REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. YAHIA FARES De MEDEA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département De Génie Civil

PROJET DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de master en génie civil

Option: construction et matériaux

THEME

ETUDE DE LA POSSIBILITÉ DE LA SUBSTITUTION PARTIELLE DU CIMENT PAR UNE POUDRE D'INCINÉRATION POUR LA FABRICATION D'UN COMPOSITE

Etudié par :

M^{r}. SMAIL Amirouche

Dirigé par :

Dr : BENTCHIKOU Mohamed

PROMOTION: JUIN 2012

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier le grand DIEU qui m'a donné la volonté et le courage pour parachèvement ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à monsieur BENTCHIKOU Mohamed d'avoir d'être l'encadreur de ce travail, ainsi pour les conseils et les remarques qu'il m'a prodigué.

Je tiens à exprimer ma respectueuse gratitude à monsieur le président de jury et les membres de jury d'avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer au jury.

Je tiens à remercies tous les responsables de département Génie Civil, et en particulier tous les enseignants de Génie Civil.

Je remercie tout particulièrement ceux qui se sont déplacés lors de ma soutenance et j'en profite pour exprimer ma profonde affection à mes parents pour leur générosité et pour l'ensemble de ce qu'ils m'ont apporté.

Enfin, mes derniers remerciements vont à tous les étudiants et les travailleurs duU.Médéa et en particulier M^{elle} Boukhelkhal Djamila.

Dédicaces

Il me fait le plaisir de dédier ce modeste travail qui ne sera pas réalisé sans l'aide de DIEU le tout puissant.

À la femme la plus importante du monde à celle qui hante mon cœur, mon âme, et ma raison, ma très chère mère que dieu la garde.

A l'homme qui m'a donné son nom mon père

A ma grand-mère que j'aime beaucoup

À mes chers frères :

À mes chères sœurs :

À toute la famille

À tout mes amis de mon village.

À tout mes amis et amies de U Medea

À tout mes amis de la promotion 2012.

Et à tous ceux qui j'aime.



SOMMAIRE

Remerciement
Dédicace
Sommaire
Liste des figures
Listes des tableaux
Résumé
INTRODUCTION GENERALE……... 01

CHAPITRE II SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. INTRODUCTION…… 03
II.2. Matières renouvelables……..... 03
II.3. Généralités sur les matériaux naturels ……. 03
II.3.1. Plantes annuelles :……. 03
II.3. 2. Arbres :…….. 05
II.4. Fibres naturelles ……. 05
II.4.1. Composition chimique…… 05
II.4.1. 1. Cellulose…….. 05
II.4.1.2. Hémicellulose……..... 06
II.4.1.3. Lignine……..... 06
II.4.1.4. Pectine …… 06
II.4.1.5. Les extractibles ……. 07
II.5. Propriétés usuelles des fibres végétales…… 08
II.6. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites ……..…….….....
08
II.7. Les applications des matériaux naturelles……. 09
- Matériaux de construction et d'isolation:…….. 09
II.8. Fibres d'origines animales …….……. 10
II.8.1. La laine…….. 10
II.8.2. La soie : 10
II.8.3. Le fil d'araignée…… 11
II.9. Avantages et inconvénients des fibres animales……... 11
II.10. Les fibres d'origine minérale ……. 11
II.10.1. L'amiante …… 11
II.10.2. Le basalte …… 12
I1.11. Comparaison des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres …….. 13
II.12. Composite ciment- bois …… 14
II.12.1. Introduction :……..... 14
II.12.2. Influence du temps de prise du ciment-bois……..... 14
II.12.3. Propriétés mécaniques du composite courant ……. 15
II.13. Conclusion…….. 18

Chapitre III Matériaux et Essais

III.1 Matériaux de base utilisés pour la fabrication du composite ……. 19
III.1.1.Introduction…….. 19
III.1.2. Le ciment……..... 19
III.1.3 Le sable…….. 22
III.1.3.1 Equivalent de sable…….. 23
III.1.3.2 Granulométrie……. 24

III.1.4 L'eau de gâchage…….. 28
III.1.5 La fibre……. 28
III.1. 6. La cendre ……. 29
III.2 Tache expérimentale ……. 30
III.2.1 Préparation des composites ……. 30
III.2.2. Mode opératoire de malaxage des mortiers……. 31
III.2.3. Equipement nécessaire …… 33
III.2.4. Signification des différents mortiers utilisés ……... 34

Chapitre IV résultats et interprétation

IV .1. Caractérisation des matériaux …….. 35
IV.1.1 .Essais sur les matériaux frais……. 35
IV.1.1.1 .Maniabilité ……..... 35
IV.1.1.2 Masse volumique du mortier à l'état frais…….. 36
IV.1.1.3. La quantité des constituants des matériaux de base dans $1m^3$……... 38
IV.1.2. Essais sur les matériaux durcis ……..... 40
IV.1.2.1. Essais mécaniques : ……... ….. 40
A - Essai de traction par flexion :… ……..... 40
B- Essai de compression…… 40
C-Résistance d'un mortier normal à l'état durci …… 41
IV .2. Interprétation ……..... 42
IV .2.1 Maniabilité (ouvrabilité) …… 42
IV.2.2. Masse Volumique ……... 43
IV.2.3. Absorption d'eau …….. 43
IV.2.4 Résistance en traction par flexion et en compression …….. 45
CONCLUSION GENERALE…… 50

Liste des tableaux

Tableau. II.1: Composition chimique des fibres végétales 07

Tableau II.2. Les propriétés usuelles des fibres végétales 08

Tableau II.3. Comparaison de prix et des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres 2006 13

Tableau III.1 : l'Analyse chimique du ciment et composition du clincker. 20

Tableau III.2 : Les masses volumiques du ciment utilisé. 21

Tableau III.3 : Essai physiques sur ciment 21

Tableau III.4 : Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge 21

Tableau III.5 : Les masses volumiques des différents sables utilisés 23

Tableau III.6 : Compacité, porosité et indice des vides des différents sables utilisés 23

Tableau III.7: L'équivalent de sable des différents sables utilisés 24

Tableau III.8 : L'analyse granulométrique du sable roulé 26

Tableau III.9: L'analyse granulométrique du sable concassé 27

Tableau III.10 Opérations de malaxage du mortier sans fibre. 32

Tableau III.11 Opérations de malaxage du mortier avec fibre 32

Tableau IV.1 Masse volumique en fonction de la teneur en cendre 37

Tableau IV.2 : Constituant du composite sans fibre et avec cendre pour 1 mètre cube de volume (à l'état frais). 38

Tableau IV.3 Constituant du composite avec cendre et 10% de fibre pour 1 mètre cube de volume à l'état frais 38

Tableau IV.4 Constituant du composite avec cendre et 15% de fibre pour 1 mètre cube de volume à l'état frais 39

Tableau IV.5 Constituant du composite avec cendre et 20% de fibre pour 1 mètre cube de volume à l'état frais. 39

Tableau IV.6 : Résistance à la compression et à la traction de mortier réalisé 41

Tableau. IV.7 Mesures et contrôles de la maniabilité du mortier avec cendre et sans fibres. 42

Tableau IV.8. Absorption d'eau pour les mortiers avec/sans fibres et pour différents (%) de la cendre. 44

Tableau IV.9 Résistance à la traction et à la compression des mortiers avec cendre et ajout de fibres (0, 10, 15 et 20%) à 7 et 28 jours. 46

Listes des figures

Figure. II.1: Molécule de la cellulose (n répétitions du glucose) 05
Figure. II.2: Molécule de l'hémicellulose 06
Figure .II.3: Formule chimique de la lignine 06
Figure. II.4. Structure d'une chaîne d'acide uronique. 07
Figure III.1 : Le ciment utilisé 22
Figure III.2 : Le cône et le récipient 22
Figure III.3 : Les éprouvettes de mesure 23
Figure III.4 : Procédure de mesure de l'équivalent de sable 24
Figure III.5 : Séries de tamis 25
Figure.III.6 courbe granulométrique des sables utilisés 27
Figure.III.7 - Le sable de concassage -Le sable roulé 28
Figure.III.8 le schéma illustratif des différentes phases de traitement des matières cellulosiques récupérées 29
Figure.III.9 courbe granulométrique de la cendre 30
Figure.III.10 Poudre d'incinération 30
Figure. III.11 La balance 33
Figure. III.12 L'étuve 33
Figure. III. 13 Le moule 34
Figure. III .14 Vibreur électrique 34
Figure. III.15 Le malaxeur électrique 34
Figure IV.1 : Maniabilimètre à mortier 35
Figure IV.2: Principe de fonctionnement du maniabilimètre à mortier 36
Figure IV.3 : Etat du mortier avant et après mesure du temps d'écoulement 36
Figure IV. 4 La masse volumique en fonction de la teneur en cendre 37
Figure IV.5 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction 40
Figure IV.6. Dispositif de rupture à la compression 41
Figure.IV.7 Evolution de E/C en fonction de la teneur en cendre 42
Figure .IV.8. Taux d'absorption d'eau en fonction de la teneur en cendre. 45
Figure.IV.9 Résistance à la traction par flexion des mortiers avec fibres et âgés de 7 jour 47
Figure.IV.10. Résistance à la compression des mortiers avec fibres et âgés de 7 jours 47
Figure. IV.11. Résistance à la traction des mortiers avec ajout de fibre à 28 jours 48
Figure. IV.12 Résistance à la compression des mortiers à fibres à 28 jours 49

Résumé :

Nous cherchons dans le présent travail à analyser la possibilité de substituer le ciment par une poudre d'incinération, que l'on récupère auprès le complexe biomédical SAIDAL de Médéa, en l'incorporant dans une matrice minérale à base de fibres cellulosiques avec différents pourcentages par rapport à la masse du ciment, afin d'obtenir un mortier composite moins coûteux, de faible conductivité thermique et qui dispose des meilleures caractéristiques mécaniques.

Summary:

We seek in this paper to analyze the possibility of replacing the cement powder incineration, which is recovered from the biomedical complex SAIDAL Medea, by incorporating it into a mineral matrix of cellulose fibers with different percentages relative to the weight of cement, to obtain a composite mortar cheaper, low thermal conductivity and which has the best mechanical properties.

ملخص .

نسعى في هذه الورقة لتحليل إمكانية الاستعاضة عن حرق مسحوق الاسمنت والتي يتم استرداد من المدية صيدال مجمع الطب الحيوي، من خلال إدراجه في مصفوفة المعدنية من ألياف السيليلوز مع نسب مختلفة نسبة إلى وزن الأسمنت، .للحصول على مركب هاون، أرخص انخفاض التوصيل الحراري والذي لديه أفضل الخواص الميكانيكية.

La meilleure façon d'assurer le développement durable du système énergétique passe, de l'avis général, par la réduction de la consommation de toutes les ressources énergétiques. La mise en œuvre des potentialités d'économie d'énergie existantes ne peut avoir que des effets bénéfiques, d'abord sur le plan financier et ensuite sur la situation environnementale globale.

En effet, l'économie d'énergie est l'une des manières de contribuer à la diminution des risques de changements climatiques auxquels notre planète est exposée. La plupart des bâtiments, qu'ils soient à usage d'habitation ou industriel, constituent des systèmes dont la consommation d'énergie est importante si l'on désire assurer un confort thermique acceptable par ses occupants. Pour les deux raisons ci-dessus mentionnées, la mise en œuvre d'un programme d'économie d'énergie dans les bâtiments devrait être une des actions prioritaires à entreprendre. La mise en œuvre d'un tel programme se traduirait par :

- l'amélioration de la conception thermique des bâtiments adaptée aux climats du pays concerné,
- l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments,
- un code de qualité pour les bâtiments neufs et un guide d'exploitation.

Il est par ailleurs indispensable de mener des études qui permettent l'amélioration du confort thermique dans l'habitat non climatisé.

Pour améliorer le confort thermique dans un pays chaud en période estivale et froid en période hivernale comme l'Algérie, le recours à la climatisation s'avère nécessaire. La climatisation naturelle contribue à limiter les recours aux appareils de climatisation, ce qui est une nécessité économique dans un grand nombre de pays chauds. On constate que chaque année, les techniques traditionnelles reculent au profit des standard architecturaux importés et inadaptés aux climats chauds et froids avec des conséquences pour le moins négatives.

