REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Etude de l'effet combiné du compactage et de la déshydratation sur la résistance mécanique d'un composite a fibre cellulosique

---

Présenté par

Mr. LAYES Amara

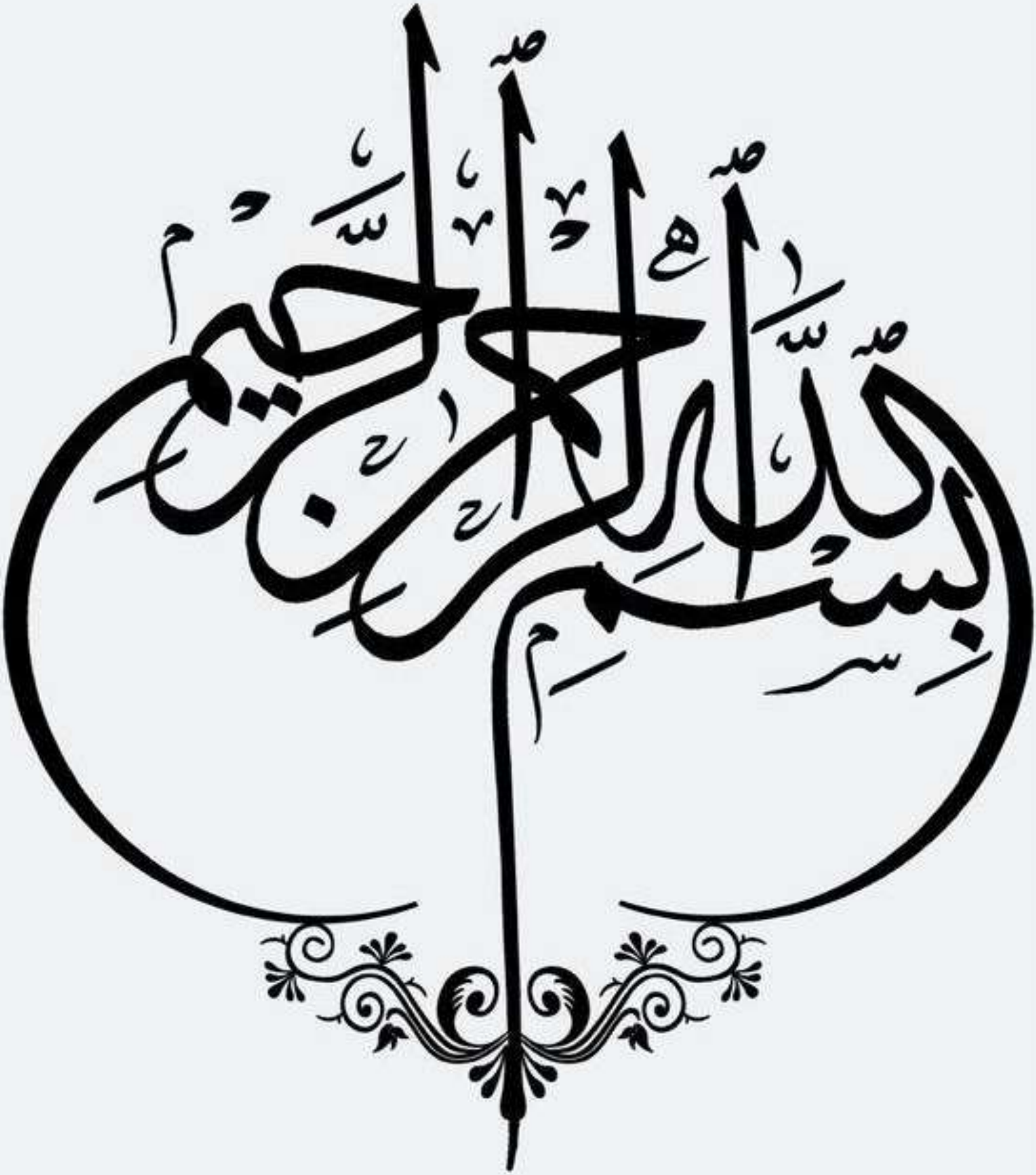
Mr. YAMANI Salem

Proposé et Dirigé par

Dr. BENTCHIKOU Mohamed

Mme LACHENANI Amina

Promotion Septembre 2020


بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicaces

Je dédie ce projet

À ma ***chère mère***

À mon ***cher père***

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir

et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs

À mes frères, ***Tamime ,Ilyas, Adnane,Khouzaima,Koussai,Moudrik et Kinana***

À MES chères sœurs ***Salma*** *et* ***Belkisse.***

Pour leurs soutien morale leurs conseils précieux tout au long de mes études

Pour leurs patiences infinies

À mon chère binôme ***Salem Yamani***

Pour son entente et sa sympathie

À mes chères amis, ***Nadhir, Ahmed,Nacer Eddine,Ali et Imad***

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles

À toute ma ***famille***

À tous mes ***autres amies***

À mes ***collègues***

LAYES Amara

Dédicaces

À ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

À mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

Àmes très chers frères

Àmes chère sœur

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite

Àtous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

YAMANI Salem

Remerciements

La présente étude a été réalisée au niveau du laboratoire de Génie Civil , au département de Matériaux en Génie Civil, Faculté deTechnologie de ***l'Université YAHIA FARES DE MEDEA.***

Nous remercions ***ALLAH*** *qui nous a donné la force et la patience*

Pour terminer ce travail.

Nos sincères remerciements:

A notre promoteur ***Dr. BENTCHIKOU*** *Mohamed et à notre Co-promotrice* ***Mme LACHENANI*** *Amina qui m'ont accompagné tout au long de cette expérience avec beaucoup de patience et de pédagogie et leurs dévouement*

Nous tenons à remercier aussi toute personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail notamment : l'ensemble d'équipes du laboratoire et aussi tous ***mes chers amis***

En fin, nous remercions chaleureusement la famille pour le sacrifice et le soutiens tout au long du parcours.

ملخص

تم إعادة تدوير النفايات من أصل السليلوز لاستخدامها في تعليق الملاط.

ركزت الدراسة بشكل أساسي على تأثير الضغط و/أو تطبيق استخراج الفراغ، على المقاومة الميكانيكية للمركب. كما ركزت الدراسة على حساسية الماء لهذه المادة من خلال امتصاصها له وتقلصها.

استخدمنا 4 نسب من الألياف (0 ، 5 ، 10 و 20٪) ، حيث تم تنفيذ عملية الضغط (بواسطة حمولة 8 كجم) و/ أو تم دمجها مع عملية استخراج الهواء بالتفريغ.

بعد إجراء جميع العمليات المؤدية إلى إعداد عينات الاختبار وحفظها، لم نتمكن من استخراج جزء كبير من النتائج بسبب "الوباء" الذي أدى الى حظر التجول مما تسبب في إغلاق المختبرات.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الألياف لديها قدرة امتصاص عالية للماء مما يؤثر سلبًا على الخليط، كما أن زيادة كمية الماء المستخرجة من المركب كانت نتيجة التأثير المدمج.

وأظهرت النتائج أن الكتلة الحجمية تتناقص مع مرور الزمن.

على الرغم من أن الأيام التي تم فيها قياس الانكماش قليلة من أجل الحكم على تأثير الإجراء على الانكماش. إلا انها أظهرت نتائج مستقرة مبدأيا

الكلمات المفتاحية: ألياف السليلوز، الضغط، الملاط، تطبيق استخراج الفراغ، المقاومة الميكانيكية، الانكماش ، الامتصاص.

RESUME

Des déchets à base de cellulose ont été recyclés pour être utilisés dans la suspension de mortier.

L'étude s'est principalement concentrée sur l'effet du compactage ou/et l'application d'une dépression sur la résistance mécanique du composé. L'étude a également porté sur la sensibilité à l'eau de ce matériau, par son absorption et son retrait.

Nous avons utilisé quatre pourcentages de fibres (0, 5, 10 et 20 %), où le processus de compactage (par une charge de 8 kg) a été effectué ou/et le processus d'extraction sous vide a été combiné.

Après avoir effectué toutes les opérations menant à la préparation des éprouvettes et leurs conservations, nous n'avons pas pu extraire une grande partie des résultats en raison de la "pandémie" à l'origine du couvre-feu avec ce qu'a induit la fermeture des laboratoires.

Les résultats ont montré que les fibres ont une capacité d'absorption d'eau élevée qui a un effet négatif sur le mélange ; et la plus grande quantité d'eau extraite du composé était le résultat de l'effet combiné.

Les résultats ont montré que la masse volumétrique diminue avec le temps.

Bien que les jours où le retrait ait été mesuré soient peu nombreux pour juger de l'effet de la procédure sur le retrait. Cependant, il a montré des résultats stables au départ

Mots clés : Fibres cellulosiques, compactage, mortier, dépression, résistance mécanique, retrait, absorption.

ABSTRACT

Cellulose-based waste has been recycled for use in the mortar suspension.

The study mainly focused on the effect of compaction or / and the application of a depression, on the mechanical resistance of the compound. The study also focused on the water sensitivity of this material, through its absorption and shrinkage.

We used four percentages of fibers (0, 5, 10 and 20%), where the compaction process (by a load of 8 kg) was carried out or / and the depression extraction process was combined.

After having carried out all the operations leading to the preparation of the test specimens and their conservation, we could not extract a large part of the results due to the "pandemic" at the origin of the curfew with what induced the closure laboratories".

The results showed that the fibers have a high-water absorption capacity which has a negative effect on the mixture; and the biggest amount of water extracted from the composite was the result of the combined effect.

The results showed that the volumetric mass decreases with time.

Although the days when shrinkage were measured are few to judge the effect of the procedure on shrinkage. However, it showed stable results initially

Key words: Cellulose fibers, compaction, mortar, depression, mechanical resistance, shrinkage, absorption.

NOTATIONS

Al2O3 : L'alumine

C : la compacité

CaO : La chaux

Cc : Le coefficient de courbure

CPA : Le ciment portland artificiel

CPJ-CEM II/A 42.5 : Le ciment portland composé classe II /A avec résistance 42.5 MPa

Cu : Le coefficient d'uniformité

d : La dimension du plus petit granulat (mm)

D : La dimension du plus gros granulat (mm)

E : mortier sous charge de 8kg + extraction sous vide et mortier de sous vide.

E/C : Le rapport eau/ciment

E/L : Le rapport eau/liant

ES : Equivalent de sable à piston (%)

ESV : Equivalent de sable à vue (%)

Fe2O3 : L'oxyde de fer

I : indice des vides

MF : Module de finesse

MgO : Oxyde de magnésium

NA : Norme Algérienne

NB : Norme Belge

NE : Norme Européenne

NF : Norme Française

p : la porosité

P : mortier sous vide

RC : La résistance à la compression (MPa)

Rt : La résistance à la traction (MPa)

SiO2 : La silice

SO3 : Sulfates

ρ : Masse volumique (kg/ m3)

ρabs : Masse volumique absolue (kg/ m3)

ρapp : Masse volumique apparente (kg/ m3)

σt : La contrainte de flexion (MPa)

σc : La contrainte de compression (MPa)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 Composition chimique du gypse 08
Tableau I-2 caractéristiques physiques des fibres végétales les plus utilisées 18
Tableau I-3 Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales 18
Tableau I-4 Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales. 20
Tableau I-5 Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales 25
Tableau I-6 proportion des constituants chimiques des bois résineux et feuillus 27
Tableau I-7 production de pâte : rendement ou qualité 28
Tableau I-8 Paramètres influençant les propriétés des composites à matrice minérale renforcés par des fibres végétales 34
Tableau II-1 Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge 48
Tableau II-2 Propriétés physiques d'identification du ciment utilisé. 54
Tableau II-3 Constituants du composite pour 1 moule de trois éprouvettes (4*4*16 cm3) 57
Tableau II-4 Opérations de malaxage du mortier sans fibres 57
Tableau II-5 Opérations de malaxage du mortier avec fibres 58
Tableau III-1 Les masses volumiques des différents sables utilisés 63
Tableau III-2 L'équivalent de sable des différents sables utilisés 63
Tableau III-3 Analyse granulométrique des différents sables.....64

Listes Des Figures

Figure I-1 Matériaux composites 3
Figure I-2 Constituants des mortiers.....4
Figure I-3 différentes formes géométriques de fibres métalliques 12
Figure I-4 les fibres métalliques 13
Figure I-5 les fibre de verre 14
Figure I-6 les fibres de polypropylènes 14
Figure I-7 Les différents types de fibres naturelles 15
Figure I-8 illustration de l'apport du renfort par des fibres…… …… . ……..16
Figure I-9 Classification des fibres végétales selon l'origine.....17
Figure I-10 Schéma des parois d'une fibre végétale 19
Figure I-11 Structure générale d'une fibre naturelle 19
Figure I-12 Structure chimique de la cellulose 22
Figure I-13. Liaisons hydrogène inter- et intramoléculaires au sein de la cellulose 22
Figure I-14 La structure d'une fibre cellulosique 22
Figure I-15 Structure d'un type de xyloglucane 23
Figure I-16 Exemple de structure chimique de la lignine 24
Figure I-17 Exemple de structure d'une chaine de pectine (acide polygalacturonique) 25
Figure I-18 Résistance en flexion et ténacité de pâte et de mortier de ciment renforcés par de la pâte kraft 36
Figure I-19 Courbes du comportement typique d'un échantillon de ciment pur (1) et d'un composite ciment/fibres de chanvre (2) en flexion 3 points 37
Figure I-20 Influence du dosage et de la longueur des fibres de jute sur les propriétés du composite 38
Figure I-21 Evolution de la résistance en flexion et du module d'élasticité d'une pâte de ciment renforcée par des fibres de chanvre en fonction de la teneur en fibres 39
Figure I-22 Définition des grandeurs caractéristiques du comportement en flexion d'un composite fibré 40
Figure I-23 Effet de la force de compactage sur la résistance à la traction 41

Figure I-24 Schéma du processus Savastano et collègues.....42
Figure I-25 Système de moule et de presse utilisé pour préparer les échantillons.....42
Figure II-1 Le cône et le récipient.....44
Figure II-2 Procédure de mesure de l'équivalent de sable.....45
Figure II-3 moule vide dans la balance.....49
Figure II-4 Dispositif pour l'essai de résistance à la traction.....49
Figure II-5 Dispositif de rupture à la compression…… …...50
Figure II-6 Absorption d'eau par capillarité.....51
Figure II-7 Rétractomètre et son étalonnage.....52
Figure II-8 Les sables utilisés.....53
Figure II-9 Fibres issues de la récupération des emballages d'œufs.....54
Figure II-10 Schéma de principe des phases du traitement du déchet de papier.....55
Figure II-11 Equipement nécessaire.....59
Figure II-12 Eprouvettes sous chargement.....59
Figure II-13 dessiccateur avec pompe à vide.....60
Figure II-14 Le combiné du compactage et extraction du vide.....60
Figure II -15 variable étudiées.....62
Figure III-1 La courbe granulométrique des sables utilisés.....64
Figure III-2 l'eau extrait du mortier pour différent pourcentage de fibres.....66
Figure III-3 le pourcentage de l'eau extrait du mortier pour différent pourcentage de fibres ...66
Figure III-4 variation de la masse volumique des éprouvettes à l'état frais (après 2:45 h) ... 57
Figure III-5 variation de la masse volumique des éprouvettes à l'état frais (après 24 h)… ….68
Figure III- 6 variation de retrait pour mortier sans fibres……..…….69
Figure III- 7 variation de retrait pour mortier à 5% de fibres…… 69
Figure III- 8 variation de retrait pour mortier à 10% de fibres…… 70
Figure III- 9 variation de retrait pour mortier à 20% de fibres……...70

Sommaire

Dédicaces……..…….I

Remerciements…….…….…….III

Résumé…….…….……..……IV

Notations…….…….…….…….VII

Liste des tableaux…….…….……..IX

Liste des figures…….……...……X

Sommaire..... XIII

Introduction Générale..... 1

CHAPITREI Synthèse bibliographique

I.1. Introduction ……..... 2

I.2. Matériaux composites ……..... 2

I.3. Matériaux composites renforcés de fibres :..... 3

I.4. Le mortier ……..... 4

I.4.1. Définition d'un mortier:..... 4

I.4.2. Différents types des mortiers ……..... 5

I.4.2.1. Les mortiers de ciment 5

I.4.2.2. Les mortiers de chaux 5

I.4.2.3. Les mortiers bâtards ……..... 5

I.4.2.4. Mortier réfractaire ……..... 5

I.4.2.5. Mortier rapide ……. 5

I.4.2.6. Mortier industriel …… 5

I.4.3. Classification des mortiers ……. 6

I.4.3.1. Classification selon leur domaine d'utilisation ……. 6

I.4.3.2. Classification selon la nature du liant …… 6

I.5. Constituant des mortiers..... 7

I.5.1. Les Liants :..... 7

I.5.1. 1 Le ciment : 7

A- Constituants du ciment ……..... 8

B- Les additifs :..... 9

I.5.2. Le sable…….. 9

I.5.2.1. Classification des sables selon leurs provenances ……. 9

I.5.2.2. Rôle du sable dans le mortier ……..... 10

I.5.3. Eau de gâchage : 10

I.6. Les fibres …….. 10

I.6.1. Définition des fibres ……..... 10

I.6.2. Les types de fibres ……..... 11

I.6.2.1. Selon la géométrie ……..... 11

I.6.2.2. Selon la nature chimique…….. 13

I.6.3. Rôles des fibres dans le béton ……..... 15

I.6.4.. Les atouts des fibres :..... 16

I.6.5. Les fibres végétales :..... 16

I.6.5.1. Classification des fibres végétales..... 17

I.6.5.2. Caractéristiques Physiques et Mécaniques des Fibres Végétales :..... 17

I.6.5.3. Structure et morphologie des fibres végétales :..... 18

I.6.5.4. Applications des fibres végétales..... 20

I.6.5.5. Avantages et inconvénients des fibres végétales pour composites : 20

I.6.5.6. Composition chimique 21

A La cellulose …….. 21

I.6.5.7. Présentation de quelques fibres végétales . ……..... 25

I.6.5.8. Fibres de papier . ……..... 26

I.7. Déchets……..... 28

I.7.1. Définition des déchets . ……..... 28

I.7.2. Origine de la production de déchets.: ……..... 29

I.7.3. Constitution chimique du déchet : …….. 29

I.7.4. Différents types de déchets : …….. 29

I.7.4.1. Déchets ultimes …….. 29

I.7.4.2. Déchets inertes . …….. 30

I.7.4.3. Déchets assimilés . …….. 30

I.7.4.4. Déchets verts…….. 30

I.7.4.5. Déchets organiques…….. 30

I.7.4.6. Déchets industriels banals (DIB) …….. 30

I.7.4.7. Déchets dangereux…….. 31

I.7.5. Recyclage des déchets . ……..... 31

I.7.5.1. Définition …….. 31

I.7.5.2. Impacts du recyclage sur l'environnement …….. 32

I.7.5.3. Le papier recyclé …….. 32

I.8. Les propriétés des composites renforcés par des fibres végétales. 33

I.8.1. Propriétés à l'état frais…….. 33

I.8.2. Propriétés à l'état durci…….. 34

I.8.2.1. Propriétés physique …….…….. 34

I.8.2.2. Propriétés mécaniques ……..... 35

I.8.3. Propriétés des composites renforcés par des fibres végétales brutes …….. 36

I.8.4.. Durabilité des composites de fibres végétales…….. 39

I.9. Mortier et béton sous l'effet de compactage ……..... 40

I.9.1. l'Influence de compactage sur les matériaux…….. 40

A- Blocs de terre comprimées avec fibres 40

B- Composites renforcés par des fibres cellulosique….……..…… ……43

I.10. Mortier et béton sous l'effet combiné d'une dépression et de la charge..... 43

Conclusion ……..... 43

CHAPITREII. Matériaux et Essais

II.1. Introduction…….. 44

II.2. Essais effectués sur matériaux……. 44

II.2.1. Caractérisation des granulats……..... 44

II.2.1.1.. Masses volumiques……..... 44

A. Masse volumique apparente 44

B. Masse volumique absolue..... 45

II.2.1.2. Propretés des granulats …….. 45

A. Equivalent de sable..... 45

II.2.1.3. Granulométrie…….. 46

A. Objet de la norme (NA 2607) 46

B. Le tamisage..... 46

C. Courbe granulométrique 46

II.2.2. Essais sur ciment 47

II.2.2.1. Essais physiques…….. 47

A. La finesse..... 47

B. La consistance normale 48

C. Le temps de prise..... 48

II.2.2.2. Essais mécaniques sur le ciment……..... 48

II.2.3. Essais sur mortier 48

II.2.3.1. mortier frais…….. 48

A. La masse volumique 48

II.2.3.2. Mortier durcis..... 49

A. Essais mécaniques 49

A1. Essai de traction par flexion..... 49

A.2 Essai de compression..... 50

B. Essai d'absorption d'eau par capillarité 51

C. Essai de retrait :..... 51

D. Mesure des variations de masse 52

II.3. Matériaux utilisées…….. 53

II.3.1. Le sable..... 53

II.3.1.1. Le sable roulé 53

II.3.1.2. Le sable de concassage..... 53

II.3.2. Le ciment..... 53

II.3.3. les fibres 54

II.3.3.1. Préparation des fibres..... 55

II.3.3.2. Taux d'absorption d'eau par les fibres..... 55

II.3.4. L'eau de gâchage..... 55

II.4. Elaboration du composite : ……. 55

II.4.1. Protocole d 'essais : 55

II.4.2. Composition des mortiers : 56

II.4.2.1. Composition du mortier témoin (sans fibres) : 56

II.4.2.2. Composition du mortier avec fibres : 56

II.4.3. Malaxage des mortiers :..... 57

II.4.4. Préparation des mélanges : 58

II.4.5. Equipement nécessaire : 58

II.4.6. Conservation des éprouvettes..... 59

II.5. Procédures appliquées aux éprouvettes…….. 59

II.5.1. Procédure par compactage..... 59

II.5.2. Procédure par extraction du vide..... 60

II.5.3. Le combiné du compactage et extraction du vide : 60

Conclusion ……..... 64

II.6. variable étudiées ……..... 62

CHAPITREIII Résultats et interprétation

III.1. Introduction..... 63

III.2. Essais effectués sur granulats..... 63

III.2.1. Masses volumiques 63

III.2.2. Equivalent de sable 63

III.2.3. Analyse granulométrique 64

III.2.4. Mélange des deux sables 64

III.3. Caractérisation des mortiers..... 65

III.3.1. Le mortier à l'état frais..... 65

III.3.1.1. l'eau extrait sous l'effet de procédure..... …….. 65

III.3.1.3. Le retrait……..…….. 69

Conclusion ……..... 71

Conclusion Générale……72

Références bibliographiques I

Introduction Générale

Introduction Générale

Compte tenu de l'augmentation des ratios de consommation mondiaux, qui à leur tour contribuent à l'épuisement des ressources naturelles, nous trouvons confronter à la nécessité de Recyclage de nombreux matériaux et de les inclure dans le domaine de la construction.

