement défaillant des fibres reste ductile.

Une explication possible consiste en une série progressive de mécanismes:

1- décollement initiale de fibre-ciment (en raison du rétrécissement des fibres pendant le séchage).

2- Reprécipitation des produits d'hydratation relativement à faible résistance (par exemple, l'ettringite secondaire) au sein de ce nouvel espace vide, introduit à l'ancienne interface de

fibre-ciment, en minimisant les changements dimensionnels de la fibre lors de mouillage ultérieur.

3- la minéralisation de la fibre par la reprécipitation des produits d'hydratation, l'hydroxyde de calcium susceptible, au sein de la structure du mur de fibres cellulaires.

Lors des premiers cycles mouillage séchage et avant la reprecipitation des produits d'hydratation autour de la fibre, les fibres ont une grande liberté à rétrécir et à gonfler, sans impédance. Lors du séchage, le rétrécissement diamétral des fibres peut créer une pression capillaire expulsive sur la solution interstitielle résidant dans le lumen de la fibre.

Une telle pression causerait à la solution interstitielle d'être principalement expulsé par les extrémités des fibres et des creux le long de la fibre. Pendant ce séchage, la reprécipitation des produits d'hydratation peut survenir à l'ancienne interface de fibre-ciment. Cependant, la reprécipitation des produits d'hydratation tels que l'ettringite peut limiter le gonflement des fibres lors de la réhumidification.

Pendant le séchage ultérieur, le rétrécissement des fibres est également réduit. Ainsi, la force motrice de l'expulsion de la solution interstitielle est minimisée. Autrement dit, la solution interstitielle réside dans la fibre pour une plus longue période de temps. Par conséquent, la solution interstitielle ne sera pas seulement migrer de l'intérieur de la fibre à la matrice par les extrémités et les ponctuations des fibres, mais la solution peut aussi diffuser du lumen à travers la paroi cellulaire, résultant en un dépôt de produits d'hydratation au sein de la paroi cellulaire des fibres. Ce dépôt ou précipitation diminue la ductilité des fibres et conduit à' l'arrachement des fibres (**fibers pull out**) de courtes longueurs dans le composite. [**76]**

### 1.10.2.5. Phénomènes aux interfaces fibres/matrice

Plusieurs auteurs attribuent la perte de ductilité au cours du temps à la modification de la zone de transition existant autour des fibres.Cette zone, décrite par de nombreux auteurs [**77 - 78]** est large de 50 à 100 micromètres environ. Elle est plus poreuse et plus fissurée que le reste de la matrice.Toledo *et al.* [**77**] associent la rupture ductile du composite aux faibles performances mécaniques de cette zone qui peut aisément rompre ou se fissurer.

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

Par analyse EDS, la migration des produits d'hydratation, et en particulier des ions calcium dans les fibres de coco, est confirmée par Toledo *et al.* **[77].**

D'après Savastano *et al.* **[78],** cette zone de transition se formerait lors du gâchage et serait due au fort coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales qui engendrerait un mouvement d'eau de la pâte à l'état frais vers les fibres, ce qui induirait ensuite une porosité plus élevée de la pâte durcie dans cette zone.

### 1.10.2.6. Mode de rupture :

Bentur *et al.* **[79], d**istinguent trois modes de rupture et identifient l'influence de la carbonatation sur ce mécanisme :

- **Mode 1** : les échantillons non vieillis rompent par arrachement des fibres de la zone de transition poreuse constituée principalement de C-S-H, il s'agit d'une rupture ductile ;
- **Mode 2** : les échantillons vieillis par des cycles d'humidification-séchage présentent à la fois des fibres arrachées et des fibres cassées dont la section est creuse. La matrice autour des fibres est dense. Il s'agit d'un mode de rupture fragile mais sans minéralisation des fibres ;
- **Mode 3** : les éprouvettes vieillies par des cycles d'humidification-séchage en ambiance riche en $CO_2$, présentent également une rupture fragile, mais la majorité des fibres est cassée et leur section est remplie de produits d'hydratation denses, elles sont pétrifiées.

Les propriétés du composite sont corrélées avec le mode de rupture, dans tous les cas les auteurs notent une chute de la ductilité, mais, pour les fibres pétrifiées en ambiance riche en $CO_2$ (mode 3), ils relèvent des augmentations de la résistance à la première fissure et du module d'élasticité tandis que pour les fibres creuses (mode 2), ces propriétés diminuent également. Ils associent cette chute aux variations volumiques des fibres qui induisent la fissuration et donc l'affaiblissement de la matrice (hypothèse formulée également par Savastano *et al.* **[79 - 80]**

D'après Mohr *et al.* **[81],** ces phénomènes peuvent être successifs. Dans un premier temps, les variations volumiques des fibres consécutives aux cycles d'humidification/séchage engendreraient une perte d'adhérence entre les fibres et la matrice. Dans un second temps, la reprécipitation des produits d'hydratation à faible résistance (éttringite secondaire) dans la porosité créée par la première étape contiendrait les variations volumiques des fibres lors des cycles suivants. Enfin, la troisième étape correspondrait à la fragilisation des fibres par minéralisation ce qui entrainerait une légère augmentation de la résistance à la première fissure mais une diminution de la ténacité et un mode de rupture fragile des fibres, **(Fig.1.20).**

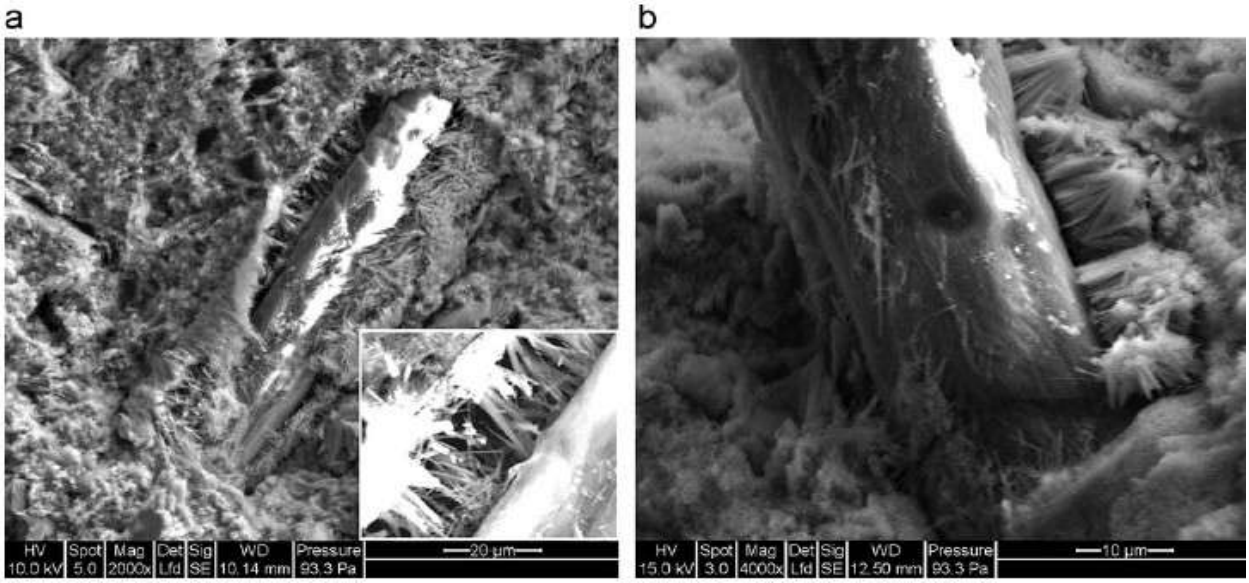



**Fig.1.19.** ESEM micrographe après 2 cycles de séchage / mouillages. (a) fibres de pâte kraft blanchie montrant la formation des aiguilles d'ettringite entre les couches S1 et S2 des fibres avec gros plan de cristaux d'ettringite. (b) composite de fibres de pâte kraft blanchie illustrant une reprécipitation denses des aiguilles ettringite qui restreint le gonflement de la fibre, **[81]**

### 1.10.2.7. Propriétés thermiques :

L'addition des matières cellulosiques dans les composites cimentaire fournit le sujet de nombreuses études et applications, en raison de leurs qualités thermiques et acoustiques ainsi que leur aspect renouvelable des ressources employées.

Le potentiel d'utilisation d'un matériau de construction particulière ne peut être déterminé qu'à partir des résultats d'une analyse multi-critères. L'application de matériaux

d'isolation, par exemple, nécessite toujours un compromis entre les performances thermiques et mécaniques.

Dans le cadre d'amélioration des propriétés thermiques M. Bentchicou ***et al*** (**[82]** cité dans **[83])** ont réalisé des essais expérimentaux sur un mortier renforcé par différents pourcentages en fibres cellulosiques de récupération où ils ont faits un compromis entre la résistance en compression et la résistance en traction avec les performances thermiques.

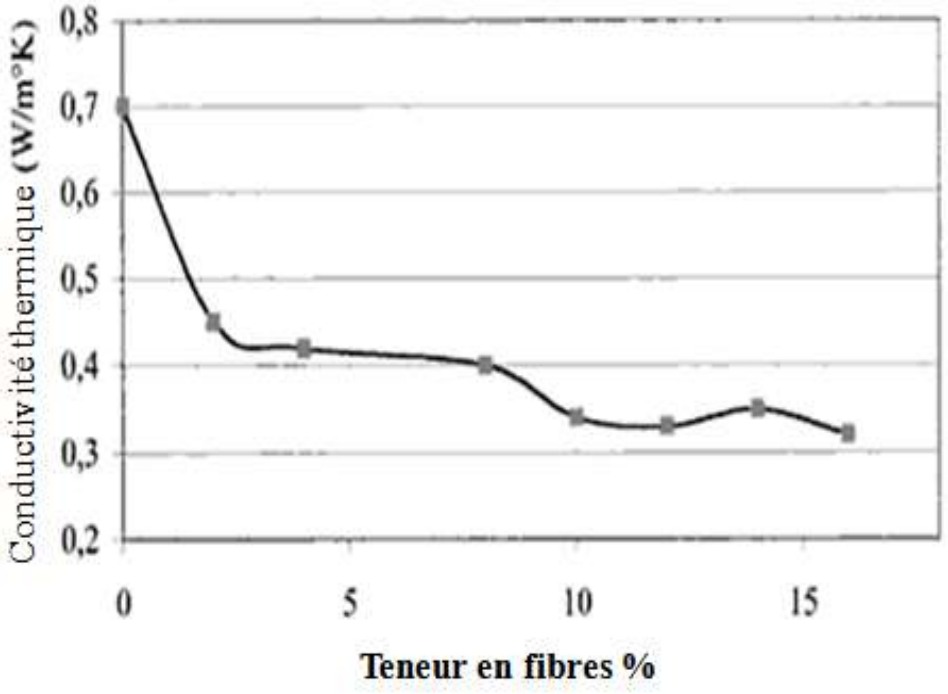



**Fig.1.20.** Conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres

Les résultats révèlent que la conductivité Thermique diminue avec la teneur en fibres et semble se stabiliser autour de 10%. Jusqu'à une teneur en fibres de 16% qui correspond à un rapport de E/C=0.68 **(fig. 1.21).** Pour la résistance en compression et d'après la **(fig.1.22)**, elle diminue en fonction de l'augmentation de la teneur en fibre, cela et due à l'augmentation de la porosité induite par les fibres mais elle reste supérieure à la valeur exigée par la norme des éléments non-porteurs en maçonnerie.

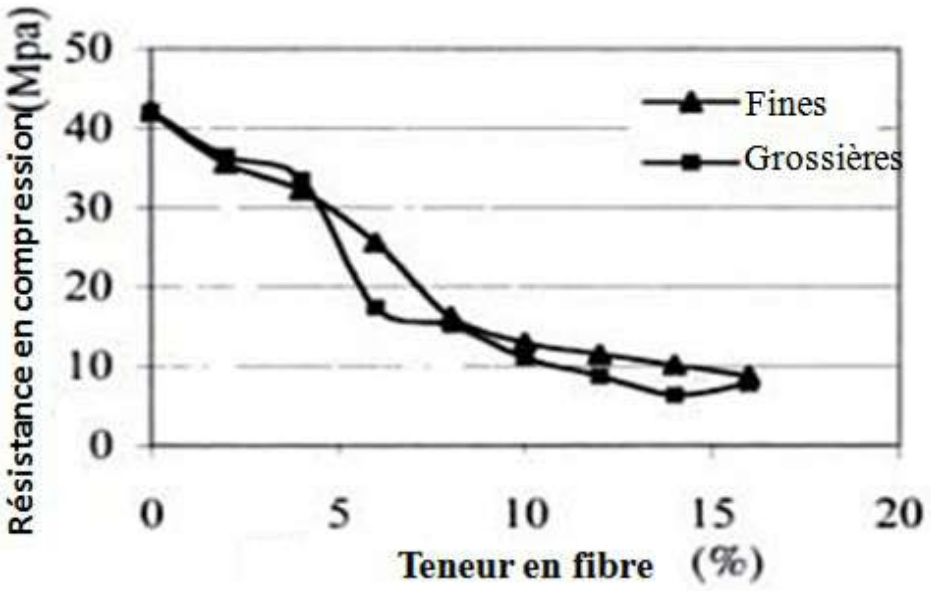



**Fig.1.21.** Résistance en compression du composites en fonction de la teneur en fibres.

Concernant la résistance en traction, elle présente une évolution non- monotone avec l'augmentation du pourcentage en fibre, le maximum de force a été trouvé à 4% de teneur en fibre

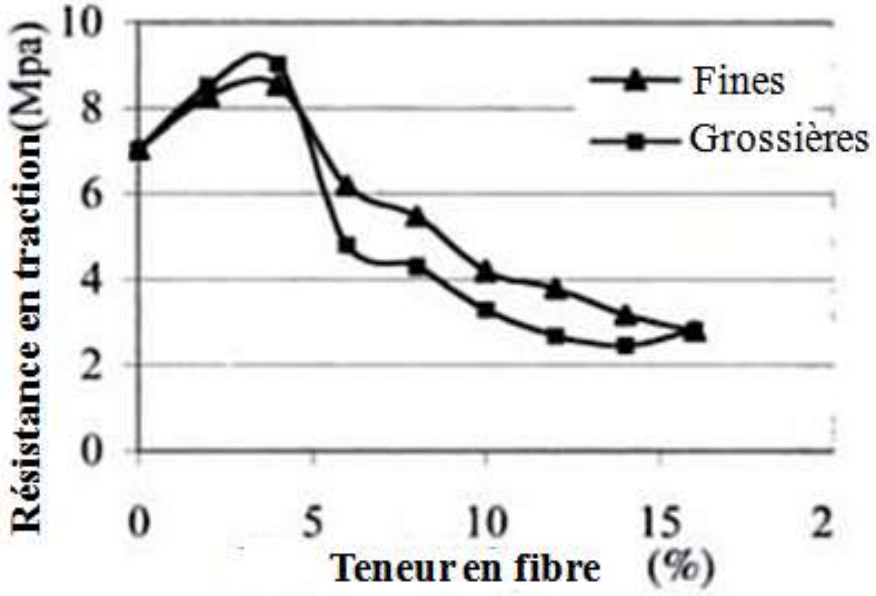



**Fig.1.22.** Résistance en traction du composites en fonction de la teneur en fibres.

Même résultats ont été trouvé par M. Bederina et al **[84]** qui ont constitué un béton de sable structurel et léger tout en préservant ses performances mécaniques. Ils ont étudié l'effet de

l'addition des copeaux de bois sur la conductivité thermique des bétons de sable. Ces copeaux, qui proviennent de déchets d'activités de menuiserie, ont été incorporés, sans aucun traitement préalable, dans les deux types de bétons de sable utilisé d'une gamme de contenus variant de 0 à 100 kg/m3

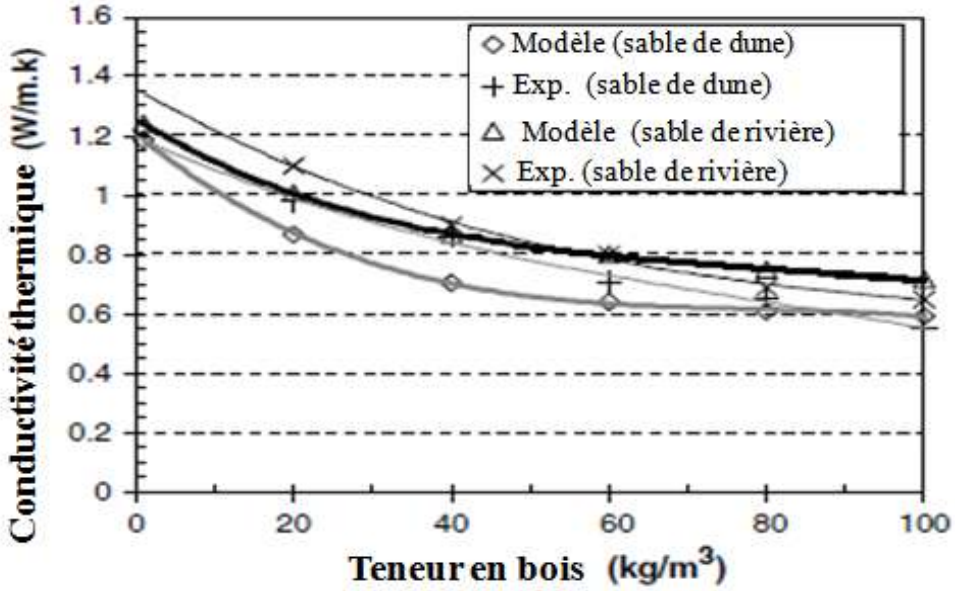



**Fig.1.23.** Influence du pourcentage en poids de granulats de bois sur la conductivité thermique.

Leurs résultats ont démontré que l'inclusion de copeaux de bois dans le béton de sable réduit la densité du matériau en grande partie, tandis que la structure restant homogène et avec une forte adhésion bois - matrice, de plus, la conductivité thermique a été améliorée **(Fig.1.24).**

Des résultants semblables sont trouvés par K. Al Rim **[85],** qui a décrit dans son article l'influence que la proportion d'agrégats de bois a sur les performances thermiques et mécaniques d'un béton argileux.

L'augmentation de la teneur en bois diminue la conductivité thermique du composite et accroît ainsi leur capacité d'isolation, la **(Fig.1.25)** montre que la conductivité thermique k diminue de 0,24 à 0,08 W / m K si le pourcentage des granulats de bois augmente de 10% à 50%.

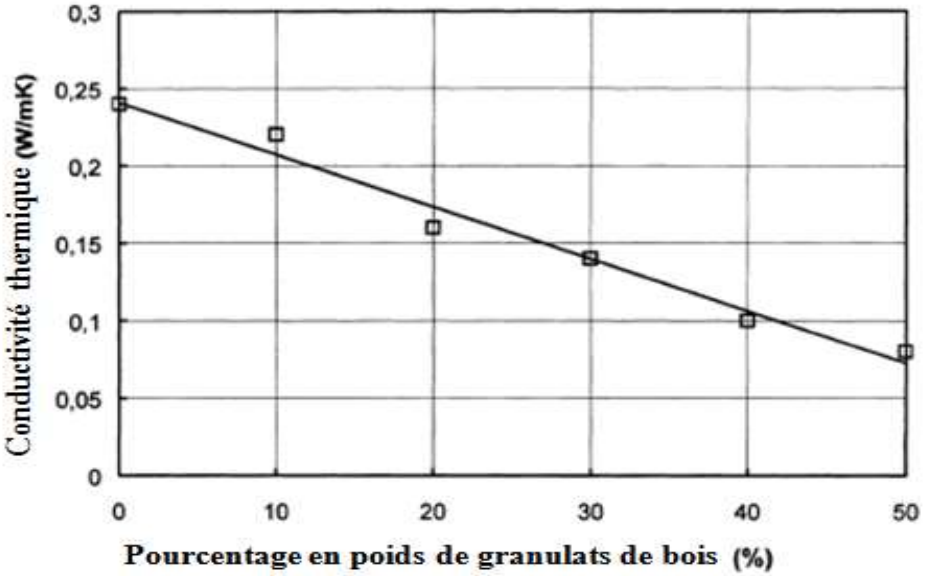



**Fig.1.24.** La conductivité thermique en fonction du contenu d'agrégat en bois

K. Al Rim et al **[85]** ont démontré finalement que l'ajout de bois au composite améliore ses caractéristiques d'isolation, réduit sa résistance mécanique et augmente sa déformabilité **(Fig.1.26)**.

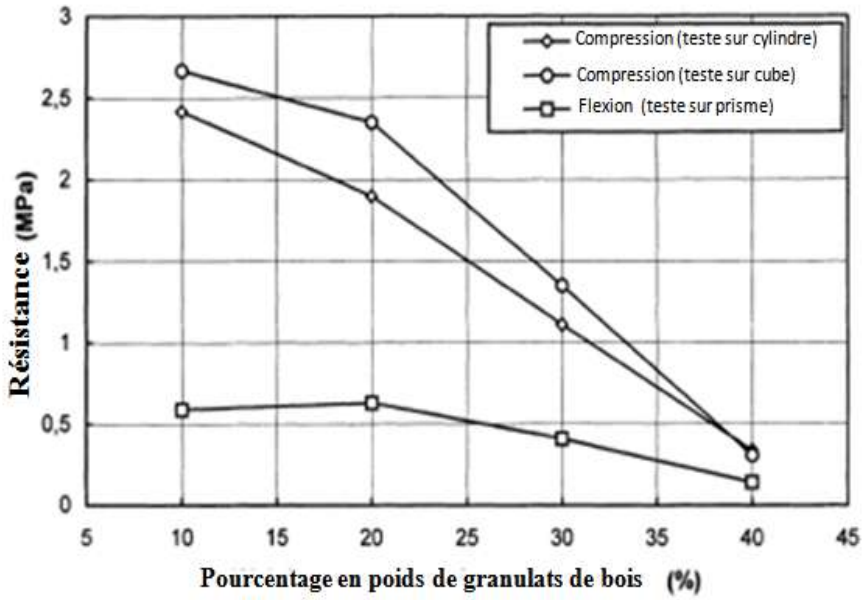



**Fig.1.25.** Resistance en compression et en flexion en fonction du contenu en bois

## *Conclusion*

D'après cette revue bibliographique on conclu que les propriétés physiques, mécanique et thermiques des composites renforcés par des fibres végétales dépendent de nombreux facteurs, telle que : le type des fibres, leur géométrie, leur surface, le type de ciment, la nature et la taille des granulats, le rapport E/C, le rapport D/L, le dosage en fibre, méthode de malaxage, méthode de mis en œuvre, méthode de cure….etc.

Il est par conséquent difficile de comparer les résultats des travaux publiés tant le nombre de variables influençant les caractéristiques finales du composite est important. Nous présenterons donc dans les parties suivantes quelques résultats significatifs en différenciant les composites par un renforcement en pourcentage variable des fibres de cellulose de récupération de carton d'emballage pour œuf en les soumettant à des cycles de séchages et d'humidifications pour des testes de durabilité à long terme, tout en étudiant l'influence sur la conductivité thermique du composite .