Pour une climatisation naturelle ou passive, à savoir un choix adéquat des matériaux et leur disposition pour réduire les apports de chaleur, les outils dont dispose le concepteur d'un bâtiment ne lui permettent pas toujours de répondre directement aux préoccupations qui peuvent être entre autres :

- le niveau d'isolation à adapter pour un bâtiment sans climatisation active
- la répartition des conductances et des capacités thermiques
- l'épaisseur optimale pour les couches des matériaux
- l'action thermique la plus efficace dans un contexte donné (climatisation artificielle/

climatisation naturelle).

Les matériaux tels que la laine de verre, de roche, de bois et l'amiante couvrant une large variété de produits d'usage courant dans les bâtiments comme des isolants thermiques et/ou acoustique [1]. Cependant, suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante pour des raisons économiques relatives aux quelques fibres (fibre de verre, fibre d'acier,…), plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les matériaux végétales en raison de leur disponibilité et leur faible impact environnemental [2].

En effet, l'utilisation des ressources renouvelables devient de plus en plus fréquente de nos jours.

Quoique l'Algérie soit parmi les pays qui possèdent une multitude de ressources végétales (le palmier dattier, le coton, le chanvre, le liège) [2,3], la valorisation de ces matériaux dans le domaine de la construction reste insuffisante.

Nous cherchons dans le présent travail à analyser la possibilité de substituer le ciment par une poudre d'incinération, que l'on récupère auprès du SAIDAL (à Médéa), en l'incorporant dans une matrice minérale à base de fibres cellulosiques avec différents pourcentages par rapport à la masse du ciment, afin d'obtenir un mortier composite moins coûteux, de faible conductivité thermique et qui dispose des meilleures caractéristiques mécaniques.

Dans ce contexte, le mémoire s'articule autour de cinq chapitres:

- le premier chapitre est consacré pour une introduction générale ;
- dans le second chapitre nous donnons une revue bibliographique sur les matériaux naturels en présentant la structure et la composition chimique de ces matériaux, leurs différents types et leurs applications.
- Le troisième chapitre présente les différentes méthodes de caractérisation des matériaux utilisés dans ce travail.
- Le quatrième chapitre est consacré à effectuer différents essais mécaniques sur les mortiers fabriqués.
- dans le cinquième chapitre nous interprétons les résultats obtenus dans le troisième chapitre.
- on termine ce mémoire par une conclusion générale.

II.1. Introduction :

L'utilisation des ressources renouvelables (ressources provenant de la biomasse) dans les matériaux composites devient de plus en plus fréquente de nos jours. On assiste à une forte demande des marchés pour des produits plus respectueux de l'environnement. C'est ainsi que des recherches sont menées dans plusieurs parties du monde. Des fonds colossaux sont débloqués dans ce sens pour satisfaire la demande. Des matériaux aux appellations diverses (bio composite, biodégradable, biocompatible, etc.) ont ainsi vu le jour.

L'importance économique des matériaux composites est maintenant notoire et les prévisions laissent à penser que celle-ci sera en augmentation constante dans les années qui viennent. Une grande diversité de fabrication est concernée, depuis les produits composites dits « à grande diffusion » jusqu'aux composants aérospatiaux à hautes performances mécaniques et thermomécaniques [4].

II.2. Matières renouvelables

La matière renouvelable correspond à toute substance possédant la capacité de se renouveler naturellement. Leur utilisation est devenue une nécessité car avec l'épuisement des ressources fossiles, avec l'émission des gaz à effet de serre et l'éternel problème de la gestion des déchets, il est indispensable de trouver des solutions alternatives pour le respect de l'environnement. Ainsi, l'amélioration de la qualité de la vie quotidienne est devenue une des préoccupations majeures de la communauté scientifique internationale. C'est dans ce cadre que de nouveaux matériaux de plus en plus performants sont mis au point.

II.3. Généralités sur les matériaux naturels :

Les matériaux naturels sont classés en trois groupes principaux, les matériaux provenant de sources végétales, animales ou minérales. Les matériaux végétaux peuvent être subdivisés en deux catégories principales:

II.3.1. Plantes annuelles :

On peut citer le chanvre, lin, jute, ramie, sisal, coton,… etc. Les fibres de ces matériaux sont classées en trois groupes suivant leur provenance, à s'avoir [4]:

- Les fibres extraites des tiges des plantes (Chanvre, Ramie, Jute, Lin, Kennaf,…).

- Les fibres dures issues des feuilles comme les feuilles de sisal, de henequen, de l'abaca, de l'ananas,...
- Les fibres provenant d'enveloppes ou de graines des fruits (Coton, Noix de coco,).

- **Le chanvre**

Le chanvre est une fibre libérienne, tout comme le lin, le Kennaf, le jute et la ramie. Les plantes de cette famille présentent toutes des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses. Par ses possibilités techniques, la fibre de chanvre répond à des besoins textiles traditionnels tout en ouvrant la voie à une foule d'innovations. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe, en France et en Italie.

La France est le premier producteur en Europe pour la production de chanvre, avec environ 9 100 ha cultivés en 2005 [5].

Les fibres libériennes sont généralement transformées en textiles (tapis et vêtements) et en produits industriels comme des géotextiles, de la toile anti-érosion, du renfort de composite et du remplissage ce qui constitue d'ailleurs le principal emploi actuel et à venir de la fibre de chanvre. A cause de sa grande solidité et de son intérêt économique, la fibre de chanvre est en effet très recherchée comme substituant de la fibre de verre et d'autres matériaux synthétiques utilisés dans divers composites agglomérés, par exemple des pièces automobiles, des matériaux de construction et divers biens de consommation.

- **Le lin :** Le lin est une plante annuelle qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie qu'en Europe. La fibre de lin vient des tiges de la plante mais aussi de l'huile extraite des graines. L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée, en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. Le lin peut être utilisé comme substitut au coton. De plus, le rendement de cette fibre est très nettement supérieur à la production de coton (jusqu'à 2 t/an/ha) [6].
- **Le Coton :** Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut. Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie et mêmes d'Europe (Espagne). Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelées linters. Le rendement en linters de coton est de seulement 0,05 t/ha/an. Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. En effet, les linters de coton mesurent 2 à 5 mm et ont une largeur de 18 μm. La fibre est utilisée pour des papiers dits de luxe. Elles sont également utilisées pour les papiers fiduciaires et principalement pour les billets de banques, papiers pour lesquels la caractéristique essentielle est la résistance au pliage [5].

- **Le Sisal :** Le sisal est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2 m de long. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ces fibres est de 3 mm [5].
- **La ramie :** La ramie est une plante arbustive. Originaire d'Asie de l'Est, la ramie a pour principaux producteurs la Chine, le Japon et l'Amérique. Le rendement en fibres est d'environ 2 t/ha/an. La longueur moyenne des fibres est comprise entre 40 et 250 mm, pour un diamètre moyen de 45 µm. Ces fibres ressemblent aux fibres de lin mais sont encore plus longues, plus solides et plus rigides [5].
- **Le coco :** Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien. On utilise plutôt dans des pièces spacieuses et lorsqu'on veut mettre en avant son côté rustique [5].

II.3. 2. Arbres :

Comme les arbres de palmier dattier [5], de pin, d'hêtre, de chêne, de sapin, d'épicéa, de peuplier [6], Les fibres provenant des arbres peuvent être extraites du tronc, des branches, des feuilles ou des tiges des feuilles [5, 6].

II.4. Fibres naturelles :

II.4.1. Composition chimique

II.4.1. 1. Cellulose

La cellulose est le constituant principal de la masse végétale d'un grand nombre des matériaux végétaux [3,7]. D'un point de vue chimique, la cellulose est un polymère linéaire, se compose seulement des unités de glucose ($C_6H_{11}O_5$) répétés, reliés entre elles par des liaisons hydrogène (voir Figure. II.1). La cellulose contient des zones cristallines ordonnées et des zones amorphes désordonnées [3]. Elle est fortement hydrophiles (qui absorbe de l'eau) à cause de la présence de groupement hydroxyles (OH) [3,7], résistant aux oxydants. Elle donne à la fibre sa rigidité [7].

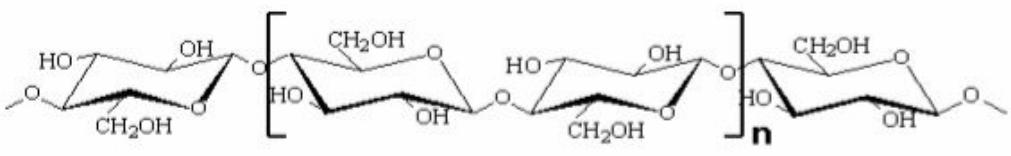


Figure. II.1: Molécule de la cellulose (n répétitions du glucose) [3].

II.4.1.2. Hémicellulose

Les hémicelluloses sont des polymères solubles dans l'eau. Ils sont amorphes, de masse moléculaire plus faible que celle de la cellulose. Ils contiennent plusieurs unités de sucre (xylose, arabinose, galactose, glucose,…) et plusieurs branchements différents. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres [3].

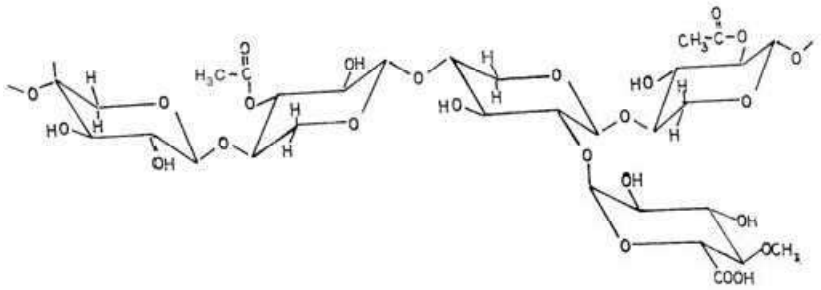


Figure. II.2: Molécule de l'hémicellulose [3].

II.4.1.3. Lignine

La lignine est un polymère hydrocarbure complexe, elle se compose de trois types d'alcools (voir Figure. II.3) [7]. C'est l'élément qui donne la rigidité aux plantes [3].

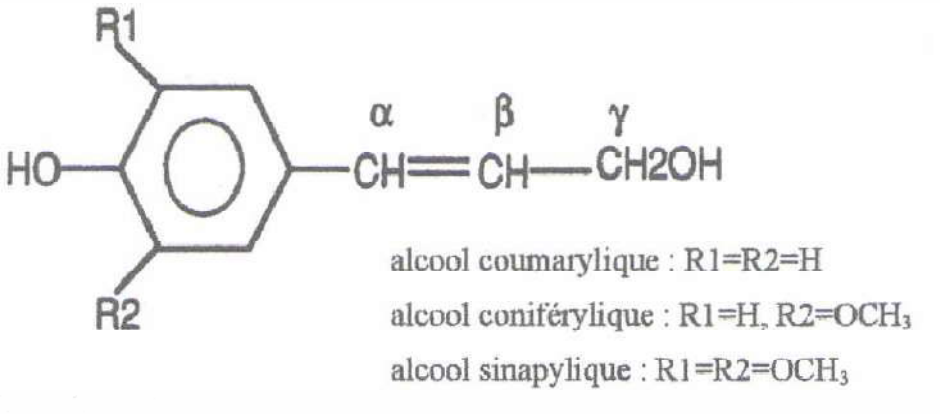


Figure .II.3: Formule chimique de la lignine [7].

Elle est totalement amorphe, hydrophobe (insoluble dans l'eau ou n'a pas la capacité de créer des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau) [7].

II.4.1.4. Pectine :

La pectine est un polymère acide, composée d'une chaîne d'acide uronique (l'acide uronique est obtenu par oxydation du dernier carbone de sucre) [7]. Elle fournie la flexibilité à la plante.