Comme de nombreux pays dans le monde, l'Algérie a connu une augmentation dans le domaine de la construction, c'est-à-dire une augmentation dans la consommation du mortier et du béton dans divers secteurs de la construction (bâtiments, ouvrages d'arts, constructions spéciales...).

Ces derniers se composent essentiellement de liant hydraulique, de granulats et d'eau sont parfois renforcée de fibres de nature soit minérales, métalliques ou végétales.

Pour des applications particulières, les betons et mortiers renforcés de fibres et malgré les nombreux avantages procurés par l'ajout par les fibres de cellulose, dont on peut citer la biodégradabilité, la légèreté, l'abondance, le coût bas, ...etc, son inconvénient, est qu'il entraine une diminution de la résistance, car il demande une quantité d'eau important pour le gâchage. Pour pallier à cette diminution de résistance, il est proposé dans cette étude de tester le compactage et l'application d'une dépression sur le matériau et de voir leur effet sur son comportement.

CHAPITRE I

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de grouper toutes les informations relatives aux matériaux utilisés dans notre étude, où nous examinerons leurs types, sources et composants. L'accent a été mis sur les fibres de cellulose, nous avons donc présenté dans cette partie leurs types, caractéristiques et composants. Ensuite les concepts de déchets et de recyclage est introduit. Enfin, nous passerons à analyser et exposer les études les plus importantes liées à notre étude.

I.2. Matériaux composites :

Un matériau composite est un matériau hétérogène formé d'au moins deux constituants non miscibles, disposés selon une organisation géométrique particulière. Quasiment tous les composites sont constitués:

•De renforts, prenant généralement la forme de fibres ou de particules, assurant l'essentiel des propriétés mécaniques du composite;

•D'une matrice dans laquelle sont noyés les renforts, assurant la cohésion de l'ensemble et le transfert des efforts ainsi que l'essentiel des propriétés autres que mécaniques .

Il existe de très nombreuses organisations géométriques possibles, aussi bien au niveau des constituants eux-mêmes (renforts sous forme de fibres longues, fibres courtes ou particules) que de la façon dont ils sont disposés (sous forme de fils qui sont ensuite tissés, de plis unidirectionnels qui sont empilés...). Selon l'organisation géométrique choisie, les propriétés du composite peuvent varier du tout au tout **[1].**

Constituants des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D’une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges,
- D’un renfort.
- D’une interface **[1].**

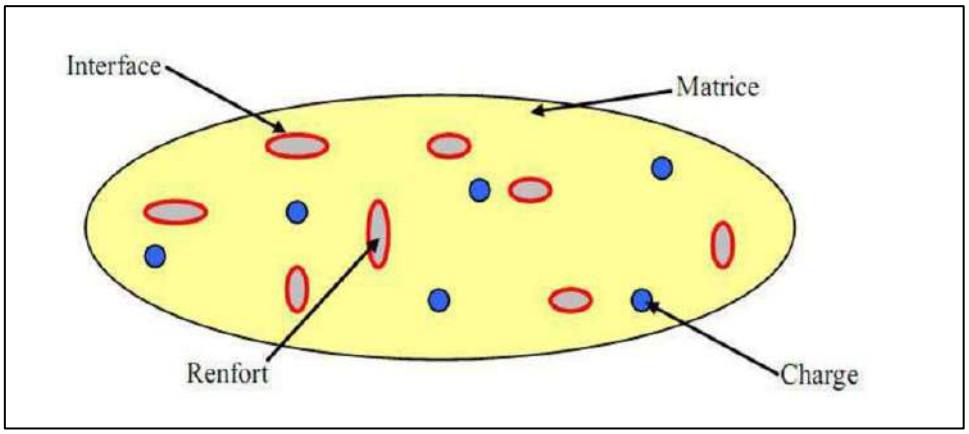


Figure I-1 Matériaux composites [1]

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice

• Les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle.
• Les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire, ainsi que le freinage.
• Les composites à matrices métalliques (CMM) qui tentent de concilier les qualités des métaux avec la légèreté et les caractéristiques mécaniques des structures composites[**1**].

I.3. Matériaux composites renforcés de fibres :

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le renforcement des matériaux de construction par des fibres fut très tôt utilisé dans l'histoire. Les blocs de terre crue renforcée par la paille ou l'incorporation de crin de cheval aux mortiers d'enduit sont des exemples remontant à plusieurs milliers d'années pourtant, le passage de ces utilisations traditionnelles à un développement technologique de composites renforcés par des fibres végétales pour des utilisations en bâtiments est relativement récent, il remonte au début des années 1970, lorsque sont réalisés les premiers travaux visant à

remplacer les fibres d'amiante dans les éléments préfabriqués profilés en fibro-ciment (bardage, tuiles, plaques, etc.). Dès lors, de très nombreuses études ont été menées sur tous les continents pour utiliser des fibres de renforcement d'origine naturelle dans les matériaux de construction, en particulier dans les pays en voie de développement, en raison de leur disponibilité, de leur faible coût économique et énergétique ainsi que de la relativement faible technicité nécessaire à leur production.

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. **[2]**

I.4. Le mortier :

I.4.1. Définition d'un mortier:

Le mortier est un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, liant (ciment ou chaux), d'eau et d'adjuvant et éventuellement d'ajout. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables, leur choix et dosage sont en fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement **[3]**

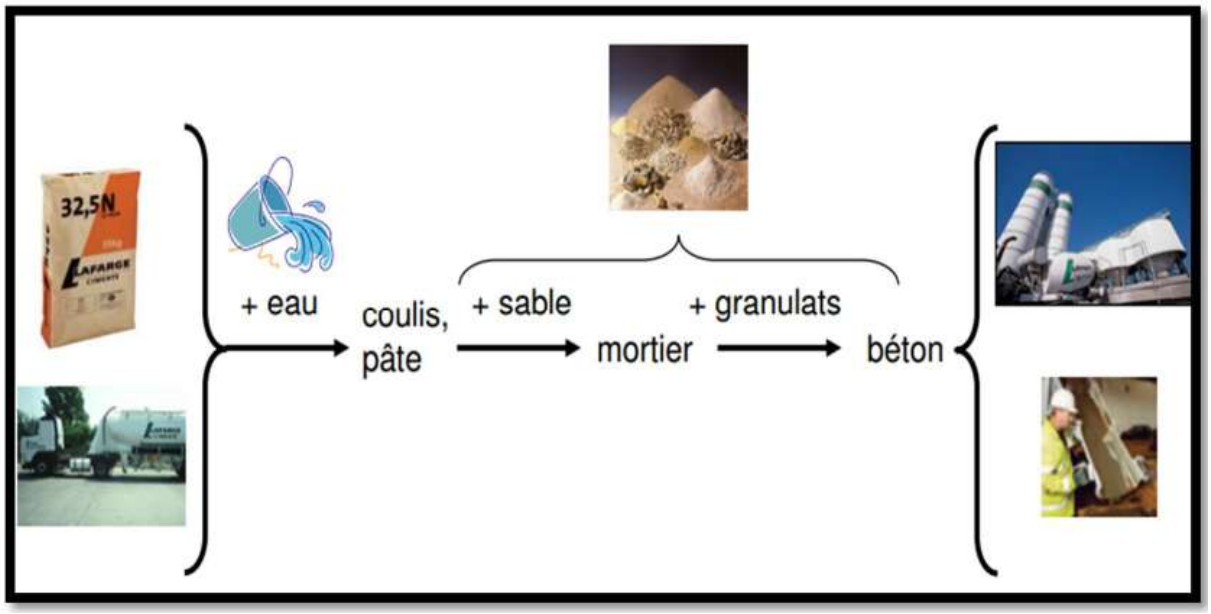


Figure I-2 Constituants des mortiers

L'incorporation de fibres que se soient naturelles ou artificielles permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables.

I.4.2. Différents types des mortiers :

Les mortiers se partagent en différents types

I.4.2.1. Les mortiers de ciment :

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m^3 de sable.[**4**]

I.4.2.2. Les mortiers de chaux :

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment surtout lorsque la chaux est calcique [**4**].

I.4.2.3. Les mortiers bâtards :

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée **[4]**

I.4.2.4. Mortier réfractaire :

Il est fabriqué avec du ciment fondu qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues.**[4]**

I.4.2.5. Mortier rapide :

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements **[4]**

I.4.2.6. Mortier industriel :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs contrôlés en usine et parfaitement réguliers Pour utiliser ce type de mortier. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins : Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.**[4]**

- Mortiers d'imperméabilisation.

- Mortier d'isolation thermique
- Mortier de jointoiement
- Mortier de ragréage
- Mortier de scellement, mortier pour chapes
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment
- Mortier de reparation

I.4.3. Classification des mortiers :

I.4.3.1. Classification selon leur domaine d'utilisation :

En général, les variétés de mortier sont liées directement par son domaine d'application qui est très vaste, une typologie des mortiers à partir de son utilisation permet de citer les catégories suivantes **[5]** :

- Mortier de pose
- Mortier de joints
- Mortier pour les crépis
- Mortier pour le sol
- Mortier pour les stucs
- Pierres artificielles
- Support pour les peintures murales
- Mortier d'injection
- Mortier pour les mosaïques
- Mortier de réparation pour
- Mortier auto plaçant
- Mortier fibré

I.4.3.2. Classification selon la nature du liant :

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en **[5]**:

- Mortier de ciment portland.

- ❖ Mortier de chaux.
- ❖ Mortiers bâtards.
- ❖ Mortier à base de ciment de maçonnerie.

I.5. Constituants des mortiers

I.5.1. Les Liants :

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être à base de ciment. C'est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson. Généralement, on peut utiliser :

- Les ciments normalisés (gris ou blanc).
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ...).
- Les liants à maçonner.
- Les chaux hydrauliques naturelles.
- Les chaux éteintes**.**

I.5.1. 1 Le ciment :

Le ciment est obtenu par cuisson de mélanges de calcaire et d'argile. Le procédé de fabrication consiste à concasser et à broyer ces deux matières premières et à les mélanger dans des proportions bien définies. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants**.** Le clinker c'est un constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants **[2]**.

Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) nécessaire pour régulariser la prise. Cette phase est propice à la réalisation des tests d'écoulement puisqu'on considère que la structure de la matrice n'est pas modifiée par le processus d'hydratation. Différents types de ciment existent sur le marché, et se distinguent par leurs relations avec les

propriétés du béton. Ainsi, le choix du type de ciment, est conditionné par les performances souhaitées du béton (résistance à la compression, temps de début de prise, etc.) Du point de vue rhéologique, les propriétés du ciment influant sur l'écoulement de la pâte d'un béton sont principalement la composition minéralogique, la granulométrie et la finesse**.**

Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et de durabilité du béton. Le rapport Eau/Ciment (E/C) est un facteur très influent sur les différents aspects des bétons. Ce rapport a toujours été associé directement à la résistance mécanique du béton et sa durabilité, et la formulation des bétons ordinaires passaient par l'optimisation de ce phénomène. Toutefois, l'introduction de nouveaux matériaux (additions minérales, adjuvants avec un extrait sec solide) porte un intérêt particulier à l'utilisation de la concentration volumique en solides puisque ce paramètre prend en compte tous les constituants du béton **[2]**.

A- Constituants du ciment :

Les ciments sont constitués, par mélange et broyage. Ils se composent de **:**

- **Le clinker :**

Le constituant principal des ciments industriels actuels est le clinker, mot anglais signifiant Scorie. Il est obtenu en cuisant, vers 1450°C, des mélanges appropriés de calcaire et d'argile, appelés crus. L'argile, principalement composée de silicates d'alumine, se scinde sous l'effet de la chaleur en ses constituants, silice et alumine, qui se combinent ensuite à la c haux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de chaux.

Composant	**SiO_2**	**Al_2O_2**	**Fe_2O_2**	**CaO**	**MgO**	**K_2O**	**Na_2O**	**SO_{3-}**	**Cl^-**
%	**10.05**	**2.99**	**1.55**	**26.90**	**3.86**	**0.41**	**0.05**	**30.33**	**0.007**

Tableau I-1 Composition chimique du gypse [2]

- **Le gypse**

Le gypse dénommé aussi gypsier est une roche saline commune des bassins sédimentaires soumis à subsidences, elle est composée principalement du minéral gypse, minéral salin très commun des séries sédimentaires, et de sulfate doublement hydraté de calcium. Ce dernier est à la fois une espèce chimique et une espèce minérale, décrite par la

formule CaSO4.2H2O. Le gypse est la roche qui permet de fabriquer industriellement le plâtre.

B- Les additifs :

On les ajoute éventuellement afin d'améliorer certaines propriétés. Les additifs ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques. Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles. Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortier, béton ou coulis. La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0.5% de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CEM III/A ou B et des CEM III/C, pour lesquelles la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1%.**[2].**

I.5.2. Le sable :

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre ; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière **[2].**

I.5.2.1. Classification des sables selon leurs provenances :

- **Sable de rivière :** il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons**.**
- **sable de mer :** il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel**.**
- **Sable de carrière :** Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire**.**
- **Sable artificiel :** il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré...). Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines**.**
- **Sable de dune :** C'est une variété des sables de mer ou du désert. Il est donc très fin **[2]**

I.5.2.2. Rôle du sable dans le mortier :

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques, ajoutant à cela, sa disponibilité et son aspect esthétique (couleur). Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide **[2].**

I.5.3. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du béton**.**

L'eau de gâchage doit être propre et ne pas contenir plus de 5 grammes par litre de matières en suspension (vases, limons, etc.), ni plus de 35 grammes de matières de sels solubles, sous réserve que ces sels dissous ne risquent pas de nuire à la conservation des bétons (acides, sulfates, sels corrosifs, matières organiques).

L'eau de mer n'est pas autorisée, sauf justifications spéciales et accord du maitre de l'œuvre. L'utilisation d'eau de mer comme eau de gâchage provoque généralement une chute sensible de la résistance du béton : de plus, elle favorise la corrosion des armatures et peut être particulièrement dangereuse dans le cas de bétons fortement armés ou précontraints. De toute façon, il faut considérer que le poids de chlorure de sodium introduit par l'eau de mer est d'environ 2% du poids du ciment

Les eaux très pures (eau distillée, eau de pluie etc.) ne sont pas autorisées.

Toute eau de qualité douteuse doit être soumise à une analyse **[2] .**

I.6. Les fibres :

I.6.1. Définition des fibres :

Le terme fibre se rapporte à un corps solide flexible. La fibre est un composant filiforme (rapport longueur /diamètres est très élevé : 25-1500) de faible longueur (5-60mm) et dont

l'épaisseur est comprise entre 0.005-0.75mm les fibres sont disponibles sous différentes formes (rondes, plates, gaufrées) d'origine minérale, organique ou métallique, les fibres sont courtes et dispersées dans toute la masse de béton **[6].**

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis les trente dernières années, l'intérêt de leur utilisation ne cesse de croitre pour la fabrication de béton prêt l'emploi du béton préfabriqué et du béton projeté fabriqué à partir soit d'acier, soit de plastique, de verre, de matériaux naturels. Elles sont ajoutées au béton lors du malaxage.

I.6.2. Les types de fibres :

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie. Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres, sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages et des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles) **[7]**.

I.6.2.1. Selon la géométrie :

Leur géométrie est très variable **(Figure I -3)**. Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice **[6].**

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment.

L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire, en plus de l'adhérence avec la matrice, les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant alors une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème, mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacités 'en ressent.

L'élancement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforce de fibres (notamment métalliques) **[9]**.

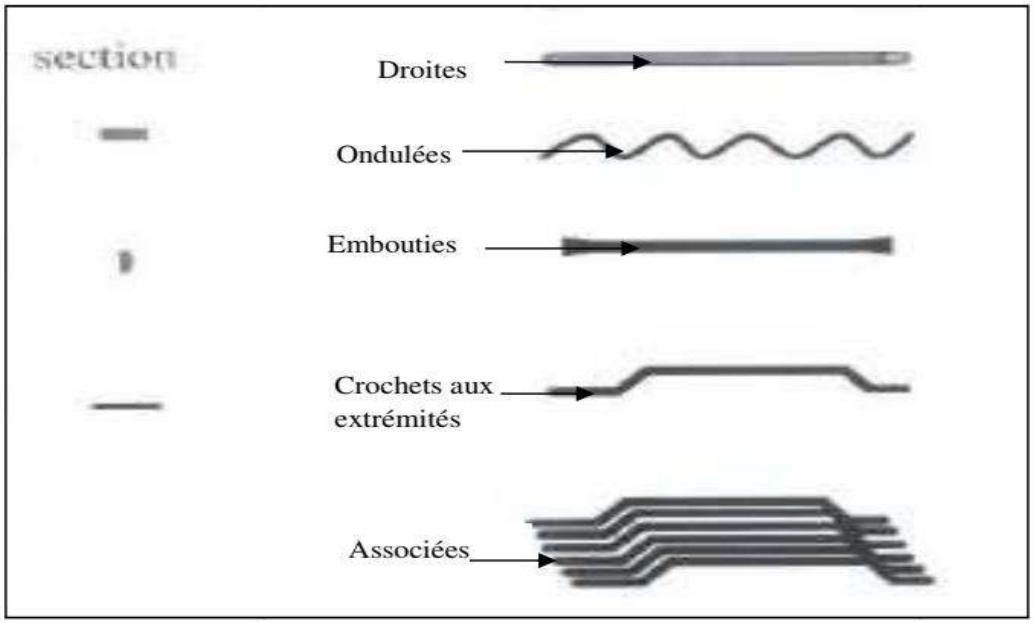


Figure I-3 différente forme géométrique de fibres métalliques [9].

Pour une longueur de fibre et un volume donné, plus le diamètre de la fibre sera faible, plus la surface spécifique sera grande. Ceci conduit à des frottements plus importants entre la fibre et la matrice, mais aussi à un nombre de fibres élevé qui augmente la probabilité de contact entre celles-ci. Ceci conduit à une diminution de la maniabilité quand le rapport longueur/diamètre augmente.

Pour un rapport longueur/diamètre fixe et un dosage en fibres donné, si le diamètre diminue, la longueur va elle aussi diminuer. Selon le raisonnement précédent, ceci conduit à une diminution de la maniabilité ce qui est en décalage avec la réalité car dans ce cas, le poids unitaire de la fibre intervient.

En résumé, pour une maniabilité donnée, on peut utiliser un dosage important de fibres courtes ou un dosage faible de fibres longues.

De même, le rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat est aussi un paramètre prépondérant concernant l'efficacité des fibres dans le béton. Rossi explique que dans le cas où la résistance de l'interface entre la matrice cimentaire et le granulat est inférieur à la résistance du granulat et de la matrice, les fissures se développent à cette interface avant de pénétrer dans la matrice. Si la longueur des fibres est proche du diamètre des plus gros

granulats, une majorité d'entre elles ne pourront intercepter efficacement les fissures inter granulaires. Pour que les fibres interviennent au niveau de la structure, il est préconisé dans la littérature un rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat de deux à trois.

Dans le cas où la résistance à l'interface entre la matrice cimentaire et les granulats n'est pas la plus faible, les fissures traversent à la fois la pâte et les granulats. Les fibres peuvent alors être pleinement sollicitées, et l'utilisation de fibres de longueur inférieure à trois fois le diamètre du plus gros granulat peut être envisagée.**[10]**.