# ***CHAPITRE 2 :***

# *Méthode d'essais et caractéristiques des matériaux mis en œuvre*

## 2.1. INTRODUCTION :

L'étude expérimentale au laboratoire nécessite une caractérisation des matériaux mis en œuvre. Dans ce chapitre, on s'intéresse à la présentation des différents essais réalisés ainsi que les matériaux utilisés pour la confection des mortiers et des mortiers composites.

## 2.2. Essais effectués sur matériaux :

### 2.2.1. Essais sur granulats: (sable)

### A.1. Masse volumique : (NA 451) [86]

Il s'agit de mesurer le volume absolu, en vrac, et apparent du sable et de chaque fraction granulaire pour déterminer le squelette granulaire du mortier.

### A.1.1.Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois les vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

### A.1.2.principe de détermination de la masse volumique apparente

L'essai consiste à remplir un récipient de volume 1L (**Fig.2.1)** par le matériau, ensuite on mesure la masse de ce dernier et on applique (**l'équation .2.1),** on obtient la masse volumique apparente (ρapp), **[87].**

$$\rho app = M / 1 \ (kg/m3) \qquad \textbf{(2.1)}$$



**Fig.2.1:**Le cône et le récipient

### A.1.3.Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau non compris les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains. La densité absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température.

### A.1.4.Principe de détermination de la masse volumique absolue

Pour déterminer la masse volumique absolue, l'essai **(Fig.2.2)** consiste à mettre dans une éprouvette un volume d'eau de 200 ml puis on verse 100 g du matériau dedans et par le biais de **l'équation (2.2)** on calcul la masse volumique absolue **[87]**:

$$\rho abs = M / V2-V1 \ (kg/ m3) \qquad \textbf{(2.2)}$$

À la fin, on peut tirer les valeurs de porosité, compacité et l'indice des vides à partir de **l'équation (2.3).**

$$C = \rho app / \rho abs; \quad P = 1-C; \quad I = P / C \qquad \textbf{(2.3)}$$

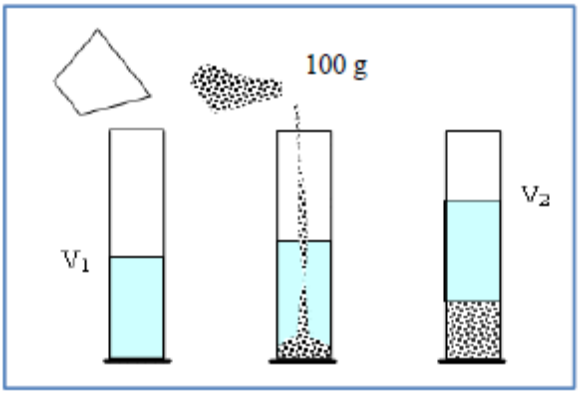



**Fig.2.2**. Les éprouvettes de mesure de la masse volumique absolue

## A.2. Porosité et compacité

### A.2.1.La porosité

C'est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. C'est une mesure des pores accessibles à l'eau. Une valeur élevée est défavorable pour la durabilité des bétons, car elle facilite la carbonatation, la pénétration de l'eau et

des chlorures, la dégradation par le gel. Elle nuit aussi au maintien de la maniabilité du béton frais, ce qui peut se compenser par un pré mouillage des granulats.

Une absorption d'eau élevée diminue le module d'élasticité et accroît le fluage, par contre, une faible absorption d'eau favorise le ressuage, **Ab ≤ 2.5 %**. **[11]**

On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent

**P=volume des vides / volume totale** **(2.4)**

## A.2.2.La compacité

La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total. Ou volume des pleins par unité de volume apparent.

c = plein / (vide + plein) **(2.5)**

La porosité et la compacité sont liées par la relation:

p+c=1 **(2.6)**

La porosité et la compacité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100%.

Si l'on connaît la masse volumique D et la masse spécifique g d'un matériau, il est aisé de calculer sa compacité et sa porosité.

Avec : c = volumes des pleins / volume totale

Donc : **c (%)= 100 Δ / γ** **(2.7)**

**p (%)= 100 (1- Δ / γ)** **(2.8)**

Δ : volumes des pleins

γ : volume totale.

## A.2.3.Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec **.**On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau E contenu par unité de poids de matériau sec.

**W = E / Ps = Ph-Ps / Ps** **(2.9)**

E : poids d'eau dans le matériau

Ps : poids du matériau sec

Ph : poids du matériau humide

A partir des définitions données plus haut, on peut écrire les relations : si W est exprimé en %

$$E = (W\% / 100).Ps \qquad \textbf{(2.10)}$$

$$E = (W\% / 100 + W\%).Ph \qquad \textbf{(2.11)}$$

## A.3.Propreté des granulats

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte du ciment.

### A.3.1. Essai d'équivalent de sable : (NF P 18-598) [88]

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution floculant ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment ($h_1$) et du sédiment + floculat ($h_2$) **(Fig.2.3).**

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$\mathbf{ES} = \frac{\mathbf{h_1}}{\mathbf{h_2}} \times \mathbf{100} \qquad \textbf{(2.12)}$$

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

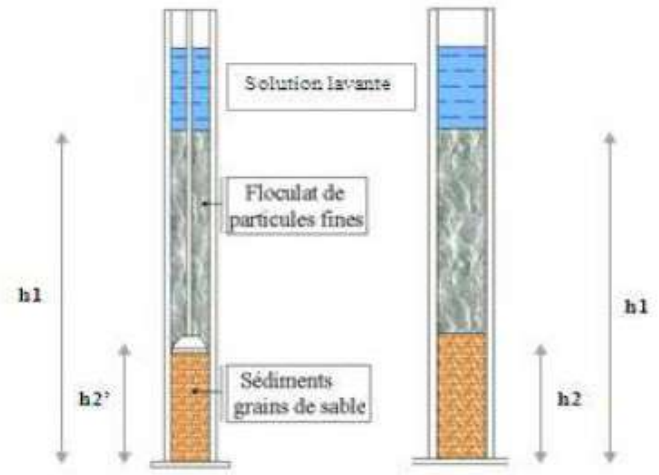



**Fig.2.3 :** Détermination de l'équivalent de sable piston.

## A.3.2. Procédure de mesure de l'équivalent de sable :

Selon la norme [NF P 18-598] **[88]**, la procédure de mesure de l'équivalent de sable est comme suit **[89]**:

- On dispose de trois éprouvettes propres pour chaque sable,
- En versant une quantité de 120 g de sable, jusqu'au premier trait d'une éprouvette normalisée contenant une solution lavante, et on laisse à reposer 10 minutes,
- On bouche les éprouvettes et on les agite d'une manière automatique à l'aide d'une machine agitatrice pendant 30 secondes,
- On lave et on remplit les éprouvettes par la solution lavante jusqu'au trait supérieur, et on laisse reposer pendant 20 minutes en évitant toute vibration,
- Deux lectures sont proposées :

1- À l'œil nu, on lit les hauteurs h1 et h2 :(équivalent de sable visuel)

$$ESV = 100.\ (h2/\ h1) \qquad \textbf{(2.13)}$$

2- À l'aide d'un piston on mesure h'2 : (équivalent de sable piston)

$$ES = 100.\ (h2' / h1) \qquad \textbf{(2.14)}$$

- finalement on prend la moyenne des résultats des trois éprouvettes.



**Fig.2.4:** Essai de l'équivalent de sable

## A.4. Granulométrie : (NA 2607) [90]

### A.4.1. Objet de la norme

La présente norme a pour objet de définir les granulats et leurs classifications d'après la dimension des grains et de fixer la méthode à suivre pour l'analyse et le tracé de la courbe granulométrique.

### A.4.2. Le tamisage

L'analyse granulométrique par tamisage s'effectue au moyen d'une série de tamis d'ouvertures normalisées. Les particules à tamiser sont d'abord séparées par lavage. Les grosses particules sont ensuite fractionnées au moyen des tamis.

Le pourcentage massique de refus est obtenu par le rapport de la masse du refus et de la masse totale initiale sèche du matériau. Le pourcentage massique de tamisât est égale au complément du pourcentage massique de refus (100- pourcentage massique de refus). La variation du pourcentage massique de tamisât est tracé en fonction du logarithme décimale de la maille du tamis.

Une échelle logarithmique de la maille du tamis est plus convenable pour représenter adéquatement l'étendue des valeurs de la dimension de la particule. L'essai est réalisé selon la norme [NA 2607] **[90]**.où le sable passant à travers une série de maille décroissante **(fig.2.5)** dont on pèse le refus de chaque tamis (NF P 15-476) **[91]**.



**Fig.2.5:** Séries de tamis

On utilise une quantité de 1000 g pour le sable de concassage et 1400 g pour le sable roulé. On trace les courbes granulométriques pour chaque sable, puis on tire les coefficients suivants :

- Le coefficient d'uniformité Cu ;
- Le coefficient de courbure Cc ;
- Le module de finesse Mf ;

### A.4.3. Courbe granulométrique :

On trace la Courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage massique de tamisât sous les tamis dont les mailes « D » sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique. La forme de la courbe granulométrique représente la distribution de la dimension de la particule, cette distribution peut être qualifiée d'uniforme si les dimensions des particules sont voisines, donc elle et caractérisée par deux coefficients :

_ Le coefficient d'uniformité Cu : $Cu = d60 / d10$ **(2.15)**

_ Le coefficient de courbure Cc : $Cc = (d30)2 / d10 . d60$ **(2.16)**

d10 : diamètre moyen des grains correspondant à 10 % passant par poids.

$D_{30}$ : diamètre moyen des grains correspondant à 30 % passant par poids.

$D_{60}$ : diamètre moyen des grains correspondant à 60 % passant par poids.

La distribution des dimensions des particules est dite :

- Bien graduée si : $C_u > 10$
- Étalé si : $C_u > 2$
- Uniforme ou serrée si : $C_u < 2$

### A.4.4. Module de finesse : (NF EN 933-1) [92]

Le module de finesse d'un sable est définit par le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.

Le module de finesse est d'autant plus faible que les granulats sont riches en éléments fins. La teneur en eau de gâchage est inversement proportionnelle au module de finesse, donc la résistance progresse avec l'augmentation du module de finesse.

Le module de finesse des sables doit être compris entre 1,80et 3,20 **[11]**.

- $2.20 < Mf < 2.80$ : convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

- 1.80 < Mf < 2.20 : est à utiliser si l'in recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre.
- _2.80 < Mf < 3.20 : correspond à des sables à utiliser pour la recherche des résistances élevées, mais on aura une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation. **[11].**

Dreux **[11]** admet qu'un bon sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 2,20 et 2,80.

### 2.2.2. Essais sur ciment.

**3- Essais physiques :**

✓ **La finesse :**

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface spécifique de Blaine d'après la norme NF P 15-476 **[91].**

La surface spécifique de Blaine exprimée en en $m^2$ /Kg est donnée par la formule suivante :

$$SSB=\frac{k.M}{m}\sqrt{t} \qquad \textbf{(2.17)}$$

t =temps de passage de l'aire dans la poudre (s).

K= constante de l'appareil (K= 21.66).

M = coefficient qui dépend de la température et de l'épaisseur de la couche de la poudre.

✓ **La consistance normale**

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pate dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme (NF P 15-431) **[93].**

✓ **Le temps de prise.**

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pate de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme (NF P 15-473) **[94].**

**4- Résistance mécanique :**

Selon la fiche technique les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément à la norme [NF P 15-471] **[95]** sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 $cm^3$

à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier normalisé: 450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau. Les résultats obtenus par cet essai sont acceptables pour la confection d'un béton et sont résumés dans le **tableau2.1**.

**Tableau 2.1 :** Évolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge.

| Age (jours) | Résistance à la compression (Mpa) |
|---|---|
| **2** | **> 20** |
| **28** | ≥ 42.5 et 62.5 |

### 2.2.3. Essais sur mortier :

**1. Mortier frais**

- **Ouvrabilité du mortier**

Selon les normes L.C.P.C (NF P 18-452) **[96]** et (NF P 15-437) **[97] ,** Le but de cet essai est de quantifier l'ouvrabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps, du mortier avant prise, et classer les mortiers suivant une échelle de fluidité croissante (ferme, plastique, très plastique et fluide).

Dans cet essai la consistance est caractérisé par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide. L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre à mortier **(Fig.2.6)** et comporte :

- Unique boîtier parallélépipédique métallique (30 cm x15 cm x15 cm) ;
- Une cloison amovible ;
- Un vibrateur ;
- Un chronomètre ;



**Fig.2.6.** Maniabilimètre à mortier

Le principe de fonctionnement du maniabilimètre à mortier est illustré dans la figure **(2.7)** et se résume comme suite :

- ✧ Huiler légèrement les parois internes de la cuve.
- ✧ Remplir le mortier.
- ✧ Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place en deux couches.
- ✧ Chaque couche piquée de 15 coups au moyen de la tige de piqua
- ✧ Araser la dernière couche.
- ✧ La cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre en même temps que la cloison est retirée.
- ✧ Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule.
- ✧ Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier.

Le temps **t** mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance.

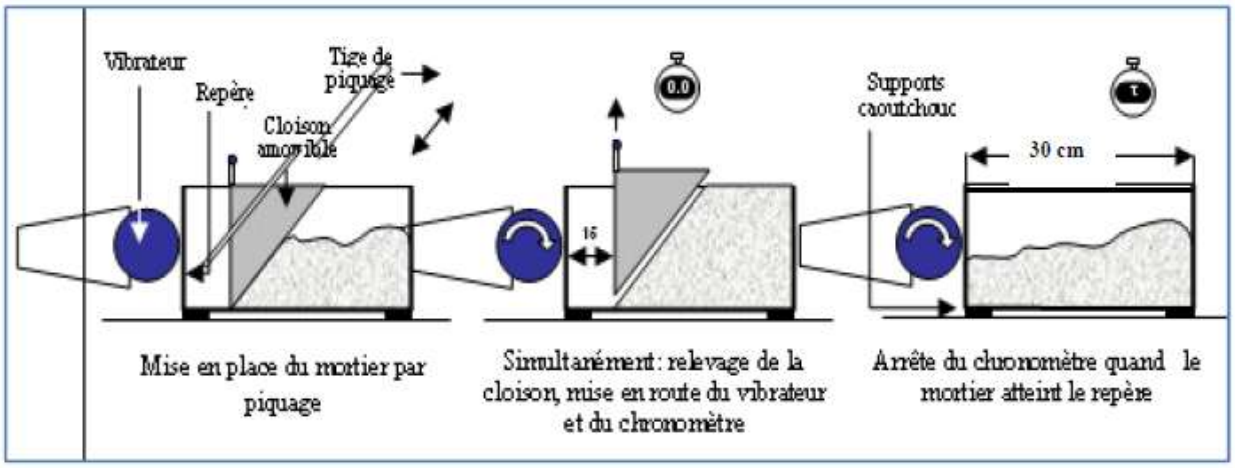



**Fig.2.7.** Principe de fonctionnement du maniabilimètre à mortier

### 3. Mortier durcis :

### a. Essais mécaniques :

Les essais habituellement utilisés pour évaluer la résistance du mortier sont la compression et la traction par flexion.

#### a1. Essai de traction par flexion :

Selon la norme EN 196-1**[98],** c'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) Figure **(.2.8),** une éprouvette prismatique de coté a et de longueur L. Dans notre étude cet essai et effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm.

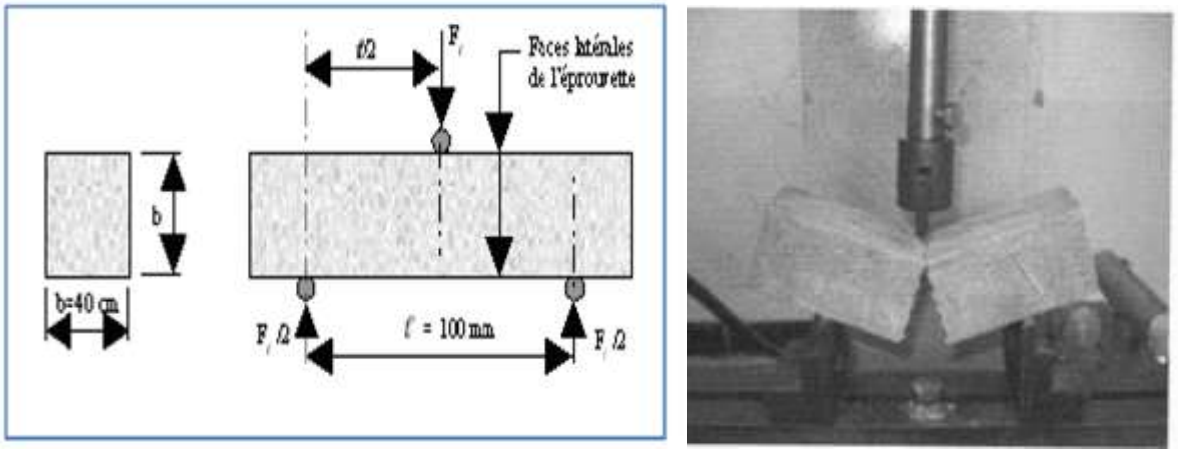



**Fig.2.8:** Dispositif pour l'essai de résistance à la traction

La contrainte de flexion sur la fibre inférieure est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{M}{I} \mathbf{v} \qquad \textbf{(2.18)}$$

**Telle que :**

**M :** Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge :

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{F_f L}}{\mathbf{4}} \qquad \textbf{(2.19)}$$

**I :** Moment d'inertie de la section transversale :

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{a^4}}{\mathbf{12}} \qquad \textbf{(2.20)}$$

**v:** La distance de la fibre la plus éloignée :

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{2}} \qquad \textbf{(2.21)}$$

La résistance en traction par flexion est calculée donc par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{1.5 F_f L}{a^3} \qquad \textbf{(2.22)}$$

$$f_{t28} = 0.9\ Ft.L / a^3 \qquad \textbf{(2.23)}$$

La rupture de chaque éprouvette en traction est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure **(2.8).**

## a2. Essais de compression :

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme (EN 196-1) **[98]** par compression axiale pour le demi prisme d'éprouvettes prismatique de dimensions (4x4x16) cm, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN**.** La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes.

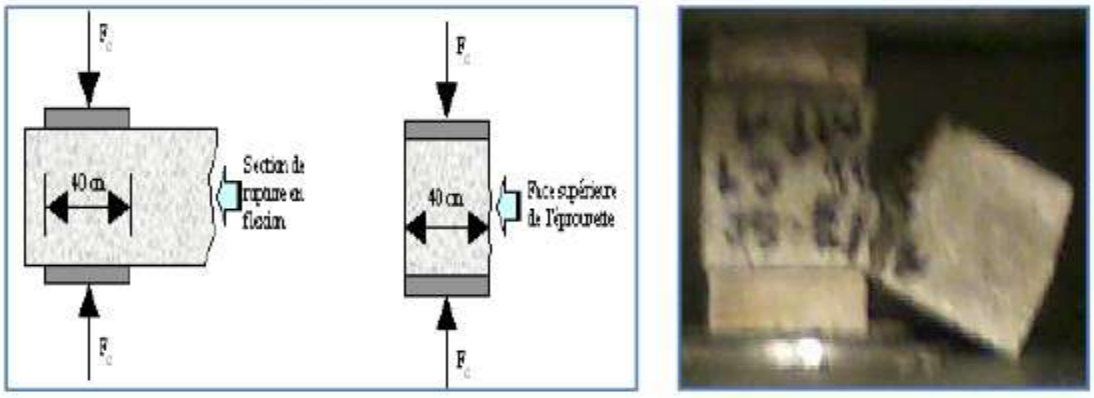



**Fig.2.9 :** Dispositif de rupture à la compression.

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la (figure.**2.9**), la contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$R_C = \frac{F_C}{b^2} \qquad \textbf{(2.24)}$$

Avec :

$R_C$ **:** Contrainte de rupture (MPa) ;

**Fc:** Charge de rupture (MN);

$\mathbf{b^2}$ **:** Section de l'éprouvette ($16 \times 10^{-4}$) m².

La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois éprouvettes à chaque âge d'essai.

## b. Essai de retrait :

C'est la diminution du volume apparent de la matière. On le mesure sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de $4 \times 4$ cm$^2$, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%.

La norme [NF P 15-433] **[99]** impose les valeurs limites, à 28 jours, de

- 800 μm/m pour les ciments portlands CPA-CEM I et CPJ-CEM II de classe 32.5 ;

-1000 μm/m pour des types de ciment identiques mais de classes 32.5R, 42.5 et 42.5R.

Le béton ou le mortier peut subir des changements de volume (retrait ou gonflement) pour un certain nombre de raisons: charge (fluage), les cycles de séchage et de mouillage, la réaction expansive pouvant survenir dans le ciment et la réaction expansive qui peuvent survenir entre le ciment et agrégats **[58]**

Pour mesurer le retrait, des éprouvettes prismatiques de dimension ($4 \times 4 \times 16$) cm sont utilisées. On compare, à différents temps, la variation de longueur d'une éprouvette, par rapport à sa longueur initiale à un temps $t_0$ pris pour origine. Dans notre étude le retrait sera mesuré par deux procédures :

- la première est le calcul des variations dimensionnelles dû aux cycles de séchage-humidification.
- la deuxième procédure consiste à mesurer le retrait total libre dû à l'évaporation de l'eau contenue dans le mortier, les éprouvettes sont conservées sans moyen de protection où les éprouvettes sont placées dans une salle à température de 20 ± 2°C et une humidité relative de 65 ± 5% et en absence de vent.

Pour assurer un bon contact entre l'aiguille du comparateur et le mortier, des plots ont été ancrés au centre de la surface de contact de l'éprouvette. Les éprouvettes de mortier sont placées d'une manière à éviter tout risque d'instabilité à une température ambiante.



**Fig 2.10 :** Rétractomètre numérique

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar et protégée contre les variations de température qui peuvent subir au cours des manipulations) (F**ig.2.10**).

### c. Mesure des variations de masse :

La variation de masse est déduite après avoir, pesé à 0.1g près chaque éprouvette à chacun des temps utilisés pour mesurer de retrait.

Pour chaque éprouvette on calcul le rapport suivant:

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{M - M_t}{M} \qquad (2.25)$$

$\Delta$**M** : Variation de masse par rapport à la masse au moment du démoulage **M**,

**M** : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

$M_t$ : Masse de l'éprouvette mesurée à un temps t après démoulage.

### d- Essais thermiques :

Les isolants sont des matériaux qui emprisonnent de l'air et par cela empêchent la propagation de la chaleur. La protection hydro-thermique fait partie de la conception globale d'une construction et doit être prise en compte dès l'avant projet. Les exigences particulières à l'isolation

thermique et à la protection contre l'humidité doivent être intégrées à toutes les étapes de la conception et de l'exécution. **[100].**

### d.1. Description de l'appareil de mesure :

Dans notre étude et pour le mesure de la conductivité thermique on a utilisé le CT mètre (**Fig.2.11)** développé par le SCTB, conforme à la norme NF EN 993-15 **[101]**, cet appareil est constitué d'un système de mesure et de capteurs de formes différentes. Nous avons choisi d'utiliser le capteur fil pour mesurer la conductivité thermique (λ) et le capteur anneau pour mesurer la chaleur massique.