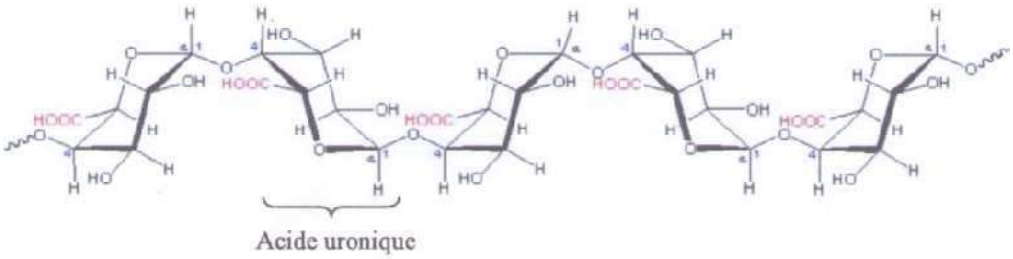


Figure. II.4. Structure d'une chaîne d'acide uronique [7].

II.4.1.5. Les extractibles :

Ils comprennent plusieurs substances chimiques différentes comme les graisses, qui sont insolubles dans l'eau et dans divers acides, elles peuvent être extraites par une solution organique [8].

En effet, les polymères des parois cellulaires des matériaux naturels ont beaucoup de groupes hydroxyles responsables de l'absorption d'eau. Cependant, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine absorbent l'humidité à différents degrés car le contenu en hydroxyles pour chaque polymère est différent [9]. Ainsi que, ils sont responsables des propriétés mécaniques des matériaux [10].

Le tableau II.1 montre les compositions chimiques des différents types des matériaux naturels.

Fibre	cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Pectine (%)	graisses (%)
Coton	85-90	5,7	0.5-1.6	5,7	0,6
Noix de coco	32-46	0.15-0.3	40-45	4	-
Jute	64,4-84	12-20	12-13	0,2	0,5
Lin	64.1-81	16.7-20.6	2-3	0.9-1.8	1.5
Chanvre	68-92	15-22	10	0.9	0.8
Ramie	68.6-76.2	13.1-16	0.6-0.7	1.9-2	0.3
Sisal	65.8	12	9.9	0.8-2	2
palmier	32-35.8	24.4-28.1	26.7-28.7	-	7

Tableau. II.1: Composition chimique des fibres végétales.

II.5. Propriétés usuelles des fibres végétales

Le tableau II.2 présente les propriétés usuelles des fibres végétales. On remarque que la plupart des fibres présentent des propriétés proches de celles des fibres synthétiques (verre, aramide, carbone…). La production de ces fibres est relativement importante.

Propriétés	Type de fibres							
	lin	Chanvre	Jute	Ramie	Coco	Sisal	Abaca	Coton
Densité	1,4	1,48	1,46	1,5	1,25	1,33	1,5	1,51
Résistance à la traction (MPa)	800-1500	550-900	400-800	550	220	600 -700	980	400
Module d'élasticité (E) [GPa]	60-80	70	10-30	44	6	38		12
(E/densité) spécifique	26-46	47	7-21	29	5	29		8
Allongement à la rupture (%)	1,2-1,6	1,6	1,8	2	15-25	2-3		3-10
Absorption d'eau (%)	7	8	12	12-17	10	11		8-25
Production mondiale en 2002 en milliers de tonnes/an	750	78	3200	202	654	345	104	21200

Tableau II.2. Les propriétés usuelles des fibres végétales [11]

II.6. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites :

Les fibres végétales constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort de matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel. Les principaux avantages et inconvénients sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

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

II.7. Les applications des matériaux naturelles :

Les applications des matériaux naturels sont nombreuses dans des domaines très variés. Presque toutes les fibres ont des utilisations finales semblables classées en trois catégories principales [4]: l'habillement (les robes,…), ménage (les meubles de maison) et industriel.

Pour les applications d'habillement, la fibre de coton est la plus utilisée, suivie de lin et chanvre. Les applications de ménage sont des rideaux, tapisserie, ameublement, matelas.
Fibre de coco et presque toutes les fibres de graine, de feuille et de tige sont employées dans cette catégorie. Dans le domaine industriel, presque toutes les fibres sont employées pour les utilisations suivantes : les cordes, chaussures, sacs, filets de pêche, papier.
Les applications industrielles s'étendent aussi à l'utilisation des fibres naturelles pour réaliser des composites qui trouvent leurs applications dans l'automobile, géotextile [4], plate-forme de pont, industrie aérospatiale et fabrication d'appareils de plongée ou d'objet sportif [11], les matériaux de construction et d'isolation dans les bâtiments [12, 13].

- **Matériaux de construction et d'isolation :**

Les fibres des plantes comme le chanvre, lin, jute, sisal, et les fibres ou particules des espèces variés des bois (chêne, pin,…) peuvent être utilisées comme renforts des différents matrices, dans le secteur des bâtiments (isolation, construction) [4, 12, 13].
Les principales matrices utilisées sont les matrices organiques (les polymères synthétiques thermoplastiques, thermodurcissables) et les matrices inorganiques comme le ciment, la magnésie et le gypse [13]. Les matrices inorganiques sont des matériaux incombustibles principalement utilisés dans la fabrication des composites de fibres ou de particules de bois (bétons, panneaux), fournissant une protection contre le feu [13].
L'utilisation des matériaux végétales est motivée par plusieurs facteurs [12]: densité faible, pas coûteux, bonne propriétés mécanique, thermique et acoustique. En plus, ils sont des matériaux renouvelables et abondants dans la nature.
Enfin, Les fibres des plantes annuelles tel que le chanvre, sont utilisées pour l'isolation (laine de chanvre) et la construction (les bétons de chanvre, les briques de chanvre), ces derniers permettent aussi de garantir un confort d'isolation thermique [12]. Grâce à la capacité de chanvre à réguler la quantité de vapeur d'eau dans l'air, son utilisation contribue à l'hygiène du bâtiment et fournit une sensation de confort à l'habitation [13].
D'autre part, les composites de liège qui ont un usage décoratif et/ ou isolant, sont des bons isolants acoustiques et thermiques [13].

II.8. Fibres d'origines animales

II.8.1. La laine

La laine est une fibre qui provient de la toison de divers ovins (moutons). Son observation à l'œil nu montre une forme frisée et élastique de couleur variable, du blanc au brun en passant par le jaune. Sa longueur varie entre 3 et 30 cm. Au microscope, la fibre présente une structure en canal irrégulier recouvert d'écailles qui se chevauchent. À l'état brut, la laine est graisseuse, car elle est imprégnée de sécrétions animales, qui constituent jusqu'à 30 % de sa masse. En outre, la laine fraîchement tondue contient de nombreuses impuretés (débris végétaux, organiques et minéraux), qui doivent être éliminées avant l'utilisation de la fibre. Ces déchets peuvent représenter jusqu'à 70 % de sa masse. La laine est un produit animal essentiellement composé par des protéines, dont le principal est la kératine. On distingue plusieurs catégories de laines : mérinos, croisées, communes, d'agneau (lambswool). La laine d'agneau est constituée par la toison de la première tonte d'un mouton. Enfin, on peut également récupérer la toison d'animaux morts ou reconstituer la laine à partir de vieux tissus. La résistance de la laine est inférieure à celle de la plupart des autres fibres textiles. Par contre, son élasticité est très grande, et les tissus ne se froissent pratiquement pas. La laine présente une grande aptitude à la filature, car les fibres adhèrent bien les unes aux autres, de même qu'elle se mélange bien avec d'autres types de fibres. Son toucher est rêche et elle possède un remarquable pouvoir isolant [13].

II.8.2. La soie :

La soie est constituée de filaments produits par des chenilles de papillons, tel le bombyx du mûrier. Pour protéger leur métamorphose, les chenilles tissent autour d'elles un cocon, à l'aide de leur glande séricigène (glande à soie). Ce cocon, une fois dévidé, donne le fil de soie. À l'œil nu, la fibre se compose d'un fil très long, entre 700 et 1 500 m, et très fin, à l'aspect brillant et doux. Comme la laine, la soie contient un mélange de protéines, notamment la fibroïne et la séricine qui représentent respectivement 65 % et 25 % du poids total, mais aussi de l'eau et des sels minéraux. La fibroïne est la soie proprement dite, les autres éléments étant plus ou moins complètement éliminés au cours de la préparation de la fibre. Celle-ci a une résistance élevée, du même ordre de grandeur que celle d'un fil d'acier à diamètre égal. Son élasticité est très grande, ce qui donne des tissus presque infroissables. La soie est un bon isolant thermique [13].

II.8.3. Le fil d'araignée

Les araignées produisent un fil constitué lui aussi de protéines. Ses performances mécaniques intéressent nombre de chercheurs pour la confection de textile technique ou pour le renforcement de matériaux composites. C'est uniquement chez les araignées sédentaires que les pièges (les toiles) existent. Les types et la nature des soies sont divers et dépendent de type d'araignée. Les soies d'araignée ont différentes fonctions telles que : la capture de proies, la reproduction et la détection des vibrations. Les performances mécaniques des soies d'araignée combinent résistance en traction, compression et ténacité. Les meilleures performances mécaniques mesurées sur des soies naturelles sont un module d'Young initial de 60 GPa, une contrainte à rupture de 2900 MPa et un allongement à rupture jusqu'à 200 %. Cet allongement à rupture en traction très important explique que, pour l'absorption d'énergie mécanique, les soies d'araignée sont inégalées dans le monde de fibres synthétiques ou naturelles **[12]**.

II.9. Avantages et inconvénients des fibres animales :

Les fibres animales présentent des propriétés spécifiques importantes telles que les propriétés mécaniques (résistance et rigidité), thermique, la biodégradabilité, leur origine renouvelable, etc.

Malgré ces avantages, les fibres animales ne sont pas beaucoup utilisées comme renfort dans les matériaux composites à cause de leur prix élevé et leur faible production.

II.10. Les fibres d'origine minérale

Les renforts d'origine minérale sont principalement à base de silicium les plus courants étant l'amiante et le basalte.

II.10.1. L'amiante

L'amiante est généralement associée aux résines phénoliques en raison d'un bon accrochage. Elle peut être employée en combinaison avec les fibres de verre dans le but de diminuer le coût. Elle est également ajoutée aux fibres de sisal pour améliorer les propriétés du matériau.

Bien que les fibres d'amiante présentent de nombreux avantages, elles posent de sérieux problèmes d'hygiène et de sécurité. En effet, les fibrilles d'amiante favorisent l'action de produit cancérigène sur l'homme, elle est donc aujourd'hui soumise à une réglementation très stricte.

II.10.2. Le basalte

Le basalte est une roche volcanique issue d'un magma refroidi rapidement au contact de l'eau ou de l'air. C'est le constituant principal de la couche supérieure de la croûte océanique. Le mot basalte est emprunté du latin basalte, lui-même probablement dérivé d'un terme éthiopien signifiant « roche noire ». Le basalte est mélanocrate à holomélanocrate (sombre à très sombre). Il a une structure microlithique, est composé essentiellement de plagioclases (50 %), de pyroxènes (25 à 40 %), d'olivine (10 à 25 %), et de 2 à 3 % de magnétite. Le basalte est issu de la fusion partielle, au niveau de la low velocity zone, d'une pyrolite hydratée.

Les fibres de basalte présentent des propriétés surprenantes : elles résistent au feu, comme les fibres de silice, de céramique ou de carbone, tout en étant beaucoup moins chères (trois à quatre fois moins chères que les fibres de silice). De par ces propriétés, les premières applications visées sont la protection anti-feu notamment pour l'ameublement, la construction, les câbles, etc.

Ces fibres sont également utilisées comme renforts dans les matériaux composites. Les producteurs mettent en avant leur résistance aux agressions chimiques et leur résistance en traction qui est supérieure d'environ 20 % à celle de la fibre de verre. Les fibres de basalte possèdent également une bonne mouillabilité et n'absorbent pas l'humidité. Les renforts peuvent se présenter sous différentes formes : tissés et non-tissés, tissus 3D et triaxiaux, tresses et filaments coupés. Ces caractéristiques pourraient leur ouvrir des applications dans les sports et loisirs ou dans l'automobile.

Les fibres de basalte présentent des avantages importants par rapport aux autres fibres tels que:

- une température d'utilisation élevée : 820 °C ;
- une bonne résistance au feu ;
- une contrainte et déformation à la rupture supérieures à celles de la fibre de verre ;
- un module d'YOUNG élevé (89 GPa) ;
- une très bonne résistance aux produits chimiques : acides forts, bases, solvants ;
- une très bonne résistance à la corrosion, aux rayonnements UV ;
- matériau inerte, non toxique, non cancérigène ;
- un prix compétitif par rapport à la fibre de verre.