I.6.2.2. Selon la nature chimique

Chaque type de fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propre : Dimensions (diamètre, longueur...), forme (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...),

Résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibre **[6]**.

a. Les fibres métalliques :

Les fibres métalliques caractérisées par un module d'élasticité élevé, offrent au béton, une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable, leur forme et leur dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités) **[6]** .



Figure I-4 les fibres métalliques

b. Les fibres de fonte amorphe :

Ces types de fibres sont obtenus par refroidissement brusque d'un alliage métallique à base de fer, sont constituées de petits rubans de 3mm de largeur, et contribuent à la limitation des fissures sous chocs.**[6]**.

c. Les fibres de verre :

Sous leur forme habituelle, elles sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration, sous la forme de fibre de faibles diamètres, le verre perd ce caractère acquière de bonne caractéristique mécanique et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faible épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton.**[6]**.



Figure I-5 les fibre de verre

d. Les fibres de polypropylènes :

Sont des produits d'origine pétrolifère, découverts en 1954, ces matériaux de synthèse ont connu une extension dans l'industrie textile ou ils apportent les avantages suivants :
Disponibilité à prix relativement faible Résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs. Augmentation notable de la résistance aux chocs. Limite l'ouverture des fissures. Ces fibres sont fréquemment utilisées dans les bâtiments, en particulier dans réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façade de tuyaux et pieux[6]. .



Figure I-6 les fibres de polypropylénes

e. Les Fibres naturelles :

Les fibres naturelles sont classées généralement en fonction de leurs origines : Animale, végétale et minérale. Les fibres d'origine végétale sont constituées majoritairement de cellulose et possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles d'origine animale. Ces dernières, telles que la laine et la soie, sont largement utilisées dans le domaine du textile Les fibres d'origines végétales peuvent être classées en sous familles selon d'où elles ont été extraites ; graines, fruits, écorce, feuilles, bois, tiges ou canne **[11] [12] .**

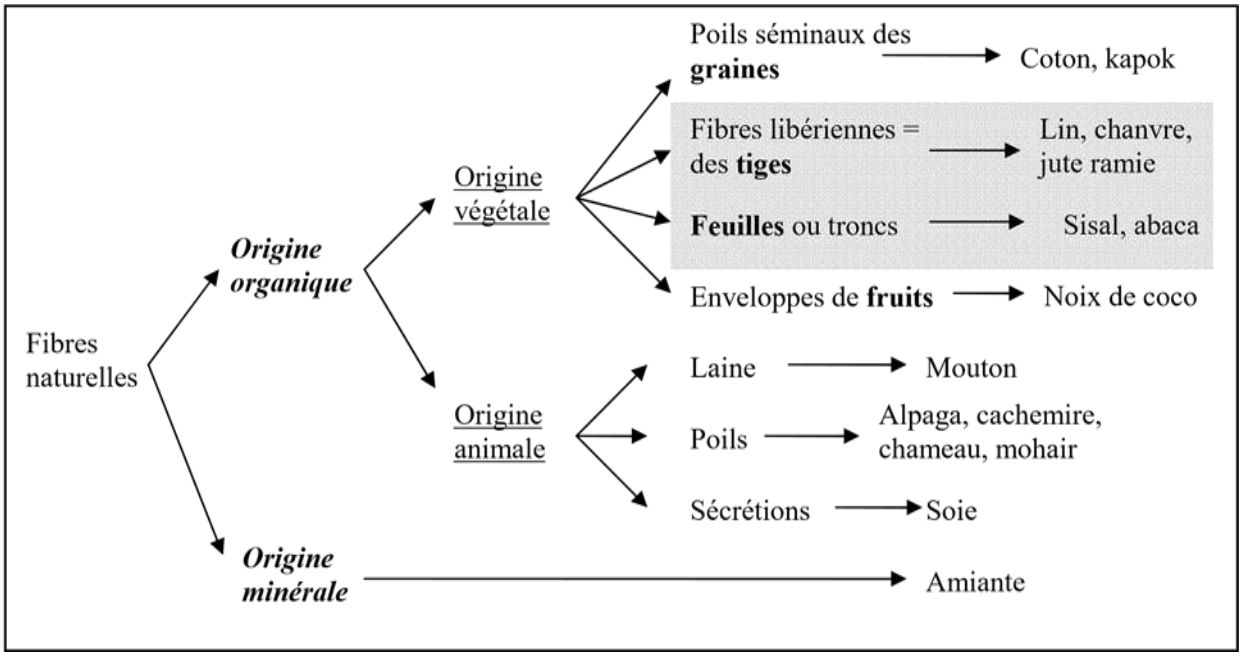


Figure I-7 Les différents types de fibres naturelles [12]

I.6.3. Rôles des fibres dans le béton :

Au début, les chercheurs ont essayé par l'addition de fibres dans le béton, d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion. Le but est uniquement une résistance très élevée du béton **[13] .**

Elles peuvent également, dans certaines applications, remplacer les armatures passives.
Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées ; ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :

- La cohésion du béton frais.
- La déformabilité avant rupture.
- La résistance à la traction par flexion.
- La ductilité et la résistance post fissuration.
- La résistance aux chocs.
- La résistance à la fatigue
- La résistance à l'usure.

- La résistance mécanique du béton aux jeunes âges.
- La réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures.
- La tenue au feu.
- La résistance à l'abrasion **[14]**

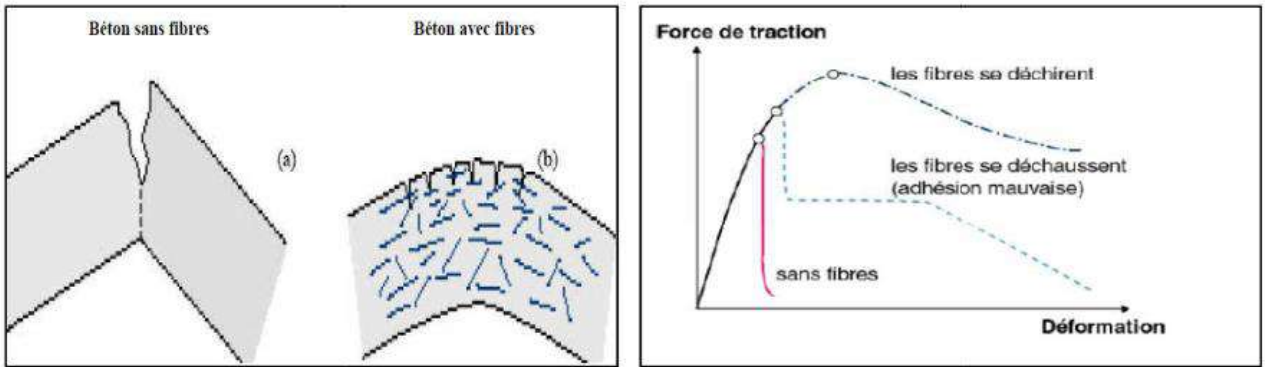


Figure I-8 illustration de l'apport du renfort par des fibres ***[14]***

Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme il est indiqué dans la**. Figure I 8 a.**

Transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroit la sécurité lors des états de chargement ultimes **Figure I 8 b.**

I.6.4. . Les atouts des fibres :

Grâce à leurs propriétés mécaniques, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et d'offrir au concepteur une plus grande liberté architecturale. Elles confèrent aux bétons de nombreux atouts :

- ✓ La maîtrise de la fissuration.
- ✓ Une facilité et rapidité de mise en œuvre.
- ✓ Un renforcement multidirectionnel et homogène.
- ✓ Un remplacement partiel ou total des armatures passives **[15].**

I.6.5. Les fibres végétales :

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales, résistent aussi à la plupart des acides organiques, mais sont détruites par les acides minéraux

forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales : les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction

Dans les pays peu industrialisés, les fibres végétales constituent donc une alternative à faible coût économique et surtout écologique aux fibres synthétiques conventionnelles (fibres métalliques, minérales ou polymériques) **[16].**

I.6.5.1. Classification des fibres végétales :

Nous pouvons subdiviser les fibres végétales en 5 groupes selon leur origine Figure I-9. Les fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok), les fibres libériennes extraites de liber de plantes (lin, chanvre, jute, ramie), les fibres extraites de feuilles (sisal, abaca), d'enveloppes de fruits (noix de coco) ou les fibres dures extraites des tiges de plantes.

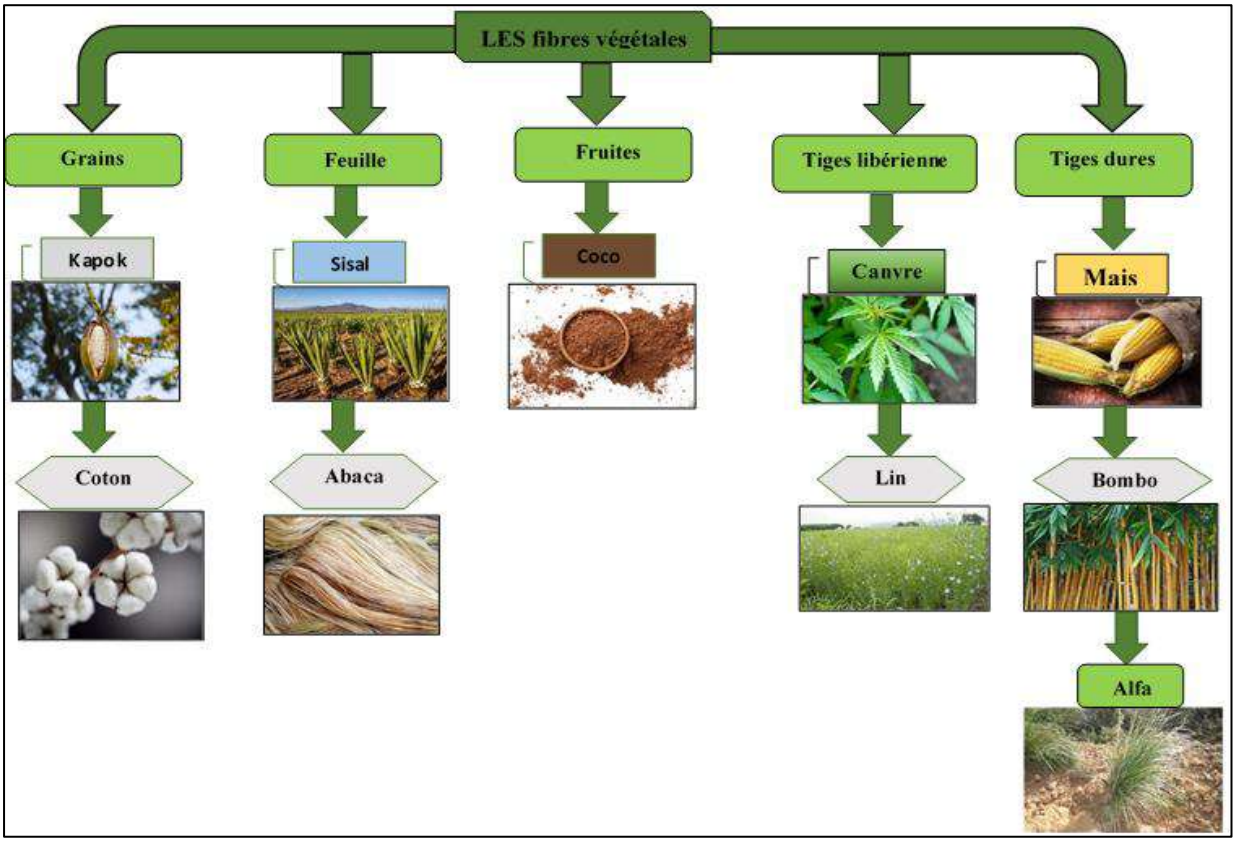


Figure I-9 Classification des fibres végétales selon l'origine

I.6.5.2. Caractéristiques Physiques et Mécaniques des Fibres Végétales :

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre sa densité et son teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Et elle est

caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité.

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales ont été traitées par beaucoup de chercheurs [17].

Tableau I-2 caractéristiques physiques des fibres végétales les plus utilisées[18].

Fibre	Diamètre (mm)	Densité (g/cm3)	Teneur en eau à l'état naturel (%)	Absorption d'eau après 5 min (%)	Absorption d'eau à la saturation (%)
Sisal	1.5 1.37 0.75-1.07	1.5 1.37 0.75-1.07	10.97-14.44	89.30 67-92	92 190-250
Noix de coco	- 1.2 0.11-0.53	1.2 1.17 0.67-1.00	-	43.20 22-28 11.44-15.85	80.40 85-135

Tableau I-3 Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales [18].

Fibres	Densité (g/cm3)	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
Cotton	1.5-1.6	7.0-8.0	587-597	5.5-12.6
Jut	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
Lin	1.5	2.7-3.2	345-103	--
chanvre	--	1.6	690	61.4-128
ramie	--	3.6-3.8	400-938	--
sisal	-- 1.37 0.75-1.07 1.5	2.6 5.2 2.08-4.08 2.0-	278 263 577.50 511-635	15.2 10.94-26.70 9.4-22.00
Noix de coco	1.2 1.17 0.67-1.00 1.33	30.0 37.7 13.7-41.0	175 107 174 72	4.0-6.0 2.8 2.5-4.5 2.0
Palmier dattier	0.51-1.08	7.5-17.4	170-290	2.1-5.25

I.6.5.3. Structure et morphologie des fibres végétales :

A. Structure :

Une fibre végétale est un empilement de plis composites renforcés par des fibrilles de

cellulose. La couche extérieure est composée d'une paroi primaire (P) (0.1-0.5 µm) et d'une paroi secondaire, elle-même constitué de trois couches repérées S1 (0.5-2 µm), S2 (5-10µm) et S3 (0.5-1µm). Au centre il peut exister une cavité appelée lumen. La couche S2 de la paroi secondaire représente environ 80% de la section et conditionne le comportement mécanique[19].

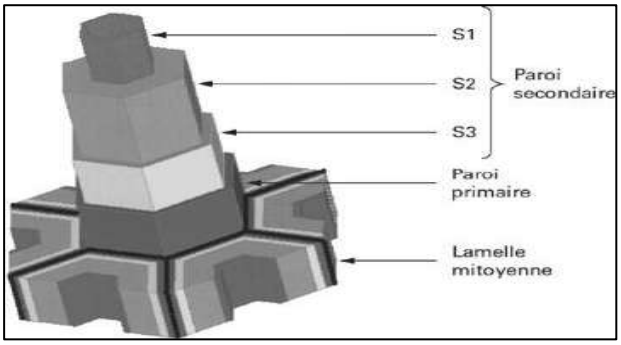


Figure I-10 Schéma des parois d'une fibre végétale [12]

B. Morphologie :

En première approche, une fibre végétale est assimilable à un matériau composite renforcé par des fibrilles de cellulose. La matrice est principalement composée d'hémicelluloses, de pectines et de lignine. **[19].**

Les fibrilles de cellulose sont orientées en hélice suivant un angle nommé angle microfibrillaire (Figure I- 11.), dont la valeur varie d'une espèce à l'autre. L'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques des parois des fibres, plus que l'angle des microfibrilles augmente, le module d'Young décroît, tandis que l'extensibilité des parois augmente **[20].**

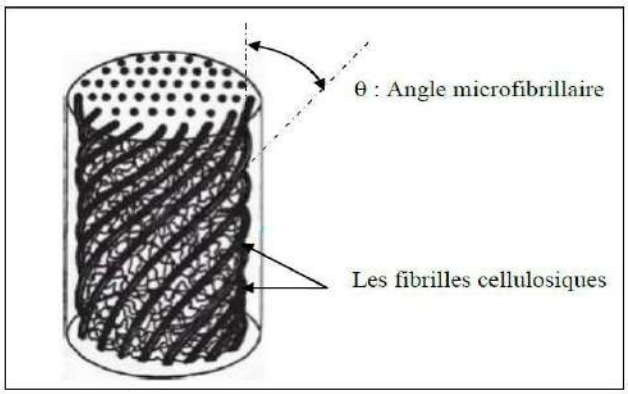


Figure I-11 Structure générale d'une fibre naturelle [24].

Tableau I-4 Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales [24].

Fibre	Longueur de la fibre (mm)	Diamétre de la fibre	Angle mocro fibrillaire(°)
Cotton	**35**	**10-45**	**-**
Lin	**4-77**	**5-76**	**10**
Chanvre	**5-55**	**10-51**	**6.2**
Kénaf	**2.5-4.5**	**14-33**	**-**
Jute	**2.5**	**5-25**	**8**
Sisal	**900**	**8-50**	**20**
Rami	**900-1200**	**20-80**	**7.5**
Nois de coco	**0.3-1**	**12-24**	**45**

I.6.5.4. Applications des fibres végétales :

Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont actuellement en cours de développement pour remplacer les matériaux traditionnels. Les principaux marchés sont aujourd'hui l'automobile et la construction.

- **En automobile :** les entreprises comme Opel Audi, BMW, Renault, Ford, Seat, fabriquent des composites renforcés de fibres végétales : garnitures et panneaux de portes, planches arrière, revêtements intérieurs et passage de roues, voûte interne de pneu, pare-choc, tableau de bord, …etc.
- **En construction :** les fibres végétales sont utilisées en renfort de matériaux, notamment d'isolation, de produits en ciment, profilés de portes, de fenêtre, panneaux décoratifs…etc.
- **En Infrastructure :** Trottoirs, digues, signalisation routières, isolant phoniques…etc.
- **Autres applications :** les palettes, le mobilier (table de camping ou chaise), équipement de jeux publics **[21]** .

I.6.5.5. Avantages et inconvénients des fibres végétales pour composites :

Les principaux avantages et inconvénients des fibres végétales sont les suivants :

- Faible densité ;
- Faible coût ou coût modéré ;
- Fibres renouvelables par culture ;

- Faible consommation d'énergie pour leur production ;
- Fibres biodégradables ;
- Stock disponible important ;
- Découpage et usinage faciles.

Grâce à un compromis idéal rigidité/résistance/légèreté, les composites renforcés par des fibres végétales concurrencent efficacement les matériaux traditionnels incorporant des charges ou fibres minérales.

Par contre, à ces avantages sont associés les inconvénients suivants :

- Fibres hydrophiles ;
- Stabilité thermique limitée ;
- Gonflement de fibres ;
- Propriétés non constantes des fibres, elles dépendent des conditions climatiques **[22] [18].**

I.6.5.6. Composition chimique :

Les fibres végétales sont généralement constituées de fibrilles de cellulose, conformées en spirales dans une matrice d'hémicelluloses, de pectines et de lignine **[23],** il existe aussi, en faible proportion, des constituants extractibles comme les protéines ou encore des composés inorganiques. La proportion d'holocellulose (comprenant la cellulose et l'hémicellulose) et de lignine varie selon les fibres naturelles et l'âge de ces fibres. La composition dépend de la condition de croissance, de l'âge du végétal, des conditions climatiques et bien sûr de la nature des fibres **[24]**.

A. La cellulose :

La cellulose est le principal composant des fibres végétales et représente la matière la plus abondante sur la surface de la terre (plus de 50 % de la biomasse). C'est est un homopolymère linéaire formé d'unités D-glucopyranose liées entre elles par des liaisons de type glycosidique β-(1→4). Le cellobiose (dimère de glucose) est le motif répétitif de la cellulose **[25]**

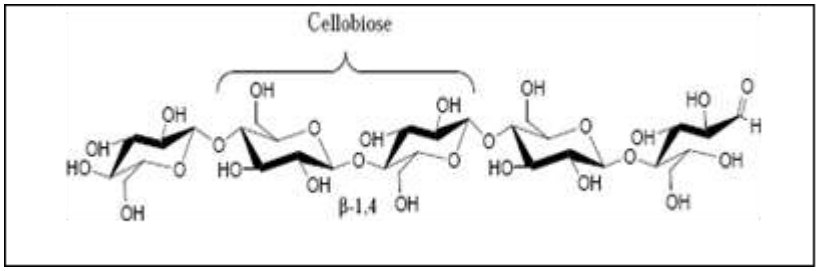


Figure I-12 Structure chimique de la cellulose [25]

Cette conformation explique la linéarité de la molécule qui se trouve stabilisée par un réseau de liaisons hydrogène intermoléculaires et intramoléculaires.

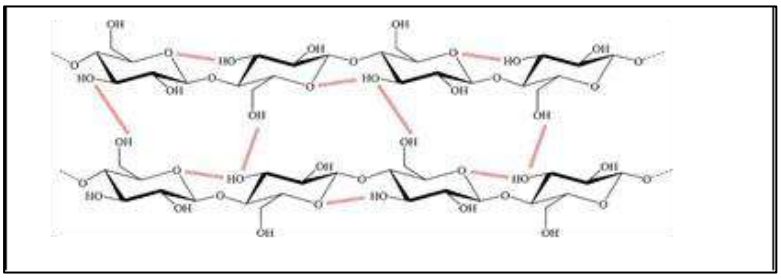


Figure I-13. Liaisons hydrogène inter- et intramoléculaires au sein de la cellulose [25]

Le nombre d'unités glucose constituant une chaîne de cellulose, appelé degré de polymérisation DP, dépend de l'origine et du traitement subi par la cellulose au cours de sa purification. Il varie entre 400 et 14000. Le maximum est atteint pour la cellulose native (n'ayant subi aucun traitement). En moyenne, après traitement de purification, les celluloses possèdent un DP de 2500.