Ces types de capteurs ont été développés pour répondre à un certain nombre de critère, en particulier la mesure sur des échantillons de faibles dimensions. Il est constitué d'un élément chauffant circulaire en composite cuivre-polyimide- constantan, au centre de l'élément chauffant annulaire, on trouve un thermocouple cuivre-constantan.



**Fig.2.11.** CT mètre

### d.2.Principe de mesure :

Le principe de mesure consiste à envoyer une certaine puissance de 0.4 à 1.5 W dans la sonde fil de rayon 0.05 cm et une puissance de 0.2 à 2.5 W dans la sonde anneau de rayon 0.015 cm, ces sondes sont placées entre deux échantillons à tester. Le temps de chauffe retenu et de 120 secondes pour la sonde fil et de 60 secondes pour la sonde anneau.

Un programme interne au CT mètre donne directement la conductivité thermique λ (w. $m^{-1}$ $K^{-1}$) et la chaleur massique (J/Kg C°) suivi d'un coefficient de corrélation (coefficient d'ajustement) qui permet de valider ou non l'essai, la précision de l'appareil est de 5%.

### e. Équipement nécessaire :

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme (EN 196-1) **[98]** et est illustré comme il suit :

- Une salle maintenue à une température de 20 °C ± 2 °C et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 % ;
- Un bac d'eau pour la conservation des éprouvettes maintenue à une température de 22 °C ± 2 °C et à une humidité relative supérieure à 90 % ;
- Une étuve maintenue à une température de 65 °C ± 5 °C et à une humidité relative inférieure à 18.5 % pour effectuer les cycles de séchage-humidification
- Un malaxeur à mortier normalisé avec une cuve de 5 L et pale de malaxage en inox;
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée (4cm x 4cm x 16cm);
- Une table à chocs pour le serrage des éprouvettes, permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm ± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s;
- Hygromètre digital numérique permet une lecture rapide de l'hygrométrie entre 10 et 95 % d'humidité relative et de la température entre 0 et 60 °C ;
- Une balance pour la mesure des petites et grandes quantités ;
- Tamiseuse électrique ;
- Les tamis de différentes mailles en inox ;
- Agitatrice ;
- Cône de sable, pour la mesure de la masse volumique apparente du sable ;
- Éprouvettes et béchers en verre et en plastique graduées ;
- Spatules flexibles en acier inox ;
- Pinceaux ;



**Fig.2.12:** Équipement nécessaire.

## 2.3. Matrice minérale:

La charge minérale utilisée dans cette étude est formée de deux éléments (le sable et le liant hydraulique). Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux de la wilaya de Médéa qui sont caractérisés expérimentalement au laboratoire de génie civil du Hall de technologie de l'université de Médéa et suivant les normes en vigueur.

## 2.4. Caractérisation des matériaux mis en œuvre

Pour avoir une maniabilité correcte et pour atteindre une bonne résistance mécanique on a procédé au :

1- Lavage du sable pour avoir un sable propre.

2- Une correction granulaire par le mélange d'un sable de concassage avec un sable naturelle pour atteindre une performance mécanique satisfaisante.

**A- LE SABLE :**

Le sable utilisé dans notre étude est un mélange de sable naturel de granulométrie 0/5 et le sable de concassage de granulométrie 0/3, dont les propriétés physiques d'identification sont présentées au tableau.**2.2**. Les figures. **(2.12)** et **(2.13)** suivantes donne un aperçu sur la nature des sables utilisés.



**Fig.2.13 :** Sable naturel de Bougazoul.



**Fig.2.14 :** Sable concassé de Mont Guorno.

**Tableau 2.2:** Propriétés physiques d'identification des sables utilisés.

| **Caractéristiques** | **Type de sable** | | **Normes** |
|---|---|---|---|
| | **Naturel** | **Concassé** | |
| **Provenance** | Bougazoul | **Mont Guorno** | |
| **Classe granulaire** | 0/3 | 0/5 | NF EN 933-1 **[102]** |
| **Module de finesse** | 1,75 | 3,48 | |
| **Masse volumique absolue (g/cm$^3$)** | 2,58 | 2,59 | NF EN 1097-6 **[103]** |
| **Masse volumique apparente (g/cm$^3$)** | 1,42 | 1,48 | NF EN 1097-3 **[104]** |
| **Équivalent de sable (%)** | 76,63 | 41,31 | NF EN 933-8 **[105]** |
| **Taux d'absorption d'eau (%)** | 0,01 | 0,02 | NF EN 1097-6 **[103]** |

## A.1. Mélange des deux sables :

Pour l'obtention d'un mélange de module de finesse égale à 2.5 (Mf souhaité =2.5), nous avons utilisé la méthode d'ABRAMS **[11]** pour faire un mélange de 55% de sable naturel et 45% de sable de concassage.

## A.2. Analyse granulométrique :

L'étude granulométrique des deux sables utilisés a été faite conformément à la norme **NF P 18-560 [106],** les courbes granulométriques sont représentée sur la figure.**2.14 :**

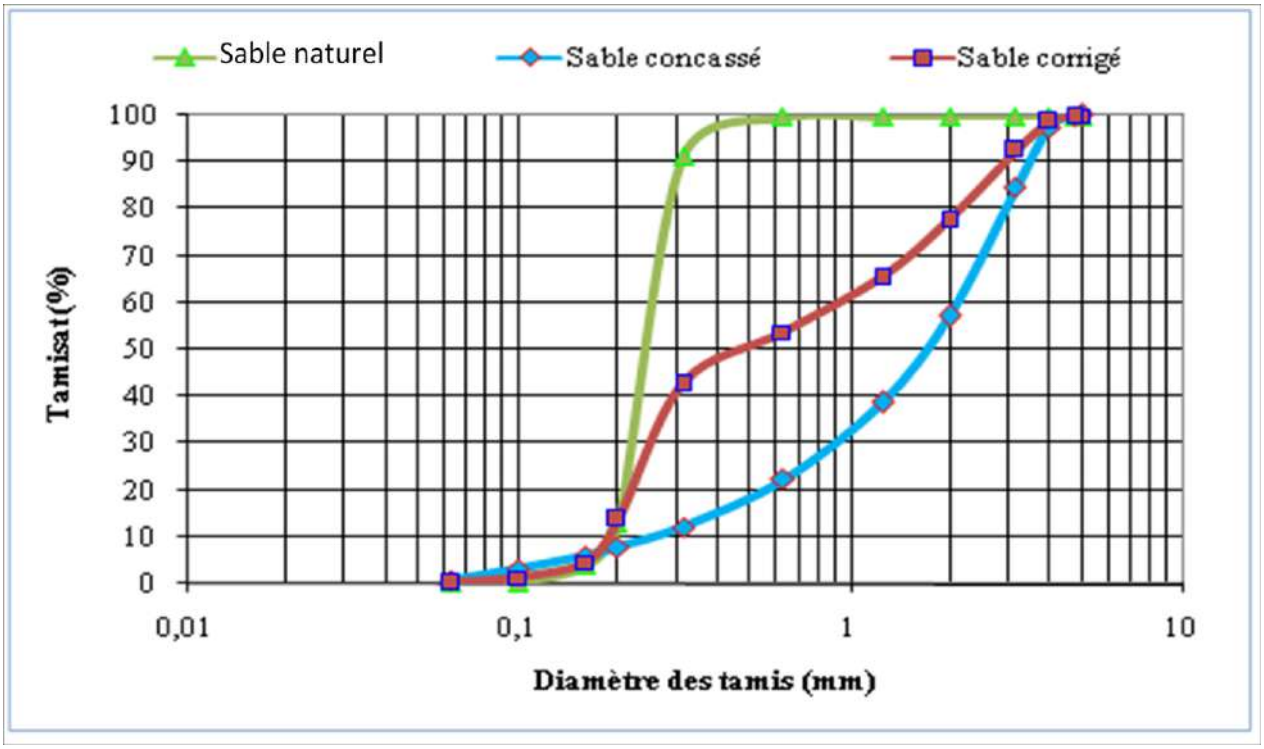



**Fig.2.15 :** Courbes granulométriques des sables utilisées et leur mélange

## B- LE CIMENT :

Le ciment utilisé dans notre étude expérimentale est un ciment composé **CPJ-CEM II / A 42.5** de la cimenterie de Chelef. **(Fig.2.15),** ses caractéristiques sont présentées dans le tableau.**2.3.**

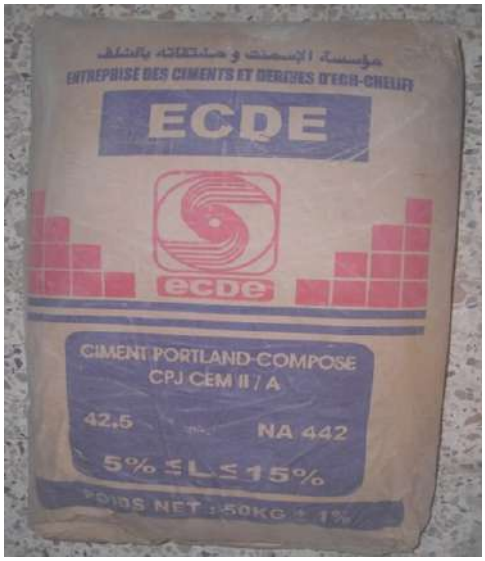



**Fig.2.16 :** Ciment de Chlef.

**Tableau 2.3:** Propriétés physiques d'identification du ciment utilisé.

| Caractéristiques | | Type de ciment | Norme |
|---|---|---|---|
| | | Chlef | |
| **Finesse ($cm^2/g$)** | | 3765 | NF EN 196-6 **[107]** |
| **Masse volumique absolue ($g/cm^3$)** | | 2,93 | |
| **Masse volumique apparente ($g/cm^3$)** | | 1,02 | NF EN 459-2 **[108]** |
| **Consistance normale (%)** | | 24,6 | NF EN 196-3 **[109]** |
| **Temps de prise** | **Début** | 2h15 | |
| | **Fin** | 3h50 | |
| **Classe de résistance (MPa)** | | 46 | NF EN 196-1 **[110]** |

## C- LES FIBRES :



**Fig.2.17 :** Fibres issues de la récupération des emballages d'œufs

Les fibres utilisées sont issues de la récupération des emballages d'œufs produits par la Société nationale de production de cellulose et des papiers (CELPAP), Algérie. Leur préparation nécessite un traitement physicochimique décrit en figure **(2.16)**. La pate est composée principalement de bois résineux (40 %), d'alfa (35 %) et de bois feuillus (25 %).

### C1-Préparation des fibres :

Les fibres utilisées sont issus du papier fabriqué de plusieurs matières premières d'origine fibreuses **[111].**

Il ressort de la recherche sur l'origine des déchets de papier d'emballage pour œufs utilisé que ce dernier est un mélange de plusieurs types de fibres dont les principales sont :

- fibres de bois feuillus qui sont relativement courtes : 1 à 1.5 mm de longueur et 15 à 30 µm de diamètre.
- Fibres d'Alfa qui ont un diamètre entre 9 et 12 µm et une longueur moyenne de 1.5 mm.
- Un faible pourcentage de trachéide des bois résineux qui sont longue de 2 à 4 mm et leurs diamètres vont de 50 à 60 µm.

  Un traitement d'homogénéisation et de blanchiment font subir ces fibres selon l'organigramme suivant

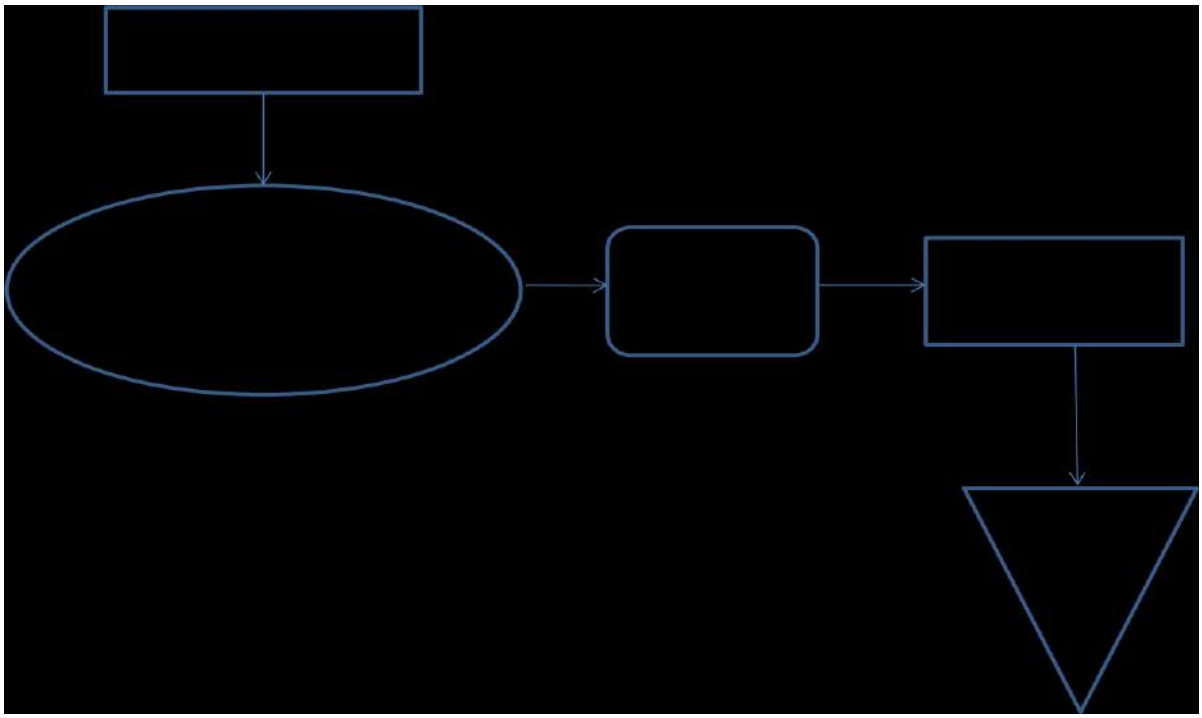


**Fig.2.18.** Schéma de principe des phases du traitement du déchet de papier **[111]**

Pour être utilisé dans le mortier, les fibres ainsi préparées sont pesées puis mélangées avec une quantité d'eau appropriée où on doit respecter le taux d'absorption d'eau par les fibres et la fraction nécessaire au gâchage du béton.

### C2-Taux d'absorption d'eau par les fibres :

Par immersion dans l'eau, un matelas fibreux est en mesure d'absorber 5 fois sa masse pris à l'état sec **[109].**

### D- L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la fabrication du mortier est celle du robinet considérée comme potable, exempte de toute impureté nuisible au mortier et conforme à la norme NF EN 1008 **[112]**.

### E-Variables étudiés :

Dans notre partie expérimentale, les essais mécaniques, physiques et thermiques ont été effectués sur des éprouvettes confectionnées pour différents types de mortiers, fabriqués au laboratoire. Le mortier à tester est basé sur une variation de trois paramètres (pourcentage en

fibres, rapport E/C, mode de conservation). L'organigramme suivant présente les variables de l'étude expérimentale réalisée au laboratoire (Fig. 2.18).

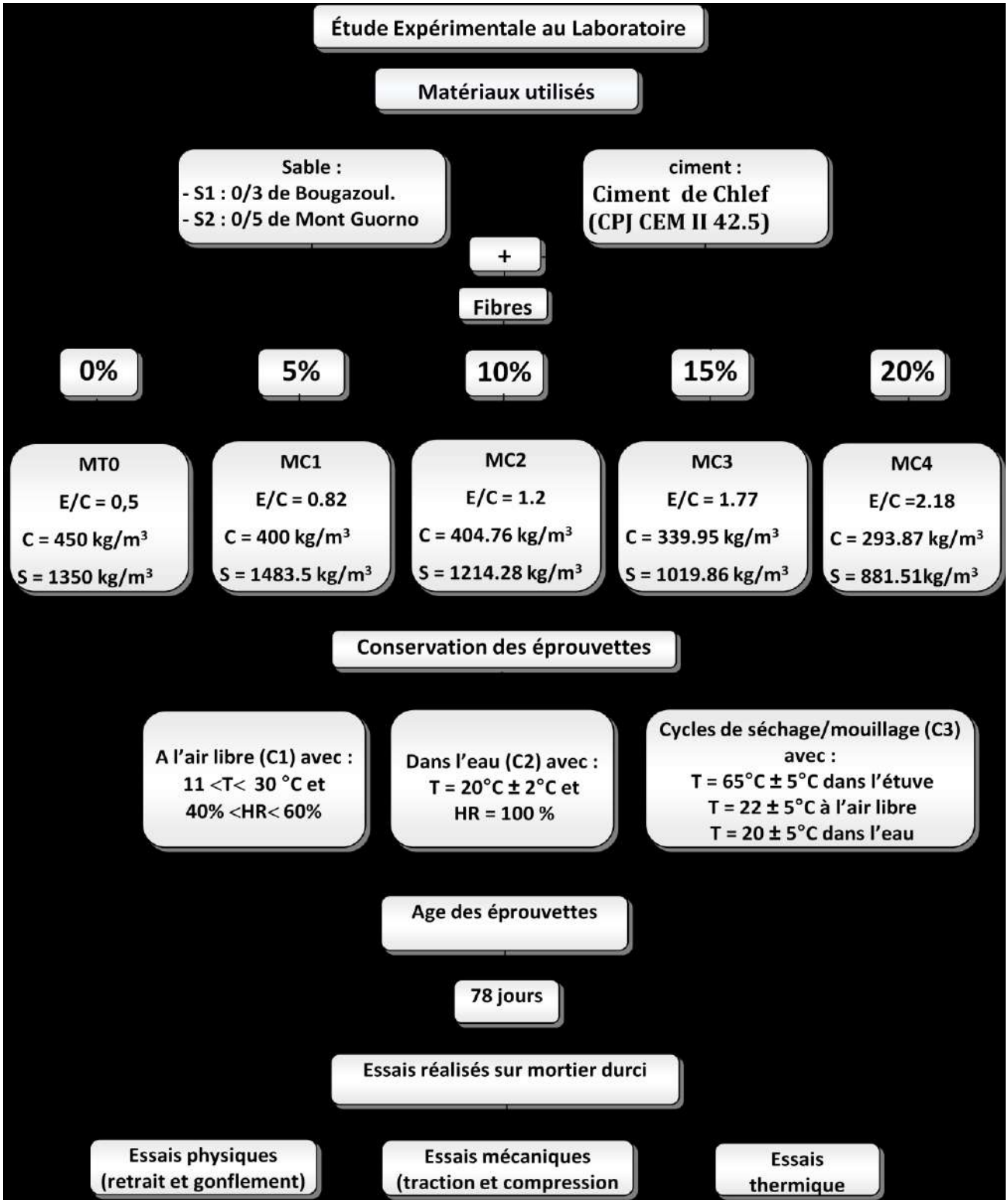



**Fig. 2.19 :** Variables étudiées.

# ***CHAPITRE 3 :***

# *Étude expérimentale*

# Première Partie

## Élaboration Du Composite

## 3.1. INTRODUCTION :

On n'ajoute pas n'importe quelle fibre à un mortier ou un béton classique, il convient d'étudier au préalable une composition adaptée, parce que la plus grande efficacité des fibres ne sera obtenue qu'après une optimisation de la composition pour déterminer la composition qui nous donne une plus grande résistance mécanique **[113].**

## 3.2. Définition des différentes compositions employées :

Dans la première partie de notre étude expérimentale on procède a l'optimisation de la composition du mortier chargé de fibre sachant que la composition du mortier témoins sans fibre est celle de la composition d'un mortier normalisé.

### 3.2.1. Composition du mortier témoin (sans fibre) :

Le mortier témoin se compose du liant, sable et d'eau. Pour la préparation de 03 éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm, les quantités sont respectivement les suivantes :

Ciment : 450g.

Sable : 1350 g.

Eau : 225 g.

Le rapport E/C est maintenu constant à 0,50.

### 3.2.2. Formulation du mortier (chargé de fibres).

L'optimisation de la composition des mortiers chargés de fibres est un passage obligé dans l'ingénierie de ce matériau. La formulation de ces matériaux ne peut pas, et ne doit pas se résumer, à l'introduction directe d'un certain pourcentage de fibres, dans un mortier ayant été préalablement optimisé sans fibres. En effet, cette introduction perturbe l'arrangement granulaire de la matrice, ce qui a pour double conséquence de diminuer la maniabilité du matériau et d'altérer sa compacité. Il est évident que cette perturbation est d'autant plus importante que le pourcentage de fibres est élevé, donc il est impératif de reformuler la matrice**. [114]**

- **Définition de (E/C) théorique :**

Pour définir la composition du mortier chargé de fibres, nous sommes basés sur les résultats obtenus par Bentchikou. M **[109]**, résumés dans le tableau **(3.1)** suivant :

**Tableau 3.1 :** Concentration de fibre en fonction de (E/C). **[109]**

| % de fibre | 0 | 3 | 4.5 | 6 | 8 | 10 | 13 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| E/C | 0.5 | 0.74 | 0.87 | 1 | 1.18 | 1.3 | 1.64 | 1.86 |

À partir du tableau précédent Tableau **(3.1)** on représente le graphe qui donne la variation du pourcentage en fibre en fonction du rapport E/C

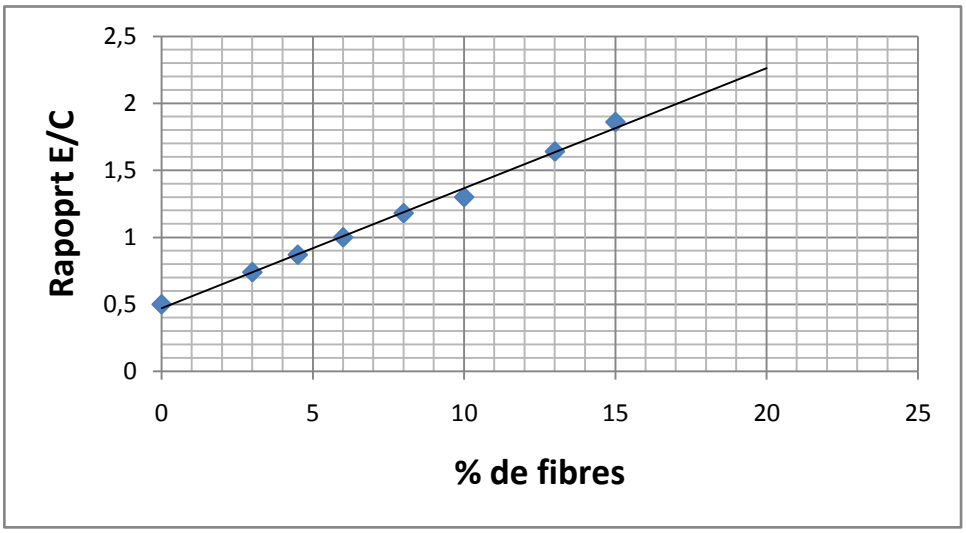



**Fig. 3.1 :** Courbe représentatif de concentration de fibre en fonction du rapport(E/C).

Pour déterminer les valeurs de (E/C théorique) qui correspondent aux pourcentages de fibres utilisées dans notre étude ( 0%, 5%, 10%, 15% et 20% en poids du ciment) et à partir de la F**ig. 3.1** , on fait la projection des pourcentages de fibres (0%, 5%, 10%, 15% et 20%) sur la droite E/C = f(% fibre) et on relève le rapport (E/C) théorique correspondant d'où on aura le tableau suivant **(tableau.3.2)**:

**Tableau.3.2 :** Concentration de fibre en fonction du rapport (E/C) théorique.

| % de fibre | 5% | 10% | 15% | 20% |
|---|---|---|---|---|
| E/C (théorique) | 0.92 | 1.3 | 1.87 | 2.28 |

Pour la détermination de (E/C) expérimental qui correspond à une résistance maximale on a procédé pour les quatre pourcentages en fibres à confectionner des éprouvettes en utilisant cinq

mélanges pour chaque pourcentage en fibres avec des valeurs de E/C autour des valeurs indiqués au tableau 3.2

Les pourcentages de fibres ainsi que les valeurs de (E/C) correspondant sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 3.3 :** différents concentration de fibre en fonction de (E/C) théorique.

| % de fibres | Nomenclature du composite | Rapport E/C estimé | Quantité d'eau (g) | Quantité de ciment (g) | Quantité de sable (g) | Quantité de fibre (g) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5% | C1-3 | 0.82 | 369 | 450 | 1350 | 22.5 |
| | C1-2 | 0.87 | 391.5 | | | |
| | C1-1 | 0.92 | 414 | | | |
| | C1-4 | 0.97 | 436.5 | | | |
| | C1-5 | 1.02 | 459 | | | |
| 10% | C2-3 | 1.2 | 540 | 450 | 1350 | 45 |
| | C2-2 | 1.25 | 562.5 | | | |
| | C2-1 | **1.3** | 585 | | | |
| | C2-4 | 1.35 | 607.5 | | | |
| | C2-5 | 1.4 | 630 | | | |
| 15% | C3-3 | 1.77 | 796.5 | 450 | 1350 | 67.5 |
| | C3-2 | 1.82 | 819 | | | |
| | C3-1 | 1.87 | 841.5 | | | |
| | C3-4 | 1.92 | 854 | | | |
| | C3-5 | 1.97 | 886.5 | | | |
| 20% | C4-3 | 2.18 | 981 | 450 | 1350 | 90 |
| | C4-2 | 2.23 | 1003.5 | | | |
| | C4-1 | 2.28 | 1026 | | | |
| | C4-4 | 2.33 | 1048.5 | | | |
| | C4-5 | 2.38 | 1071 | | | |

## 3.3. Expérimentation

### 3.3.1. Mode opératoire et condition de cure des éprouvettes :

#### *A.1. Protocol d'essai :*

A raison de trois éprouvettes par essai pour quatre compositions de pourcentage (5%,10%,15%,20% en poids de ciment), chaque pourcentage comprend cinq valeurs de (E/C) différente. Les éprouvettes sont testées à 7 jours pours les essais mécanique de compression et de traction par flexion, le nombre d'essai effectué concernant cette partie est de :

- 60 essais de traction par flexion.
- 120 essais de compression.