I1.11. Comparaison des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres

Le tableau II.3 présente le prix et les caractéristiques mécaniques en traction de différentes fibres d'origines naturelles ainsi que celles des fibres de renfort couramment utilisée pour le renforcement de matériaux composites courants. Les valeurs présentées sont issues de la littérature et, compte tenu du caractère naturel de ces fibres, on remarque des dispersions. Ces valeurs sont discutables car on note des différences pour un même type de fibre, en fonction des paramètres tels que l'origine, la variété, les conditions de croissance et de récolte des fibres, associés aux traitements qu'elles ont subis. Les fibres végétales pourraient constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison notamment de leur légèreté et de leur faible impact environnemental. Les fibres de lin ou de chanvre sont, avec leur densité proche de 1,5, plus légères d'environ 40 % que les fibres de verre. Elles présentent, d'autre part, des propriétés mécaniques pouvant atteindre celles du verre en termes de résistance à la traction et de résilience. Leur fabrication nécessite jusqu'à 80 % d'énergie en moins que les fibres de verre. Au niveau économique, les fibres végétales sont beaucoup moins chères que les fibres synthétiques **[13]**.

Fibres	E (GPa)	A (%)	σ_r (MPa)	Densité	Prix (euro/Kg)
Fibres synthétiques					
Verre E (Filament vierge)	72 - 73	4,6 - 4,8	3200 - 3400	2,54	1,5
Carbone(Toray T300)	230	1,5	3530	1,7 - 1,9	30
Aramide	124	2,9	3620	1,44	
Fibres végétales					
Lin	13 - 85	1 - 4	600 - 2000	1,54	0,56 - 0,61
Ramie	61,4 - 128	1,2 - 3,8	400 - 938	1,56	
Chanvre	35	1,6	389	1,07	0,60 - 1,30
Jute	26,5	1,5 - 1,8	393 - 773	1,44	0,27
Sisal	9 - 21	3 - 7	350 - 700	1,45	0,31
Noix de coco	4 - 6	15 - 40	131 - 175	1,15	0,23 - 0,80
Coton	5,5 -12,6	7 - 8	287 - 597	1,5 - 1,6	
Fibres animales					
Ver à soie Attacus atlas	5	18	200		
Ver à soie Bombyx mori	16	15	650		
Araignée Argiope	7	30	600		

E : module d'Young en traction A : allongement à rupture en traction
σ_r : contrainte à rupture en traction

Tableau II.3. Comparaison de prix et des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres 2006[13].

II.12. Composite ciment- bois :

II.12.1. Introduction :

Les composites bois-béton ont été beaucoup étudiés depuis ces dernières années car les fibres de bois possèdent beaucoup d'avantages comparées aux fibres d'amiante : le faible coût, des procédés d'élaboration plus sains pour la production des composites de différentes formes, le renouvellement et le recyclage, alors que l'utilisation d'amiante a été mise en cause par la législation sur la santé.

Le renforcement des ciments par des fibres cellulosiques donne un matériau composite qui peut remplacer l'amiante-ciment dans de nombreuses applications telles que les plaques de toiture, la tuyauterie, les revêtements de murs et d'autres applications intérieures.

Néanmoins, les composites à base de bois montrent, en général, un désavantage important : c'est leur sensibilité aux conditions humides, conduisant à des variations dimensionnelles et par conséquent, à la baisse de la performance du composite. L'utilisation de ces composites dans les constructions est souvent limitée à cause de cela. Des méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques et physiques du bois et du composite ciment-bois en général seront discutées plus loin.

Notons que l'intérêt est aussi d'utiliser des matériaux cellulosiques de rebut (chutes, copeaux, papier, …) afin d'apporter un moyen de les valoriser.

II.12.2. Influence du temps de prise du ciment-bois

Dès les années 60 **[Bib et al, 68]** signalent un rallongement très sensible des temps de prise, voire même une inhibition totale de celle-ci, les mélanges restant indéfiniment à l'état pâteux. La détermination des facteurs influençant la prise se pose donc depuis plus de trente ans. Biblis attribue les plus fortes influences au glucose et à la cellulose, tandis que **[Wea et al. 67]** rendent compte de forts retards engendrés par la présence de bois décomposé dans le mélange.

Les solutions apportées consistent en l'introduction d'accélérateurs de prise du ciment afin de contrecarrer l'effet néfaste des extractibles du bois. **[Mos, 85]** préconise l'emploi de chlorures de fer, d'étain ou d'aluminium à 5% en masse. Il est même possible de neutraliser les effets des extractibles à l'aide de chlorure de calcium sans altérer les propriétés mécaniques **[Mitch, 80].** On attribue ensuite des influences moins marquées aux tanins et aux acides aliphatiques, tandis que les terpènes et la lignine n'ont pas d'effet observable [**Bib et al 68].**

[Wil et al. 84] ont entrepris la classification d'adjuvants organiques et inorganiques selon leur influence accélératrice ou retardatrice, sur la prise du ciment, en suivant son hydratation par calorimétrie isotherme. Leurs conclusions semblent indiquer que toutes les molécules organiques semblent induire des retards, mais que parmi elles, les adjuvants phénoliques avec des groupes hydroxyle adjacents sont de puissants retardateurs. Ce fait est expliqué par la faculté de telles molécules de former des complexes avec des ions calcium. L'acide citrique, le catéchol et l'acide salicylique sont notamment cités.

Rappelons que ces molécules sont largement présentes dans les extractibles du bois, notamment du bois rétifié, et que les polyphénols, oligomères de ces mêmes molécules, sont également susceptibles de donner des complexes d'ions métalliques. On peut retenir que la présence de molécules organiques diverses dans l'eau de gâchage peut introduire des perturbations de l'hydratation du ciment, entraînant dans certains cas une chute des résistances mécaniques du matériau. Les extractibles aqueux du bois sont donc susceptibles d'avoir de tels effets. **[Ang, et al. 01]** ont préparé des composites fibres de **bagasse-ciment**, avec une distribution aléatoire des fibres dans le composite. Ils se sont concentrés sur l'influence de divers paramètres sur la prise du matériau composite bagasse-ciment : les constituants végétaux de la fibre de bagasse, le traitement thermique de la fibre (bagasse réifiée entre 175-250°C) ou le traitement chimique d'hydrolyse par l'acide chlorhydrique, le taux massique de fibres de bagasse dans le composite et le pourcentage d'eau ajoutée. Cette étude montre l'effet retardateur de la lignine sur la prise du matériau composite et le comportement du composite est quasiment le même que celui du ciment classique ou du composite cellulose-ciment pour de faible teneurs en fibres de bagasse rétifiées à 200°C.

[Khe et al. 00] ont supposé que la liaison interfaciale, dans le cas des ciments renforcés par des fibres, peut être affectée par plusieurs paramètres comme le rapport« eau/ciment », la porosité, la morphologie de la fibre et la compaction. Cette liaison peut être aussi de nature physique ou chimique ou une combinaison des deux, et cela en fonction de la nature de la matrice et de la fibre renforçante.

II.12.3. Propriétés mécaniques du composite courant :

[And et al. 79] ont étudié la variation des propriétés mécaniques du composite renforcé avec des **fibres de cellulose** en fonction de la fraction massique des fibres. Leurs études montrent que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation de la fraction massique. Par exemple : pour la fraction massique m_f = 10 % la résistance en traction est :($Rt^{=}$ 9.65 ±1.63 MPa). Par contre, la résistance à la flexion 3 points est maximale (Rf =

26.84±1.77 MPa) pour une fraction massique de 6%. Ensuite, quand m_f = 8-10%, la résistance à la flexion n'augmente quasiment plus.

Ils annoncent aussi que le module d'élasticité en traction est maximal (E_t= 13.62± 3.45 GPa) pour un taux de fibres de 4%, alors que celui en flexion diminue avec l'augmentation du taux de fibres. A partir des calculs, ils ont trouvé que le cisaillement interfacial varie entre 0.35 et 0.45 MPa; le cisaillement ne peut pas être très élevé à cause de l'incompatibilité entre la fibre et la matrice et aussi parce que, sous charge, il y a le décollement de la fibre d'avec la matrice.

Bla et All [Bla et al. 99] ont proposé d'utiliser dans les composites « les fibres secondaires », c'est -à-dire, les fibres de papier recyclé et de produits de papier. La résistance à la flexion et la ténacité de tels composites est plus importantes que celles du ciment pur. Des cycles de congélation-décongélation du composite augmentent son module élastique dynamique, alors que pour le ciment pur c'est le contraire. En même temps, la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de l'humidité des composites.

Les composites secs montrent des valeurs de la ténacité plus petites que les composites humides. Les propriétés mécaniques du composite ont été améliorées par le traitement chimique de la surface des fibres de bois, l'utilisation du malaxage par cisaillement à grande vitesse et par la modification de la matrice cimentaire.

Dans cette étude les fibres des résineux, les fibres de feuillus et les fibres de papier de journal on été utilisées. Les fibres ont été traitées par des solutions (1, 10, 30, 60, et 100% en volume) d'acrylique et par une solution aqueuse d'alkylakoxylane avant de les mélanger au ciment.

La résistance à la flexion est plus grande pour le composite que pour le ciment pur. Les deux traitements améliorent les valeurs de la résistance à la flexion par rapport aux fibres non traitées. Mais, le traitement par la solution de 30 % et plus d'acrylique abaisse la résistance à la flexion. Le composite avec les fibres de feuillus donne les meilleurs résultats de la résistance à la flexion. Cela s'explique par le fait que les fibres de résineux sont plus courtes, que celle des fibres de feuillus et les fibres servent de ponts entre des microfissures développées dans la matrice cimentaire. Ces résultats se confirment par d'autres études : les ciments renforcés de fibres courtes développent de plus faibles résistances que ceux renforcés de fibres longues.

La longueur des fibres traitées par la solution d'alklaoxylane n'a pas une grande influence sur la résistance à la flexion du composite. Les valeurs de la résistance à la flexion du composite avec fibres traitées sont comparables avec celles du composite avec fibres non

traitées. De même, le traitement par la solution de 100% d'alkylalkoxylane donne une chute de la résistance à la flexion pour tous les types de fibres. En comparant les deux types de traitement, les auteurs indiquent que les valeurs de la résistance sont plus élevées pour les fibres traitées par la solution d'alkylalkoxylane.

La ténacité s'améliore pour le composite par rapport au ciment pur et pour le composite aux fibres traitées par rapport au composite aux fibres non traitées. En général, les meilleures valeurs de la ténacité correspondent au traitement par la solution de 30% et plus d'acrylique, alors que les valeurs de la résistance à la flexion associées diminuent.

La résistance à la compression diminue pour le composite par rapport au ciment pur. Cependant, le traitement par la solution 30% et moins d'alkylalkoylane produit une faible augmentation des valeurs de la résistance. Le traitement par la solution d'acrylique ne produit pas de résultats sensiblement différents des résultats pour le composite aux fibres non traitées.

Le composite aux fibres traitées par la solution de 100% d'alkylalkoxylane donne les valeurs de la résistance à la compression plus élevées que celles pour le composite aux fibres traitées par la solution de 100% d'acrylique.

Dans une autre étude,**[Bla et al. 94]** annoncent que l'amélioration des propriétés mécaniques du composite peut être atteinte par **la modification de la matrice cimentaire** et par l'utilisation du malaxage par le cisaillement à grande vitesse. Pour modifier les propriétés de la matrice les auteurs proposent différents types de ciment.

L'utilisation des ciments alcalinisés améliore la maniabilité de la pâte cimentaire et diminue ses délais de prise. Les valeurs de la résistance à la flexion et à la compression optimales ont été obtenues pour le ciment commercial alcalinisé à 25°C. La dilatation linéaire est plus basse pour le composite à base du ciment alcalinisé.