Le taux de cellulose peut varier de manière significative et influencer grandement les propriétés mécaniques de la fibre car la cellulose possède une rigidité environ trente fois supérieure à celle des autres constituants **[25]**, **[26]**

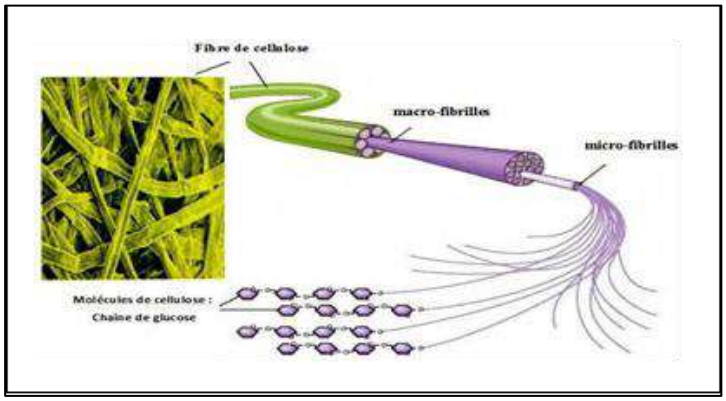


Figure I-14 La structure d'une fibre cellulosique [26]

D'un point de vue cristallinité, la cellulose présente une morphologie semi-cristalline Le taux de cristallinité de la cellulose est de 40 à 50% pour le bois, 60% pour le coton et dépasse les 70% pour certaines algues marines.

Les microfibrilles de cellulose correspondent à des assemblages entre les chaînes β-(1→4) Dg lucanes par formation de liaisons hydrogènes intermoléculaires. Ce réseau permet de maintenir ensemble les molécules et favorise l'établissement d'un état solide ordonné. Le coeur de ces microfibrilles est très cristallin tandis que les chaînes de surface constituent les zones dites amorphes **[24]**.

B. Les hémicelluloses :

Les hémicelluloses sont des polysaccharides amorphes, de masse moléculaire plus faible que celle de la cellulose. Elles sont composées de sucres neutres : xylose, arabinose, galactose, glucose, mannose et acides uroniques. Par suite de leur conformation, les xyloglucanes peuvent contracter des liaisons d'hydrogène avec la cellulose. L'hémicellulose diffère de la cellulose selon quatre aspects :

- Elle contient plusieurs unités de sucres différentes contrairement à la cellulose qui contient seulement des unités de glucose ;
- Elle peut être ramifiée, contrairement à la cellulose qui est linéaire ;
- Le degré de polymérisation, c'est-à-dire le nombre de résidus 'ose' par chaîne, est 10 à 100 fois plus élevé pour l'hémicellulose que pour la cellulose ;
- Les constituants de la cellulose diffèrent d'une plante à l'autre.

La classe la mieux étudiée correspond aux xyloglucanes (Figure I-15) **[27] .**

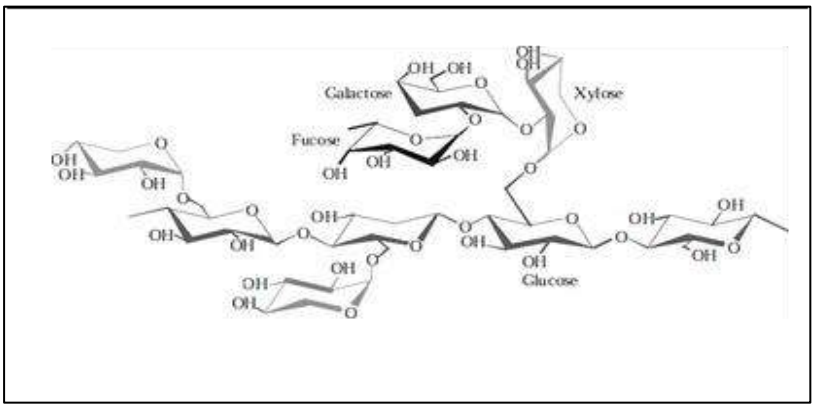


Figure I-15 Structure d'un type de xyloglucane [27]

C. La lignine :

La lignine ou (les lignines) sont des polymères tridimensionnels provenant de la polymérisation radicalaire de trois alcools phenylpropenoiques. La présence de lignines renforce les liaisons hydrogène qui relient le réseau cellulose_ hémicellulose [28]. Elle est responsable de la rigidité et de la dureté des bois et des plantes. Peu sensible à la dégradation biologique, elle crée une barrière morphologique à la pénétration et à la progression des agents pathogènes, et contribue à la protection naturelle des végétaux contre certaines attaques parasitaires. Elle possède des propriétés mécaniques largement inférieures à celle de la cellulose, environ 4GPa en module élastique alors que pour la cellulose cette valeur peut aller jusqu'à 135 GPa. L'élimination de la lignine devient donc souhaitable pour de meilleures propriétés mécaniques des fibres unitaires **[29] .**

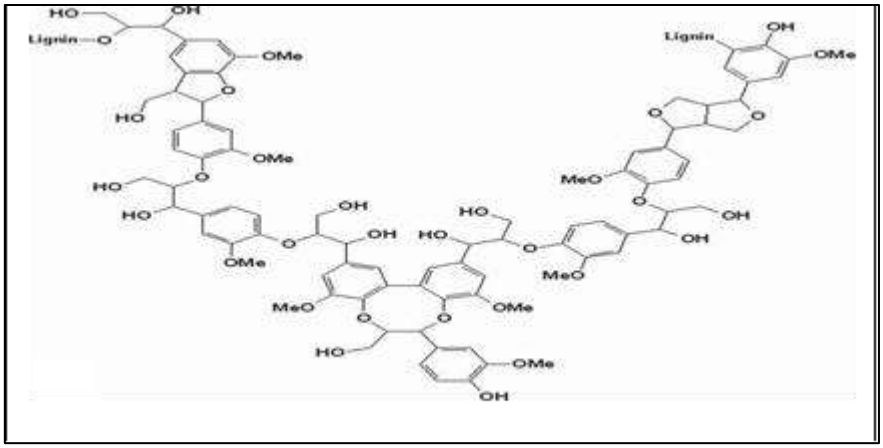


Figure I-16 Exemple de structure chimique de lignine [30]

D. Les pectines :

Les pectines regroupent les hétéro-polysaccharides qui se trouvent généralement dans les parois cellulaires primaires des fibres végétales. La structure des pectines dépend de l'espèce végétale et les proportions des différents types varient en fonction de leur position dans les parois cellulaires. Les pectines sont les composés les plus hydrophiles dans les fibres végétales en raison de la présence de groupes acide carboxylique **[30]** .

E. Les cires

Les cires sont des constituants des fibres naturelles, qui peuvent être extraites avec des solutions organiques. Ces matériaux se composent de différents types d'alcools insolubles dans l'eau et de plusieurs acides tels que l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique. Les cires sont totalement hydrophobes et totalement imperméable à l'eau et aux gaz, limitant ainsi la transpiration des plantes **[30] [24] .**

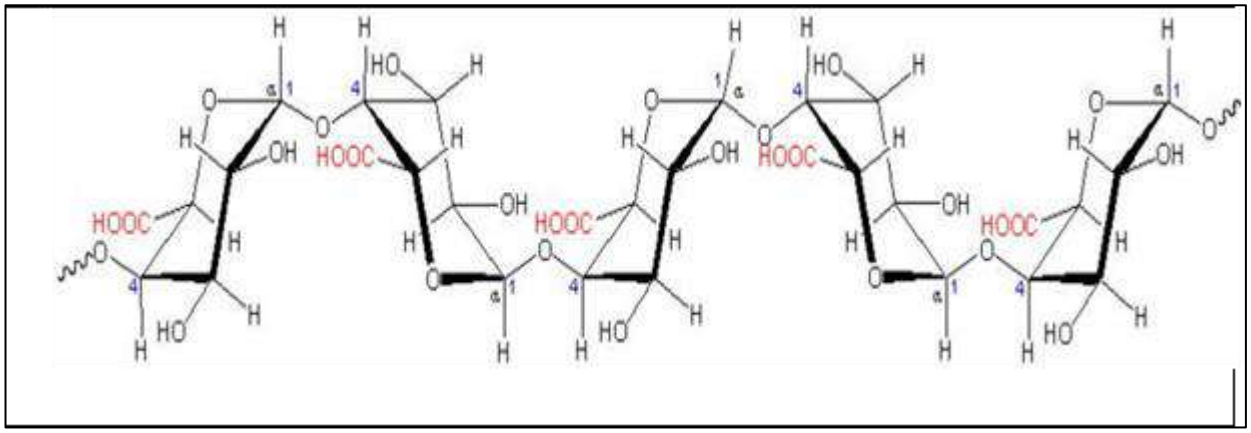


Figure I-17 Exemple de structure d'une chaine de pectine (acide polygalacturonique) [30]

Tableau I-5 Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales [32]

Fibres	Cellulose	Hémicelluloses	Lignine	Pectine	Cire
Diss	**44.10**	**15.15**	**16.80**	**11.85**	**12.10**
Lin	71	18.6 - 20.6	2.2	2.3	1.7
Chanvre	70 - 74	17.9 - 22.4	3.7 - 5.7	0.9	0.8
Jute	61.1 - 71.5	13.6 - 20.4	12 - 13	0.2	0.5
Ramie	68.6 - 76.2	13.1 - 16.7	0.6 – 0.7	1.9	0.3
Sisal	66 - 78	10 - 14	10 - 14	10	2
Coco	32 - 43	0.15 - 0.25	40 - 45	3 - 4	-
Alfa	45	24	24	5	2

I.6.5.7. Présentation de quelques fibres végétales :

- **Le jute** : (*Corchorus)* fibre extraite de la tige de la plante du même originaire du Sud-est Asiatique, il peut être utilisé pour des revêtements de sol.

- **Le sisal**: *(Agave sisalana)* est une plante originaire de l'est du Mexique fibre extraite des feuilles, très résistante, cette fibre sert à la fabrication de cordage, de tissus grossiers et de tapis, des revêtements de sol.

- **Le lin**: *(Linum usitatissimum)* fibre extraite de la tige, plante herbacée annuelle des régions tempérées. Le lin a une faible élasticité, mais est hautement absorbant et bon conducteur de chaleur.

- **Le coir** : (*Cocos nucifera*) fibre entourant les noix de coco, est un palmier poussant dans les pays tropicaux. Elle peut être utilisée pour des revêtements de sol.

- **Le chanvre**: *(Cannabis sativa)* extraite de la tige d'une plante cultivée en zone tempérée est une plante annuelle originaire apparemment de Chine. Elle est constituée à 85% de cellulose. La fibre peut absorber jusqu'à 30% d'humidité et retient 95% des rayons UV.

- **Le Ramie** : (*Bochmaria vivea (L),)* est une plante arbustive. Originaire d'Asie de l'est. Les fibres des tiges du ramie sont constituées de cellulose quasi pure de très bonne qualité. Le ramie est principalement employé pour la production de tissu et utilisées pour le tissage et la fabrication de papiers résistants **[32].**

I.6.5.8. Fibres de 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**.**

La fabrication des pâtes 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 **[2]:**

- la préparation du bois.
- la mise en pate.
- le blanchiment.

- la régénération des produits chimiques.
- la fabrication du papier.

A titre d'illustration on donne ci-dessous (Tableau I- 6) la composition en constituants les plus importants, des bois résineux et feuillus **[2].** entrant dans la fabrication du papier**.**

Tableau I-6 proportion des constituant chimiques des bois résineux et feuillus [2].

Constituants principales	Résineux	Feuillus
	Pourcentage (en masse)	
Cellulose	45-40	**45-50**
Hémicellulose		
Galactoglacmannan	15-20	**-**
Glucuronxylan	10	**-**
Glucomannan	-	**1-5**
Lignine	-	**22-30**
Extractives	0-5	**0-10**

Pour extraire la cellulose du bois, notamment la lignine, plusieurs procédés ont 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. Selon l'emploi de l'un ou de l'autre procédé, il est possible de distinguer deux grandes catégories de pâte à papier **[2].**

- **La pâte mécanique.**
- **La pâte chimique**.

A. La pâte mécanique

On obtient de la pâte mécanique en râpant le bois contre une pierre ou entre des plaques métalliques afin 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 pâte) dépasse généralement 85%

La pâte 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, (Tableau I-7) **[2].**

Tableau I-7 production de pâte : rendement ou qualité

Qualité	Constituants retenus			
	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	**Rendement-matière**
Pate chimique				
• A faible rendement (essentiellement de résineux)	Totalité	Peu	Pas	**45-55%**
• A haut rendement (de feuillues 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%**
Pâte mécanique	Totalité	Totalité	Totalité	**Supérieur à 95%**

B. La pâte chimique :

C'est une Pâte 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 :

Pâte de bois au sulfate (Kraft), à la soude et au bisulfate. Elles peuvent être blanchies, mi blanchies ou écrues**.**

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 pâte 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 **[2].**

I.7. Déchets

I.7.1. Définition des déchets :

Un déchet (détritus, ordure, résidu, etc.) désigne : la quantité perdue dans l'usage d'un produit, ce qui en reste après son utilisation. De nos jours, ce terme tend à désigner n'importe quel objet ou substance ayant subi une altération d'ordre physique ou chimique, ou qui ne présente plus d'utilité et le destinant à l'élimination ou au recyclage (Il est alors parfois nommé

recyclât).

Voici la définition très précise du déchet donnée par une loi française :

" Est un déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit… que son détenteur destine à l'abandon. (Article 1 de la loi du 15 juillet 1975, modifiée par la loi n°92-646 du 13 juillet 1992) **[33]**

I.7.2. Origine de la production de déchets :

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

• biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites ;

• chimiques : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;

• technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;

• économiques : les produits ont une durée de vie limitée ;

• écologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;

• accidentelles : les inévitables dysfonctionnement des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

I.7.3. Constitution chimique du déchet :

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux **[34]** .

I.7.4. Différents types de déchets :

I.7.4.1. Déchets ultimes :

Le déchet ultime est un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. **[34]**

I.7.4.2. Déchets inertes :

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction. Ce sont notamment les déchets suivants : Les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les enrobés bitumeux **[35].**

I.7.4.3. Déchets assimilés :

Les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères (OM) qui proviennent des ménages et tous les déchets gérés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants) **[35]**.

I.7.4.4. Déchets verts

Ce sont les déchets végétaux des parcs et jardins (gazon, branchages…) **[35].**

I.7.4.5. Déchets organiques

Les termes suivants recouvrent la même notion : biodéchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères). Il s'agit de :

❖ déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts)

❖ déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuietout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé,
coquilles d'œufs, etc.…- boues **[35]**

I.7.4.6. Déchets industriels banals (DIB)

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie **[35].**

I.7.4.7. Déchets dangereux

A. Déchets industriels spéciaux (DIS)

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc.… **[35]**

B. Déchets ménagers spéciaux (DMS)

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage. Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé **[35]**.

I.7.5. Recyclage des déchets :

I.7.5.1. Définition :

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés.
Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :
- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. Ainsi, dans le cas du Québec, l'importante hausse du taux de recyclage, passant de 18 % à 42 % entre 1988 et 2002, est allée

de paire avec une augmentation de la quantité de déchets à éliminer par habitant, passant de 640 kg/an/personne à 870 kg du fait d'une augmentation de 50 % de la production par habitant durant cette même période. En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne. Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

I.7.5.2. Impacts du recyclage sur l'environnement :

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières. Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

✓ l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;

✓ chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;

✓ le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité (É) ;

✓ l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).

✓ chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;

✓ chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 d'eau et 2,5 kWh d'électricité (É) en plus de 15 g de bois **[36]**

I.7.5.3. Le papier recyclé :

La production de pâtes 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. 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 **[2]** . 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 % **[2].**

Chaque fois qu'une tonne de papier est recyclée, c'est 1.41 tonnes de bois qui est économisée, ainsi que 48.2 m3 d'eau et 10.25 MWh d'énergie, soit 0.04 tonnes d'équivalent CO2 évitée

Parmi les papiers et cartons qu'on peut trier pour le recyclage, on trouve :

- Le carton ;
- Les journaux et les magazines ;
- Les briques de laits et de jus de fruits ;
- Les suremballages des packs de yaourts ;
- Les boîtes de céréales ;
- Les enveloppes blanches.

I.8. Les propriétés des composites renforcés par des fibres végétales

I.8.1. Propriétés à l'état frais :

L'ajout de fibres végétales à une matrice minérale conduit à une diminution de sa maniabilité **[37]** , compensable par un ajustement du rapport E/L ou l'usage de superplastifiant **[38]**. 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 **[39]** .
La présence de fibres au moment du malaxage induit également une augmentation de la quantité d'air entraîné **[40]**.

Enfin, plusieurs auteurs relèvent un retard de prise lié à l'incorporation de fibres végétales. Des mécanismes complexes semblent expliquer ce phénomène et la bibliographie est parfois contradictoire sur ce thème. Le retard de prise observé serait lié à la présence de sucres libres issus des fibres végétales. Fisher **[41]** cité par **[42]** l'attribue plus précisément à la dégradation de carbohydrates
solubles en acides sacchariniques, agents retardateurs de prise, explication reprise par Reading (**[43]** cité par **[44]**) pour lequel la prise du ciment serait inhibée par des oligosaccharides produits par la dégradation de l'hémicellulose en milieu alcalin.

Govin **[44]** a étudié la modification des mécanismes d'hydratation d'un ciment portland en présence de peuplier, il note une action prépondérante du bois sur l'hydratation du C3S et du C2S. L'inhibition de la précipitation de la portlandite est d'après lui causée par l'acidification

de la phase interstitielle par la présence du bois. Elle modifie également la polymérisation des C-S-H, notamment par création d'un gradient de rapport C/S entre la fibre de bois et la matrice.

Dans ses travaux sur le renforcement d'une matrice cimentaire par des fibres de chanvre, Sedan **[42]** conteste l'attribution du retard de prise à la seule présence de sucres neutres ou d'acides issus de la dégradation des fibres végétales. Il met en évidence la fixation des ions calcium par les pectines des fibres, mécanisme qui, d'après lui, inhibe la précipitation des C-S-H du fait de la trop faible concentration en calcium dans la solution interstitielle.

I.8.2. Propriétés à l'état durci

Comme dans les bétons renforcés 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 **[45].** Cependant, ces propriétés vont dépendre de nombreux facteurs, présentés dans le Tableau ci-après.

Tableau I-8 Paramètres influençant les propriétés des composites à matrice minérale renforcés par des fibres végétales [40]

Facteur	Variables
Types de fibres	Noix de coco, sisal, bagasse, bambou, jute, bois etc.
Géométrie des fibres	Longueur, diamètre, section, morphologie (boucles, crochets etc.)
Morphologie des fibres	Mono filamenteuse, faisceaux, frisotis, nœuds
Surface des fibres	Rugosité, présence d'agents de surface
Propriétés de la matrice	Type de ciment, nature et taille des granulats, adjuvants
Formulation du composite	Rapport E/L, superplastifiant, antimoussant, dosage en fibres
Méthode de malaxage	Type de malaxeur, séquence d'introduction des constituants, méthodes d'ajout des fibres, temps et vitesse de malaxage
Méthode de mise en œuvre	Vibration conventionnelle, égouttage sous vide, extrusion, projection
Méthode de moulage	Pression de moulage
Cure	Température, humidité.

I.8.2.1. Propriétés physiques :

A. Retrait :

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 **[45].**

I.8.2.2. Propriétés mécaniques :

Les recherches de Coutts**[47]** en Australie, ont porté principalement sur l'utilisation des fibres de pâte de bois en substitution des fibres d'amiante mais, par la suite, de nombreuses fibres végétales ont aussi été testées, notamment les fibres de sisal **[48]** , de bambou **[49]** , de banane **[50]** , ou encore de lin. Différents travaux ont également été réalisés pour évaluer le potentiel de déchets de fibres, sous-produits de l'industrie du cordage par exemple **[51].** Les fibres traitées ont été obtenues par le biais de méthodes chimiques, mécaniques, ou une combinaison des deux, et incorporées dans différentes matrices : pâte de ciment Portland ou de laitiers activés par du gypse et de la chaux **[48],** mortier ou plâtre **[52].**

La valorisation des fibres végétales est associé à un mode de fabrication spécifique, à savoir le procédé Hatschek. De ce fait, la formulation et les propriétés, notamment mécaniques, de ces produits sont très différentes de celles obtenues avec un matériau à base de fibres brutes coulé de manière conventionnelle.

Les fibres utilisées sont beaucoup plus courtes (de l'ordre du millimètre) et la mise en œuvre se fait à partir d'un mélange très dilué. L'essorage et la compaction qui suivent permettent d'atteindre des niveaux de résistance en flexion de l'ordre de 20 MPa et des valeurs de ténacité supérieures à 1 kJ/m^2.

L'incorporation de fibres permet d'obtenir un matériau ductile, à la résistance en flexion et surtout à la ténacité nettement plus élevée que la matrice non renforcée. En incorporant 12% en masse de fibres de sisal à une matrice fragile, Savastano *et al* **[48]** obtiennent une résistance en flexion et une ténacité respectivement 5 et 43 fois plus élevées que celles de la matrice seule.