#### *A.2.* Préparation des mélanges

Tous les mélanges sont préparés dans les mêmes conditions dans une salle maintenue à une température de 20°C ± 2C° et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%. Le mélange est effectué par malaxage pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1, au moyen du malaxeur spécifié par la norme NF P 15-411 figure (**3.2),** selon la procédure cité dans le paragraphe **A.2.1 et A.2.2 (page 76)**:



**Fig.3.2** : Malaxeur à mortier

### A.2.1. Mortier témoin (sans fibres)

Les diverses opérations de préparation des mortiers chargé de fibres suivent l'ordre décrit ci-après :

- Verser l'eau dans la cuve de malaxeur,
- Verser le liant,
- Mettre le malaxeur en fonctionnement pendant 1 min (vitesse lente),
- Introduire le sable dans la cuve pendant les 30 dernières secondes,
- Mettre le malaxeur à la vitesse rapide pendant 30 secondes supplémentaire,
- Arrêter le mouvement pendant 1 min et 30 secondes; racler les parois et le fond du récipient pendant les 15 premières secondes de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage.
- Laisser reposer pendant 1min et 15 seconds restants,
- Reprendre le mouvement de malaxeur pendant 60 secondes à vitesse rapide

### A.2.2. Mortier composite (avec fibres)

Les diverses opérations de préparation des mortiers chargé de fibres suivent l'ordre décrit ci-après :

- Verser l'eau dans la cuve de malaxeur,
- Verser les fibres,
- Mettre le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 10 à 15 min jusqu'à la séparation des fibres,
- Arrêter le malaxeur,
- Verser le liant,
- Mettre le malaxeur en fonctionnement pendant 1 min (à vitesse lente),
- Introduire le sable dans la cuve pendant les 30 dernières secondes,
- Mettre le malaxeur à la vitesse rapide pendant 30 secondes supplémentaire,
- Arrêter le mouvement pendant 1 min et 30 secondes; racler les parois et le fond du récipient pendant les 15 premières secondes de façon qu'aucune partie du mortier n'échappe au malaxage.
- Laisser reposer pendant 1min et 15 seconds restants,
- Reprendre le mouvement de malaxeur pendant 60 secondes à vitesse rapide

## A.3. Mise en place du mortier composite :

La norme [EN 196-1] décrit d'une manière détaillée le mode opératoire.

Même mode de mise en place à suivre pour les deux gâchés (mortier sans fibres et mortier chargé en fibres). Le mortier ou le composite préparé est remplit dans des moules prismatiques 4x4x16 cm. Le serrage du mortier dans ces moules est obtenu en introduisant le mortier ou le composite en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois **(Fig.3.3)**. En suite, le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans une salle à 20°C et 65% d'hygrométrie relative pendant 24 heures pour être démoulé après.

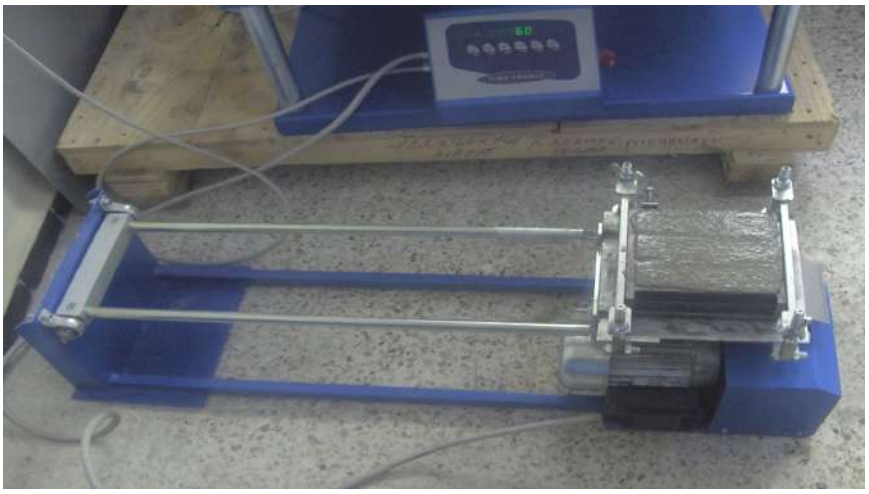


**Fig.3.3. Table à chocs**

## A.4. Conservation des éprouvettes

Après démoulage, les éprouvettes destinées aux essais mécaniques vont être immergées dans l'eau à 20±1°C pendant 7 jours avant l'écrasement.

## 3.4. ESSAIS MECANIQUES :

Les essais habituellement utilisés pour évaluer la résistance du matériau sont la compression et la traction par flexion.

### 3.4.1. Essai de traction par flexion :

L'allure des courbes de la résistance en traction en fonction de E/C pour l'âge 7 jours est donnée sur les figure : (3.4) ;(3.5) ;(3.6) ;(3.7).respectivement pour les composites à 5%, 10%, 15% et 20% de fibres

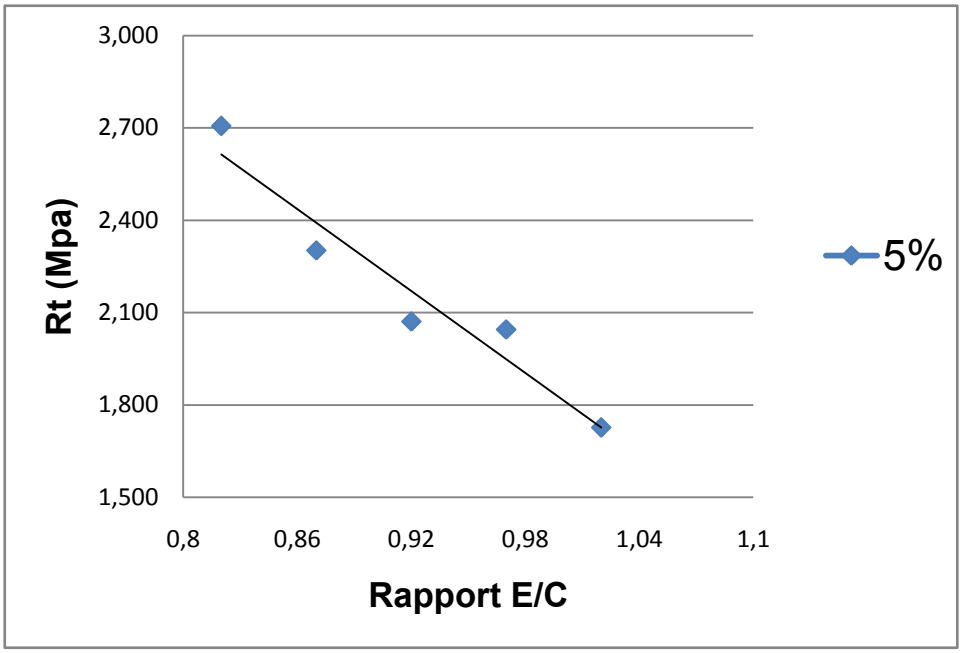



**Fig.3.4** : Effet de E/C sur la résistance en traction du composite à 7 jours pour une fraction de 5% de fibres.

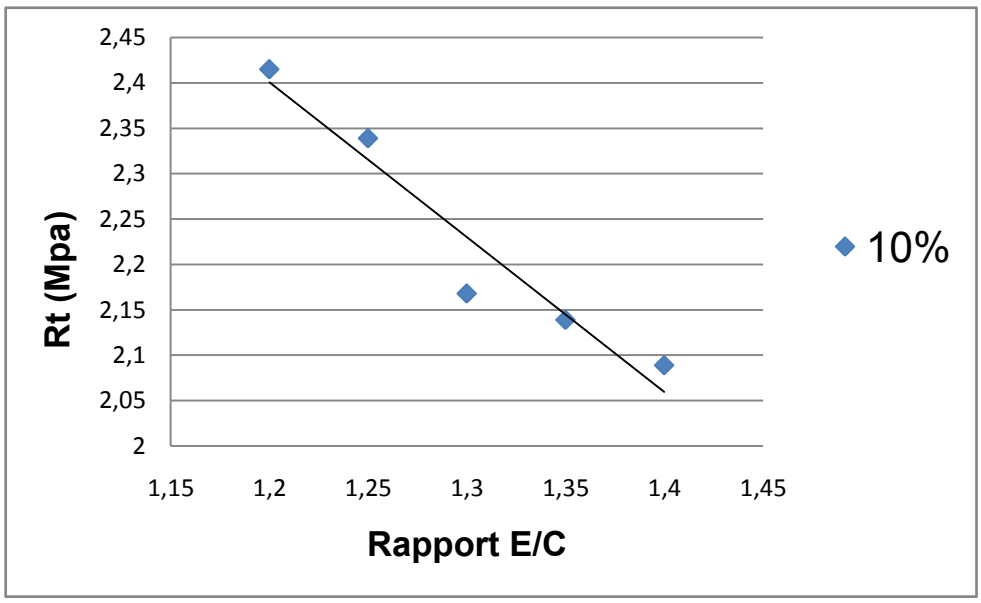



**Fig.3.5** : Effet de E/C sur la résistance en traction du composite à 7 jours pour une fraction de 10% de fibres.

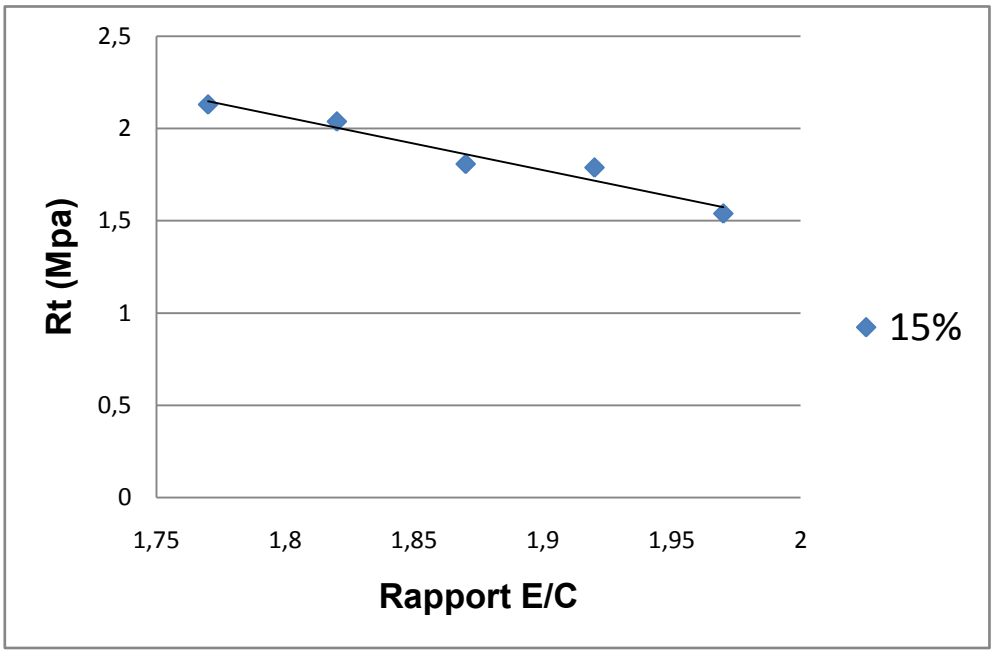



**Fig.3.6**: Effet de E/C sur la résistance en traction du composite à 7 jours pour une fraction de 15% de fibres

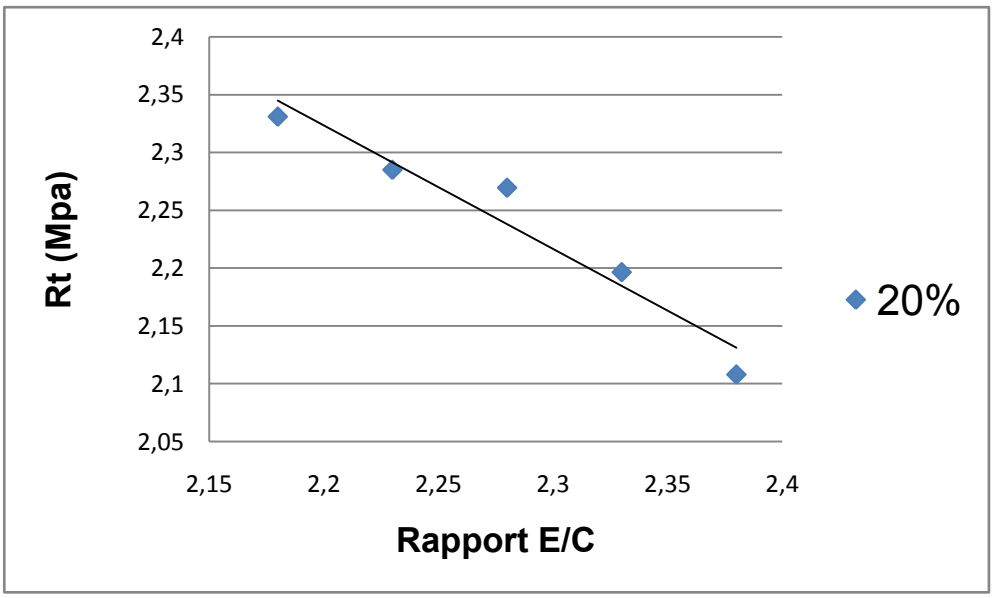



**Fig.3.7** : Effet de E/C sur la résistance en traction du composite à 7 jours pour une fraction de 20% de fibres.

### 3.4.2. Essai de compression :

Nous donnons sur les figures **(3.8) ;(3.9) ;(3.10)** et **(3.11)** les courbe de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C à l'âge de 7 jours, respectivement pour les composites à 5%, 10%, 15% et 20% de fibres

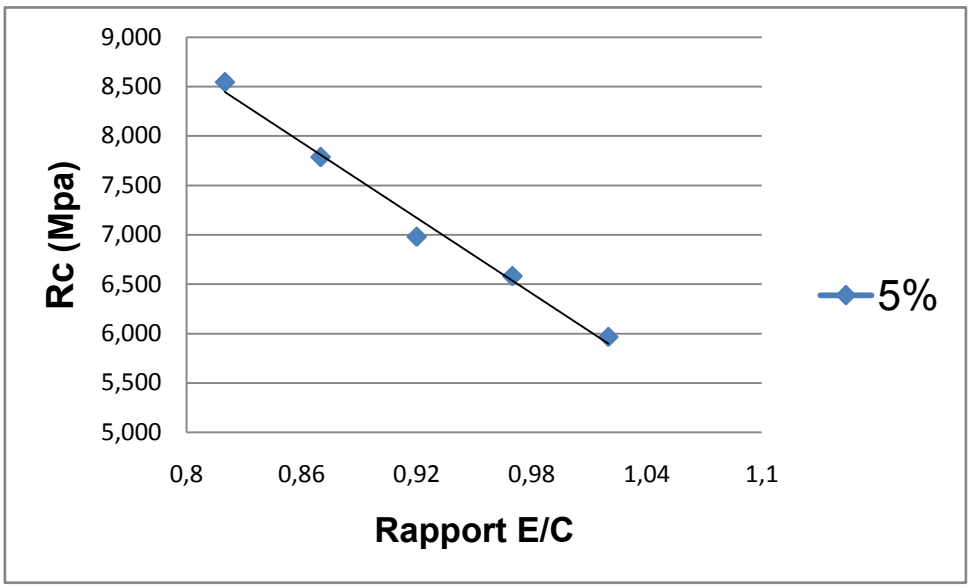



**Fig.3.8** : Effet de E/C sur la résistance en compression du composite à 7 jours pour une fraction de 5% de fibres.

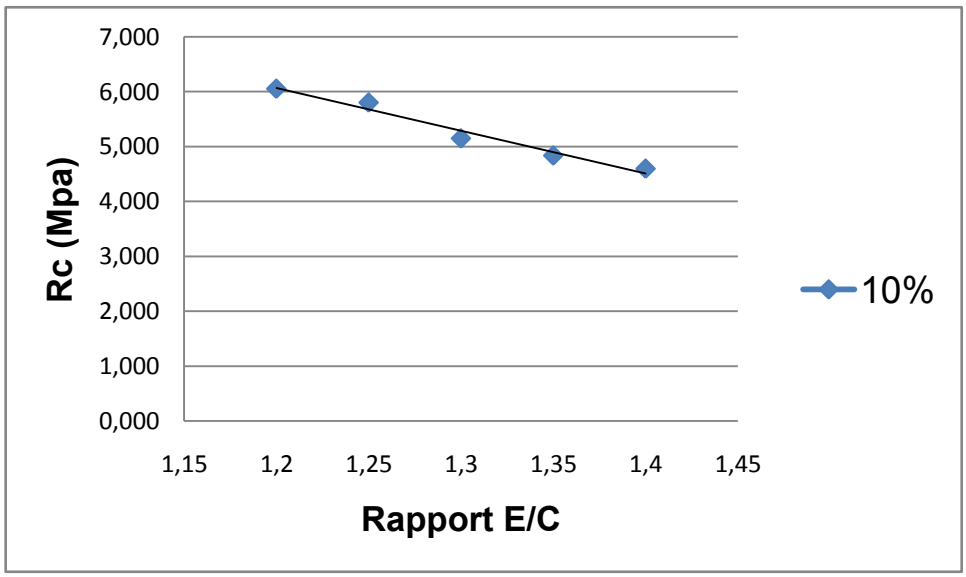



**Fig.3.9** : Effet de E/C sur la résistance en compression des composite à 7 jours pour une fraction de 10% de fibres.

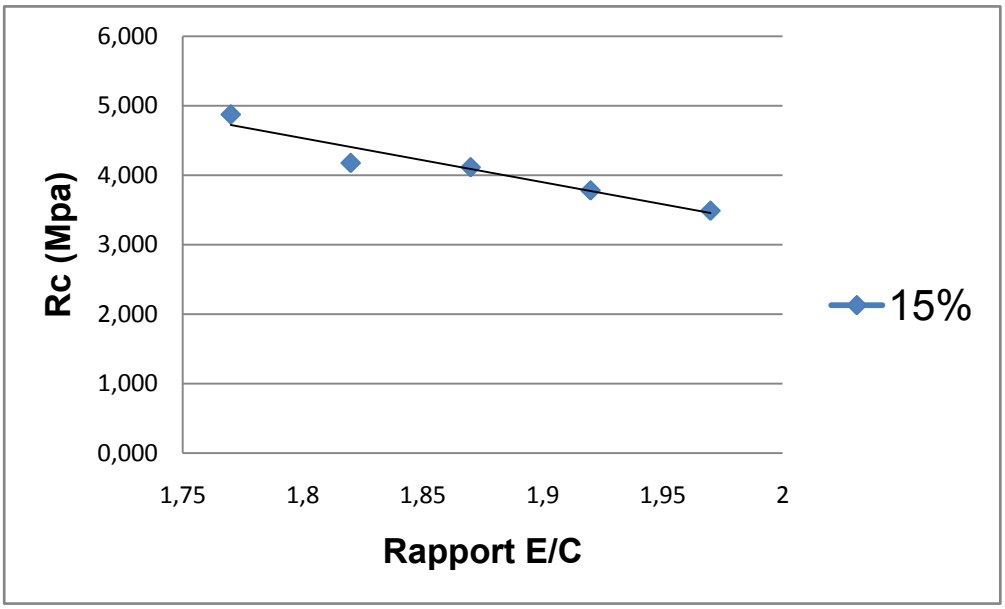



**Fig.3.10 :** Effet de E/C sur la résistance en compression du composite à 7 jours pour une fraction de 15% de fibres.

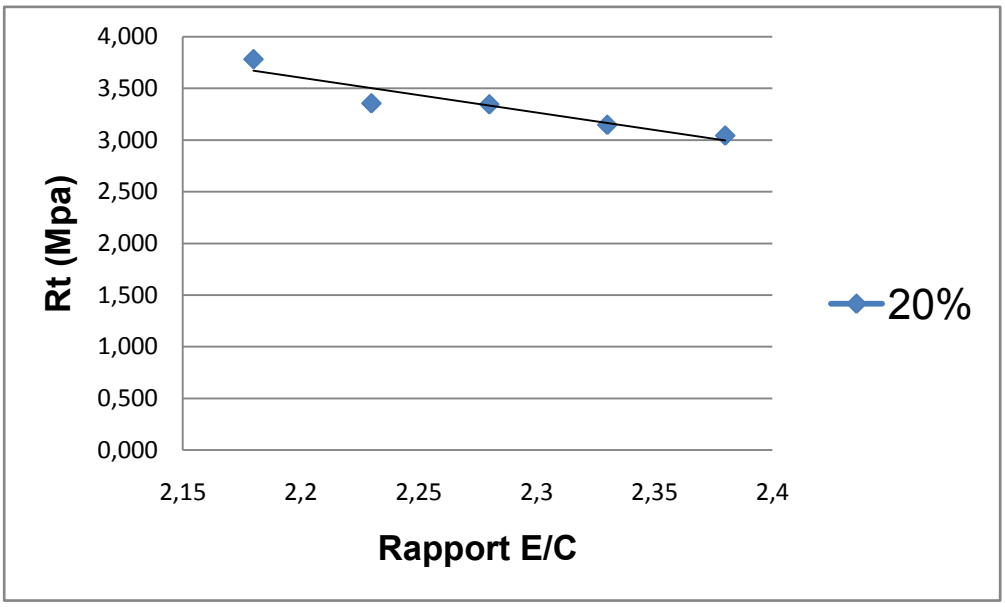



**Fig.3.11 :** Effet de E/C sur la résistance en compression du composite à 7 jours pour une fraction de 20% de fibres.

## 3.5. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS :

Pour chaque teneur en fibres (5%,10%,15% et 20%), le rapport E/C a été varié pour obtenir la résistance maximale. D'après les figures **(3.4 - 3.11)** donnant la variation des résistances en fonction de E/C, on remarque que la résistance en traction et en compression des composites diminue en fonction de l'augmentation de rapport E/C pour les différents pourcentages en fibre, et que la résistance maximale pourra être trouvé pour des valeurs de E/C inferieures à celles indiquées dans le **tableau 3.2**

## 3.6. CONCLUSION :

On adopte pour chaque pourcentage la valeur qui correspond à une valeur de résistance à la compression et à la traction maximale avec une ouvrabilité convenable.