Les effets de remplacement d'une partie du ciment par la fumée de silice ont été étudiés dans ce travail. La fumée de silice contient plus de 95% de SiO_2 amorphe avec une taille de grain d'environ 0.01 micron. L'addition de fumée de silice améliore la maniabilité de la pâte cimentaire et augmente la résistance à la flexion (22,8 MPa avec l'addition de 6% en masse de fumée de silice par rapport à 15,2 MPa sans l'addition de fumée de silice). En même temps, l'addition de fumée de silice diminue l'alcalinité de la matrice et donc diminue le dégrée de dégradation des fibres de bois. Cet aspect a été étudié dans le détail par A. Govin **.** Les fibres qui contiennent de grande quantité de lignine sont plus sensibles au milieu alcalin de la matrice cimentaire que les fibres où la quantité de lignine est négligeable.

C'est parce que la lignine et l'hémicellulose sont plus susceptibles à l'attaque alcaline et à la dégradation chimique que la cellulose.

L'utilisation d'un malaxeur par cisaillement à grande vitesse augmente la résistance à la flexion du composite (19 MPa par rapport à 11,1 MPa pour le malaxeur à aubes).

L'observation en microscopie optique montre que l'utilisation de malaxeur par cisaillement à grande vitesse provoque la réduction des agglomérations des fibres et leur meilleure distribution dans la matrice, conduisant ainsi à un renforcement plus efficace.

Led a examiné l'effet d'addition au mélange ciment + argile de copeaux de bois. La résistance à la compression du composite diminue avec l'augmentation du taux de copeaux de bois, alors que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation de taux de copeaux de 0 à 10%. Cette augmentation peut être expliquée par le fait que les copeaux jouent le rôle de fibres dans la matrice. En plus, l'addition des copeaux améliore la performance thermique d'isolation du composite et diminue ses variations dimensionnelles.

D'autre part, les variations dimensionnelles peuvent être comparées avec l'absorption d'eau des copeaux et du composite. La réduction des valeurs d'absorption d'eau de composite par rapport à celles pour les copeaux seuls s'explique par le fait que dans le composite, la matrice absorbe aussi. Excepté les résultats du traitement par la chaux, la réduction des variations dimensionnelles est plus importante que la réduction d'absorption d'eau pour les copeaux et le composite. Cette conclusion démontre que les variations dimensionnelles ne sont pas seulement dues à l'absorption d'eau des copeaux. La conséquence de ce processus est que la modification de la porosité de la matrice peut être un facteur essentiel pour la réduction de la variation dimensionnelle. Cela concorde avec des recherches antérieures.

Le traitement par l'eau bouillante suivi du traitement par la chaux hydraulique permet de minimiser considérablement les variations dimensionnelles du composite. Ce procédé technique permet d'atteindre un excellent compromis dans les propriétés du matériau.

II.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique concernant les matériaux naturels. Cette présentation servira à savoir les différents types des matériaux naturels, leurs structures, leur composition chimique. D'après cette étude, la structure et la composition chimique de différents types des matériaux naturels vont influencer de manière importante leurs propriétés macroscopiques. Il est très important de prendre en compte ces propriétés pour l'utilisation des matériaux.

En effet, les matériaux naturels sont utilisés dans plusieurs domaines d'application et leur utilisation est limitée par leurs propriétés d'où la nécessité de présenter une revue sur les propriétés des matériaux naturels et leur caractérisation.

Dans le présent chapitre nous nous intéressons à la caractérisation des matériaux utilisés en réalisant différents essais qui ont été menés dans les laboratoires du hall technologique à Médéa.

III.1 Matériaux de base utilisés pour la fabrication du composite :

III.1.1.Introduction

Les bétons sont des matériaux de construction qui contiennent du ciment, de l'eau, du sable, des granulats et des adjuvants (retardateurs ou accélérateurs de prise, réducteurs d'eau …. etc.). Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature, les pourcentages des constituants, l'utilisation, le malaxage et la mise en œuvre.

Dans notre travail les différents matériaux avec lesquels nous travaillerons sont : Le ciment (liant) ; Eau ; Sable ; Cendre ; Fibre

III.1.2. Le ciment

Un seul type de ciment est utilisé au cours de cette étude expérimentale **[14]**. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, produit par la cimenterie d'Oggaz (Mascara) dont l'ajout est le calcaire qui est conformé à la norme [NA 442] **[15]**.

A-Définition

Le ciment utilisé (MATINE) est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO2) à caractère acide. On trouve également l'aluminium (Al2O3) et le fer (Fe2O3). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 °C et 1500°C.

En présence d'eau à lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés. MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442 **[15]**, EN 197-1 **[16]** et à la norme NF P 15-301 **[17]**.

B-Domaine d'utilisation

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais, ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton, qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les applications dans lesquelles le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

C- Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, ports, aéroports…etc) ;
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement…etc) ;
- Secteur industriel ;

D-Analyse et caractérisation du ciment

Le **tableau III.1** résume l'analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment (Annexes).

Tableau III.1 : l'Analyse chimique du ciment et composition du clincker.

Analyse chimique du ciment	Perte au feu (%) (NA 5042)	7.00-9.50
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0.01-0.03
Composition hypothétique du clincker	Silicates tricalciques C3S (%)	58.00-64.00
	Aluminates tricalciques C3A (%)	6.00-8.00

E- Essais physiques

- **La finesse**

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme [NF P 15-476] **[18]**.

- **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] **[19]**.

- **La masse volumique**

Tableau III.2 : Les masses volumiques du ciment utilisé.

Caractéristiques	**Le ciment**	**La norme**
Masse volumique apparente (g/cm^3)	0,96	NF EN 459-2 **[101]**
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,91	NF EN 196-6 **[102]**

- **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 15-473] **[20]**. Le tableau II.2 résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Tableau III.3 : Essai physiques sur ciment

Essais	Norme
Consistance normale de la pate de ciment (%)	25.50-28.00
Retrait à 28 jours (mm/m)	< 1000
Expansion (mm)	0.50 – 2.50
Début de prise (min)	120 – 180
Fin de prise (min)	210-280

- **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] **[21]** sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm3 à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier normalisé: 450g 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 III.4.

Tableau III.4 : 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



Figure III.1 : Le ciment utilisé

III.1.3 Le sable

Le sable utilisé est un sable mélange entre, le sable roulé et le sable concassé. Après avoir soumis les deux sables utilisés à des différents essais de caractérisation

a- Masses volumiques

Les masses volumiques apparentes et absolues des différents sables utilisés ont été déterminées selon la norme [NA 451] **[22]**.

- **Masse volumique apparente**

Cet essai consiste à remplir un récipient de volume 1L par le matériau, ensuite on mesure la masse de ce dernier, ce qui nous donne ρ_{app}= M / 1 (kg/m^3)



Figure III.2 : Le cône et le récipient

- **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 l'équation suivante, on calcul la masse volumique absolue **[23]**:

ρ_{abs}= M / V2-V1 (kg/ m3)

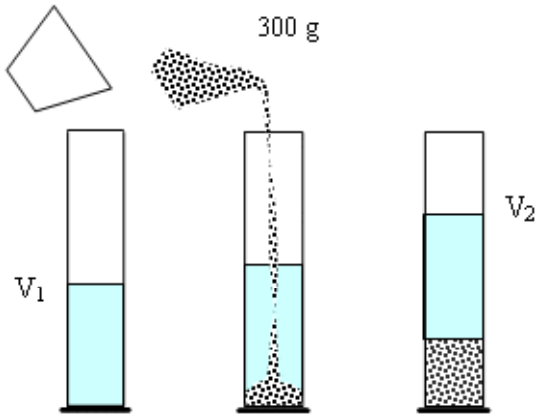


Figure III.3 : Les éprouvettes de mesure,

Les résultats trouvés sont résumés dans les deux tableaux **III.5 et III.6** .

Tableau III.5 : Les masses volumiques des différents sables utilisés

Sable	**Roulé**	**Concassé**
Masse volumique apparente (kg/m3)	1410	1412
Masse volumique absolue (kg/m3)	2501	2520

À partir de l'essai de calcul de la masse volumique absolue, on peut tirer les indices suivants: (porosité, compacité, indice des vides).

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} \; ; \; P = 1\text{-}C \; ; \; I = P / C$$

Le **Tableau III.6** regroupe la compacité, la porosité et l'indice des vides des différents sables utilisés.

Tableau III.6 : Compacité, porosité et indice des vides des différents sables utilisés

Sable	**roulé**	**concassé**
Compacité (%)	56.37	56.03
Porosité (%)	43.63	43.97
Indice des vides	0.774	0.784

III.1.3.1 Equivalent de sable

Selon la norme [NF P 18-598] **[24]**, la procédure de mesure de l'équivalent de sable est comme suit **[25]**:

- 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 lavante, et on laisse à reposer 10 minutes.

- On bouche les éprouvettes et on les agite d'une manière automatique à l'aide d'une machine agitatrice pendant 30 secondes ;

-On lave et on remplit les éprouvettes par la solution lavante jusqu'au trait supérieur, et les laisse à reposer 20 minutes en évitant toute vibration ;

-On lit les hauteurs h1 et h2 puis à l'aide d'un piston on mesure h2**'**.

ES =100. (h2**'** / h1)

ESV =100. (h2/ h1)



Figure III.4 : Procédure de mesure de l'équivalent de sable

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.7: L'équivalent de sable des différents sables utilisés

Sable	ESV	ES	Observation
Roulé	77.50	65.52	Sable légèrement argileux : à ne pas utiliser seul
Concassé	94.29	89.91	Sable très propre : bonne utilisation

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

III.1.3.2 Granulométrie

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme [NA 2607] **[26]** où le sable passant à travers une série de maille décroissante (figure III.5) dont on pèse le refus de chaque tamis **[25]**.





Figure III.5 : Séries de tamis

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

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

A partir du module de finesse de chaque type de sable, on fait la correction du sable ayant le module de finesse le plus bas.

Afin de tracer la courbe granulométrique des sables, les sables utilisés sont soumis au tamisage et les résultats trouvés sont récapitulés dans les tableaux suivants

A- Le sable roulé

Le sable roulé utilisé dans cette étude est provenu de Hassi Bahbah de la région de Djelfa **[27]**, située à 300 Km au sud d'Alger, sa classe granulaire est 0/0,315, c'est un sable fin (figure III.6) et est utilisé pour corriger le sable de concassage utilisé.

Afin d'obtenir les caractéristiques de sable normalisé.

Tableau III.8 : L'analyse granulométrique du sable roulé

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisat (%)
5	2	2	0,14	99.86
4	1	3	0.21	99.79
3.15	1	4	0.28	99.72
2	1	5	0.35	99.65
1,25	4	9	0.64	99.36
0.63	55	64	4.57	95.43
0.315	667	731	52.21	47.79
0.2	539	1270	90.71	9.29
0.16	97	1367	97.64	2.36
0.1	29	1396	99.71	0.29
0.063	3	1399	99.92	0.08
Fond	1	1400	100	0

Le coefficient d'uniformité : Cu =1.66

Le coefficient de courbure : Cc =1.06

Mf =1.55 → le sable est très fin et uniforme.

B- Le sable concassé

Pour le sable de concassage utilisé (figure III.6) de dimension 0/3, provenant de la station de concassage de MONT GORNO situé à 25 Km au sud de Médéa **[28]**.

Tableau III.9: L'analyse granulométrique du sable concassé

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisat (%)
5	2	2	0.2	99.8
4	46	48	4.8	95.2
3.15	133	181	18.1	81.9
2	246	427	42.7	57.3
1.25	187	614	61.4	38.6
0.63	173	787	78.7	21.3
0.315	109	896	89.6	10.4
0.2	42	938	93.8	6.2
0.16	17	955	95.5	4.5
0.1	25	980	98.0	2
0.063	16	996	99.6	0.4
Fond	3	999	99.9	0.1

Le coefficient d'uniformité : Cu =7.33

Le coefficient de courbure : Cc =1.22

Mf =3.19 → le sable est grossier et bien étalé.