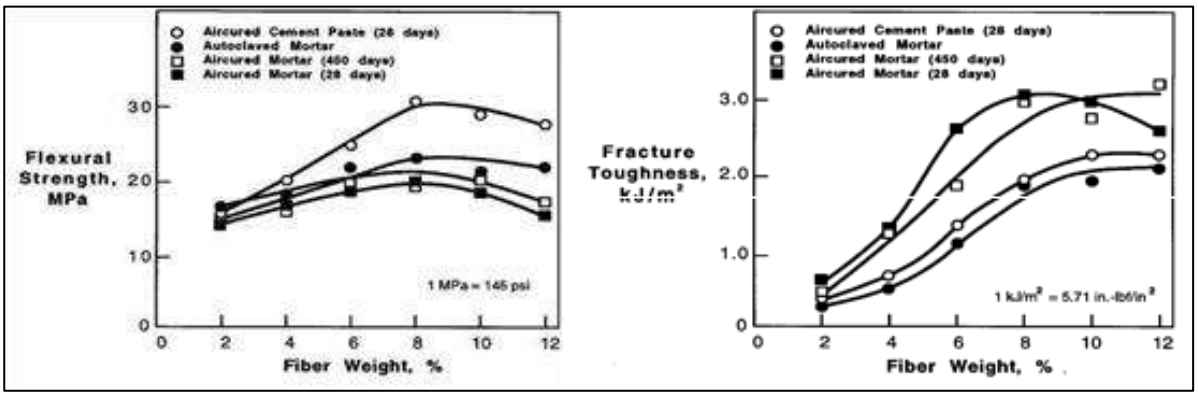


Figure I-18 Résistance en flexion et ténacité de pâte et de mortier de ciment renforcés par de la pâte kraft

Les résultats mettent en évidence l'existence d'un dosage optimal en fibres pour lequel la résistance en flexion et la ténacité sont maximales : cet optimum varie en fonction du type de fibre et de leurs propriétés mais il est en général compris entre 8 et 14 % en masse .

D'après Coutts **[47],** dans les produits en fibrociment, la liaison entre les fibres et la matrice solide se fait au niveau moléculaire. Les groupements hydroxyles des molécules de cellulose constituent les modes de liaison principaux entre les fibres et la pâte de ciment. Le traitement des fibres permet d'optimiser cette liaison, le raffinage permet en effet l'assouplissement des fibres ainsi que la création d'un réseau de microfibrilles à leur surface ce qui augmente les zones potentielles de contact entre fibres et particules solides **[45]** .

La durabilité de ces produits pour des expositions en extérieur a été démontrée par plus de 10 ans d'utilisation commerciale. Dans ce domaine, les composites à base de pâte kraft présenteraient de meilleures performances que les composites à base de fibres brutes du fait des traitements chimiques préalablement subis par la pâte kraft. En effet, ils confèrent aux fibres traitées une faible teneur en lignine qui serait le composant le plus susceptible à l'attaque alcaline **[39]**.

I.8.3. Propriétés des composites renforcés par des fibres végétales brutes :

Les études réalisées sur les matériaux composites à base de fibres végétales brutes mettent en évidence une modification du comportement mécanique du composite. Alors que la matrice cimentaire pure présente un comportement élastique linéaire fragile, les éprouvettes de composite fibré testées en flexion trois points conservent leur intégrité même au-delà de la charge maximale, et continuent à supporter une charge significative dans la partie post-pic Ce phénomène est mis en évidence par la Figure I -19 représentant le comportement d'une matrice cimentaire pure et de la même matrice renforcée par 16% en volume de fibres de chanvre.

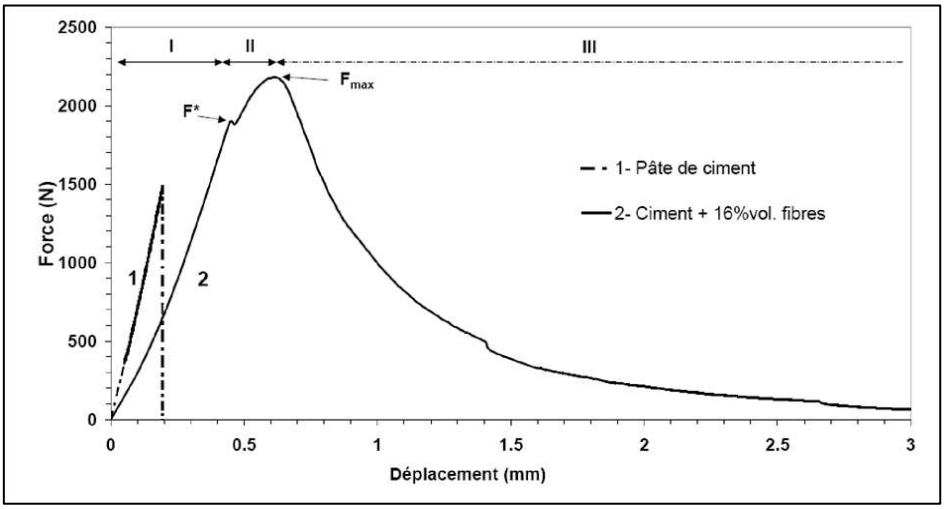


Figure I-19 Courbes du comportement typique d'un échantillon de ciment pur (1) et d'un composite ciment/fibres de chanvre (2) en flexion 3 points [42]

L'auteur distingue trois phases dans le comportement du composite fibré :

- Phase I : comportement quasi-linéaire proche de celui de la pâte de ciment seule, dans cette phase les efforts sont majoritairement repris par la matrice ;
- Phase II : à partir de F* apparition de la première fissure de la matrice, puis reprise de la charge par les fibres, qui, d'après l'auteur, limitent la propagation de la fissure par un effet de pontage ;
- Phase III : au-delà de F_{max}, diminution contrôlée de la charge contrairement à la pâte de ciment seule qui casse brutalement. L'auteur associe cette phase à une rupture progressive des interfaces fibres/matrice suivie d'un déchaussement des fibres **[45].**

L'incorporation de fibres végétales modifie peu la charge d'apparition de la première fissure, qui est liée principalement aux propriétés de la matrice, mais une fois la fissure apparue, les fibres limitent la propagation de la fissure.

Le passage d'une matrice fragile à un composite fibré ductile présentant un comportement post-pic adoucissant est relevé par tous les auteurs. Cependant, cette modification du comportement ne va pas forcément de pair avec une amélioration de la résistance en flexion, c'est pourquoi le paramètre prépondérant pour rendre compte de la contribution des fibres dans le comportement du composite est sa ténacité qui représente l'aptitude du matériau à absorber une certaine quantité d'énergie avant la rupture

Les performances du composite dépendent notamment du dosage et de la longueur des

fibres. Mansur *et al* **[53]** ont étudié le renforcement de mortiers de ciment par des fibres de jute (Figure I -20).

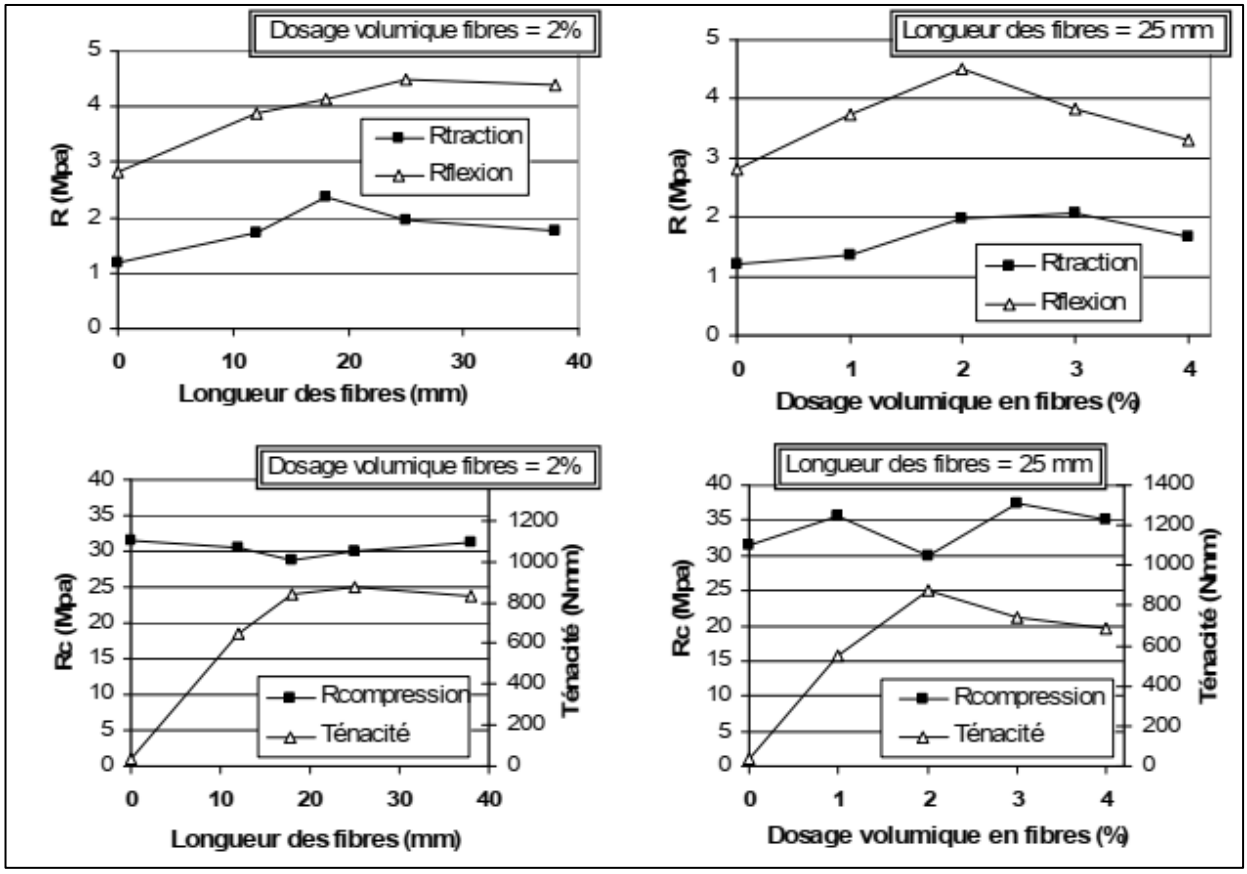


Figure I-20 Influence du dosage et de la longueur des fibres de jute sur les propriétés du composite

Les résultats présentés sur la (Figure I -20) 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.

Concernant la résistance en compression, ces résultats diffèrent de ceux de Kriker *et al* **[37].** 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 **[45]** .

On peut noter aussi sur cette même figure que les performances en flexion et en traction du composite sont dépendantes de la longueur et du dosage en fibres de jute. Dans un premier temps, plus la longueur des fibres est importante, plus les résistances en traction et en flexion ainsi que la ténacité du composite sont améliorées. Cependant, au-delà d'une longueur critique (environ 25 mm) les propriétés n'augmentent plus. De la même manière, à longueur de fibres constante, l'augmentation du dosage en fibres de jute permettra l'amélioration des propriétés jusqu'à un certain seuil, ici environ 2 % en volume. Cette limitation est attribuée par l'auteur au phénomène de « boulochage », c'est-à-dire qu'au-delà d'une certaine longueur ou d'un certain dosage, les fibres ont tendance à s'entremêler en rendant plus difficile leur dispersion dans la matrice, elles restent regroupées en amas et la liaison à l'interface fibre/matrice est diminuée **[45]** .

Le dosage optimal et la longueur optimale des fibres dépendent du type de fibres et de la méthode de mise en œuvre. Das Gupta *et al* [59] (étudient le renforcement d'une pâte de ciment par des fibres de coir de coco et relèvent une amélioration optimale des propriétés pour un dosage volumique de 4% et une longueur de fibres de 38 mm. Sedan [45] quant à lui, obtient une amélioration optimale pour un dosage de 16% en volume de fibres de chanvre de longueur comprise entre 10 et 20 mm **[45]** (voir Figure I- 21).

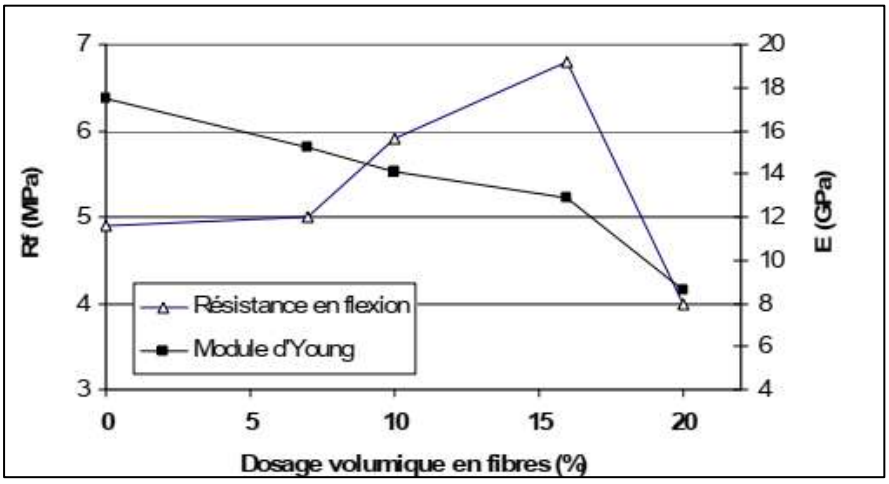


Figure I-21 Evolution de la résistance en flexion et du module d'élasticité d'une pâte de ciment renforcée par des fibres de chanvre en fonction de la teneur en fibres [42]

I.8.4. . Durabilité des composites de fibres végétales

Malgré les résultats encourageants obtenus vis-à-vis des propriétés et notamment des

propriétés mécaniques des matériaux de construction renforcés par des fibres végétales, les études réalisées mettent en évidence des déficiences concernant la durabilité des fibres dans la matrice alcaline.

Etant donné la variabilité des notations et des appellations utilisées par les différents auteurs, nous allons en préambule à cette partie définir les termes que nous retiendrons pour définir le comportement en flexion du composite fibré (Figure I- 22) **[45]** :

- La résistance à la première fissure (R1ère fissure) correspond à la contrainte de première fissuration de la matrice,
- La résistance de chute (Rchute) correspond à la contrainte résiduelle après la rupture de la matrice,
- La résistance post pic (Rpost-pic) correspond à la contrainte maximale de la phase post-pic

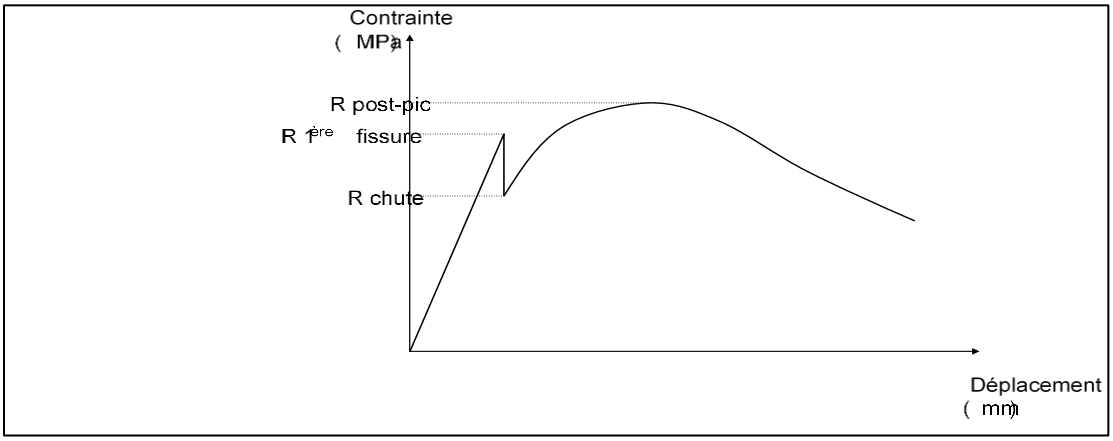


Figure I-22 Définition des grandeurs caractéristiques du comportement en flexion d'un composite fibré [45]

I.9. Mortier et béton sous l'effet de compactage

Afin de réduire le vide rempli d'eau et d'air dans le matériau, nous devons appliquer une force, des vibrations ou les deux, ce qui contribue à réduire ce vide.

I.9.1. L'Influence de compactage sur les matériaux :

Le compactage en tant que technique d'amélioration des propriétés mécaniques trouve application dans le domaine des matériaux de construction, tout comme dans le domaine des travaux publiques.

A- Blocs de terre comprimées avec fibres

Le compactage du mortier frais est un élément important permettant d'obtenir un mortier solide, dense et durable, il consiste à diminuer la teneur en eau et les vides entre les

granulats. Ce qui conduit à densifier le matériau et augmenter sa masse volumique. Ceci a pour conséquence d'améliorer la résistance du mortier. Nous remarquons également dans la Figure I-23 l'effet de la pression sur la résistance qui montre que plus la force de la pression augmente la résistance aussi ([ref Tallah] reporté par **[2]).**

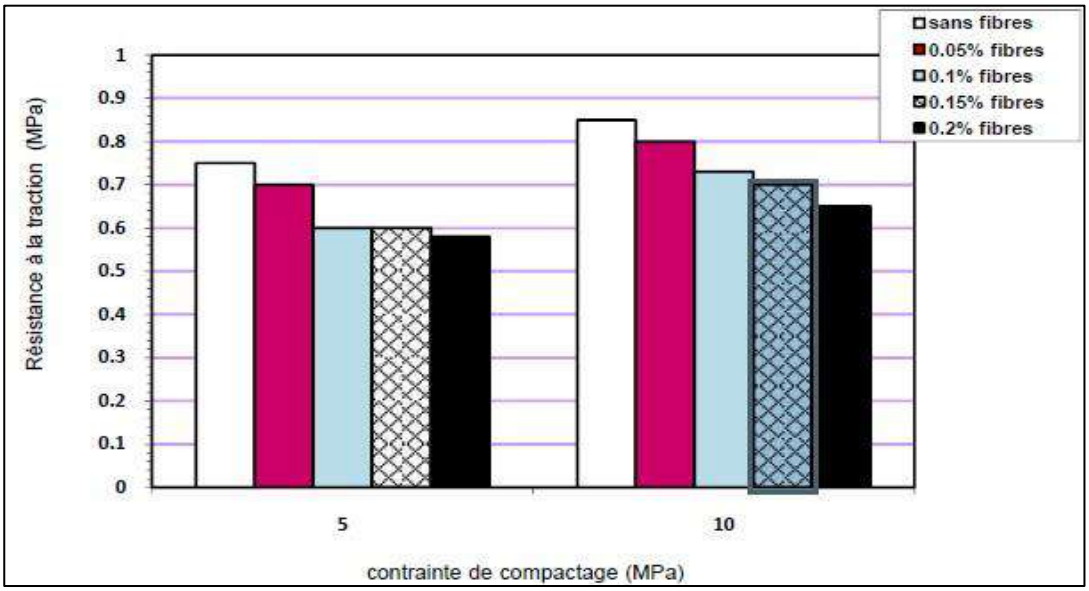


Figure I-23 Effet de la force de compactage sur la résistance à la traction

B- Composites renforcés par des fibres cellulosiques :

Les fibres cellulosiques sont des matériaux hydrophobes qui ; mélangées avec une matrice cimentaire nécessite une quantité d'eau importante qui nuit à la qualité du mortier**.** Megateli et Mekki **[2]** ont utilisé cette technique pour la tester sur un mortier composite à fibres de papier recyclés où ils obtiennent, en comparant avec la référence (sans compactage) une nette amélioration des propriétés mécaniques allant de 4 à 20% selon le dosage en fibres et les conditions de cure.

Comme reporté dans la ref **[45]** , Coutts et Savastano et leurs collègues ,ont utilisé avec succès une variante du procédé Hatschek (la technique d'arrosage sous vide des boues) pour préparer des composites de ciment avec des fractions massiques de fibres de pâte d'environ 8% en poids (environ 10% en volume). Dans cette technique, les matériaux matriciels sont agités, avec la quantité appropriée de fibres dispersées dans l'eau, pour former une suspension avec environ 20% de matériaux solides. Ensuite, la suspension est transférée dans un moule percé et un vide est appliqué comme on peut le voir sur la figureI-24. Ensuite, la planche est pressée jusqu'à ce qu'elle ait une épaisseur allant jusqu'à 15 mm **[54]**.