Le tableau 3.4 résume les résultats du rapport E/C (adopté) donnant le maximum de résistance mécanique pour les quatre compositions.

**Tableau 3.4:** caractéristiques mécaniques des composites en fonction de rapports E/C expérimentale pour chaque % en fibre.

| % de fibre | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---|---|---|---|---|
| E/C (adopté) | 0.82 | 1.2 | 1.77 | 2.18 |
| **Rc max (MPa)** | 8.545 | 6.052 | 4.875 | 3.781 |
| **Rt max (MPa)** | 2.706 | 2.415 | 2.129 | 2.331 |

Avec ces valeurs de E/C qui donne un maximum de résistance mécanique on regroupe dans le tableau 3.5 les constituants pour 1 Kg du composite (à l'état frais), dans le tableau 3.6 les constituants pour 1 $m^3$ à l'état frais

**Tableau.3.5 :** Constituant du composite pour un kilogramme.

| % de fibre | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---|---|---|---|---|
| **E/C (adopté)** | 0.82 | 1.2 | 1.77 | 2.18 |
| **Ciment (g)** | 268.77 | 223.63 | 194.11 | 172.68 |
| **Sable (g)** | 805.32 | 670.91 | 582.34 | 517.98 |
| **Eau (g)** | 220.39 | 268.39 | 343.57 | 376.38 |
| **Fibre (g)** | 13.46 | 22.37 | 29.13 | 34.53 |

**Tableau.3.6** : Constituant du composite pour 1 mètre cube de volume (à l'état frais).

| % de fibre | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---|---|---|---|---|
| **E/C (adopté)** | 0.82 | 1.2 | 1.77 | 2.18 |
| **Ciment (Kg)** | 494.5 | 404.76 | 339.95 | 293.87 |
| **Sable (Kg)** | 1483.5 | 1214.28 | 1019.86 | 881.51 |
| **Eau (Kg)** | 405.48 | 485.76 | 601.71 | 640.54 |
| **Fibre (Kg)** | 24.77 | 40.5 | 51.02 | 58.77 |

# Deuxième Partie

## *Influence des cycles séchage - humidification sur les performances du composite*

## 3.7. INTRODUCTION :

Beaucoup d'attentions ont été accordés pour étudier les performances à long terme des composites renforcés de fibres de cellulose de point de vue durabilité liés aux propriétés mécaniques. Bien que les propriétés physiques telles que la perméabilité et la porosité liée au retrait et au gonflement de la matrice du ciment ont été montré pour fournir une bonne mesure de la durabilité.

Après avoir définit la composition de notre mortier composite, une deuxième étude expérimentale sera exposé dans ce chapitre pour déterminer l'influence des cycles de séchage-humidification ainsi que la teneur en fibre sur les performances mécaniques, physiques et la conductivité thermique du composite, en exposant les échantillons à différents teneur en fibres à plusieurs cycles de séchage-mouillage (5,10, 15, et 25 cycles).

### 3.7.1. Expérimentation :

- ***Protocol d'essai :***

Le nombre d'essai effectué concernant la deuxième partie est de :

- 75 essais de traction par flexion.
- 150 essais de compression.
- 50 essais de variations dimensionnelles.
- 50 essais thermiques. (200 éprouvettes à réaliser).

**Établit selon la répartition suivante :**

1- Trois éprouvettes par essai pour cinq compositions (0, 5, 10, 15, 20%) et cinq cycles (0, 5, 10, 15, 25 cycles) testé à 78 jours pours les essais mécaniques de compression et de traction par flexion. (éprouvettes 4x4x16).

2- Deux éprouvettes par essai pour les essais de variation dimensionnelles (retrait, gains et perte de masse). (éprouvette 4x4x16cm)

3- deux éprouvettes par essai pour cinq compositions (0%,5%,10%,15%,20%) en fibres et cinq cycles (0, 5, 10, 15, 25cycles) pour les essais thermiques (conductivité thermique et chaleur spécifique). (éprouvette 8x4x16 cm)

- **Mode opératoire et condition de cure des éprouvettes :**

***a.1-Mortiers sans fibres :***

La séquence de malaxage pour le mortier témoin est représentée dans le tableau suivant (Tableau3.8) :

**Tableau3.8** : Opération de malaxage de mortier sans fibre

<table>
<tr><td>Opérations</td><td>Introduction Eau + ciment</td><td>Malaxage de l'ensemble</td><td>Introduction du sable</td><td>Continuer à mélangé</td><td>Raclage de la cuve</td><td>Laisser reposer</td><td>Malaxage</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Durée</td><td rowspan="2">-</td><td>Les 30 premières seconde</td><td>Pendant les 30 secondes suivantes</td><td rowspan="2">30 secondes supplémentaire</td><td>15 s</td><td>1 min 15 s</td><td rowspan="2">60 s</td></tr>
<tr><td colspan="2">60 s</td><td colspan="2">1 min 30 s</td></tr>
<tr><td>État du malaxeur</td><td>Arrêt</td><td colspan="2">Vitesse lente</td><td>à Vitesse rapide</td><td colspan="2">Arrêt</td><td>vitesse rapide</td></tr>
</table>

***a.2-Mortiers chargé de fibres***

La même composition que le mortier témoin a été utilisée pour la confection des mortiers chargés de fibres cellulosiques de récupération. Au ciment et au sable, on rajoute une quantité de fibres variant entre 5 et 20% en poids du ciment.

La préparation de la gâchée se fait de la même manière que celle décrite pour le témoin, seulement à préciser que dans la première phase et après avoir pesé les fibres, on les verse dans le malaxeur avec de l'eau nécessaire à préparer cette gâchée pour les séparer pendant un temps qui correspond à 15 min.

La préparation de la gâchée se fait en plusieurs étapes consécutives (tableau3.9)

**Tableau 3.9** : Opération de malaxage de composite chargé de fibre

<table>
<tr><td>Opérations</td><td>Eau + Fibres</td><td>Malaxage (séparer les fibres).</td><td>verser du ciment</td><td>Malaxage de l'ensemble</td><td>verser du sable</td><td>Continuer à mélangé</td><td>Raclage de la cuve</td><td>Laisser reposer</td><td>Malaxer</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Durée</td><td rowspan="2">-</td><td rowspan="2">15 min</td><td rowspan="2">-</td><td>Les 30 premières seconde</td><td>Pendant les 30 secondes suivantes</td><td rowspan="2">pendant 30 secondes</td><td>15 s</td><td>1 min 15 s</td><td rowspan="2">60 s</td></tr>
<tr><td colspan="2">60 s</td><td colspan="2">1 min 30 s</td></tr>
<tr><td>État du malaxeur</td><td>Arrêt</td><td>Vitesse lente</td><td>Arrêt</td><td colspan="2">Vitesse lente</td><td>à Vitesse rapide</td><td colspan="2">Arrêt</td><td>vitesse rapide</td></tr>
</table>

Le mode opératoire pour la confection des éprouvettes ainsi que sa mise en place pour le mortier témoin (mortier sans fibre) et le composite (mortier chargé de fibre) et clairement expliqué dans le chapitre 3, paragraphe **3.3.1 [A.2.1 et A.2.2]).**

- **Conservation des éprouvettes :**

Après démoulage, les éprouvettes font subir deux types de cure suivant les essais auxquels elles seront destinées :

- 28 jours de cure dans l'eau à 20±1°C pour les éprouvettes destinées aux cycles de séchage –humidification : éprouvettes sur lesquelles on fait des essais de variation dimensionnelle (retrait –gonflement) et Variation pondérale (perte et gain de masse), résistance à la compression et à la flexion et les essais thermiques.
- Pour les éprouvettes de références qui ne vont pas subir les cycles de séchage-humidification, elles doivent rester dans l'eau à 20±1°C jusqu'au moment de l'essai (78 jours).
- Pour les essais de retrait, les éprouvettes sont laissées après démoulage d restent à l'air du laboratoire.

Pour que toutes les éprouvettes de toutes les compositions auront le même temps d'hydratation, et afin d'éliminer les effets de l'âge sur la résistance, on assure quelle séjournent tous pendant 78 jours dans le milieu de cure quel que soit le nombre de cycle effectué (mouillage-séchage).

### 3.7.2. Cycle humidification-séchage utilisé :

Le cycle de séchage mouillage à suivre dans notre étude est similaire au cycle réalisé par B.J. Mohr *et al* **[76]**. Ce cycle est adopté pour qu'on puisse comparer les résultats de notre étude
Le cycle d'humidification-séchage **(Fig.3.12)** se résume à :

- ✓ 23 h et 30 min de séchage dans une étuve à 65 ± 5 °C.
- ✓ Refroidissement à l'air de laboratoire à 22 ± 5 °C et 37 ± 5% d'humidité relatif pour 30 min.
- ✓ 23 h et 30 min de trempage dans l'eau à 20 ± 2 °C.
- ✓ Repos pendant 30 min à 22 ± 5 C et 37 ± 5% d'humidité relatif.

La phase de repos des éprouvettes entre l'étuvage et le trempage dans l'eau (mouillage) à été envisagée pour éviter le choc thermique et les microfissurations ultérieures.

Les échantillons ont été exposés à 0, 5, 10, 15 et 25 cycles avant les essais mécaniques afin de déterminer comment les propriétés mécaniques de ces composites à base de fibres de papier recyclé sont affectées après différents nombres de cycles d'humidification-séchage.

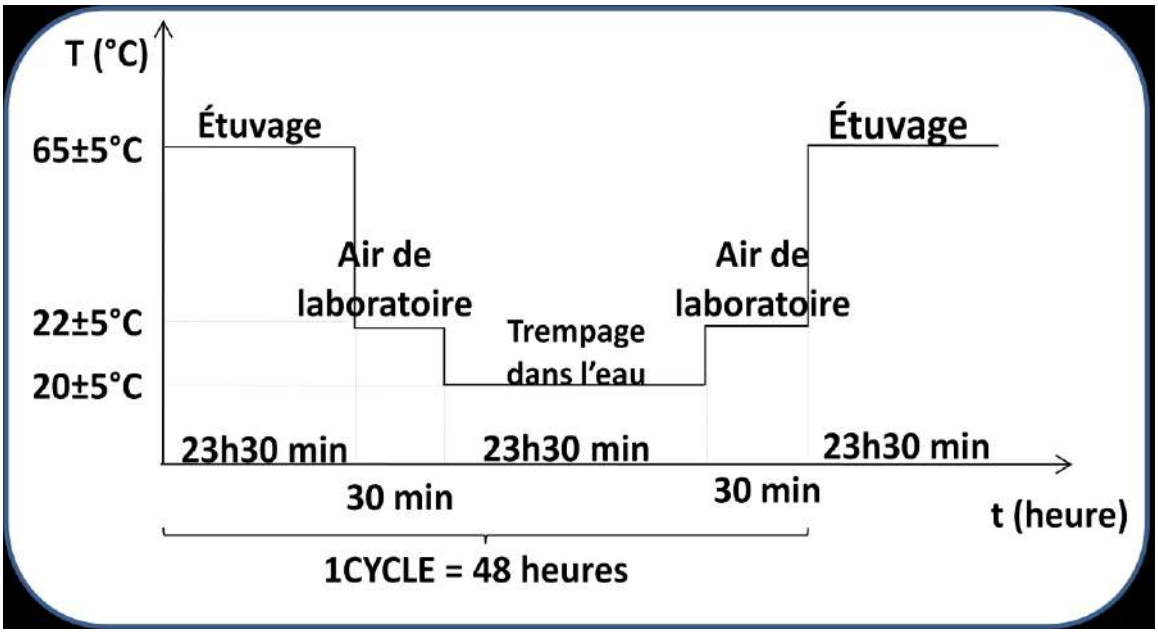



**Fig.3.12**. Schématisation des étapes d'1 cycle de séchage/humidification.

### 3.7.3. Essai sur composite durcis

Dans cette étude, les mesures de variations dimensionnelles, le gain et la perte de masse, les essais de compression et de traction par flexion, ainsi que les essais thermiques ont été utilisées pour quantifier les performances mécaniques de notre matériau composite.

#### a- Essais mécanique :

#### a1- Compression simple :

Nous donnons sur les figures **(3.13)** et **(3.14)** respectivement les courbes de la résistance à la compression en fonction de la fraction des fibres incorporées et en fonction de nombre de cycle de séchage-mouillage réalisé.

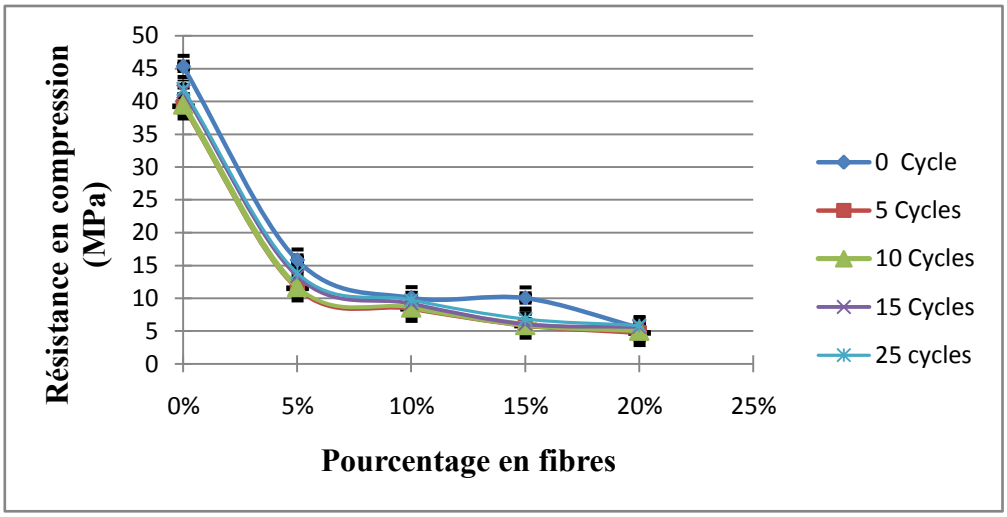



**Fig.3.13** : Variation de la résistance en compression du composite en fonction du pourcentage en fibres

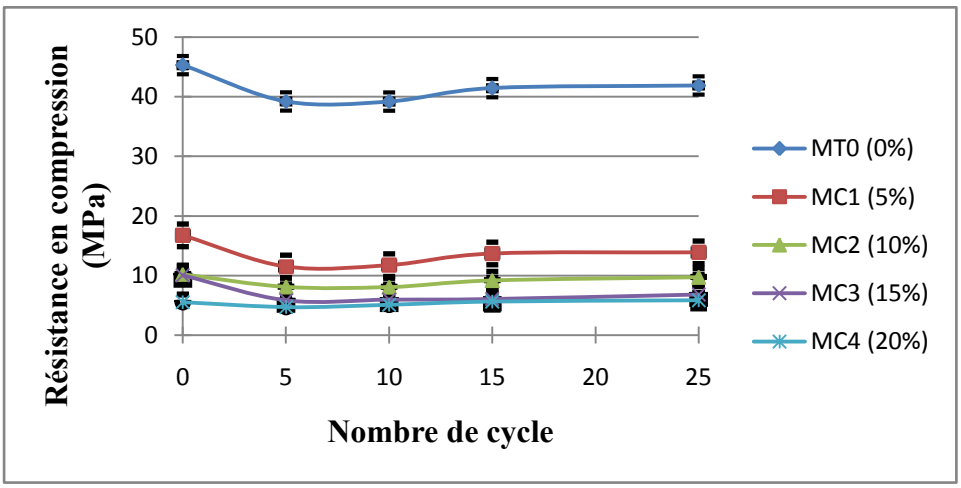



**Fig.3.14 :** Variation de la résistance en compression du composite en fonction du nombre de cycle séchage-humidification.

### a2- Traction par flexion

L'allure des courbes de la résistance en traction par flexion en fonction de la fraction des fibres incorporées et en fonction du nombre de cycles est donnée dans les figures **(3.15)** et **(3.16)** respectivement

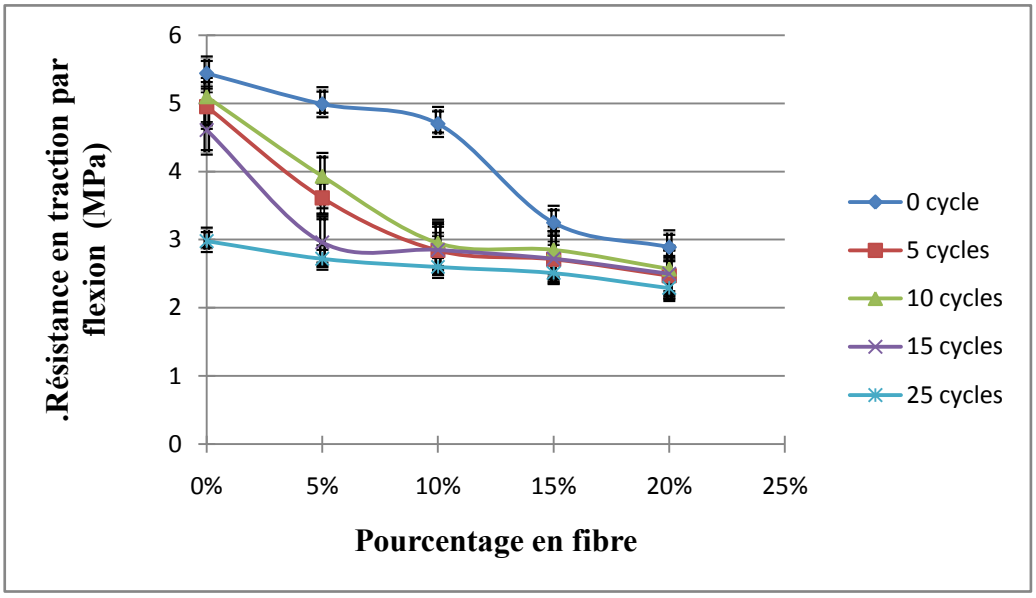



**Fig.3.15** : Variation de la résistance en traction par flexion du composite en fonction du pourcentage en fibres.

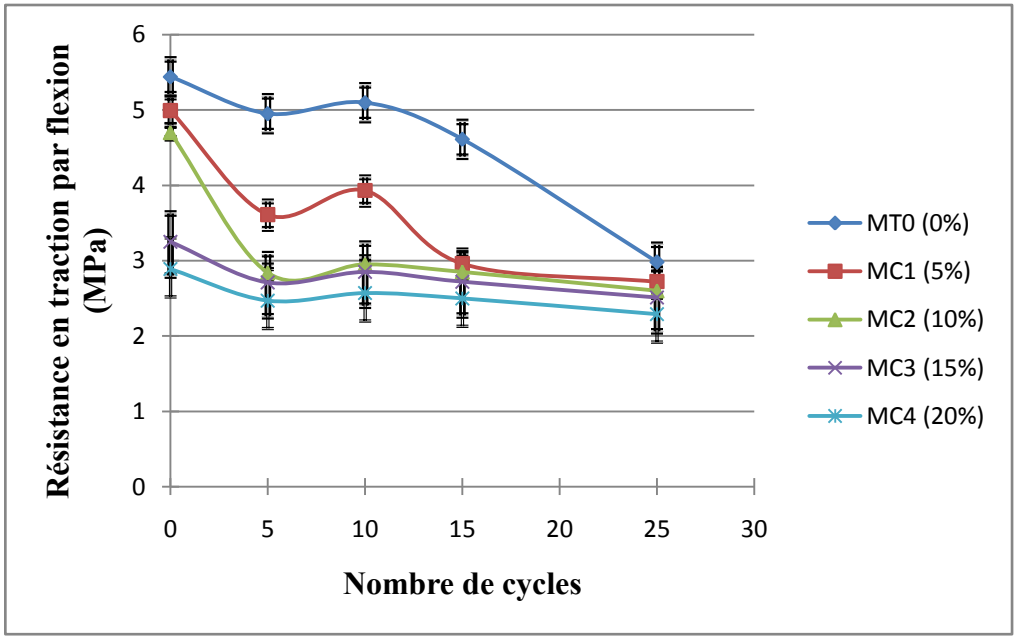



**Fig.3.16** : Variation de la résistance en traction par flexion du composite en fonction du nombre de cycle séchage-humidification

## a3. Interprétation des résultats :

### a.3.1. Influence du dosage en fibres sur les performances mécanique

D'après la figure **(3.13)** on constate que la résistance en compression diminue avec l'augmentation du pourcentage en fibres et que le mortier témoin (0% de fibre) reste le plus résistant. Cette constatation est en accord avec les résultats de Bentchicou. M. ***et al*** **[82],** cité dans la littérature et qui ont utilisé les fibres de cellulose pour le renforcement du mortier, ils affirment que l'ajout de fibres végétales diminue la résistance en compression. Cela est expliqué par le fait que l'incorporation des fibres dans la matrice du mortier augmente le rapport E/C, l'évaporation de cette eau augmente le volume des vides et diminue la compacité du mortier, d'où une diminution de la résistance en compression.