A travers ces résultats trouvés, la courbe granulométrique des sables utilisés est illustrée dans la **Figure.III.6.**

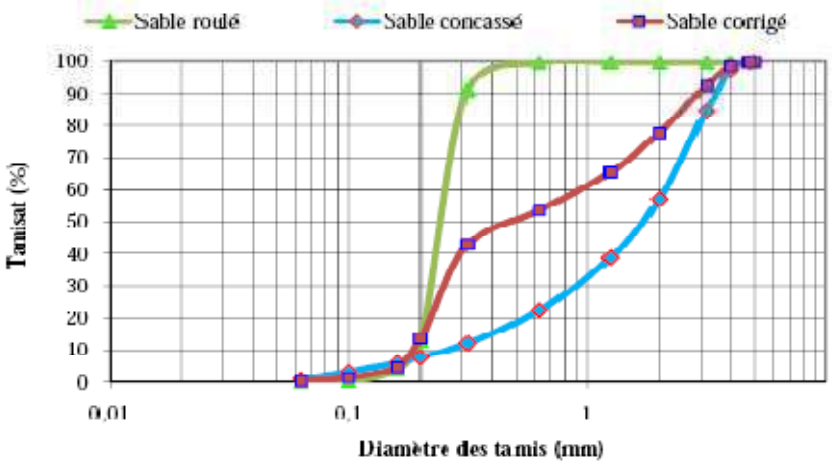


Figure.III.6 courbe granulométrique des sables utilisés

Le sable mélange sera composé alors des portions suivants :
Le pourcentage du sable concassé =64 %
Le pourcentage du sable roulé =36 %
Ou bien :
La masse du sable concassé = 864 g
La masse du sable de roulé = 486 g



Figure.III.7 - Le sable de concassage -Le sable roulé

III.1.4 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection de béton est une eau potable du robinet **[29]**, exempte d'impuretés, conforme à la norme [NFP 18-303] **[30]**.

III.1.5 La fibre

Les fibres utilisées sont issues de la récupération des emballages d'œufs produits par la société nationale de production de cellulose et des papiers (CELPAP) de Baba Ali, mélangées avec les fibres de papiers récupéré.
Leur préparation nécessite un traitement physico-chimique décrit en figure III. 8. La pate est composée principalement de bois résineux (40%), d'alfa (35%) et de bois feuillus (25%). La masse volumique des fibres utilisées est estimée à 1490 $kg.m^{-3}$ d'après Bentchikou (2000), et Bentchikou et al (2001).

La **Figure.III.8** Représente le schéma illustratif des différentes phases de traitement des matières cellulosiques récupérées.

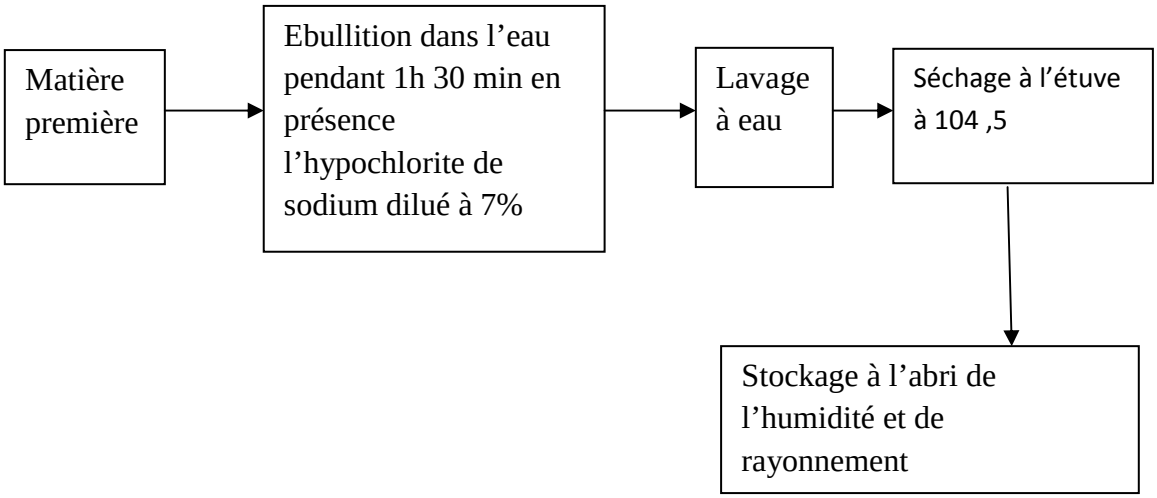


Figure.III.8 le schéma illustratif des différentes phases de traitement des matières cellulosiques récupérées

III.6.1. La cendre

La cendre est un second matériau non hydratant avec lequel, on substitue une quantité du ciment dans le but de réduire le coût de revient de mortier final. Cette cendre provient du complexe ANTIBIOTICAL (SAIDAL) de Médéa.

A –granulométrie

L'analyse granulométrique de la cendre d'incinération nous a donné la courbe illustrée sur la **Figure.III.9**

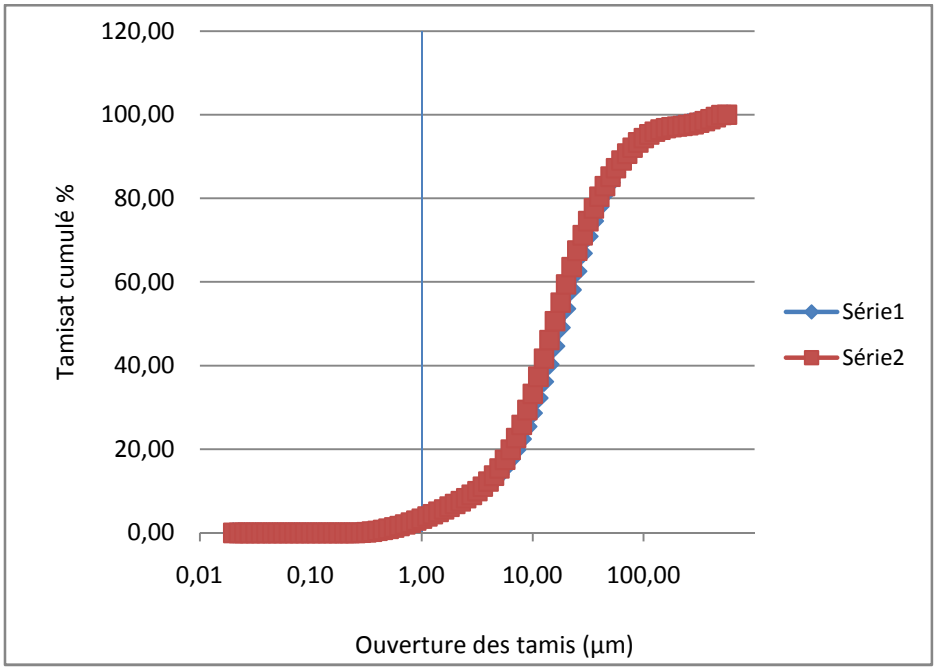


Figure.III.9 courbe granulométrique de la cendre

Une photo visuelle de la cendre utilisée pour cette étude est représentée sur la figure III.10



Figure.III.10 Poudre d'incinération

III.2 Tache expérimentale

III.2.1 Préparation des composites

La norme [EN 196-1] **[31]** décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Le mortier préparé, est remplit dans un moule (4 cm x 4 cm x 16 cm). Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux moitiés puis on le pose

sur une table vibrante où on applique 60 couts à chaque fois. Après avoir arasé toute la partie saillante, on recouvre le moule avec une plaque de verre et, on l'entrepose dans la salle.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau, jusqu'au moment de l'essai mécanique.

Au jour prévu, les éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes [ENV 197-1] **[32]** et [NFP 15-301] **[17]** définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 7 jours et 28 jours.

Mis à part le mortier témoin composé uniquement de ciment et de sable avec un rapport E/C = 0,58, l'étude est menée sur seize compositions avec ajout de 10%, 15%, et 20% de fibres par rapport à la masse du ciment et, en substituant cette dernière par différents dosages de cendre d'incinération en même temps que l'ajout des fibres avec dosage de (50, 100, 150 gr). Les tableaux suivants regroupent les constituants correspondants à 1 m^3 de matériaux pour différentes teneurs en fibres et aux différents dosages de la poudre.

La quantité d'eau nécessaire pour les seize compositions est calculée en tenant compte de ce que les fibres et la poudre absorbent jusqu'à saturation : définie comme la quantité d'eau maximale qui peut être absorbée par les fibres, la quantité d'eau retenue par contact à la surface des fibres et celle retenue par capillarité due à l'enchevêtrement des fibres.

L'expérience montre qu'à la saturation, les fibres retiennent 6 fois leurs masses en eau, ce qui explique l'augmentation de E/C chaque fois que la concentration en fibres augmente. L'évolution de E/C en fonction de cette dernière est linéaire :

E/C = 0,0858 F + 0,4765, ou F et la concentration massique en fibres, avec un coefficient de corrélation R^2=0,99. Ainsi le rapport E/C augmente proportionnellement en augmentant la masse de la poudre d'incinération avec une valeur de 0,2 pour chaque dosage de 50 gr de cette dernière.

En partant d'une composition de mortier témoin normalisé, c'est-à-dire, préparé d'après la norme NF P 15-403, à chaque fois qu'on incorpore les fibres et la poudre d'incinération dans la matrice, la demande en eau augmente, ce qui entraine, pour un volume constant du matériau une diminution du ciment et du sable.

III.2.2. Mode opératoire de malaxage des mortiers

La procédure de malaxage pour les deux types de mortier (sans et avec fibres) est représentée dans les **Tableaux III.10 et III.11**.

Tableau III.10 Opérations de malaxage du mortier sans fibre.

Opérations	Durée	Etat du malaxeur
Introduction de l'eau		Arrêt
Introduction du liant (Poudre après ciment)		
Malaxage	30 sec	Vitesse lente
Introduction du sable	30 sec	
Malaxage	30 sec	Vitesse rapide
Raclage de la cuve	15 sec	Arrêt
Repos	1 min 15 sec	
Malaxage	60 sec	Vitesse rapide

Tableau III.11 Opérations de malaxage du mortier avec fibre

Opérations	Durée	Etat du malaxeur
Introduction de l'eau		Arrêt
Introduction de fibres		
Malaxage	10 à 15 min	Vitesse lente
Introduction du liant (Poudre après ciment)		Arrêt
Malaxage	30 sec	Vitesse lente
Introduction du sable	30 sec	
Malaxage	30 sec	Vitesse rapide
Raclage de la cuve	15 sec	Arrêt
Repos	1 min 15 sec	
Malaxage	60 sec	Vitesse rapide

III.2.3. Equipement nécessaire

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme [EN 196-1] **[31]** et est illustré.

- Une salle maintenue à une température de 20 °C ± 2 °C et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 % ;
- Un bac d'eau pour la conservation des éprouvettes maintenue à une température

de 22 °C ± 2 °C et à une humidité relative supérieure à 90 % ;

- Une étuve maintenue à une température de 115 °C et à une humidité relative inférieure

à 18.5 % ;

- 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 ;
- Tamiseuse électrique ;
- Les tamis de différentes mailles en inox ;
- Cône de sable, pour la mesure de la masse volumique apparente du sable ;
- Eprouvettes et béchers en verre et en plastique graduées ;
- Spatules flexibles en acier inox ;
- Pinceaux ;



Figure. III.11 La balance



Figure. III.12 L'étuve



Figure. III. 13 Le moule



Figure. III .14 Vibreur électrique



Figure. III.15 Le malaxeur électrique

III.2.4. Signification des différents mortiers utilisés :

0R, 1R, 2R, 3R : Mortiers avec différentes masses de cendre et sans ajout de fibres.

0F10, 1F10, 2F10, 3F10 : Mortiers avec différentes masses de cendre et avec 10% de fibres.

0F15, 1F15, 2F15, 3F15 : Mortiers avec différentes masses de cendre et avec 15% de fibres.

0F20, 1F20, 2F20, 3F20 : Mortiers avec différentes masses de cendre et avec 20% de fibres.