Une autre possibilité basée sur l'égouttage sous pression a été utilisée pour préparer avec succès des composites cellulosiques incorporant jusqu'à 4% en poids de coton et de pulpe de pin. La pâte de ciment est constituée d'un mélange de ciment, de sable, d'eau et d'agent fluidifiant avec un rapport eau / ciment d'environ 1 : 1. Les fibres de cellulose sont dispersées dans l'eau et incorporées dans le coller au préalable. Les échantillons sont préparés dans un moule micro-grillé pour permettre l'évacuation de l'eau avec un minimum de perte de ciment et de sable. Le moule est placé sur une plaque, puis compacté sur une table vibrante, et pressé

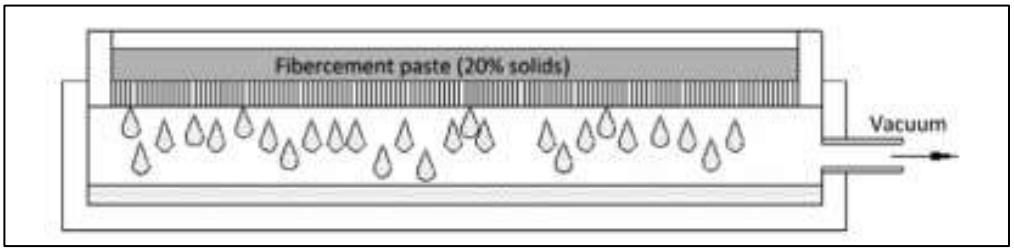


Figure I-24 Schéma du processus Savastano et collègues



Figure I-25 Système de moule et de presse utilisé pour préparer les échantillons

pendant 24 h pour atteindre une pression finale de 4 MPa (Figure I- 24) **[54].**

Les propriétés finales des composites de fibres et de ciment cellulosiques dépendent, outre la fibre et les composants de la matrice, du processus de fabrication. Les principaux objectifs à atteindre pour développer des composites aux propriétés mécaniques bien équilibrées sont les suivants **[54]** :

1 Une dispersion homogène des fibres dans la matrice.
2 Une interaction bien équilibrée entre la matrice de ciment et les fibres pour permettre l'arrachement des fibres.
3 Une faible porosité de la matrice.
4 Un pourcentage de fibres optimisé : suffisant pour renforcer le matériau tout en permettant une continuité de la matrice.

I.10. Mortier et béton sous l'effet combiné d'une dépression et de la charge

Faisant suite aux travaux de Megateli et Mekki **[2]** , nous avons soumis dans cette partie de l'étude le composite placé dans un milieu confiné, à une dépression par extraction du vide de ce dernier pour un temps déterminé puis on appliquera une charge de 8 kg au-dessus et cela dans le but de mettre en évidence l'effet combiné charge -depression.

Conclusion :

Ce chapitre est consacré à l'étude de la bibliographie sur les matériaux composites, en montrant l'avantage de combiner des fibres de différentes nature et de morphologie à une matrice pour la fabrication d'un composite.

L'amélioration des propriétés du composite peut être réalisé par des techniques de compactage ou de dépression et la combinaison de ces deux techniques est l'objet d'exploration dans les chapitres qui suivent**.**

CHAPITRE II

Matériaux Et essais

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons tous les matériaux qui composent le mortier et leurs caractérisations, avec les essais et les normes utilisées.

II.2.Essais effectués sur matériaux

II.2.1. Caractérisation des granulats

II.2.1.1. Masses volumiques

Les masses volumiques apparentes et absolues des différents sables utilisés ont été déterminées selon la norme [NA 451] **[55].**

A. Masse volumique apparente

Cet essai consiste à remplir un récipient de volume 1L par le matériau, ensuite on mesure la masse de ce dernier et on applique la relation qui donne (ρ_{app}) **[56]** :

ρ_{app}= M / 1 (kg/m^3)



Figure II-1 Le cône et le récipient

B. Masse volumique absolue

Cet essai 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 la relation II.1 on calcul la masse volumique absolue **[56] :**

$\rho_{abs}= M / V_2-V_1$ (kg/ m^3)

À la fin, on peut tirer les indices suivants : (porosité, compacité, indice des vides).

$C = \rho_{app} / \rho_{abs}$; $P = 1-C$; $I = P / C$ II.2

II.2.1.2. Propretés des granulats :

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

A. Equivalent de sable

Selon la norme [NF P 18-598] **[57],** la procédure de mesure de l'équivalent de sable est comme suit **[58]** :

- ✓ On dispose de trois éprouvettes propres pour chaque sable, puis on prendra la moyenne des trois résultats obtenus ;
- ✓ En versant une quantité de 120 g de sable, jusqu'au premier trait d'une éprouvette normalisée contenant une solution lavant, 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 lavant jusqu'au trait supérieur, et on les laisse reposer 20 minutes en évitant toute vibration ;
- ✓ On lit les hauteurs h_1 et h_2 puis à l'aide d'un piston on mesure h_2'.

$ES =100. (h2' / h1)$ II.3

$ESV =100. (h2/ h1)$ II.4

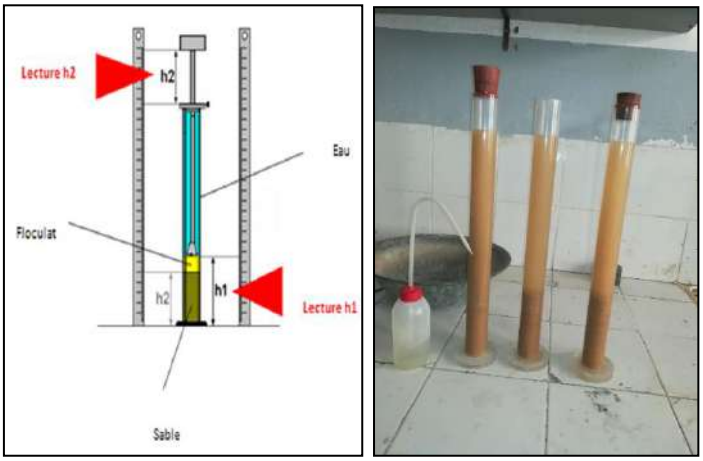


Figure II-2 Procédure de mesure de l'équivalent de sable

II.2.1.3. Granulométrie

A. Objet de la norme (NA 2607) [59]

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.

B. 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 tracée 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] **[59]** .Où le sable passant à travers une série de maille décroissante (annexe B) dont on pèse le refus de chaque tamis.

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

- ✓ Le coefficient d'uniformité C_u;
- ✓ Le coefficient de courbure C_c ;
- ✓ Le module de finesse Mf ;

C. 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 II.5

_ Le coefficient de courbure Cc : Cc = (d30)2/ d10. d 60 II.6

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

d30 : diamètre moyen des grains correspondant à 30 % passant par poids.

d60 : diamètre moyen des grains correspondant à 60 % passant par poids.

La distribution des dimensions des particules est dite :

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

D. Module de finesse (NF EN 933-1) [60]

Le module de finesse d'un sable est défini 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 1,80 et 3,20 **[61]** .

➢1.80 <Mf< 2.20 : est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre. 2.20 <Mf< 2.80 : convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

➢ 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 **[61]. .**

Dreux G **[61]** admet qu'un bon sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 2,20 et 2,80.

II.2.2. Essais sur ciment

II.2.2.1. Essais physiques

A. 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. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine

d'après la norme [NF P 15-476] **[62]**

B. 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 pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme [NF P 15-431] **[63] .**

C. Le temps de prise

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme (NF P 15-471) **[64] .**

II.2.2.2. Essais mécaniques sur le ciment

Selon la fiche technique, les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément à la norme [NF P 15-471] **[64]** 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 tableau II.1.

Tableau II-1 Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge

Ages (jours)	Résistance à la compression (MPa)
2	>20
28	≥ 42.5 et 62.5

II.2.3. Essais sur mortier

II.2.3.1. Mortier frais

A. La masse volumique

On a déterminé la masse volumique à l'état frais de composite par la différence des pesées des moules vides et remplis sur le volume du moule.

ρ = masse de mortier/volume de moule II.7

Avec :

Volume du moule = 3(4x4x16)=768 cm3

Masse de mortier = la masse de moule remplis-la masse de moule vide



Figure II-3 moule vide dans la balance

II.2.3.2. 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] **[65]** c'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) (Fig II.4), une éprouvette prismatique de côté b et de longueur L **[58] .** Dans notre étude, cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à 28 et jours et 90 jours

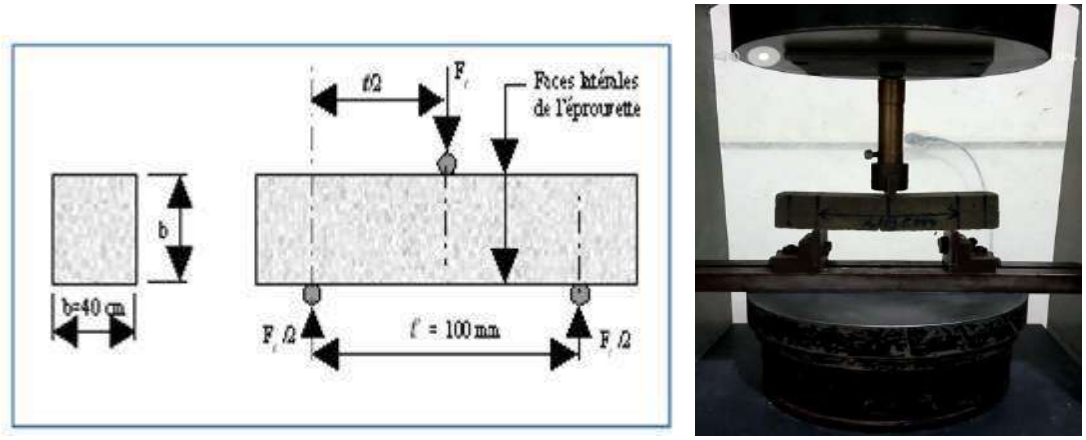


Figure II-4 Dispositif pour l'essai de résistance à la traction

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

$$\sigma = \frac{M}{I}v \qquad \text{II.8}$$

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge : $M = \frac{F_f L}{4}$ II.9

I : Moment d'inertie de la section transversale **:** $\boldsymbol{I = \frac{a^4}{4}}$ II.10

v: La distance de la fibre la plus éloignée: $\boldsymbol{v = \frac{a}{2}}$ II.11

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule

$$\sigma_t = \frac{(1.5F_F L)}{a^3} \qquad \text{II.12}$$

En pratique on utilise la relation II.13 qui tient compte de l'hétérogénéité du béton on mortier

$$f_{t28} = 0.9\ Ft.L / a3 \qquad \text{II.13}$$

La rupture de chaque éprouvette en traction est effectuée conformément au dispositif décrit sur la Fig II.5.

A.2 Essai de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme (EN 196-1 **[66]** par compression axiale pour le demi-prisme d'éprouvettes prismatique de dimensions (4x4x16) cm**.** La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes.

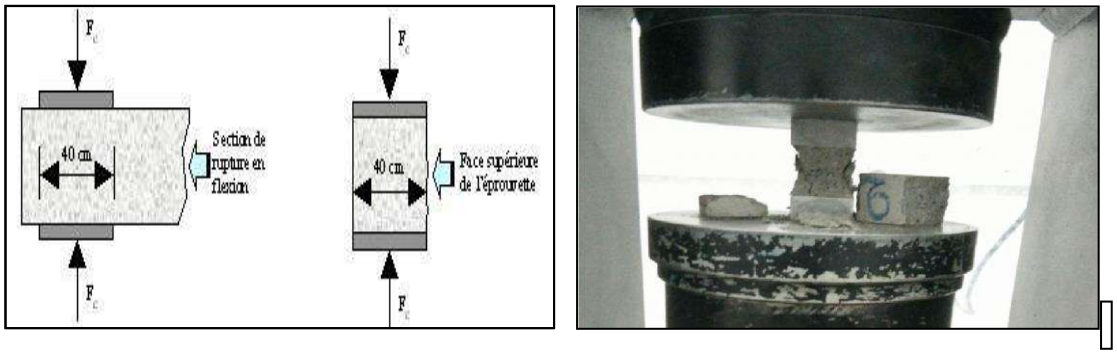


Figure II-5 Dispositif de rupture à la compression

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la figure II.5, la contrainte de rupture est calculée comme suit : $R_c = \frac{F_c}{b^2}$ II.14

Avec

RC : Contrainte de rupture (MPa) ;

Fc: Charge de rupture (MN);

b²: Section de l'éprouvette (16×10^{-4}). m^2

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

B. Essai d'absorption d'eau par capillarité

Conformément à la norme [NBN NE 13057] **[66] on** utilise des éprouvettes prismatiques de section 4x4 cm^2qu'on a préalablement séché jusqu'à masse constante. On pèse l'éprouvette au début (m_0), après on l'introduire dans un bac remplit d'eau (5 mm d'eau) (Fig II.6) et pendant chaque intervalle de temps (12 min, 30 min ,1 h ,2 h ,4 h ,24 h) on ressort l'éprouvette du bac et on la repese (m_1). La différence de poids entre m_1 et m_0 est le poids de l'eau absorbée par le matériau (m_1- m_0).

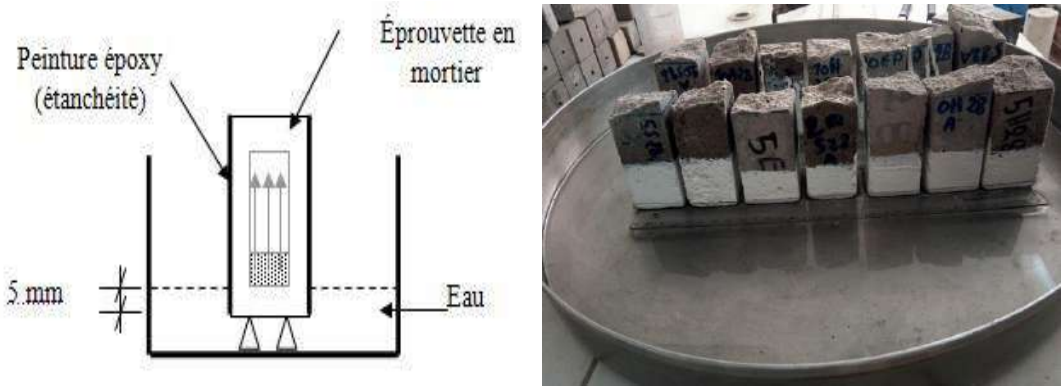


Figure II-6 Absorption d'eau par capillarité

C. Essai de retrait :

Définit comme 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 ×4 cm^2, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%.

La norme [NF P 15-433] **[67]** 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 42.5 R. 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 peut survenir entre le ciment et agrégats **[45].**

Pour mesurer le retrait, des éprouvettes prismatiques de dimension (4 × 4 × 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 t0 pris pour origine.

On mesure 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(FigII 7)



Figure II-7 Rétractomètre et son étalonnage

D. 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 calcule le rapport suivant :

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{M - M_t}{M} \qquad \text{II.15}$$

ΔM : Variation de masse par rapport à la masse au moment du démoulage **M**.

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

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

II.3. Matériaux utilisés

Dans ce travail et dans le but de pouvoir comparer les résultats d'un mortier témoin sans fibre et un autre mortier avec fibre. Les deux mélanges à base de sable roulé corrigé par un sable de concassage sont utilisés. Les constituants entrant dans la composition de la matrice sont :

II.3.1. 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**.**

II.3.1.1. Le sable roulé

Le sable roulé utilisé dans cette étude est de HASI BAHBAH de la région de Djelfa, située à 160 Km au sud de Médéa**,** (Fig II.8).

II.3.1.2. Le sable de concassage

Pour le sable de concassage utilisé (Fig II.8), il est de dimension 0/3. Il provient de la station de concassage de MONT GORNO située à 25 Km au sud de Médéa.



Sable roulé de HASI BAHBAH



Sable de concassage

Figure II-8 Les sables utilisés

II.3.2. Le ciment

Un seul type de ciment utilisé au cours de cette étude expérimentale. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, produit par la cimenterie de Djelfa avec les caractéristiques présentées sur le tableau II.2.

Tableau II-2: Propriétés physiques d'identification du ciment utilisé.

Caractéristiques		Norme
Finesse (cm^2/g)	3765	NF EN 196-6 [68]
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,93	
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,02	NF EN 459-2 [69]
Consistance normale (%)	27,04	NF EN 196-3 [70]
Début de prise	2h30	
Fin de prise	4h	
Classe de résistance (MPa)	46	NF EN 196-1 [71]

II.3.3. Les fibres

Les fibres utilisées sont issues de la récupération des emballages d'œufs (Fig II.9) produits par la Société nationale de production de cellulose et des papiers (CELPAP), Algérie. Leur préparation nécessite un traitement physicochimique décrit en (Fig II.10) La pâte est composée principalement de bois résineux (40 %), d'alfa (35 %) et de bois feuillus (25%).



Figure II-9 Fibres issues de la récupération des emballages d'œufs

II.3.3.1. Préparation des fibres

Un traitement d'homogénéisation et de blanchiment font subir ces fibres selon l'organigramme suivant **[72]** :



Figure II-10 Schéma de principe des phases du traitement du déchet de papier [72]

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.

II.3.3.2. 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.

II.3.4. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection de mortier est une eau potable du robinet **[61]**, exempte d'impuretés, conforme à la norme [NFP 18-303] **[73]**.

II.4. Elaboration du composite :

II.4.1. Protocole d 'essais :

A raison de trois éprouvettes par essai, deux cures différentes, trois procédures d'essais, pour trois compositions de pourcentage des fibres, le nombre d'essais effectué sur les mortiers réalisés est résumé comme suit :

- 48 essais de traction par flexion
- 48 essais de compression simple
- 48 essais de retrait
- 8 essais d'absorption d'eau

II.4.2. Composition des mortiers :

II.4.2.1. Composition du mortier témoin (sans fibres) :

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

II.4.2.2. Composition du mortier avec 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 **[74].** L'optimisation de le composite a fait l'objet d'un précédent travail **[75].**

Dans notre travail on a utilisé 3 différents pourcentages de fibre (5%,10%,20%), les constituants sont présentés dans le tableau II.3.

*Tableau II-3 Constituants du composite pour 1 moule de trois éprouvettes (4*4*16 cm³) [75]*

% de fibre	5%	10%	20%
E/C (adopté)	0.82	1.2	2.18
Ciment (g)	379.77	310.85	225.7
Sable (g)	1139.33	932.57	677
Eau (g)	311.41	373.06	491.9
Fibre (g)	19.023	31.10	45.14
Volume de moule 3 éprouvettes (4*4*16 cm³)	768	768	768

II.4.3. Malaxage des mortiers :

La procédure de malaxage pour les deux types de mortier (sans et avec fibres) est représentée dans les tableaux II.4 et II.5**.**

Tableau II-4 Opérations de malaxage du mortier sans fibres [58]

Opérations	Durée	Etat du malaxeur
Introduction de l'eau	-	Arrêt
Introduction du ciment		
Malaxage	30 s	Vitesse lente
Introduction du sable	30 s	
Malaxage	30 s	Vitesse rapide
Raclage de la cuve	15 s	Arrêt
Repos	1min 15s	
Malaxage	60s	Vitesse rapide

Tableau II-5 : Opérations de malaxage du mortier avec fibres [58]

Opérations	Durée	Etat du malaxeur
Introduction de l'eau	-	Arrêt
Introduction des fibres		
Malaxage	10 a 15mn	Vitesse lente
Introduction du ciment	-	Arrêt
Malaxage	30s	Vitesse lente
Introduction du sable	30 s	
Malaxage	30 s	Vitesse rapide
Raclage de la cuve	15 s	Arrêt
Repos	1min 15s	
Malaxage	60s	Vitesse rapide

II.4.4. Préparation des mélanges :

Tous les mélanges sont préparés dans les mêmes conditions dans une salle à une température de 20°C ± 2C° et à une humidité relative supérieure ou égale à 50%. Le mélange est effectué par malaxage qui, conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1, au moyen du malaxeur spécifié par la norme NF P 15-411.

II.4.5. Equipement nécessaire :

- Une salle 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 trempées dans l'eau
- 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
- Balances pour la mesure des petites et grandes quantités
- Eprouvettes et béchers en verre et en plastique graduées

- Spatules flexibles en acier inox



Figure II-11 Equipement nécessaire

II.4.6. Conservation des éprouvettes

Après démoulage on a entreposées les éprouvettes dans l'air libre du laboratoire, jusqu'au moment de l'essai de rupture.

II.5. Procédures appliquées aux éprouvettes

Une fois terminée le coulé dans des moules, le matériau subit soit une pression de compactage par application d'une charge au-dessus, soit une dépression dans un dessiccateur où on procède à l'extraction du vide ou le combiné du compactage et du dessiccateur où on procède à l'extraction du vide. Ceci est décrit dans ce qui suit :

II.5.1. Procédure par compactage

Nous avons soumis nos éprouvettes à une pression par l'application de charge de 8 Kg. Des plaques sont placées fermement en contact direct avec le matériau. Elles sont perforées pour permettre à l'eau de s'échapper au-dessus de l'éprouvette (Figure II 12). Les charges restent en place pendant 2 h 45 mn en respectant le temps de début de prise du composite.



Figure II-12 Eprouvettes sous chargement

II.5.2. Procédure par extraction du vide

Dans cette partie, nous préparons le moule qui contient trois éprouvettes de dimensions 4×4×16; pour l'insérer dans le dessiccateur,

Deux moules à la fois, sont introduits à l'intérieur du dessiccateur lui-même relié à une pompe à vide pour l'extraction de l'air. Le système est mis en marche pendant 2H 45mn correspondant au temps de début de prise (Figure II 13).



Figure II-13 dessiccateur avec pompe à vide

II.5.3. Le combiné du compactage et extraction du vide :

Dans cette partie, nous combinons le compactage durant 2H45mn et l'extraction sous vide. L'opération de l'extraction sous vide dure 2H45mn.