Pour ce qui est de la résistance en traction par flexion, les résultats d'essais représentés sur la figure**. (3.15)** montrent que l'addition des fibres diminue la résistance en traction par flexion, les mêmes résultats ont été trouvés par AJ. Morano *et al* **[69]** qui ont trouvé que l'ajout des fibres de fique en différents pourcentages diminue la résistance en compression et la résistance en traction de plus en plus que le pourcentage en fibres est augmenté.

### a.3.2.Influence du nombre de cycle sur les performances mécaniques :

Concernant l'influence des cycles séchage-mouillage sur les performances mécaniques, on remarque à partir de la figue **(3.14)** que la résistance en compression augmente légèrement avec le nombre de cycle séchage humidification pour une même composition, elle peut atteindre pour le $10^{ème}$, $15^{ème}$ et $25^{ème}$ cycle une augmentation par rapport au $5^{ème}$ cycle respectivement de :

- 0.62%, 4.98% et 5.87% pour une concentration de 0% en fibre.
- 1.39%, 11.76% et 14.80% pour une concentration de 5% en fibre.
- 2.28% 7.84% et 13.20% pour une concentration de 10% en fibre.
- 1.19%, 2.19% et 9.87% pour une concentration de 15% en fibre.
- 6.48%, 13.82% et 15.70% pour une concentration de 20% en fibre.

En se basant sur les résultats de Yingzi Yang *et al* **[64]** qui a trouvé que l'augmentation du nombre de cycle rend le matériau moins poreux et plus dense, on peut conclure que la formation d'ettringite résultant des cycles d'humidification-séchage est accompagnée par une diminution de la porosité et par une augmentation concomitante de la résistance en compression du matériau.

D'après la figure **(3.16),** on remarque que la résistance en traction par flexion diminue avec l**e** nombre de cycle pour la même composition jusqu'à 25 cycles, mais il y a une légère augmentation au 10$^{ème}$ cycle pour toutes les composites. Par rapport à la 5$^{ème}$ augmentation peut atteindre les valeurs de :

- 2.68% pour une concentration de 0% en fibre.
- 6.41% pour une concentration de 5% en fibre.
- 2.34% pour une concentration de 10% en fibre.
- 4.30% pour une concentration de 15% en fibre.
- 3.46% pour une concentration de 20% en fibre

D'après B.J. Mohr *et al* **[76],** la minéralisation complète de la fibre ne peut avoir lieu qu'au-delà d'environ 10 cycles de mouillage-séchage, qui s'accompagne par une légère augmentation de la résistance en traction par flexion au 10$^{ème}$ cycle mais au-delà la chute reprend jusqu'à 25 cycles.

La succession et la poursuite des cycles d'humidification-séchage conduit à une formation de plus en plus d'ettringitte qui provoque le gonflement et l'endommagement de l'éprouvette en créant des microfissures.

La diminution de la résistance en flexion est due probablement à la fracture de la fibre, Cela suppose que, après 25 cycles séchage-mouillage, la fibre devient cassante, les mêmes résultats ont été trouvés par B.J Mohr *et al* **[76]**, qui ont prouvé qu'après 25 cycles de séchage-humidification, tous les composites, ont montré des pertes significatives des propriétés mécaniques.

### b- Essais physiques :

### b.1. Variation dimensionnelles :( Retraits et gonflements)

Les fluctuations de la teneur en eau peuvent entraîner des variations dimensionnelles appelées retrait ou gonflement, selon que l'on a affaire à une augmentation ou à une diminution de volume.

### b.1.1. Retrait des éprouvettes conservées à l'air.

Sur les figures**. (3.17)** et **(3.18),** on représente respectivement le retrait en fonction de l'âge pour différents dosages en fibres, et le retrait en fonction de la concentration en fibre pour différents âges.

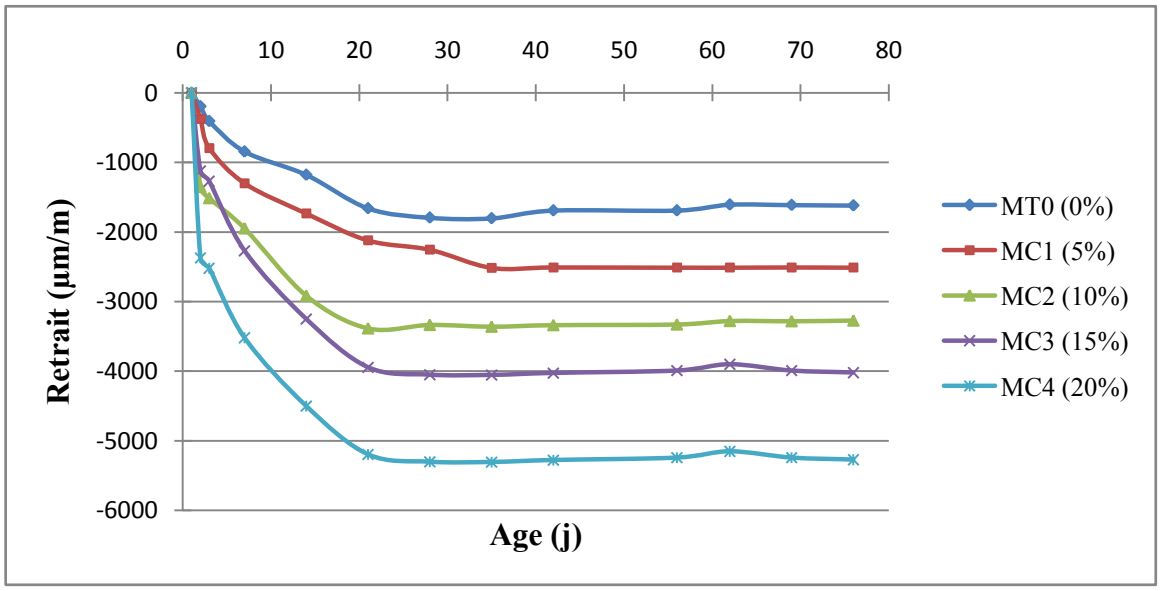



**Fig.3.17.** Retrait en fonction de l'âge pour les différentes concentrations (éprouvettes conservées à l'air).

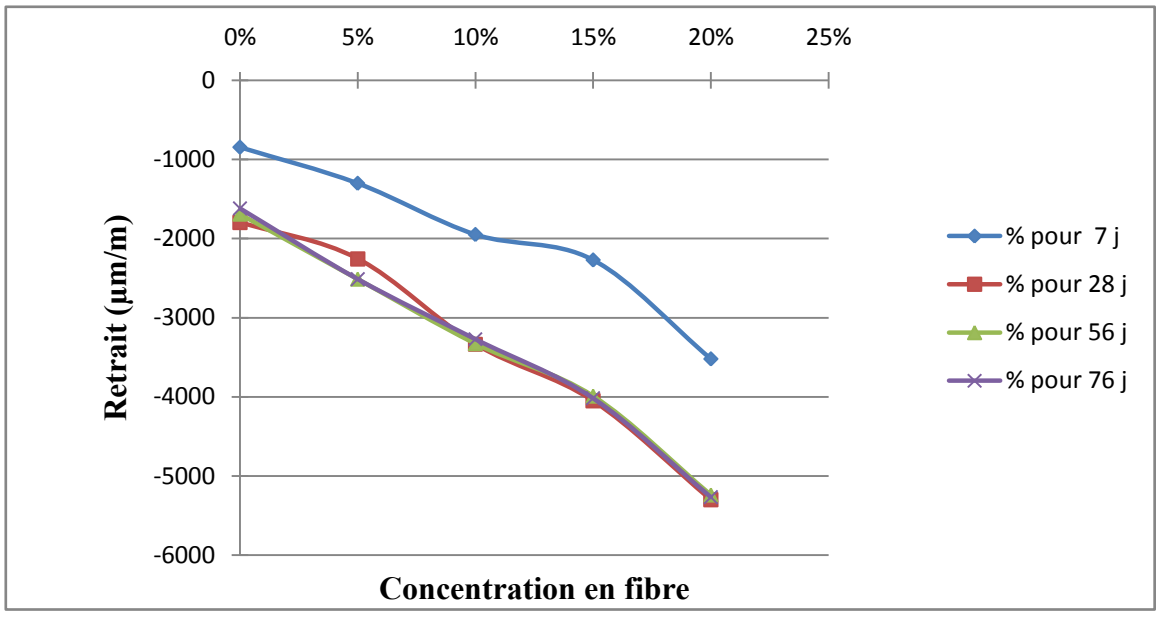



**Fig.3.18**. Variation de retrait en fonction de la concentration pour différents âges (éprouvettes conservées à l'air).

**b.1.2.Variations dimensionnelles des Éprouvettes soumis aux cycles séchage humidification.**

Sur les figures **(3.19)**, **(3.20)**, **(3.21)** et **(3.22)** on représente respectivement les variations dimensionnelles en fonction de nombre de cycles pour différentes concentrations en fibre.

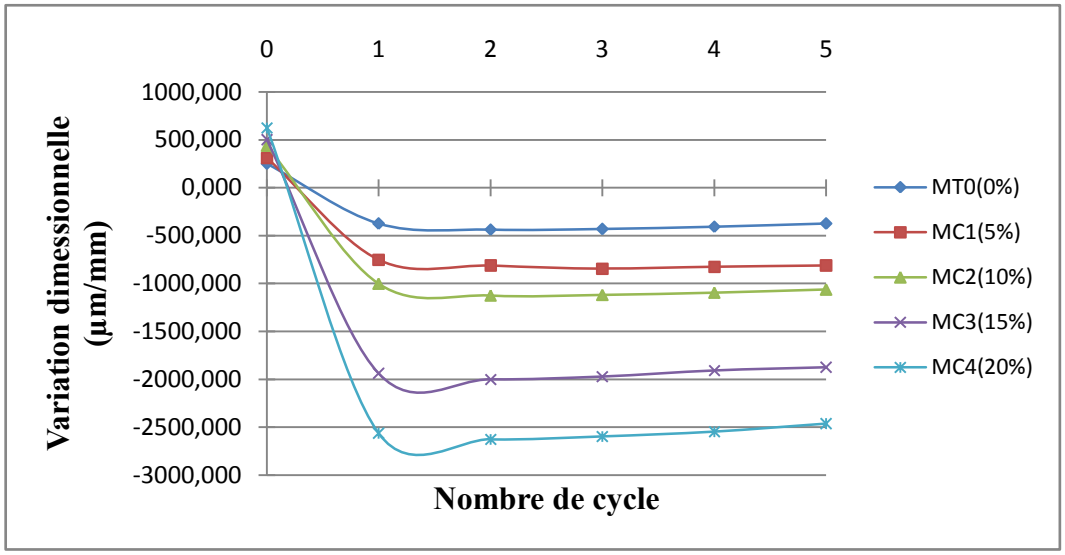



**Fig.3.19**: Variation dimensionnelle en fonction du nombre de cycle (5 cycles) pour les différentes concentrations.

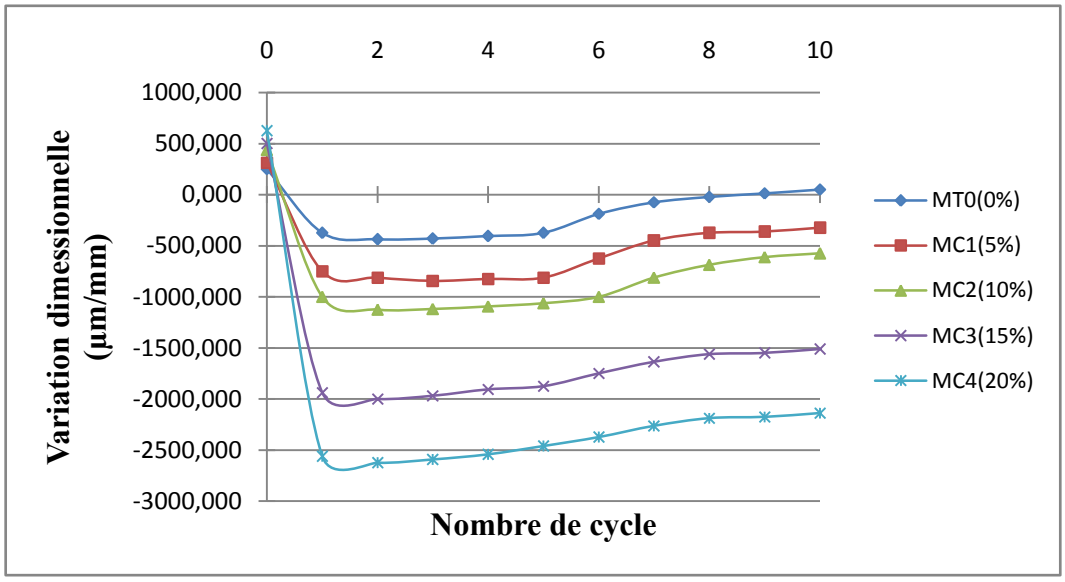



**Fig.3.20.** Variation dimensionnelle en fonction du nombre de cycle (10 cycles) pour les différentes concentrations.

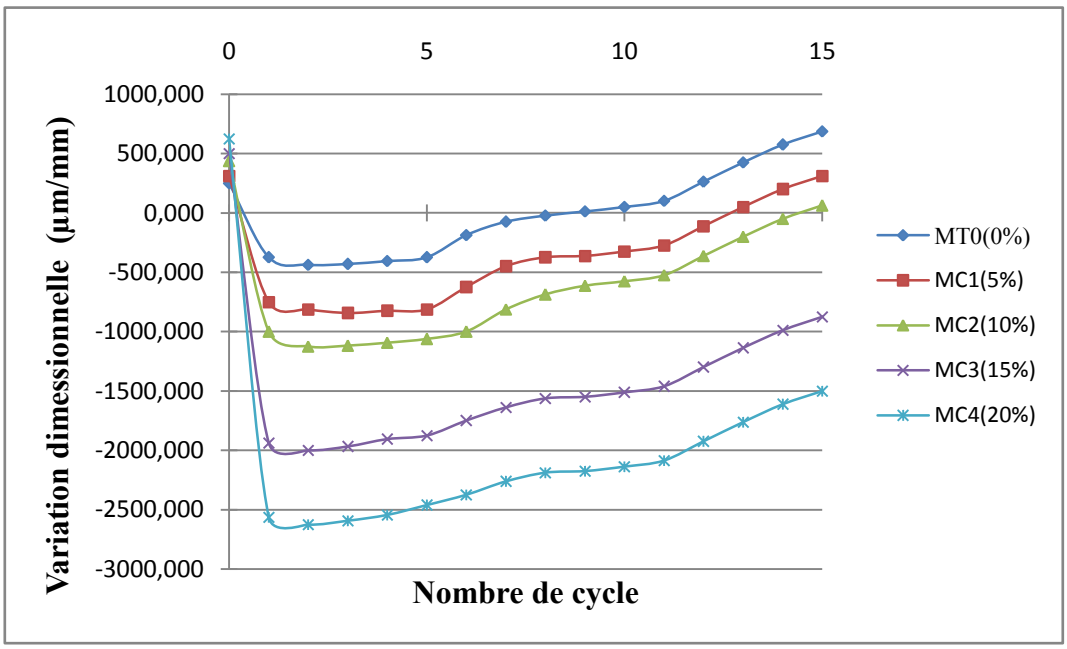



**Fig.3.21.** Variation dimensionnelle en fonction du nombre de cycle (15cycles) pour les différentes concentrations

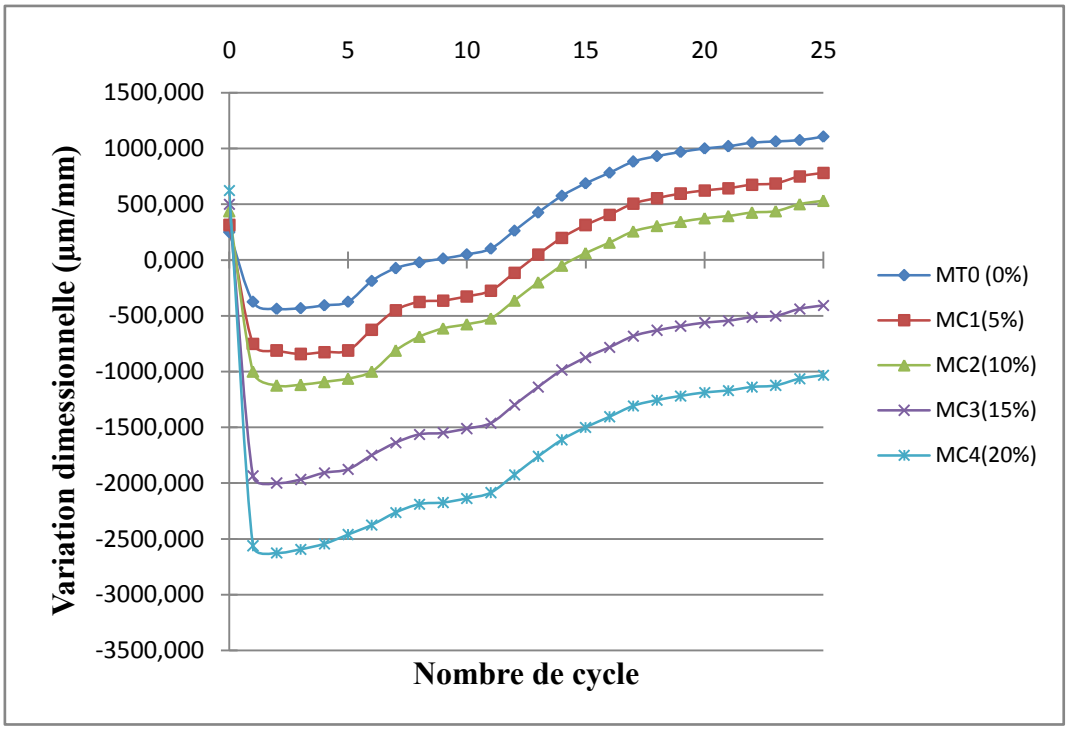



**Fig.3.22**. Variation dimensionnelle en fonction du nombre de cycle (25cycles) pour les différentes concentrations.

### b.1.3. Interprétation des résultats

Il est clair d'après les figures **(3.17 et 3.18)** que le retrait croit avec l'augmentation du dosage en fibre et par conséquent par l'augmentation du rapport E/C. D'après la figure (**3.17)** On voit que les courbes du retrait s'aplatissent en s'approchant de l'âge de 28 jours.

Pour l'influence des cycles de séchage humidification sur les variations dimensionnelles des éprouvettes, et d'après les figure **(3.20) ,(3.21),(3.22)** et **(3.23),** on remarque que les graphes peuvent être décomposés en deux parties, la première représentant le retrait qui augmente jusqu' à la fin du 1$^{er}$ cycle où débute la deuxième partie qui montre la diminution de retrait et la manifestation du gonflement des éprouvettes et cela pour toutes les compositions sous différents cycles.

Ce résultat est confirmé par Mohr *et al.* [**75]** qui ont trouvé que le gonflement des éprouvettes survient après deux cycles mouillage- séchage, ce gonflement est la conséquence de la formation d'ettringite dans les vides créés par le rétrécissement des fibres (caractère hydrophile de la fibre de cellulose) lors de séchage-mouillage successive.

### b.2. Variations pondérales :( gain et perte de masse).

Pour bien expliquer le retrait des éprouvettes conservées à l'air et les variations dimensionnelles des éprouvettes subissant les cycles de séchage mouillage, on présente dans cette partie les résultats de variations massiques des éprouvettes durant cette période.

Pour évaluer la quantité d'eau absorbée ou perdue par le matériau , on pèse l'éprouvette au démoulage et durant le déroulement des cycles pour les éprouvettes soumises aux cycles séchage- mouillage et pendant la mesure du retrait pour les éprouvettes conservées à l'air , la mesure se fait à l'aide d'une balance électronique de précision égale à 1/100 grs .

La valeur de la perte de masse ainsi que le gain de masse est évaluée par la mesure du rapport entre la différence de masse de l'éprouvette (entre le démoulage et l'âge considéré) à la masse initiale.

### b.2.1. Éprouvettes conservées à l'air (sans cycle).

Les figures **(3.23)** et **(3.24)** donnent respectivement les courbes de perte de masse en fonction du temps pour les différentes concentrations en fibres et de perte de masse en fonction des concentrations pour différents âges.

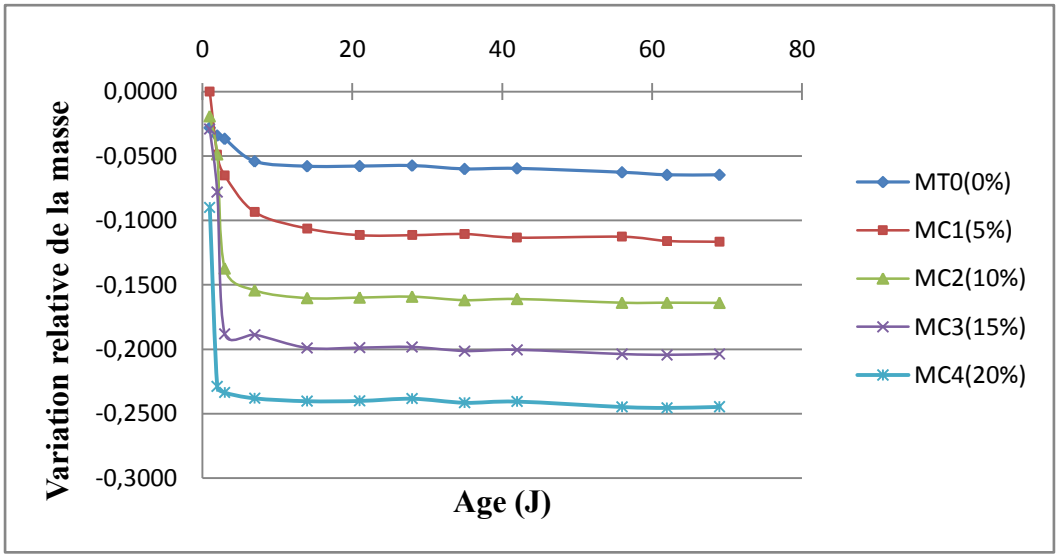



**Fig.3.23:** Variation relative de la masse (perte de masse) en fonction de temps

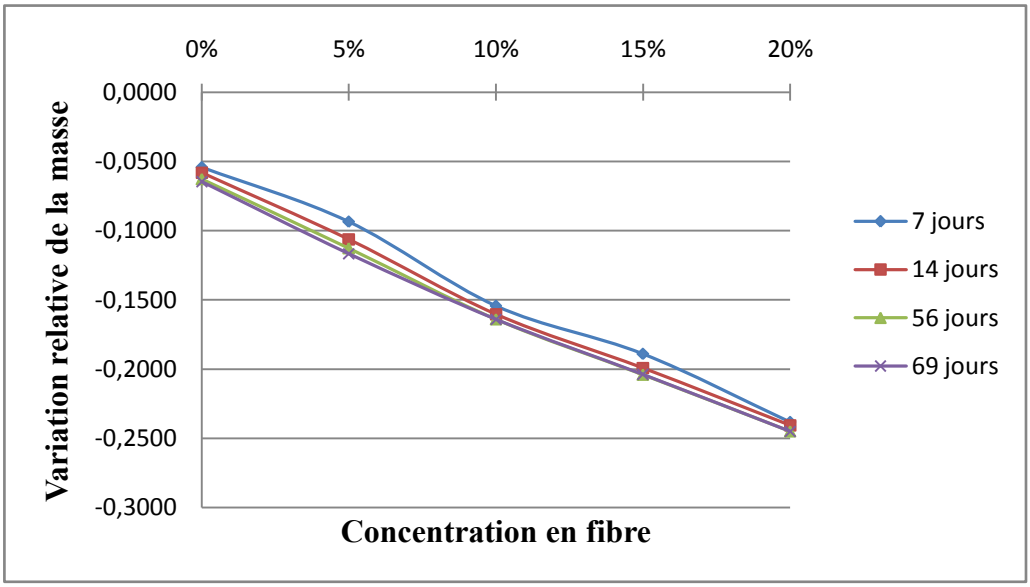



**Fig.3.24 :** Variation relative de la masse (perte de masse) en fonction de concentration en fibres.

### b.2.2. Éprouvettes soumis aux cycles séchage humidification.

On donne sur les figures **(3.25)**, **(3.26)**, **(3.27)**, **(3.28)** respectivement les courbes de perte de masse en fonction de nombre de cycle (5, 10, 15, 25) pour les différentes concentrations en fibres dont la pesé a été faite à la fin de chaque cycle.