IV .1. Caractérisation des matériaux

IV.1.1 .Essais sur les matériaux frais

IV.1.1.1 .Maniabilité

Selon les normes L.C.P.C [NF P 18-452] **[33]** et [NF P 15-437] **[34]** Le but de cet essai est de quantifier l'ouvrabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps, du mortier avant prise, et classer les mortiers suivant une échelle de fluidité croissante (ferme, plastique, très plastique et fluide) **[25]**. Dans cet essai la consistance est caractérisé par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide. L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre à mortier (figure IV.1) et comporte :

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



Figure IV.1 : Maniabilimètre à mortier

Le principe de fonctionnement du maniabilimètre à mortier est illustré dans la figure IV.2 et se résume comme suite :

- Huiler légèrement les parois internes de la cuve.
- Remplir le mortier.
- Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place en deux couches.
- Chaque couche piquée de 15 coups au moyen de la tige de piquage

- Araser la dernière couche.

- La cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre en même temps que la cloison est retirée.

- Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule.

- Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier.

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

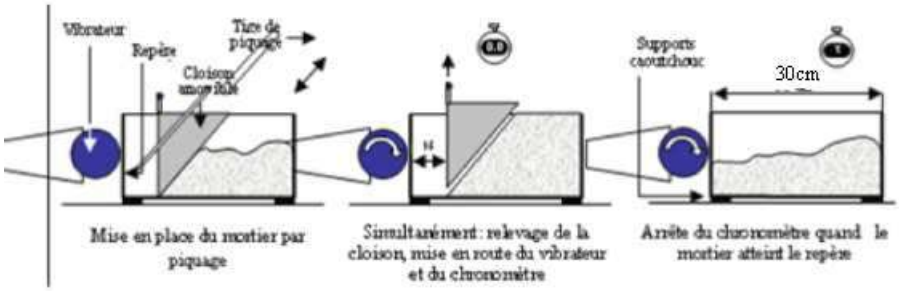


Figure IV.2: Principe de fonctionnement du maniabilimètre à mortier



Figure IV.3 : Etat du mortier avant et après mesure du temps d'écoulement

IV.1.1.2 Masse volumique du mortier à l'état frais

Le **Tableau. IV.1** regroupe les différentes masses volumiques des mortiers étudiés avec ou sans fibres en fonction de la teneur en cendre.

Tableau IV.1 Masse volumique en fonction de la teneur en cendre.

Mortiers	teneur en cendre (%)	masse volumique ($kg.m^{-3}$)
0R	0	2394,53
1R	12,5	2356,79
2R	28,57	2317,74
3R	50	2285,1
0F10	0	1907,92
1F10	12,5	1862,04
2F10	28,57	1858,09
3F10	50	1854,11
0F15	0	1860,95
1F15	12,5	1848,92
2F15	28,57	1817,275
3F15	50	1782,72
0F20	0	1769,61
1F20	12,5	1705,68
2F20	28,57	1692,68
3F20	50	1679,62

Ces résultats peuvent être groupés en un seul graphique tel que reproduit sur la figure IV. 4

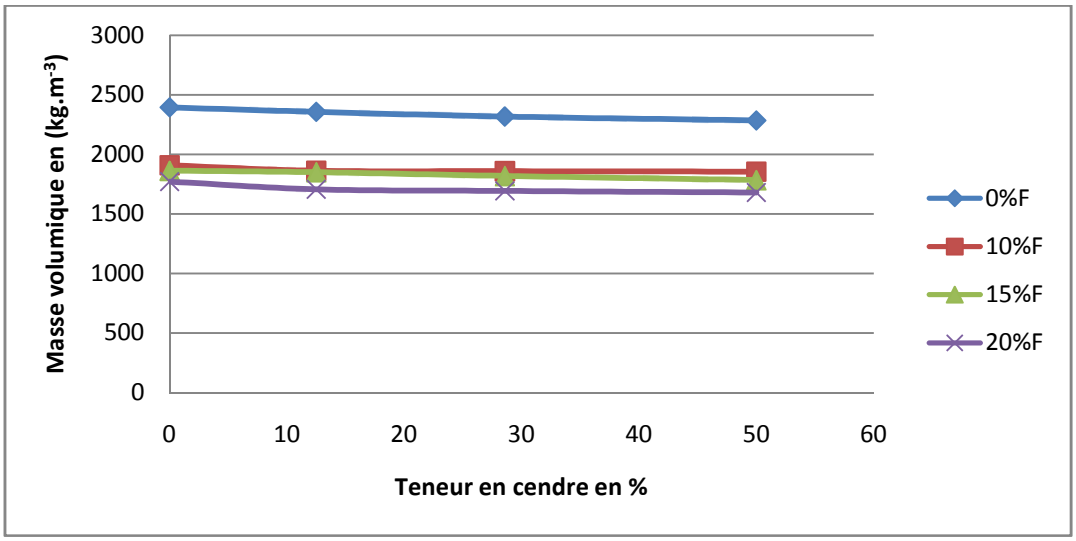


Figure IV. 4 La masse volumique en fonction de la teneur en cendre

IV.1.1.3. La quantité des constituants des matériaux de base dans 1m^3

Le **Tableau IV.2** regroupe toutes les masses des constituants des mortiers sans fibres en présence de la cendre d'incinération**.**

Tableau IV.2 : Constituant du composite sans fibre et avec cendre pour 1 mètre cube de volume (à l'état frais).

	0R	1R	2R	3R
Cendre (kg)	0	56.92	111.48	163.8
E/C (adopté)	0.58	0.6	0.62	0.65
Ciment (kg)	521.82	455.42	390.2	327.6
Sable (kg)	1567.7	1537.03	1505	1474.28
Eau (kg)	305.01	307.42	311.06	319.42

Le **Tableau IV.3** regroupe toutes les masses des constituants des mortiers avec 10% de fibres en présence de la cendre d'incinération.

Tableau IV.3 Constituant du composite avec cendre et 10% de fibre pour 1 mètre cube de volume à l'état frais.

	0F10	1F10	2F10	3F10
Cendre (kg)	0	39.06	73.77	108.48
E/C (adopté)	1.2	1.22	1.24	1.27
Ciment (kg)	370	311.75	272.17	232.59
Sable (kg)	1112.92	1052.17	1049.44	1046.7
Eau (kg)	387,89	427.89	435.5	443.09
Fibre (kg)	37.11	31.17	27.21	23.25

Le **Tableau IV.4** regroupe toutes les masses des constituants des mortiers avec 15% de fibres en présence de la cendre d'incinération

Tableau IV.4 Constituant du composite avec cendre et 15% de fibre pour 1 mètre cube de volume à l'état frais.

	0F15	1F15	2F15	3F15
Cendre (kg)	0	34.67	67.86	101.78
E/C (adopté)	1.77	1.79	1.81	1.84
Ciment (kg)	296.92	277.46	237.51	203.56
Sable (kg)	993.93	936.43	916.01	885.05
Eau (kg)	525.56	558.74	560.27	561.8
Fibre (kg)	44.54	41.62	35.625	30.53

Le **Tableau IV.5** regroupe toutes les masses des constituants des mortiers avec 20% de fibres en présence de la cendre d'incinération.

Tableau IV.5 Constituant du composite avec cendre et 20% de fibre pour 1 mètre cube de volume à l'état frais.

	0F20	1F20	2F20	3F20
Cendre (kg)	0	29.71	58.99	87.7
E/C (adopté)	2.18	2.2	2.22	2.25
Ciment (kg)	261.22	237.72	206.5	175.41
Sable (kg)	886,69	802.34	796.49	789.4
Eau (kg)	569.47	588.38	589.4	592.04
Fibre (kg)	52.23	47.53	41.30	35.07

IV.1.2. Essais sur les matériaux durcis

IV.1.2.1. Essais mécaniques :

A - Essai de traction par flexion :

Selon la norme [EN 196-1] **[31]** c'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) (Figure IV.4), une éprouvette prismatique de côté a=4cm et de longueur L=16 cm **[25]**. Dans notre étude, cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à 7, 28 et plus tard à 90 jours.

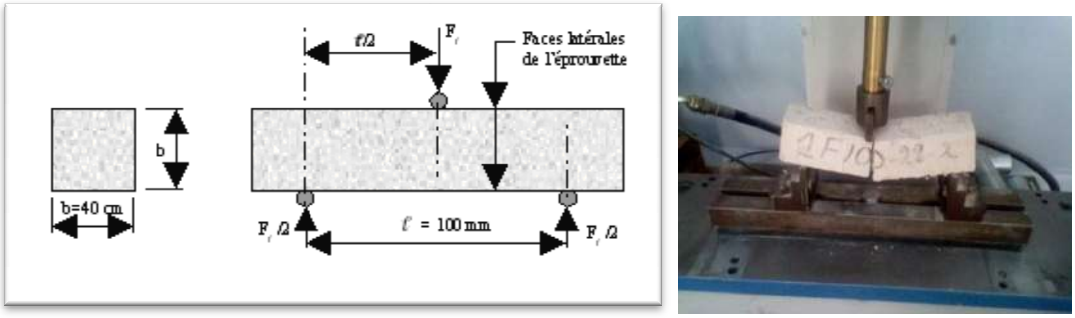


Figure IV.5 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction

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

$$\sigma_t = \frac{M}{I} v$$

M : moment de flexion :

$$M = \frac{F_t L}{2}$$

I : moment d'inertie de la section transversale :

$$I = \frac{a^4}{12}$$

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

B- Essai de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [EN 196-1] **[31]** par compression axiale pour demi prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à 3,7, 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN (Figure IV.5). La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai **[25]**.

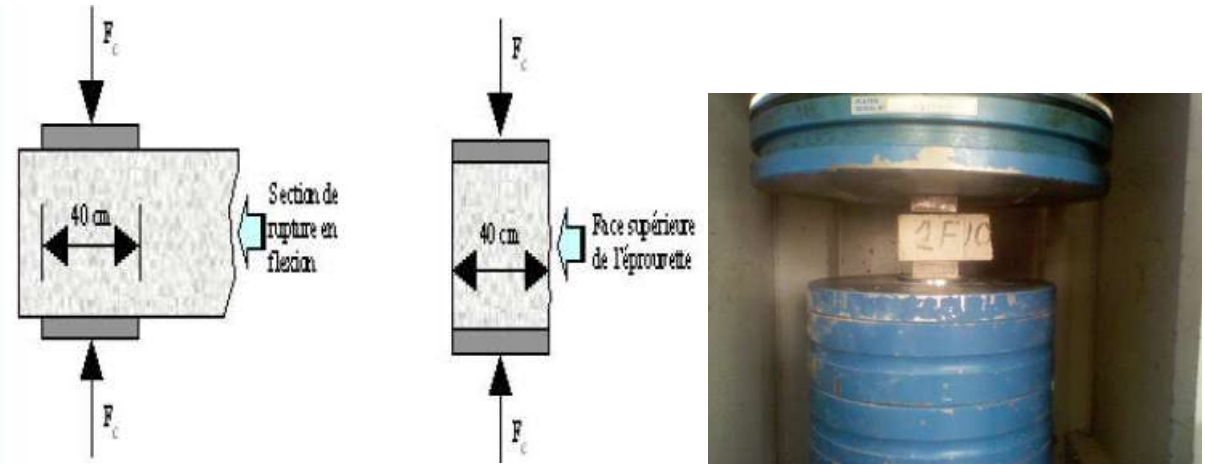


Figure IV.6. Dispositif de rupture à la compression

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la figure IV.3, la contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

C-Résistance d'un mortier normal à l'état durci :

Ce mortier est un mortier témoin, qui ne contient aucun ajout ni de fibre ni de poudre d'incinération sa composition est :

Le sable 1350 gr

Le ciment 450 gr

L'eau 261 gr

E/C = 0.58

Après les essais de rupture (résistance à la compression et à la traction par flexion) les résultats sont récapitulés dans le tableau.

Tableau IV.6 : Résistance à la compression et à la traction de mortier réalisé

Mortier	Rc (MPa)		Rt (MPa)	
	7j	28 j	7j	28 j
0R	33.46	38	2.54	4.37

IV .2. Interprétation

IV .2.1 Maniabilité (ouvrabilité) :

L'essai de l'ouvrabilité des différents mortiers avec différents pourcentages de la cendre par rapport à la masse du ciment (0R, 1R, 2R, 3R) est destiné à déterminer la quantité d'eau nécessaire qu'on ajoute au mortier pour qu'il garde la même maniabilité (9 ±1 S), cela est réalisé en faisant varier la teneur en cendre.

La figure. IV.7 présente l'évolution du rapport E/C en fonction de la teneur en cendre.