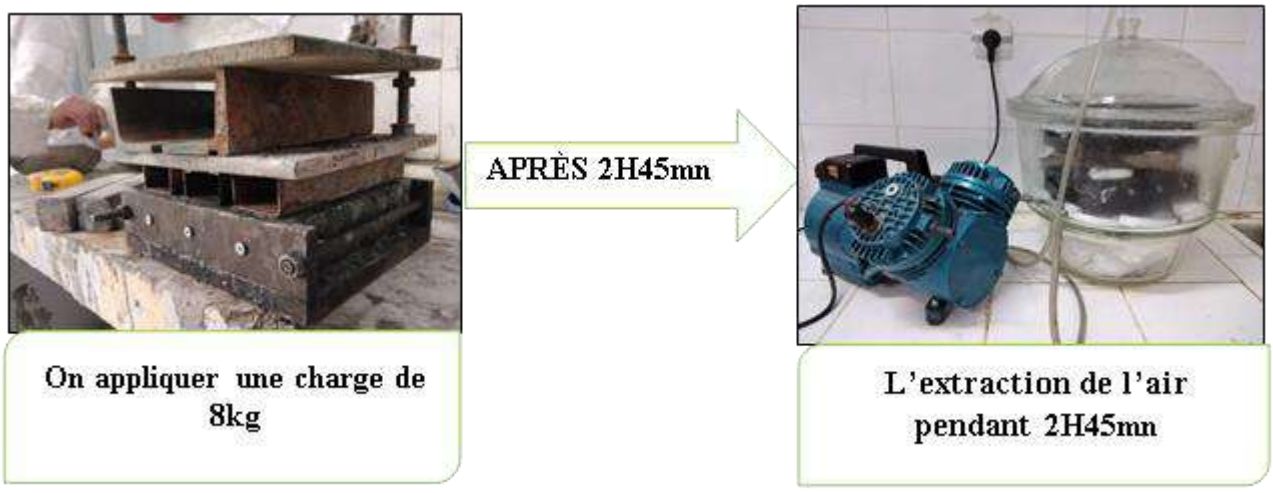


Figure II-14 Le combiné du compactage et extraction du vide

Le but du compactage et l'extraction du vide est le réduire autant que possible l'eau dans le mélange pour obtenir plus de résistance

Conclusion :

Dans cette partie, le programme expérimental a été décrit et qui nous a permis d'identifier et de caractériser les matériaux utilisés dans la formulation du composite et de définir les protocoles des essais à réaliser

II.6. Variables étudiées :

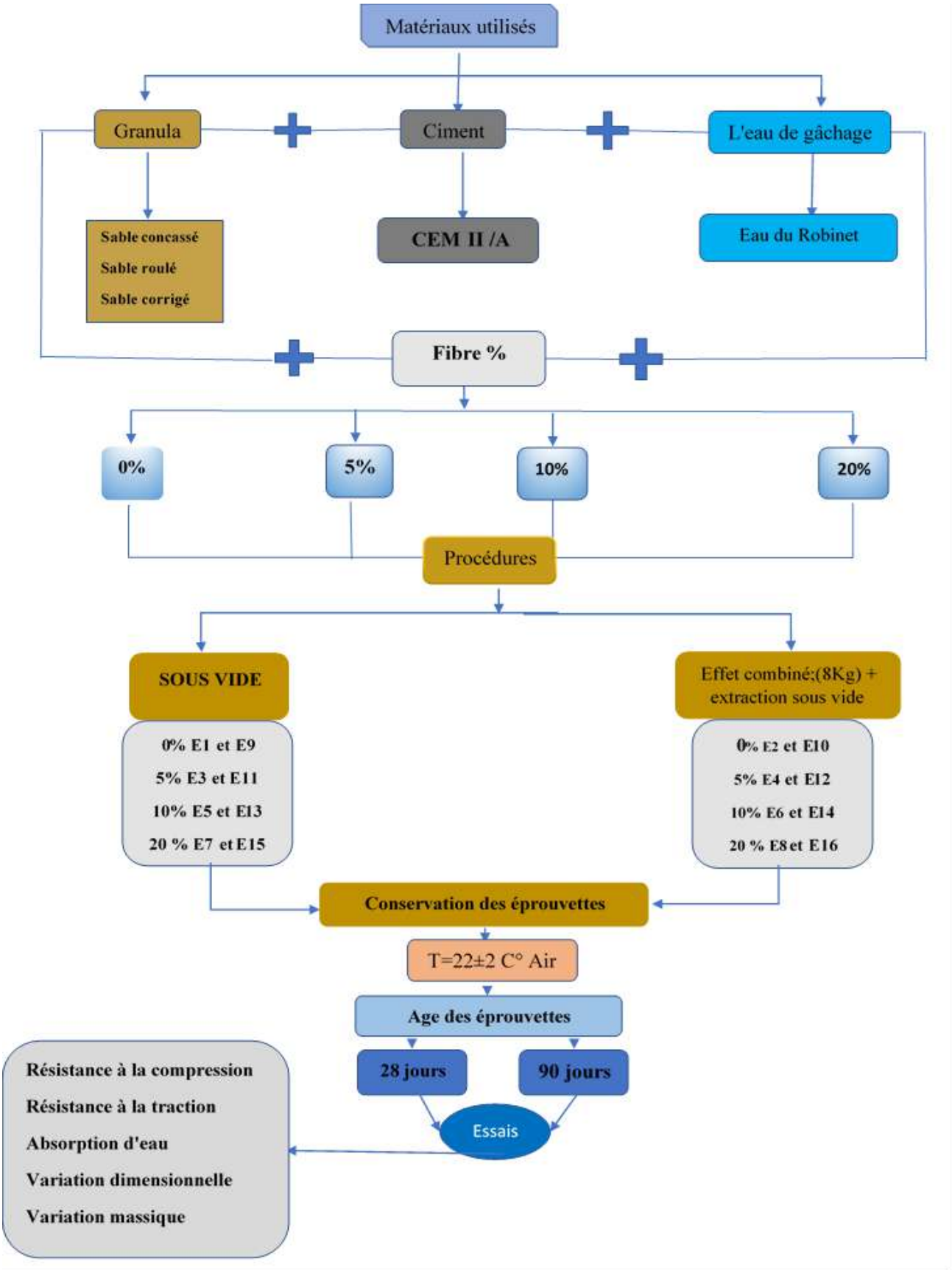


Figure II-15 variables étudiées

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

III.1. Introduction

Dans cette partie, tous les résultats qu'on aurait pu obtenir ont été collectés pour être analysés.

III.2. Essais effectués sur granulats

III.2.1. Masses volumiques

Après avoir soumis les granulats utilisés à différents essais de caractérisation, les résultats trouvés sont résumés dans le tableau III.1.

Tableau III-1 Les masses volumiques des différents sables utilisés

Sable	Roulé (HASI BAHBAH)	Concassé lavé (Mont Gorno)
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1483	1552
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2500	2500

III.2.2. Equivalent de sable

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont résumés dans le tableau III.2.

Tableau III-2 L'équivalent de sable des différents sables utilisés

Sable	ESV	ESP	Observations
Roulé (HASI BAHBAH**)**	82.41	77.96	Sable très propre : bonne utilisation
Concassé (Mont Gorno**)**	55.15	54.65	Sable argileux

Les résultats présentés dans le tableau III.2 nous montrent que l'équivalent de sable est acceptable.

III.2.3. Analyse granulométrique

Afin de tracer la courbe granulométrique des sables, on les soumet au tamisage. Les courbes granulométriques des sables utilisés sont données dans la figure III.1.

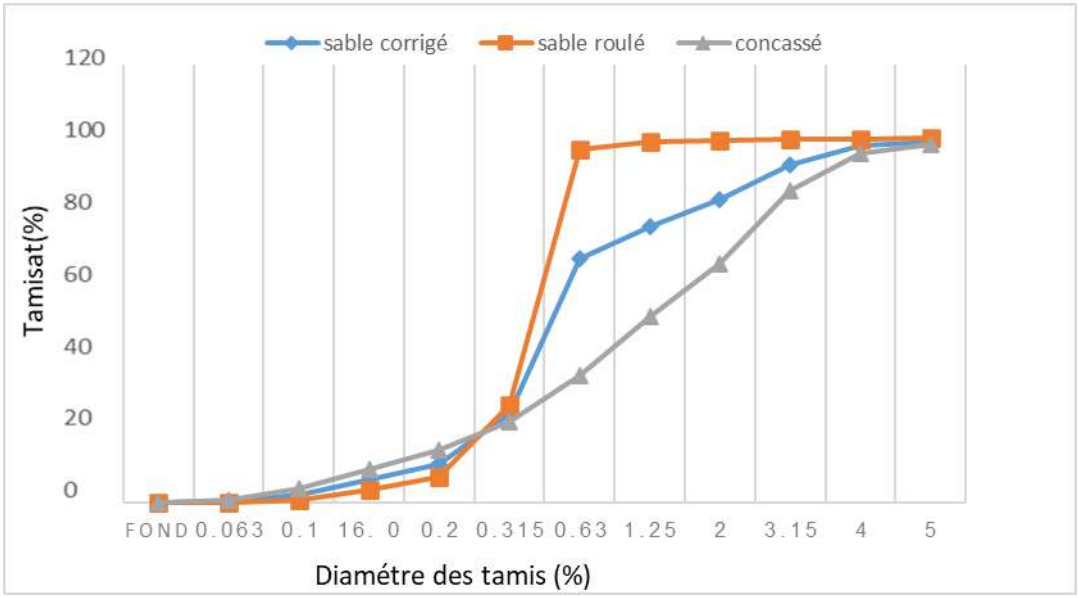


Figure III-1 La courbe granulométrique des sables utilisés

A partir de l'analyse granulométrique, on détermine le module de finesse (MF) et les résultats trouvés pour chaque sable sont récapitulés dans le tableau III.3.

Tableau III-3 Analyse granulométriques des différents sables.

Sable	**Roulé** (HASI BAHBAH)	**Concassé lavé** (Mont Gorno)
Module de finesse (MF)	1.75	3.17

A travers ces résultats, il parait clair que le sable concassé est grossier alors que l'autre est fin, ce qui nous oblige à corriger le fin par le grossier pour avoir un mélange convenable.

III.2.4. Correction du sable

Selon la méthode d'ABRAMS et le module de finesse souhaité (Mf souhaité = 2.5), on calcule les paramètres S_1, S_2 et S suivants :

Mf souhaité =2.5

S_1=3.17-2.5=0.69

S_2=2.5-1.75=0.74

S=0.69+0.74=1.43

- Le sable mélange sera composé alors des portions suivantes
- Le pourcentage du sable concassé = (0.69/1.43).100=48.25%
- Le pourcentage du sable roulé = (0.74/1.43).100=51.75 %

III.3. Caractérisation des mortiers

Les résultats de caractérisation soit à l'état frais, soit à l'état durcis sont donnés ci-après

III.3.1. Le mortier à l'état frais

III.3.1.1. l'eau extrait sous l'effet de procédure

il est à rappeler que par procédure, on entend l'opération effectuée sur les éprouvettes mises en place dans les moules (sous vide dans un dessiccateur, sous charge de 8 kg et effet combiné

Dans cette essai nous pesons la masse des éprouvettes après 2.45 heures de mise en place de mortier dans les moules, Les résultats sont représentés par des histogrammes qui permettent de comparer les valeurs de la masse d'eau extraite par rapport aux différentes procédures utilisées.

Les resultats de l'eau extrait des éprouvettes à l'état frais sous l'effet de procédure exprimé soit en g (m_E) soit en % selon les relations III.2 et III.3 sont représentés en figure III.2 et III.3 respectivement :

$$m_E = (m_2 - m_1) + (m_2 - m_3) \quad \text{III.2}$$

$$E_E = [(m_2 - m_1) + (m_2 - m_3)]/m_1 \quad \text{III.3}$$

m_E:la mase de l'eau extrait sous l'effet de procédure

m_1: la masse initiale dees éprouvettes

m_2:la masse des éprouvettes après 2:45 h

m_3: la masse de les éprouvettes après 5:30 h

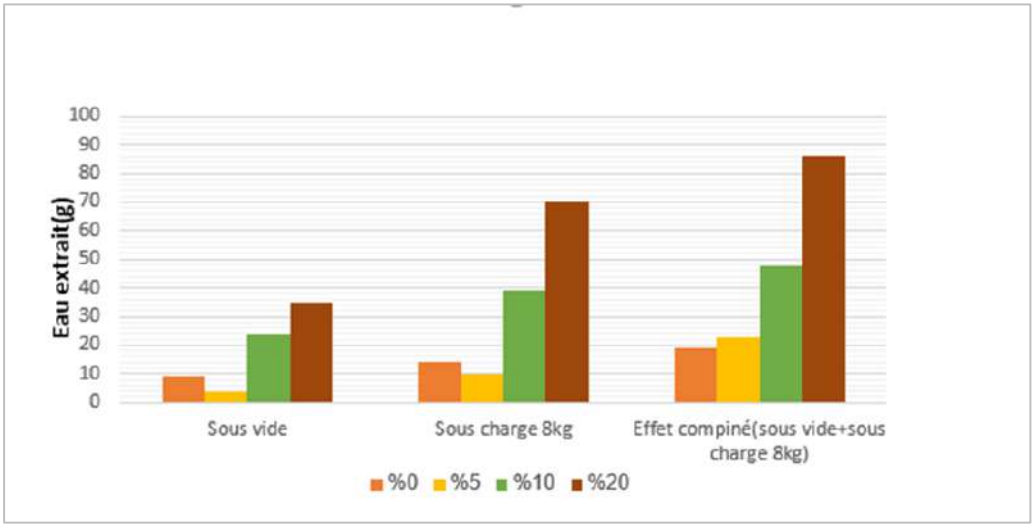


Figure III-2 l'eau extrait du mortier pour différent pourcentage de fibres

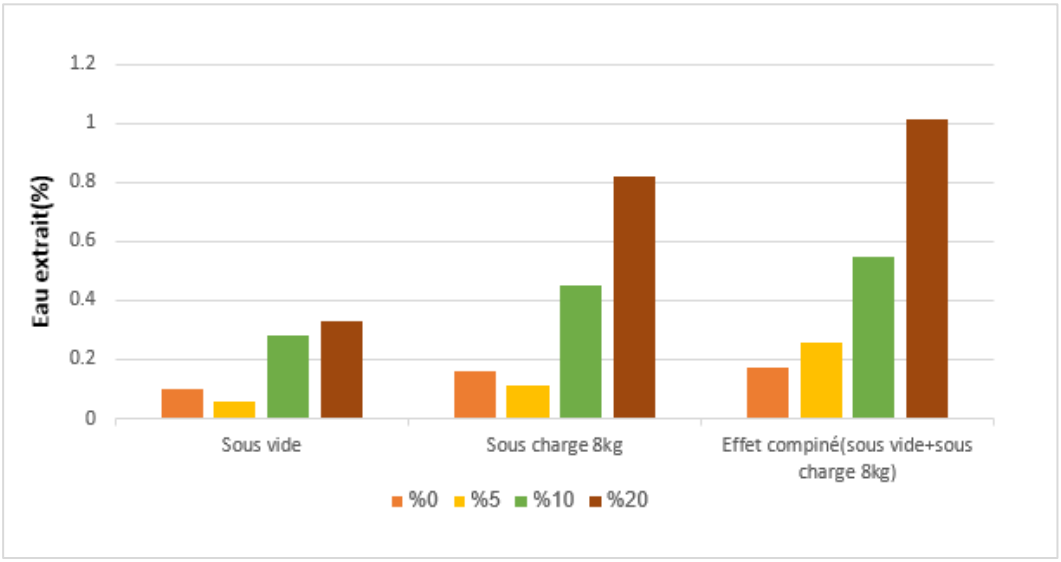


Figure III-3 le pourcentage de l'eau extrait du mortier pour différent pourcentage de fibres

Après la lecture des graphes III-4 et 0-3, on peut observer que la masse d'eau extraite varie d'une procédure à l'autre, où elle atteint un maximum de 87 g, soit 1,01% de la masse du mortier

Plus il y a de fibres, plus l'eau est extraite, ce qui indique que les fibres ont une capacité d'absorption d'eau élevée

On note également que la masse d'eau extraite sous pression est supérieure à la masse d'eau extraite sous vide, car l'effet de la pression est considéré comme direct ce qui fait que l'eau s'échappe à travers les parois du moule

Par contre l'effet sous vide, n'a pas été si profond et nécessitera probablement plus de temps pour que la dépression atteigne le coeur de l'échantillon.

Dans le cas de l'effet combiné, la masse d'eau extraite visiblement traduit par une augmentation sur le graphe est le résultat des deux procédures

III.3.1.2. La Masse volumique des éprouvettes

Le résultat de la masse volumique ρ des éprouvettes à l'état frais est défini par :

$$\rho = \frac{M}{v} \qquad \text{III.2}$$

Avec :

$\boldsymbol{M}$: La masse de l'éprouvette à 2 :45h ou 24h

$\boldsymbol{v}$: Le volume d'éprouvette

Après les avoir laissés à l'air du laboratoire pendant 2 :45h et 24 h après le coulage, la masse volumique du composite est représentée sur la figure III.4 et III.5.

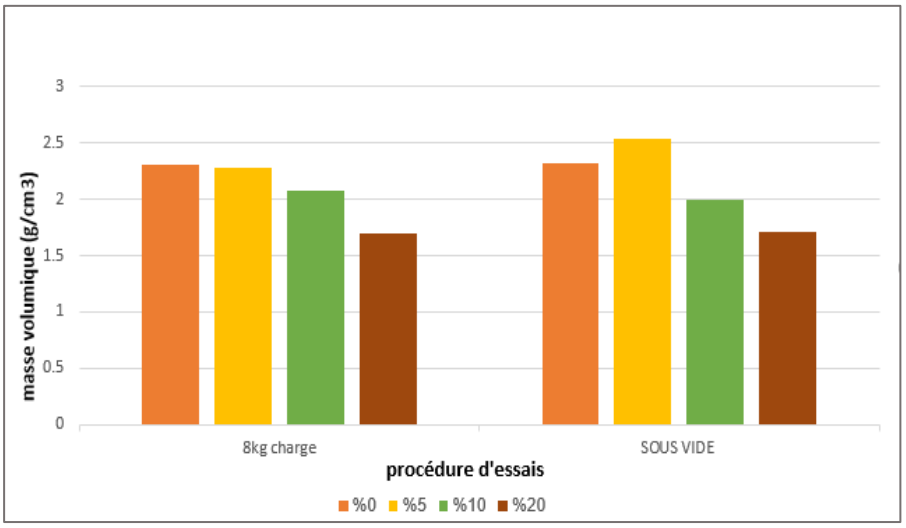


Figure III-4 variation de la masse volumique des éprouvettes à l'état frais (après 2:45 h)

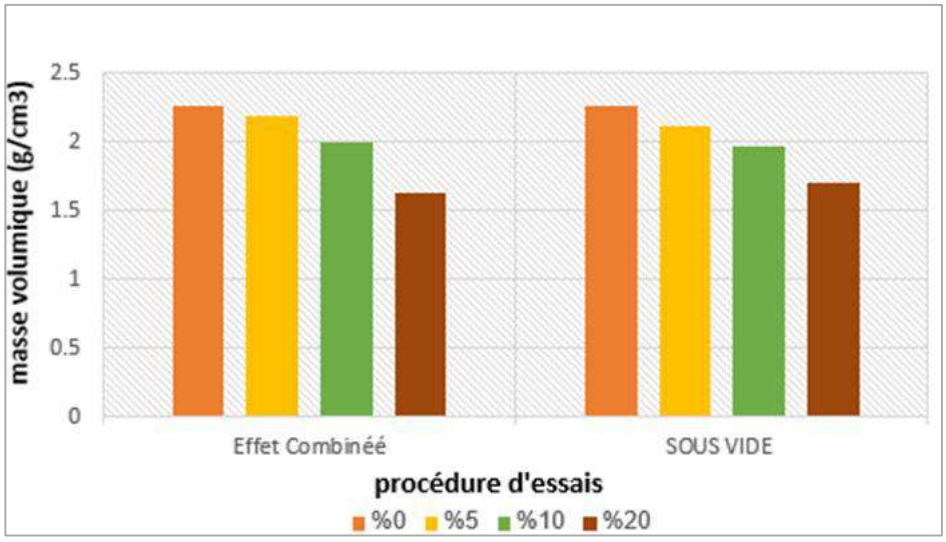


Figure III-5 variation de la masse volumique des éprouvettes à l'état frais (après 24 h)

À partir des figures III 4 et III 5, on peut noter que la masse volumétrique diminue légèrement dans tous les cas après 24 heures, et cela est dû aux volumes perdus en raison des procédures appliquées et des réactions chimiques

Plus il y a de fibres, plus la densité est faible, ce qui nous donne des composites plus légers quelle que soit la procédure appliquée.