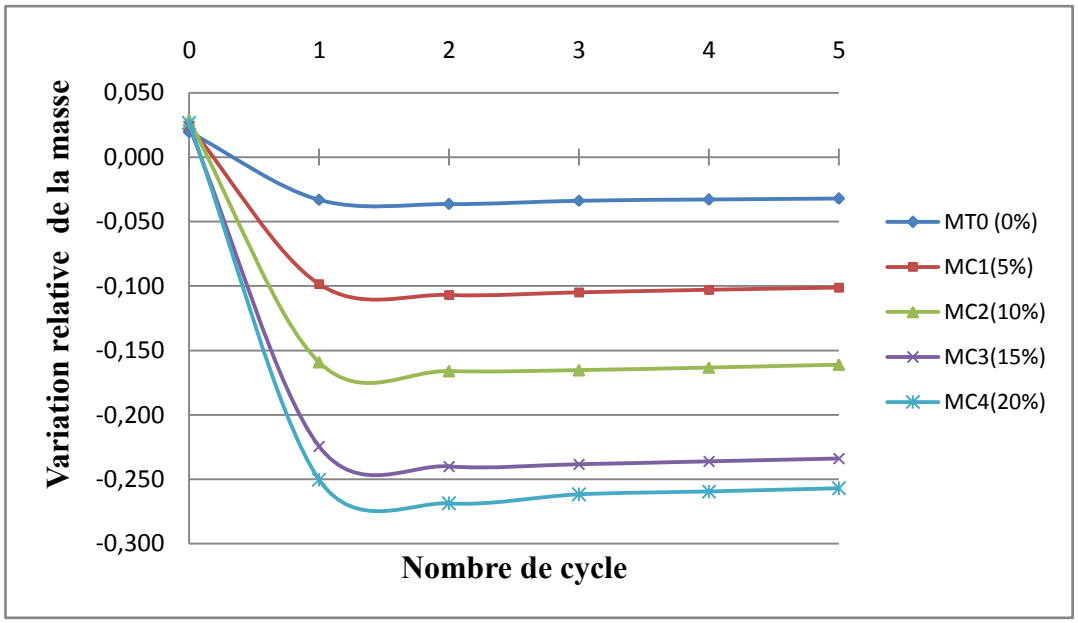



**Fig.3.25** : Variation relative de la masse en fonction du nombre de cycle (5 cycles).

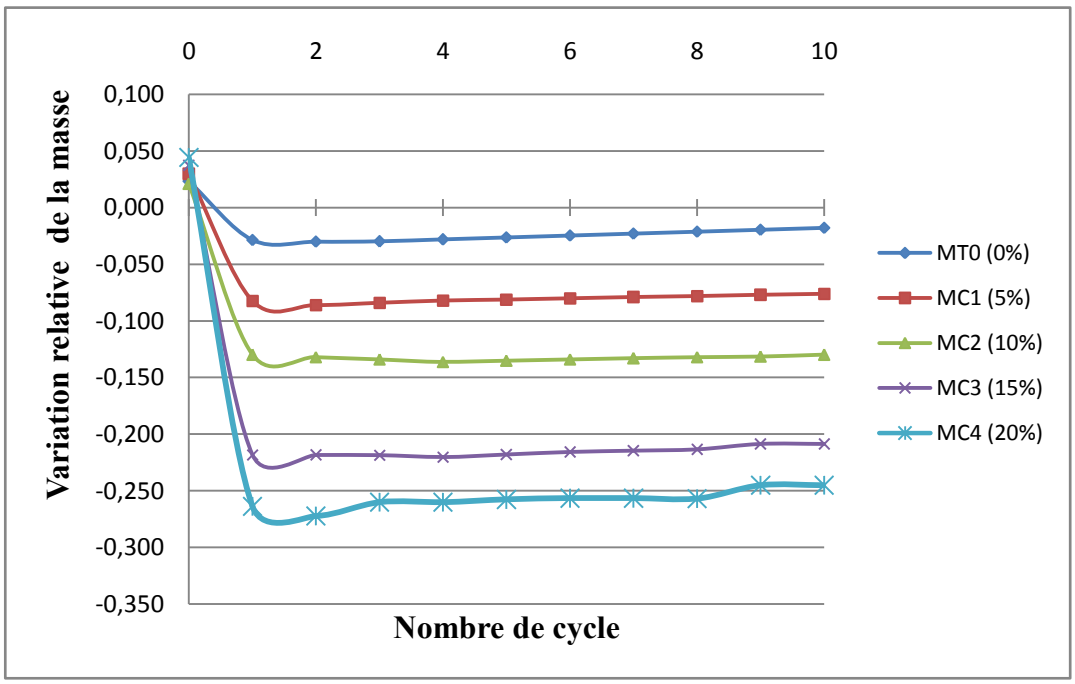



**Fig.3.26 :** Variation relative de la masse en fonction de nombre de cycle (10 cycles)

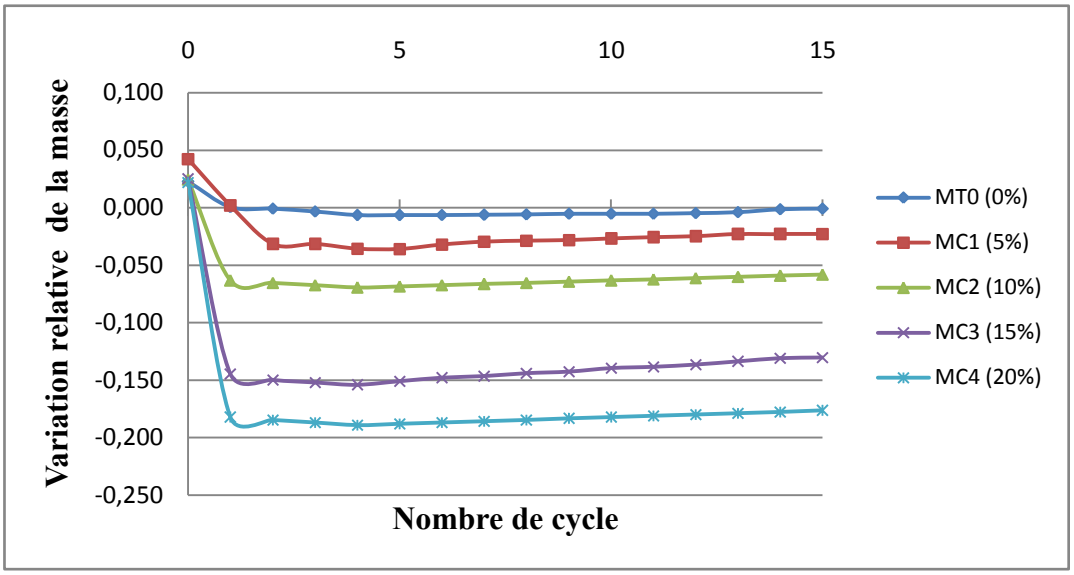



**Fig.3.27 :** Variation relative de la masse en fonction du nombre de cycle (15 cycles).

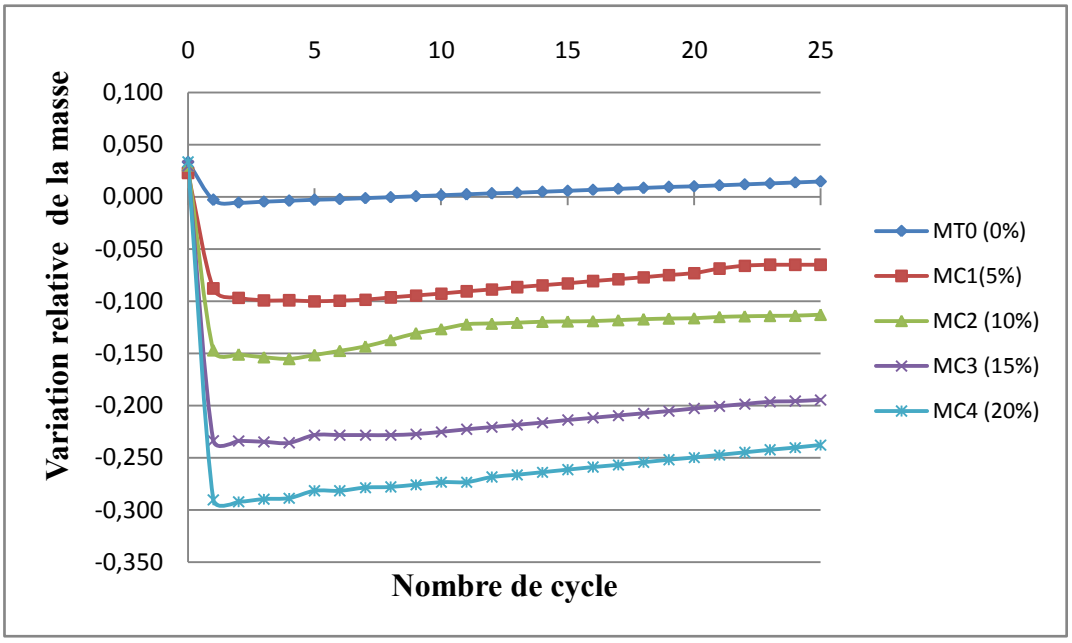



**Fig.3.28 :** Variation relative de la masse en fonction du nombre de cycle (25 cycles).

On donne sur la figure **(3.29) les** courbes de perte de masse en fonction de nombre de mesure effectué pour 25 cycle pour les différentes concentrations en fibres dont la pesé a été faite :

- Avant étuvage.
- À la sortie de l'étuvage.
- Après trempage dans l'eau.

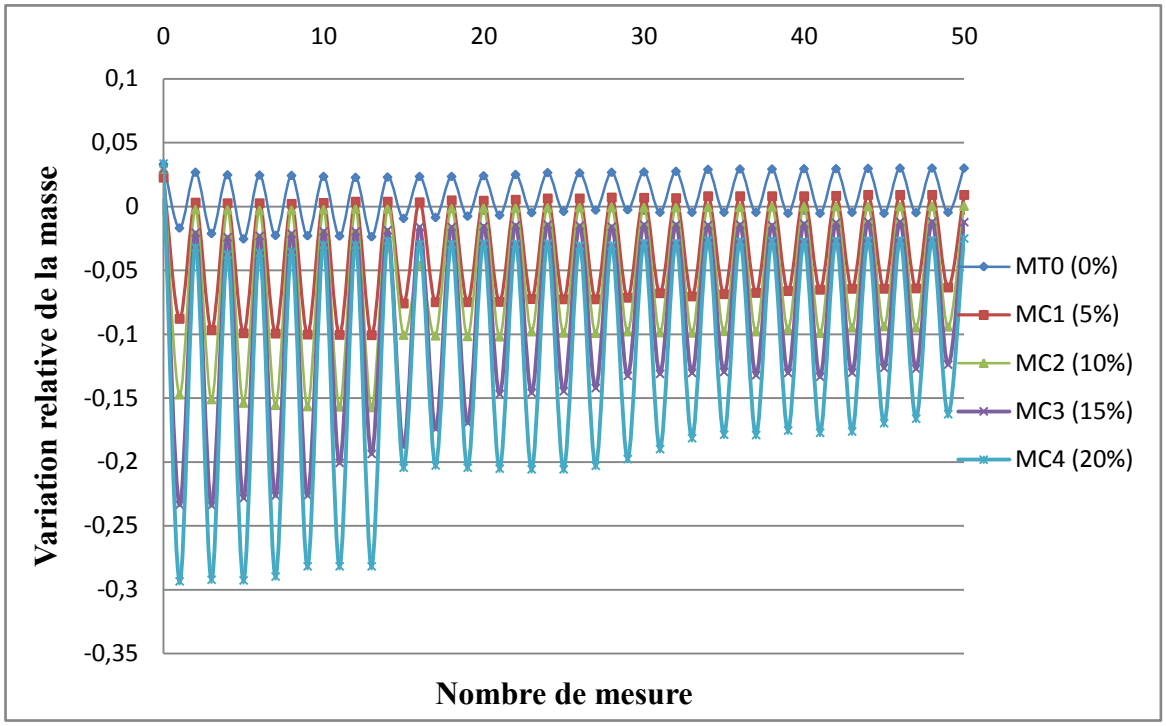



**Fig.3.29 :** Variation relative de la masse en fonction du nombre de mesure pour 25 cycles.

### b.2.3. Interprétation des résultats

#### b.2.3.1.Éprouvettes conservé à l'air

D'après la figure **(3.23)** on constate que la perte de masse augmente en premier temps ensuite elle se stabilise avec l'âge. La stabilité semble être bien atteinte à 60 jours pour toutes les concentrations.

D'après la figure **(3.24)** on remarque qu'il ya une perte en masse de (16 à 17%) pour le mortier chargé de 20% de fibre par rapport au mortier témoins (0% en fibre), ce changement de volume du mortier due au séchage et sans doute due à la perte de l'humidité qui dépend de l'environnement.

#### b.2.3.2. Éprouvette soumis aux cycles séchage-mouillage :

L'allure des courbes **(3.25)**, **(3.26)**, **(3.27)**, **(3.28) et (3.29)** qui montre une perte de masse en premier temps ensuite un gain de masse à partir du 3$^{ème}$ cycle confirme la variation des courbes de retrait où le gonflement continue jusqu'au 25$^{ème}$ cycle.

### c- Essais thermique :

Après l'achèvement des cycles séchage humidification les éprouvettes sont laissées à l'air de laboratoire pour sécher.

Dans le souci de bien mener l'expérience pour déterminer les valeurs du coefficient de conductibilité thermique λ , nous avons traité les surfaces des éprouvettes, rugueuses à l'état initial à l'aide d'une ponceuse à papier à verre dans le but d'obtenir des surfaces lisses, planes et parallèles.

### c.1.1.Coefficient de conductivité thermique

Les figures **(3.30), (3.31)** représentent respectivement la conductivité thermique en fonction de pourcentage en fibres et la conductivité thermique en fonction du nombre de cycle.

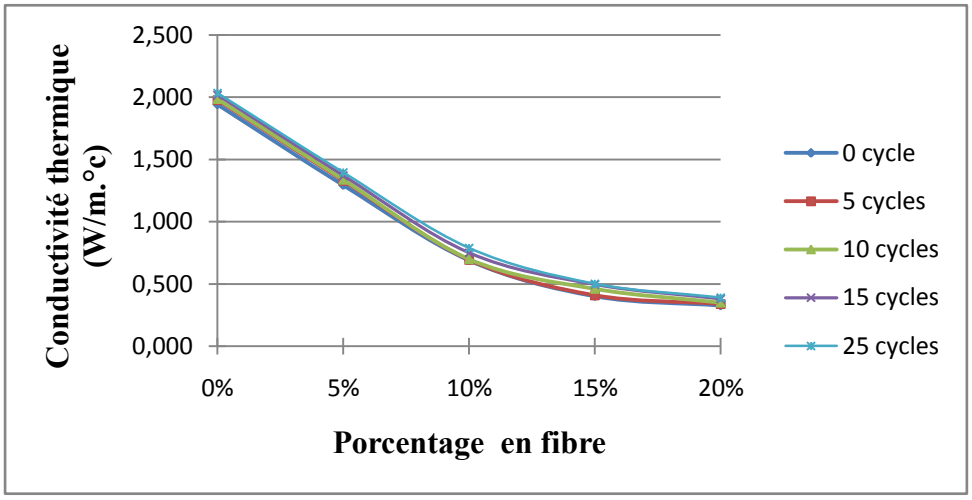



**Fig .3.30 :** Conductivité thermique en fonction de la concentration en fibres.

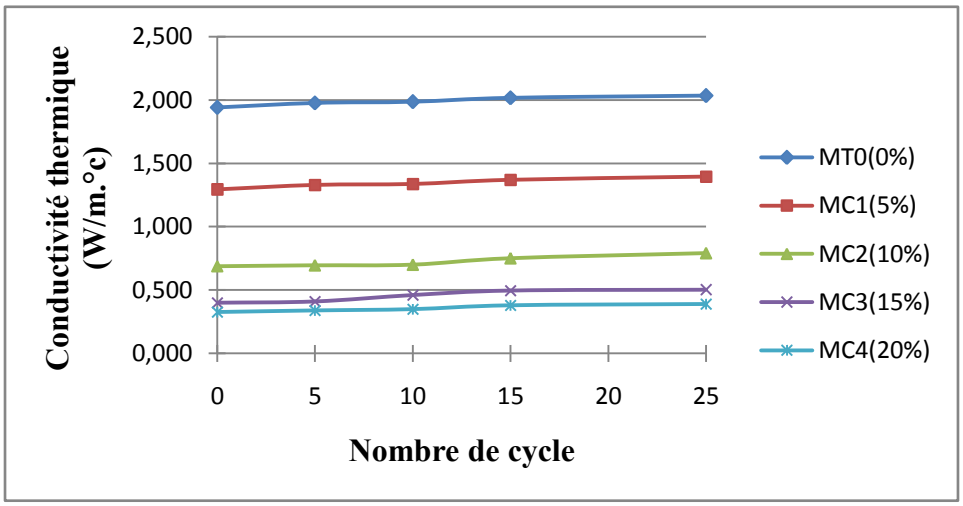



**Fig .3.31:** Conductivité thermique en fonction du nombre de cycle

### c.1.2.Chaleur massique :

Les figures **(3.32)** et **(3.33)** représentent respectivement la chaleur massique en fonction du pourcentage en fibres et la chaleur massique en fonction du nombre de cycle.

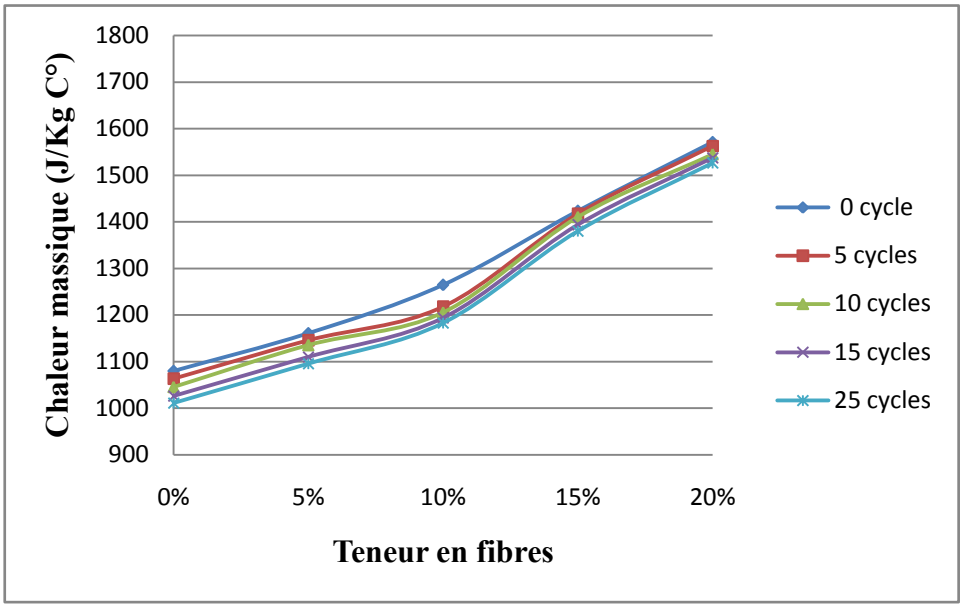



**Fig .3.32:** Chaleur massique en fonction de la concentration en fibres.

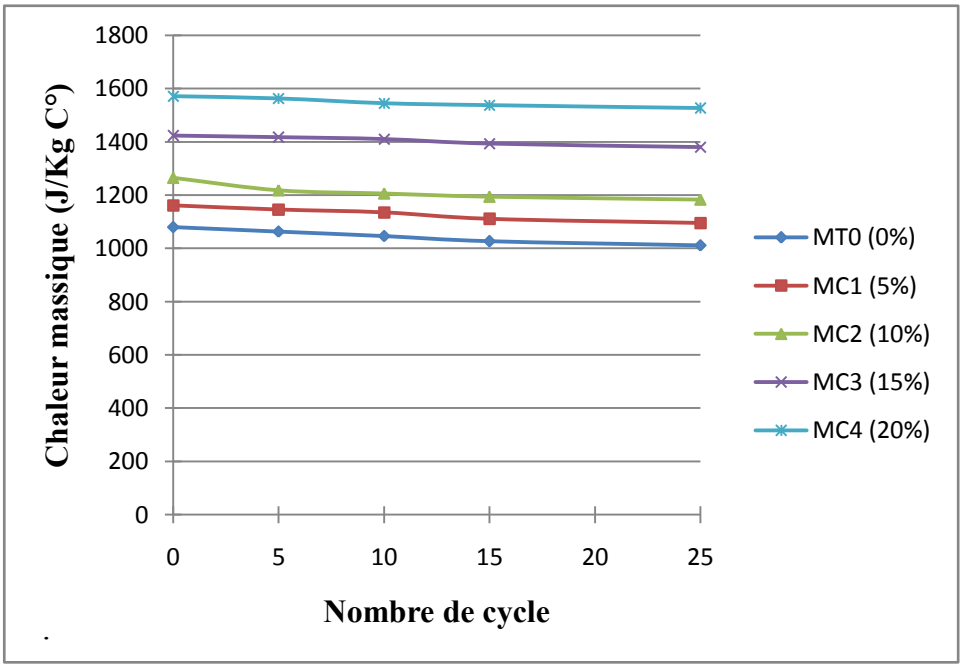



**Fig.3.33:** Chaleur massique en fonction du nombre de cycle

### c.1.3.Interprétation des résultats :

La figure **(3.30)** montre que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du dosage en fibre par contre la figure **(3.32)** montre que la chaleur massique augmente avec l'augmentation de dosage en fibres, ceci est évident par le fait que l'incorporation des fibres dans le matériau engendre une porosité qui diminue par la suite la densité du matériau. La conductivité thermique à son tour diminue. À 20% en fibres la conductivité thermique peut atteindre une diminution de 4.96% par rapport à 15% en fibres et une diminution de 54.77% par rapport au mortier témoin. Nos résultat pour le cas de 15% en fibres sont proche des résultats obtenu par M. Bentchicou ***et al*** **[82]** qui ont trouvé qu'à 16 % le coefficient de conductivité thermique est de 0.32 W/m.°c , la valeur trouvé dans notre étude est de 0.4 W/m.°c, la différence peut être due au séchage insuffisant des éprouvettes ou aux conditions de leur conservation dans le laboratoire (humidité relative).