On remarque également sur la figure III 5 que l'effet combiné sur les composites a provoqué une augmentation de la densité quel que soit leurs pourcentage de fibres, et ce résultat montre la préférence de l'effet combiné sur les autres procédures

III.3.1.3. Le retrait

Les résultats des essais de retrait (ε) sont illustrés sur les figures III.6 a III.9

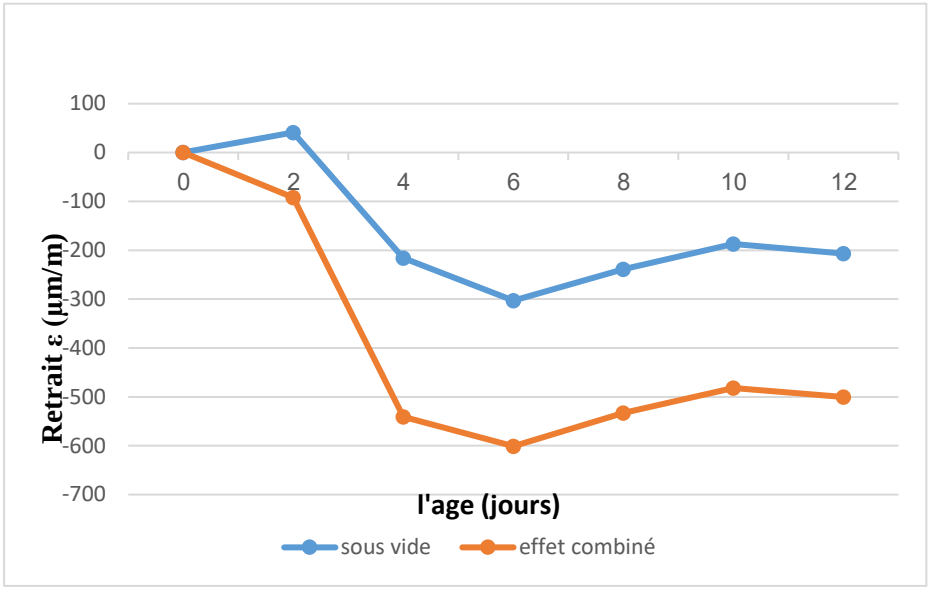


Figure III- 6 variation de retrait pour mortier sans fibres

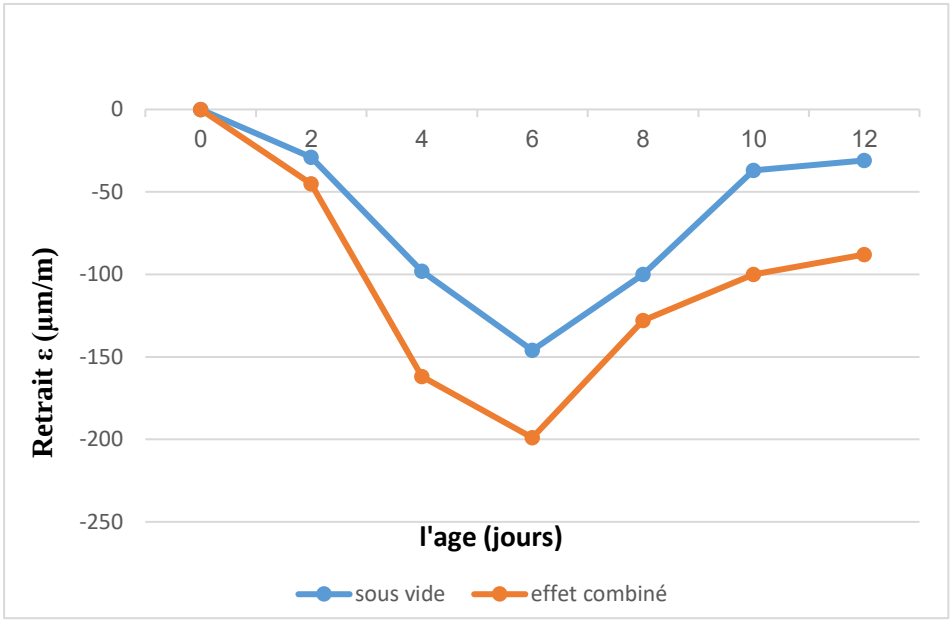


Figure III- 7 variation de retrait pour mortier à 5% de fibres

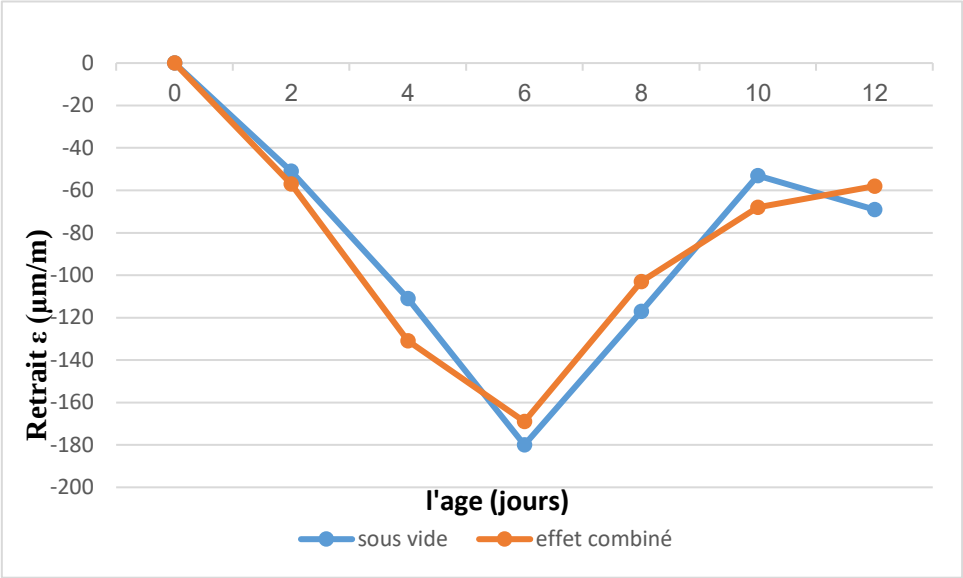


Figure III- 8 variation de retrait pour mortier à 10% de fibres

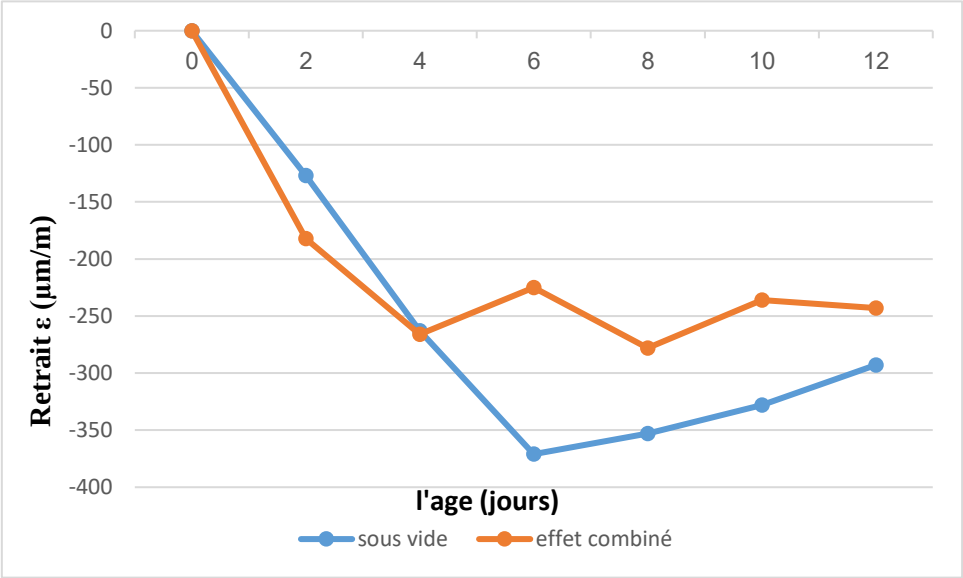


Figure III- 9 variation de retrait pour mortier à 20% de fibres

D'après les formes précédentes, et bien que les jours où le retrait a été mesurée soient peu nombreux pour juger de l'influence de la procédure sur le retrait et en tenant compte des résultats pour les mortiers sans application de charges on note que la procédure quelque soit sa nature participe à la diminution du retrait dont la valeur tend à se stabiliser à partir du 6 -ème jour en regardant le palier qui commence à se former à partir de là.

il est important de voir que l'effet combiné implique de meilleurs retraits pour les taux de chargement en fibre supérieur à 10%.

Conclusion :

Il est évident de voir que plus le pourcentage de fibres est élevé, plus le pourcentage d'eau dans le mortier est élevé.

La quantité d'eau extraite par effet de compactage est supérieure à celle extraite par effet de sous vide. on peut s'attendre à un matériau plus compact donc plus résistant avec la procédure de compactage.

Les premiers résultats de retrait ne permettent pas de tirer de conclusions significatives sauf quelques résultats à cours terme qui restent à confirmer s'ils sont aussi valable à long terme.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Tout le travail que nous avons réalisé dans le cadre de ce mémoire vise à exploiter les déchets de papier qui contiennent de la cellulose, où nous avons cherché à définir l'effet combiné de compactage et de l'extraction de l'eau sous vide appliqué à un mortier chargé de ces fibres sur son comportement à l'état frais et durci. Les résultats d'un nombre réduit d'essais (suite à la conjoncture de COVID 19) nous ont permis de conclure ce qui suit :

- Bien que les fibres rendent les éprouvettes plus légères, elles absorbent de grandes quantités d'eau ce qui a un effet négatif sur le mélange.
- La quantité d'eau extraite par effet de compactage est supérieure à celle extraite par effet de sous vide. On peut s'attendre à un matériau plus compact donc plus résistant avec la procédure combinée
- Les premiers résultats de retrait ne permettent pas de tirer de conclusions significatives sauf quelques résultats à cours terme qui restent à confirmer s'ils sont aussi valable à long terme..

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] Boudali.A, Hachemaoui.M, Etude par algorithme génétique de l'effet d'humidité sur l'endommagement, Mémoire de master (2018), université de Dr. Tahar Moulay Saida, Algérie.

[2] Megateli.O, Mekki.M, Effet de la pression de compactage sur la résistance, Mémoire de master 2018, université Yahia Farés de Medea, Algérie.

[3] Furlan.V, Bissegger.P, Ancient mortars - history and approach to scientific examination, Date of Publication, (1975).

[4] Kadid.Z, Boucetha.S, Mémoires de Master (2017), Influence des milieux de conservation sur la durabilité des mortiers autoplaçants, université M'Hamed Bougara –Boumerdes ; Algérie.

[5] Nassah.D, Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physicomécaniques des mortiers fibrés, Mémoire de master (2017) ; université M'Hamed Bougara –Boumerdes ; Algérie .

[6] Boilekbache.M. Hamrat.B, Influence of the rhéologie of steel fibers' Reinforced Concretes on their Mechanical Properties. European Journal of Environmental and Civil Engineering vol 13 (4), p 473-488.

[7] Benkechkache.G, Etude de comportement diffère des bétons influence des paramètres de composition et de chargement. Thèse de Magister (2007), université Mentouri Constantine Algérie.

[8] Rossi.P, Les bétons de fibres métalliques ponts et chausses. Paris, France (1998).

[9] Guillaume.E, Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton, thèse doctorat (2008) de l'université de Toulouse,France.

[10] Hayet.M, Influence des fibres végétales sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton, Mémoire de Master (2017), université M'Hamed Bougara –Boumerdes ; Algérie.

[11] Bouzouita.S, Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel. Autre. École centrale de Lyon ; école nationale d'ingénieurs de Monastir, Français., (2011).

[12] Baley.C, Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, Techniques de l'Ingénieur. Réf.AM.5.130, (2004).

[13] Chanvillard.G, analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées ancrées dans une matrice cimentaire, études et recherche des LCPC, série ouvrages d'art. la thèse de doctorat (1993), l'université de Sherbrooke, Canada.

[14] Sukontasukkul.P, toughness evaluation of steel and polypropylene fiber reinforced concrete beams under bending, Thammasat Int. J. Sc. Tech., Vol. 9, No.3, (2004).

[15] Cotterell.B, Fracture mechanics of cementations materials, blackie academic et professional, London/Chapman and hall, (1996).

[16] Malou.M, influence de l'introduction des fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire, caractérisation-comportement monotone-microstructure, thèse doctorat (2007), université Mentouri, Constantine, Algérie.

[17] Gagui.W, L'effet d'ajout des fibres palmiers dattiers (saaf et lif) sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sable, Mémoire de Master (2015), université Mohamed khider, Biskra, Algérie,.

[18] Roudier.A, Analyse multi-échelle du comportement hygro-mécanique des fibres de lin, Thèse de Doctorat (2012), Université Blaise Pascal Clermont II.

[19] Duigou.A.L, Etude des mécanismes d'adhérence entre une fibre de lin et le PLLA-Influence d'un traitement faiblement impactant à l'eau,Comptes Rendus des JNC 17 - Poitiers, p 09 , (2011).

[20] Laurans. F. Déjardin.A et Pilate.J, Physiologie de la formation des parois de fibres de bois, revue des composites et des matériaux avancés., Vol.16, p.27-39, (2006).

[21] Etienne Bourbon.P, Carlsson.L et Anders.J, Matériaux composites à matrice organique, Edition Monson Lausanne, 154 p, (2004).

[22] Do.Thi Vi Vi. Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non, Thèse de doctorat (2011), Université de Grenoble,en co-tutelle avec l'université de Hochiminh Ville, Vietnam.

[23] Meirhaeghie.C. Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France. Comptes Rendus de l'Ademe par Fibres Recherche Développement, France, (2011).

[24] Yahiaoui.L, Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss). Mémoire de Magister (2011), Institut d'Optique et de Mécanique de Précision, Université Ferhat Abbas Sétif, Algérie.

[25] Faugeras.P.A , Valorisation des fibres lignocellulosiques de la pâte à papier, Thèse de Doctorat (2012), Université de Limoges (en co-tutelle avec l'université de Québec), France.

[26] Bouhank.S. Effet d'absorption d'eau sur le comportement mécanique des composites PP/ farine cellulosique, Mémoire de Master (2012), Département de Génie des Procédés, université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie.

[27] Prat.R, Mosiniak.M et Roland. J.C, La paroi primaire de la cellule végétale, cours de biochimie de l'université de Pierre et Marie de Paris, (2002).

[28] Colonna.P, La chimie verte, Edition : Lavoisier, p139, Paris, (2006).

[29] Ly.H.B, Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose, Thèse de doctorat (2008), Institut national Polytechnique de Grenoble, France.

[30] Bouzouita.S, Optimisation des interfaces fibre/matrice de composites à renfort naturel, Thèse de doctorat (2011), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir - Ecole Centrale de Lyon, France.

[31] Reggad.M, Kadri.F, Influences du taux de fibres, traitement, taux d'absorption d'eau et la température sur les propriétés au choc des composites PP/fibres de Genet d'Espagne, Mémoire DEUA (2007), Département Génie des Procédés, Université Ferhat Abbas setif1 ; Algérie,.

[32] Belhadj.R., Etudes des propriétés physico-mécaniques des fibres végétales traitées (Alfa), Mémoire d'ingénieur (2003), d'Etat, Département d'Optique et Mécanique de Précision, Université Ferhat Abbas-Sétif 1, Algérie.

[33] Saker.A, Etude d'un centre de tri de déchets, Mémoire de Master (2017), université Badji-Mokhtar Annaba, Algérie.

[34] Sperandio.K, identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en œuvre par les collectivités locales, thèse de doctorat (2001), l'institut national des sciences appliquées de Lyon, France.

[35] Chelabi.Z, Taleb.H, mélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre, Mémoire de master (2017), université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, Algérie.

[36] Saadani.S, Comportement des bétons à base de granulas recyclés, Mémoire de Magister(2006), université Mentouri, Constantine, Algérie..

[37] Castro.J, Naaman.A.E, Cement Mortar Reinforced with Natural Fibers, ACI Materials Journal. Vol 6, p 69-78,(1981).

[38] Kriker.A ,Debicki.G, Bali .A, Khenfer.M , Chabannet.M , Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate,Cement and Concrete Composites, Volume 27,p 554-564, 2005) .

[39] State-of-the-art report on fibre reinforced concrete, Reported by ACI Committee 544 ACI 544.1-96.2002.

[40] Aziz.A, Paramasivam.P, Lee. S.L, New Reinforced Concretes 3. Concrete reinforced with natural fibres,Surrey University Press, (1984).

[41] Fisher.V.F, Wihaus.O, Ryssel.M, Oldrecht.J, The water-soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wools boards, Holztechnologie, Vol 15, p 1303-1309, (1974).

[42] Sedan.D, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Thèse de doctorat (2007).université de Limoges, France.

[43] T.Reading, Deleterious effects of wood forms on concrete surfaces, Concrete International p 57-62, (1985).

[44] Govin.A, Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment. Modification du ciment par le bois., Thèse de l'Ecole des Mines de Saint Etienne, France (2004).

[45] Magniont.C, contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco matériau de construction à base d'agro ressources., thèse doctorat (2010). L'université de Toulouse, France.

[46] Toledo.R.F.D, Ghavami.K ,Sanjuan.M, England.G.L, Restrained and Drying Shrinkage of Cement Mortar Composites Reinforced With Vegetable Fibres, Cement and Concrete Composites, Vol 27, p 537-546, (2005).

[47] Coutts.R.S.P, A review of Australian research into natural fibre cement composites, Cement and Concrete Composites, Vol 27, p 518-526, (2005).

[48] Savastano.H, Warden.Jr.P.G, Coutts. R.S.P, Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices, Cement and Concrete Composites, Vol 25, p311-319, (2003).

[49] NI.Y, Coutts.R.S.P, Autoclaved bamboo pulp fibre reinforced cement, Cement and Concrete Composites, Vol 7, p 99-106, (1995).

[50] Zhu.W.H, Tobias.B.C, Coutts.R.S.P, Langfors.G., Air cured banana-fibre-reinforced cement composites, Cement and Concrete composites, Vol 16, p 3-8, (1994).

[51] Savastano.H, Warden.P.G, Coutts.R.S.P, Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites, Cement and Concrete Composites, Vol 22 , p 379-384, (2000).

[52] Coutts.R, Wood fibre reinforced plaster, Journal of Materials Science, Vol 21, p 2959-2964, (1986).

[53] Mansur.M, Aziz.M.A, A study of jute fibre reinforced cement composites, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete,, Vols. %1 sur %2 Vol 4-2, p. 75-82, (1982) .

[54] Ardanuy.M, Claramunt.J, Romildo.D.T.F, Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research, Construction and Building Materials, vol. 79, p.115–128, (2015).

[55] NA 451, Normes Algérienne(1989), Essais Pour Déterminer Les Caractéristiques Mécaniques Et Physiques Des Granulats - Détermination De La Teneur En Eau Par Séchage.

[56] Cherait Y, Nafa Z, (2007), Eléments De Matériaux De Construction Et Essais, Direction de la publication universitaire de Guelma, Algérie.

[57] NF P 18-598, Normes AFNOR:(1991), Granulat- Equivalent de sable .

[58] Dupain.R (2000). Granulats, Sols, Ciment Et Béton : Caractérisation Des Matériaux De Génie Civil Par Les Essais De Laboratoire,2eme édition Casteilla, Paris, France.

[59] NA 2607,Normes Algérienne (1990), Granulats - Analyse Granulométrique Par Tamisage .

[60] NF EN 933-1 (1997), Essais Pour Déterminer Les Caractéristiques Géométriques Des Granulats. Partie 1 : Détermination De La Granularité. Analyse Granulométrique Par Tamisage , AFNOR.

[61] Dreux. G, Festa j, Nouveau Guide Du Béton Et De Ses Constituants , Edition Eyrolles, Paris, France.,(2002).

[62] NF P 15-476, Normes AFNOR (1990), Méthodes D'essais Des Ciments- Détermination De La Finesse.

[63] NF P 15-431, Normes AFNOR (1994), Liants Hydrauliques – Technique Des Essais- Détermination Du Temps De Prise Sur Mortier Normal.

[64] NF P 15-471, Normes AFNOR (1995), Méthodes D'essais Des Ciments - Partie 1 : Détermination Des Résistances Mécaniques .

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

[66] NBN NE 13057, Normes Belge (1997), Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire, (Octobre 1997), (Mai 2002).

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

[68] NF EN 196-6 (1990),Méthodes d'essais des ciments. Partie 6 : Détermination de la finesse, AFNOR.

[69] NF EN 459-2 (2002), Chaux de construction. Partie 2 : Méthode d'essai , AFNOR.

[70] NF EN 196-3 (1995),Méthodes d'essais des ciments. Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité, AFNOR, (1995).

[71] NF EN 196-1 (1995), Méthodes d'essais des ciments. Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques, AFNOR.

[72] Bentchikou. M, Élaboration et étude de deux matériaux composites à fibres cellulosiques et matrice minérale et organique. Application à l'isolation thermique , Mémoire de Magister (2002), Université De Médéa, Algérie.

[73] NF EN 196-3 (1995), Eau de gâchage pour béton ,AFNOR.

[74] Pierre.R.G, Chanvillard PRO 15: 5th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB',(2000).

[75] Blaifi.H, Evaluation des performances d'un matériau composite à matrice minérale et fibre cellulosique soumis à des ambiances climatiques instables, Mémoire de magister (2012), université Dr Yahia Farés, Médéa, Algérie.