La figure **(3.31),** montre que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation de nombre de cycle et la figure **(3.33)** montre que la chaleur massique diminue légèrement avec l'augmentation de nombre de cycle, cela est expliqué par l'augmentation de la densité du matériau due au cycle séchage –humidification qui a une incidence sur l'augmentation de la résistance en compression comme expliqué auparavant et qui a été confirmé par K. Al Rim *et al* **[86]** en montrant que la résistance mécanique diminue avec la diminution de la densité.

# Conclusions générales et Recommandations

## Conclusions Générales :

La présente étude se concentre sur l'évaluation des performances mécaniques d'un matériau composite chargé de fibres cellulosiques soumis aux cycles d'humidifications et de séchages qui a été utilisé comme une méthode de test accéléré pour simuler des conditions environnementales extérieures dans lesquelles les structures des matériaux composites sont soumis à l'action desséchante du vent et du soleil et de mouillage par la pluie ou les eaux de ruissellement de fonte des neiges.

D'après les résultats de cette étude on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les résistances en compression et en traction sont très affectées par l'ajout des fibres, et par la suite par l'augmentation du rapport E/C, elles diminuent de plus en plus quand le pourcentage en fibres augmente où le rapport E/C augmente.

- Les performances mécaniques sont légèrement affectées par le nombre de cycle où ils présentent une légère augmentation de la résistance en compression au $15^{ème}$ cycle et une légère augmentation de la résistance en traction par flexion au $10^{ème}$ cycle.

- Les performances thermiques telles que la conductivité thermique et la chaleur spécifique sont influencés par le pourcentage en fibre par le fait que la présence des fibres dans le mélange demande une quantité d'eau plus élevée qui augmente par la suite le rapport E/C, l'évaporation d'eau engendre une porosité qui provoque une augmentation du pouvoir isolant du matériau.

- Le matériau utilisé malgré son exposition aux cycles, ne perd pas son pouvoir isolant

- Si on opte pour assurer l'isolation, le composite à 20% de fibres avec une conductivité thermique de 0.322 W/m.°c et une résistance en compression de 5.86 MPa pourra être utilisé comme matériau constructif non porteur bien que vieillit par 25 cycles de séchage humidification.

**Recommandations :**

Les fibres végétales semblent donc représenter une alternative prometteuse de renfort de matrice. Elles ont l'avantage de leur faible coût économique et environnemental. Leur incorporation permet dans certains cas d'améliorer à court et moyen termes le comportement en flexion du composite. Cependant, leur durabilité est relativement mauvaise du fait d'une combinaison de phénomènes qui conduisent à la dégradation des fibres, à leur minéralisation et à la fragilisation du composite.

Des mesures permettant d'améliorer ce comportement ont été envisagées, parmi ces mesures on cite :

- Utilisé une pression de compactage pour les éprouvettes confectionnées lors de mise en œuvre pour avoir une résistance amélioré

- La diminution de l'alcalinité et de la teneur en Ca(OH) 2 de la matrice par substitution d'une partie du ciment par des additions pouzzolaniques.

- Modifier les fibres par l'enduction ou l'imprégnation des fibres avec des agents de blocage. En réduisant le mouvement de l'humidité autour et dans les fibres, il est présumé que la progression de la minéralisation de la fibre va être ralentie ou empêchée.

- L'investigation microstructurelle pourra donner plus d'indications sur le réarrangement de la microstructure du composite suite à la fatigue du matériau par les cycles de séchage-mouillage.

- Tester le matériau pour un nombre de cycle supérieur à 25.

# Références bibliographiques

[1] Jean-Paul Baïlon & Jean-Marie Dorlot, 2000-2001, « *Des matériaux* », troisième édition, Presses internationales, école polytechnique de Montréal, Page 633

[2] Jean Pierre Mercier, Wilfried Kurz & Gérald Zambelli, 1999, « *Introduction à la science des matériaux* » troisième édition, entièrement revue augmentée, presses polytechniques et universitaire Romandes, page 457.

[3] Romildo D. Tolêdo Filho a, Khosrow Ghavami b, George L. England, Karen Scrivener, 2003, « *Development of vegetable fiber mortar composites of improved durability* ». Cement & Concrete Composites, Vol 25 185–196

[4] Friedbert Kind-Barkauskas, 2006 «*Construire en béton: conception des bâtiments en béton armé* ». Édition française, première édition. Presses Polytechniques et Universitaires Romande.

[5] Manfred Hegger, Volker Auch-Schwelk & Matthias Fuchs. 2009 «*Construire: atlas des matériaux* », 1ère édition française, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes,

[6] CIM béton, 2008. Fiche technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses applications : « *Les mortiers* », Tome 3, Paris, 12/2008.

[7] ***A.H.Paul Maurenbrecher,*** *K. Trischuk, M.Z. Rousseau et M.I. Subercaseaux***, 2008** « *Les mortiers de rejointoiement pour les bâtiments de maçonnerie ancienne : considération pour l'exécution* », Notice technique édité par l'Institut de recherche en construction du CNRC, Canada, 04/2008.

[8] Groupe des ingénieurs, 1997 « *Mortiers et bétons hydrauliques, matériaux de construction* », Edition Eyrolles, Paris,.

[9] S. SBHAVIKATTI « *BASIC CIVIL ENGENEERING* », Copyright © 2010, NEW AGE INTERNATIONAL PUBLISHERS, 4835/24, Ansari Road, Daryaganj, New Delhi – 110002 Visit us at **www.newagepublishers.com.**

[10] COGNON & LACOMBE, 1997 – 1998 « *GENIE CIVIL* », 2ième année d'études, École Centrale Paris, Réservé uniquement aux Enseignants, Élèves et Anciens Élèves de l'École Centrale Paris.

[11] Dreux G. & Festa j. 2002, « *Nouveau guide du béton et de ses constituants »*, Edition Eyrolles, Paris, France.

[12] Laurence CARAMARO « *Fibres et Fils a Usage Technique* » technique de l'ingénieur. N2 510 page2.

[13] Premamoy Ghosh, 2004 « *Fiber science and technology* », first reprint 2009, publié par Tata McGraw Hill Education Private Limited, p :3

[14] Anne Barnett, 1997« *Examining textiles technology* », PAGE 30, British Library Cataloguing in Publication Data.

[15] Von Moody, Howard L. Needles, 2004, «*Tufted Carpet: textile fibers, dyes, finishes, and processes* », éditeur: Brent Beckley/William Andrew, Inc.

[16] Sabu Thomas, Laly A. Pothan, 2009 « *Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: From Macro to Nanoscale »*. Editeurs: Sabu Thomas & Laly A. Pothan, p:3.

[17] Christophe BALEY, « *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites »*, REF N 2 220, Techniques de l'ingénieur, p : 3-4-5-6

[18] Shobha K. Bhatia, Jennifer Lynn Smith « *Bridging the gap between engineering and the global world: A Case Study of the Coconut (Coir) Fiber Industry In Kerala, India »* copyright 2008 by Morgan and Claypool

[19] Anthony J. Bertino,Patricia Nolan Bertino, 2008, « *Forensic Science: Fundamentals and Investigations »*, « A study of fibers and textile» 1ère edition, p:76.

[20] Bryan Harris, 2003, « *fatigue in composites: science and technology of the fatigue response of composites ».*éditeur: Bryan Harris.

[21] Parviz Navi,Frédéric Heger, 2005 « *Comportement thermo-hydromécanique du bois », applications technologiques et dans les structures»,*1ière édition, Presses Polytechniques et universitaires Romandes.

[22] Kenji Kamide, 2005 « *Cellulose and cellulose derivatives: molecular characterization and its applications ».* Elsevier.

[23] William G. Hopkins,Charles-Marie Évrard,2003 « *Physiologie végétale »*, traduction de la 2ème édition américaine « Introduction to plant physiology *» ,* par Serge Rambour

[24] Jean Pelmont , 2005 « *Biodégradations et métabolismes: les bactéries pour les technologies de l'environnement »,* EDP Sciences, p : 736

[25] Wadood Hamad, 2002, « *Cellulosic materials: fibers, networks, and composites »* KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS .Boston/Dordrecht/London. p.17

[26] Sareen S. Gropper,Jack L. Smith,James L. Groff, 2009 « *Advanced nutrition and human metabolism »* 5 ème edition.

[27] Jean-Luc Wertz, Olivier Bédué, Jean P. Mercier, 2010 *« Cellulose Science and Technology »***,** 1ière édition, EPFL Press, distribués par CRC press.

[28] James Lindsay White,Kwang-Jea Kim.2008 « *Thermoplastic and rubber compounds: technology and physical chemistry »*

[29] S. P. MISHRA, 2000 « *A text book of fiber science and technology »* , New Age International (P)Ltd., Publishers

[30] Jean-Claude Roland, Françoise Roland, Hayat El Maarouf-Bouteau, François Bouteau, 2008 « *ATLAS BIOLOGIE VEGETALE* 2 *». Organisation des plantes à fleurs,* 9ème édition Algeria-Educ.com *Atlas*].

[31] Andrzej M. Brandt, 2009« *Cement-based composites: materials, mechanical properties, and performance »* , 2ème edition, edition publié par: Taylor and Francis, p :128

[32] Joseph Asunción, 2003 « *The complete book of papermaking »* Éditeur: New York: Lark Books. P: 104.

[33] John Wiley, 2007, « *Handbook of plant science »*, Volume 1. Éditeur Keith Roberts.

[34] Roland W. J. McKinney, 1995 « *Technology of paper recycling »* 1 ère edition. Éditeur: R.W. J. McKinney.

[35] OCDE 2001 « *Développement Durable: Les Grandes Questions »*, Organisation De Coopération Et De Développement Économique, publié sous la responsabilité de secrétaire général de l'OCDE. Thorfald Moe.

[36] A. K. Bledzki,V. E. Sperber,O. Faruk, 2002« *Natural and wood fiber reinforcement in polymers »* volume 13, N°8,. Rapra Review Reports

[37] Jean-Jacques Macheix, Annie Fleuriet, Christian Jay-Allemand 2005 « *Les composés phénoliques des végétaux: un exemple de métabolites secondaires d'importance économique »*, presses polytechniques et universitaires romandes, p : 165.

[38] Michel Vernus, Mai 2004 « *La fabuleuse histoire du papier »* éditeur Cabidita, collection : Archive Vivante.

[39] Jean-Claude Daumas 2006 « *La mémoire de l'industrie: de l'usine au patrimoine »* PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE CMPTÉ.

[40] Jeanne Mager Stellman , 2000 « *Encyclopédie de sécurité et de santé au travail»,* Volume 4. P : 72.6 – 72.10

[41] Frédéric Barbier, 2001 « *Les trois révolutions du livre »*: actes du colloque international de Lyon /Villeurbanne. Louis ANDRÉ, Le papier et la « seconde révolution du livre*»,*

[42] FAO, 2001, «Pate et vieux papier *»,* éditeur*: Food and Agriculture Organization of the United Nations* 1995-1999 FAO *Produits forestiers* .

[43] OCDE, « *Manuel D'analyse des Projets industriels dans les pays en voie de développement »* édition corrigé, Paris 1972.)

[44] Bertolini L'Harmattin 1999 « *Le papier à travers les âges: du premier âge au recyclage»* Gérard ISBN : 2-7384-7624-4).

[45] Hernani S. Sobral, 1990, « *Vegetable plants and their fibers as building materials »* Proceedings of the Second International RILEM Symposium 1ère edition.

[46] Hans-Jörg Bullinger, 2009 « Technology Guide: Principles, Applications, Trends *»*. « Renewable Ressource p:31 *»* Éditeur : Hans-Jörg Bullinger, Springer,

[47] Michel Dupeux, 2005 « A*ide-mémoire science des matériaux»*, Nouveau tirage corrigé © Dunod, Paris, 2004 ISBN 2 10 005458 9).

[48] OCDE, 2001 « *les perspectives de l'environnement de l'OCDE»*, Chapitre 18 « industrie des pates et papiers *»*, p : 239

[49] Wen-Jie Guoa, Yan Wanga, Jin-Quan Wana,b, Yong-Wen Maa, 2011« *Effects of slushing process on the pore structure and crystallinity in old corrugated container cellulose fibre*, *Carbohydrate Polymers»*, volume 83 1–7.

[50] Pierre Melquiot 2003« *1001 mots et abréviations de l'environnement et du développement durable »* édition RECYCONSULT Version1.1

[51] Jean-Michel Balet, 2005 « *Gestion des déchets Aide-mémoire»,* 2e édition Dunod, Paris, ISBN 978-2-10-053548-4

[52] Janice VanCleave's, 2008 « *Super Science Challenges: Hands-On Inquiry »* Projects copyright éditeur Janice VanCleave

[53] Peter Graf, Anita Huber, Matthieu Legrand, Otto Schaefer ; 2010 « *Paroisses vertes: Guide écologique à l'attention des Eglises »* éditions Labor et Fides.

[54] M. Bentchikou,S. Hanini, ;K. Silhadi, A. Guidoum, 2007 « *Elaboration et étude d'un mortier composite a matrice minérale et fibres cellulosiques : application a l'isolation thermique en bâtiment »*. **Canadian Journal of Civil Engineering.** VOL 34; N° 1, pages 37-45

[55] Peter Bartos,D. L. Marrs,D. J. Cleland, 1995 «*Production methods and workability of concrete*: *Proceedings of the International RILEM Conference »* première edition

[56] A.E.Naaman et H.W .Renhardt, 2003, « PRO 30: 4th International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites *»,* Volume 1.

[57] A. Kriker, G. Debcki, A. Bali, M. M. Khenfer, M. Chabannet, 2005« *Mechanical properties of date palm fibers and concrete reinforced with date palm fibers in hot-dry climate »* Cement and Concrete Composites, Volume 27 554-564

[58] Camille MAGNIONT, 2010, « *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco matériau de construction à base d'agro ressources »*, Mémoire de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier

[59] F. N. Rabinovich, 1995, « *Concretes with dispersed reinforcement* » éditor :Ms Margaret Majithia , F.N. Rabinovich , p 60

[60] Nicolas Roussel, Zahia Toutou, Robert Leroy, 2004 « Fresh cement based composites materials. Rheological Behavior, PRO 39: 6th International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC). BEFIB *» p:289*

[61] Peter Bartos, D. L. Marrs, D. J. Cleland, 1996 « *Production methods and workability of concrete: proceedings of the International RILEM ».* Première edition.

[62] M.A. Aziz, P. Paramasivam, S.L. Lee Surrey. 1984 « *New Reinforced Concretes 3. Concrete reinforced with natural fibres »* University Press,

[63] R. D. Toledo Filho, K. Ghavami, M. A. Sanjuan, G. L. England *Free,* 2005« *restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres »* Cement and Concrete Composites, Vol 27 537-546

[64] Yingzi Yang 1, Michael D. Lepech, En-Hua Yang, Victor C. Li, 2009« *Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles »* Cement and concrete research vol 39 382–390)

[65] A. Pavoine, L. Divet l, S. Fenouillet, V. Randazzo et J.-P. Davy, Novembre 2003 « *Impact de conditions des cycles de séchage et d'humidification sur la formation différée d'ettringite dans les bétons* Matériaux et Constructions *»*, Vol. 36, pp 587-593

[66] X.LIN, M.R.SILSBEE and D.M.ROY, 1995« *Improvements in the durability of cellulose reinforeced cementitious composites ».* intercollege Materials Laboratory, the Pennsylvannia State University, PA,USA. 370 487–496.

[67] Par K. L. Scrivener,J. Francis Young, 1997 « *Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems »*: 1ère edition, 1997 E et FN Spon. pp 106-113

[68] H.Savastano Jr., P.G. Warden, R.S.P. Coutts, 2003« *Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices »* Cement and Concrete Composites, Volume 25 311-319

[69] M.A.Mansur, M.A.Aziz, 1982« *A study of jute fibre reinforced cement composites »*International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 4-2, 75-82

[70] AJ. Morano, LEG. Cambronero, I.Chacon, JM.Ruiz, 2005 « *Mechanical Characterization of Cement Reinforced with Fique Fibers »* Roman Material Engineering.

[71] Folker H. Wittmann, 2000 « *Materials for buildings and structures»* , Federation of European Materials Societies EUROMAT-Volume 6, éditeur: F H. Wittmann

[72] B.J. Mohr , H. Nanko , K.E. Kurtis, 2006 « *Aligned kraft pulp fiber sheets for reinforcing mortar»* Cement & Concrete Composites volume 28,161–172

[73] R. MacVicar , L.M. Matuana , J.J. Balatinecz,1999 « *Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement composite*s » Cement & Concrete Composites 21, 189-196.

[74] M. Bentchikou, 2008 «*Contribution à l'étude et à l'élaboration de matériaux composites pour l'isolation thermique. Cas de béton de fibre de papiers recyclés*», thèse de Doctorat en génie civil. École Nationale Polytechnique. El Harrach. Alger .119 pages sans annexe Algérie.

[75] Narayanan Neithalath, 2006, « *Damage assessment in cellulose–cement composites using dynamic mechanical characteristics»* Cement & Concrete Composites volume 28, 658–667.

[76] B.J Mohr , H. Nanko b, K.E. Kurtis , 2005« *Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling »* Cement & Concrete Composites 27, 435–448

[77] R. D. Tolêdo Filho, K. Scrivener, G.L. England, K. Ghavami, 2000 « *Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites »* ,*Cement and Concrete Composites,* Volume 2 ,127-143

[78] H. Savastano, V. Agopyan, A. M. Nolasco, L. 1999 « *Plant fibre reinforced cement components* for roofing Pimentel Construction and Building Materials *»* , Volume 13, 433-438

[79] A. Bentur, S.A.S. Akers,1989« *The microstructure and ageing of cellulose fibres reinforced cement composites cured in a normal environment »* The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 11-2

[80] H. Savastano, V.M. John, V.Agopyan, O. Pellegrino Ferreira, 2002« *Weathering of vegetable fibre-clinker free cement composites* Materials and Structures *»*, Volume 35, 64-68

[81] B.J. Mohr , J.J. Biernacki , K.E. Kurtis, 2006 « *Microstructural and chemical effects of wet/dry cycling on pulp fiber–cement composites »,* Cement and Concrete Research 36 , 1240–1251

[82] M. Bentchicou, A. Guidoum K. L. Scrivener, K. Silhadi, S. Hanini « *Effect of cellulose fibre on the thermal and mechanical properties of cement paste ».*

[83] E.Vazquez, Ch.F.Hendriks and G.M.T. Jansse, « *PRO 40: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in buildings and structure », November* 2004, Barcelona, Espan, vol. 2; 2004. p. 724–30. ISBN:2-912143-54-3. 2 Édité par RILEM

[84] M. Bederina, 2006 « *Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modeling* Construction and Building Materials ».Volume: 21, Issue: 3, Publisher: Elsevier, Pages: 662-668

[85] K Al Rim , A. Ledhem , O. Douzane , R.M. Dheilly , M. Queneudec,1999 « *Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites »,* Cement & Concrete Composites 21 269-276

[86] **[NA 451],** Normes Algérienne : « *Essais pour déterminer les aractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée* », 1989.

[87] Dr. CHERAIT Yacine, Mr NAFA Zahredine **:** « *Eléments de matériaux de construction et essais* », Direction de la publication universitaire de Guelma ,2007.

[88] **NF P 18-598,** Normes AFNOR : « *Granulat- Equivalent de sable* », Octobre 1991.

[89] DUPAIN.R et all, « *Granulats, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire* » ,2eme édition CASTEILLA, Paris ,2000.

[90] **NA 2607,** Normes Algérienne : « *Granulats - Analyse granulométrique par tamisage* », 1990.

[91] **NF P 15-476**, Normes AFNOR : « *Méthodes d'essais des ciments- Détermination de la finesse* », Aout 1990.

[92] **NF EN 933-1,** 1997, « *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage* », AFNOR.

[93] **NF P 15-431**, Normes AFNOR : « *Liants hydrauliques – technique des essais-détermination du temps de prise sur mortier normal* », Février 1994.

[94] **NF P 15-473,** Normes AFNOR : « *Méthodes d'essai des ciments-partie 3 : détermination du temps du prise et de la stabilité* », Aout 1995.

[95] **NF P 15-471,** Normes AFNOR : « *Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques* », Aout 1995.

[96] **NF P 18-452,** Normes AFNOR : « *Béton- mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètre* », Mai 1988.

[97] **NF P 15-437**, Normes AFNOR : « *Liants hydrauliques –Techniques des essais – Caractérisation des ciments par mesure de la fluidité sous vibration des mortiers* », Juin 1987.

[98] **CEN EN 196-1,** Normes AFNOR : « *Méthodes d'essais des ciments – partie 1 : détermination des résistances mécaniques (indice de classement P15- 471)* », Aout 1995.

[99] **NF P 15-433,** Normes AFNOR *Méthodes d'essais des ciments. - Détermination du retrait et du gonflement.*

[100] René vittone 2010 « Bâtir : manuel de la construction » presses polytechnique et universitaire romandes.

[101] **NF EN 993-15** «*Méthodes d'Essai pour Produits Réfractaires Façonnés Denses-Partie 15 : Détermination de la Conductivité Thermique* », Octobre 2005.

[102] **NF EN 933-1**, 1997, « *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage* », AFNOR.

[103] **NF EN 1097-6**, 2001, « *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau* », AFNOR.

[104] **NF EN 1097-3**, 1998, « *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire* », AFNOR.

[105] **NF EN 933-8**, 1999, « *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable* », AFNOR.

[106] **NF P 18-560,** Normes AFNOR**, «** *essai pour déterminer l'analyse granulométrique par tamisage* »

[107] **NF EN 196-6**, 1990, « *Méthodes d'essais des ciments. Partie 6: Détermination de la finesse* », AFNOR.

[108] **NF EN 459-2**, 2002, « *Chaux de construction. Partie 2 : Méthode d'essai* », AFNOR.

[109] **NF EN 196-3**, 1995, « *Méthodes d'essais des ciments. Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité* », AFNOR.

[110] **NF EN 196-1**, 1995, « *Méthodes d'essais des ciments. Partie 1: Détermination des résistances mécaniques* », AFNOR.

[111] Bentchikou. M., 2000, « *Élaboration et étude de deux matériaux composites à fibres cellulosiques et matrice minérale et organique. Application à l'isolation thermique* », Mémoire de Magister, Université Dr Yahia Fares, Médéa, Algérie.

[112] **NF EN 1008**, 2003, « *Eau de gâchage pour bétons: spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton »*, AFNOR.

[113] Chafi N, 2005, « matrice cimentaire renforcée de fibres, Valorisation des sous produits (Polystyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois), Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, Algérie.

[114] Pierre Rossi, Gilles 2000 « *Chanvillard PRO 15: 5th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB*'»