Tableau. IV.7 Mesures et contrôles de la maniabilité du mortier avec cendre et sans fibres.

Référence	Temps d'écoulement (s)	Rapport E/C	Cendre (%)
0R	9 ±1	0,58	0
1R	9 ±1	0,6	12,5
2R	9 ±1	0,62	28,57
3R	9 ±1	0,64	50
4R	9 ±1	0,66	80

Les résultats des mesures et des contrôles de l'ouvrabilité du mortier avec cendre et sans fibres sont tracés graphiquement sur la figure IV.6 :

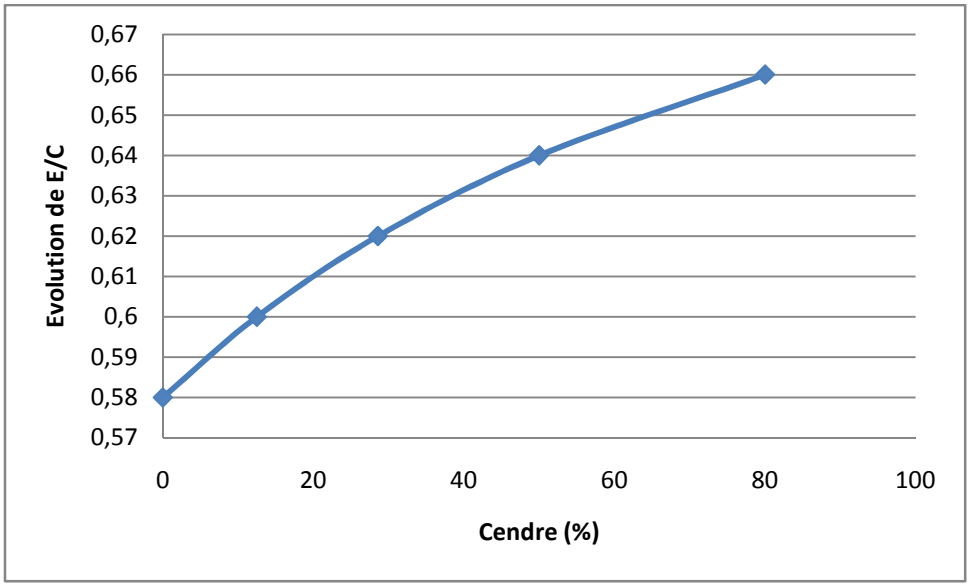


Figure.IV.7 Evolution de E/C en fonction de la teneur en cendre

D'après les résultats illustrés sur le graphe de la figure IV.7, on constate que le rapport E/C augmente avec l'augmentation de la teneur en cendre ce qui signifie que, la cendre est un matériau absorbant. Selon le graphe la quantité d'eau nécessaire pour que la maniabilité soit constante est pratiquement la même au delà de la première substitution du ciment par la cendre.

IV.2.2. Masse Volumique :

D'après la figure IV. 5, on constate que la densité du composite est inférieure à celle du mortier témoin et cela quelque soit la teneur en fibre et le dosage en cendre. Bien que l'ajout de plus en plus de cendre dans le matériau n'affecte pas significativement la densité du mortier avec cendre on constate comme même une légère diminution de cette dernière.

Il est à remarquer d'après le même graphique que l'allègement du matériau est du à l'ajout de fibres.

L'influence de l'incorporation des fibres et de la cendre sur la diminution des constituants (ciment, sable) est clairement montrée sur les valeurs données aux tableaux (IV. 2, IV. 3, IV. 4, IV. 5).

L'écart maximum est perceptible entre les compositions 0R et 3F20 comme on peut le voir sur le tableau suivant :

	0R	3F20
Cendre (kg)	0	87.7
E/C (adopté)	0.58	2.25
Ciment (kg)	521.82	175.41
Sable (kg)	1567.7	789.4
Eau (kg)	305.01	592.04
Fibres (kg)	0	35.07

IV.2.3. Absorption d'eau :

L'essai d'absorption d'eau est destiné à déterminer la quantité d'eau absorbée par chaque mortier sans et avec fibres en présence de la cendre en émergeant ce dernier dans

l'eau. Cet essai consiste à mesurer l'accroissement de la masse de l'éprouvette placée dans un récipient plein d'eau (la différence de masse) et cela dans un espace de temps de 2 heures, le temps que met le mortier pour se saturer.

Tableau IV.8. Absorption d'eau pour les mortiers avec/sans fibres et pour différents (%) de la cendre.

Mortiers	masse sèche	masse fraiche	(m2-m1) m1	(m2-m1) gr	% en cendre
0R	1200	1258	4,83333333	58	0
1R	1216	1292	6,25	76	12,5
2R	1130	1221	8,05309735	91	28,57
3R	1110	1205	8,55855856	95	50
4R	1154	1260	9,18544194	106	80
0F10	922	1063	15,2928416	141	0
1F10	931	1092	17,2932331	161	12,5
2F10	895	1042	18,1005587	162	28,57
3F10	911	1075	18,0021954	164	50
4F10	860	1040	20,9302326	180	80
0F15	813	988	21,5252153	175	0
1F15	776	979	24,2268041	188	12,5
2F15	776	973	25,3865979	197	28,57
3F15	752	971	27,2606383	205	50
4F15	774	986	27,6485788	214	80
0F20	730	941	28,9041096	211	0
1F20	694	911	31,2680115	217	12,5
2F20	704	883	31,25	220	28,57
3F20	700	924	32	224	50
4F20	701	924	31,8116976	223	80

La figure.IV.8 présente l'évolution du taux d'absorption d'eau du mortier sans fibres en fonction de la teneur en cendre et cela pour différentes teneur en cendre.

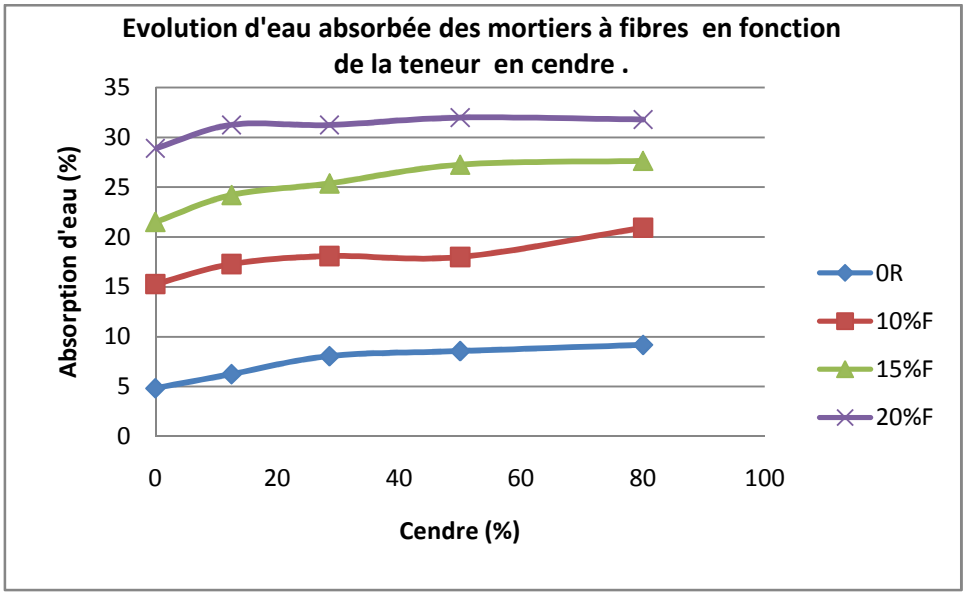


Figure .IV.8. Taux d'absorption d'eau en fonction de la teneur en cendre.

Le taux d'absorption d'eau augmente lorsqu'on augmente la teneur en cendre. Il peut s'expliquer par le fait que la cendre en tant que constituant secondaire est un matériau plus absorbant que le ciment. Aussi, pour les mortiers avec fibres, on constate que le taux d'absorption d'eau est très élevé si on le comparant par rapport aux mortiers sans fibres, cette élévation est pratiquement proportionnelle par rapport aux dosages en fibres. La porosité globale du matériau composite (fibre et cendre) étant plus élevée, la tendance à absorber l'eau est plus importante.

IV.2.4 Résistance en traction par flexion et en compression :

Les matériaux retenue pour cet essai sont les mêmes que ceux ayant servi à la mesure de taux d'absorption d'eau.

Nous allons donc nous intéresser à l'influence de l'incorporation des fibres et la substitution de ciment par la poudre d'incinération sur les propriétés mécanique des mortiers étudies, le tableau IV.9 regroupe les résultats des essais mécaniques (résistance en traction et en compression) effectués sur les différents mortiers à 7 jours et à 28 jours.

Tableau IV.9 Résistance à la traction et à la compression des mortiers avec cendre et ajout de fibres (0, 10, 15 et 20%) à 7 et 28 jours.

Mortier	Rc (MPa)		Rt (MPa)	
	7j	28 j	7j	28 j
0R	33.46	38	2.58	4.37
1R	24.11	27.91	2.54	3.8
2R	18.26	21.41	2, 33	3.44
3R	12.06	19.88	1.86	2.04
0F10	8.97	9.3	2.484	2.9
1F10	8.33	9.16	2.43	2.76
2F10	7.34	8.32	2.36	2.63
3F10	6	7.5	2.33	2.35
0F15	5.85	7.14	2.76	2.56
1F15	5 .125	7.07	2.47	2.37
2F15	4.56	6.66	2.29	2.26
3F15	4	6.37	2.27	2.16
0F20	5.2	6.54	2.77	3.15
1F20	4.2	5.9	2.70	3.03
2F20	3.8	5.9	2.56	2.37
3F20	3.02	5.8	2.2	2.3

Les figures IV.9 et IV.10 donnent la résistance de chaque éprouvette testée à la traction et à la compression après 7 jours passés depuis le jour de décoffrage.

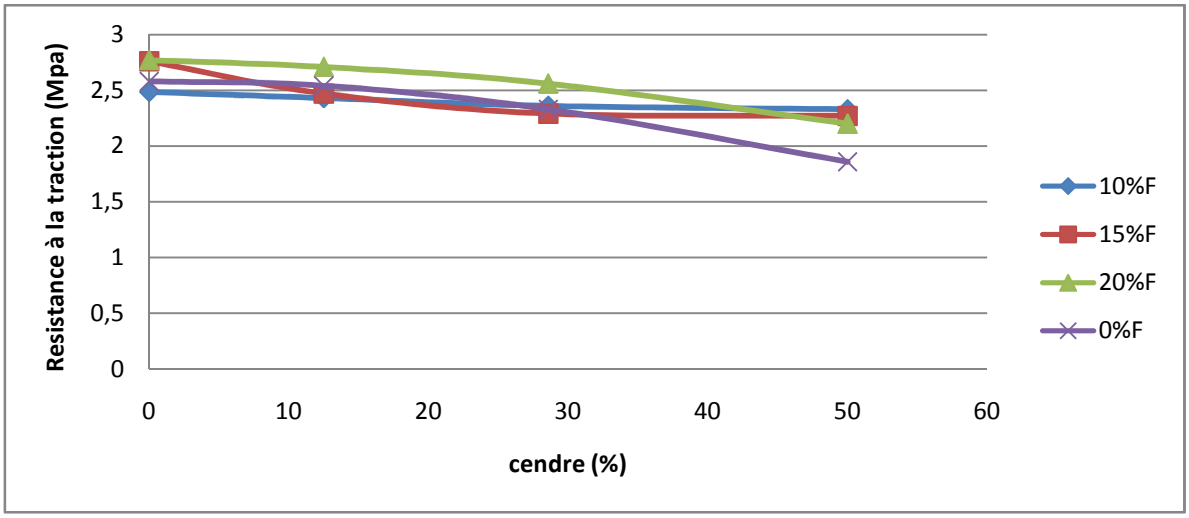


Figure.IV.9 Résistance à la traction par flexion des mortiers avec fibres et âgés de 7 jours

On constate que la résistance à la traction et à la compression du mortier sans fibres avec présence de la cendre diminue proportionnellement par rapport à la teneur en cendre, en raison probablement du caractère non réactif de la cendre, la résistance à la traction est environ la dixième de la résistance en compression.

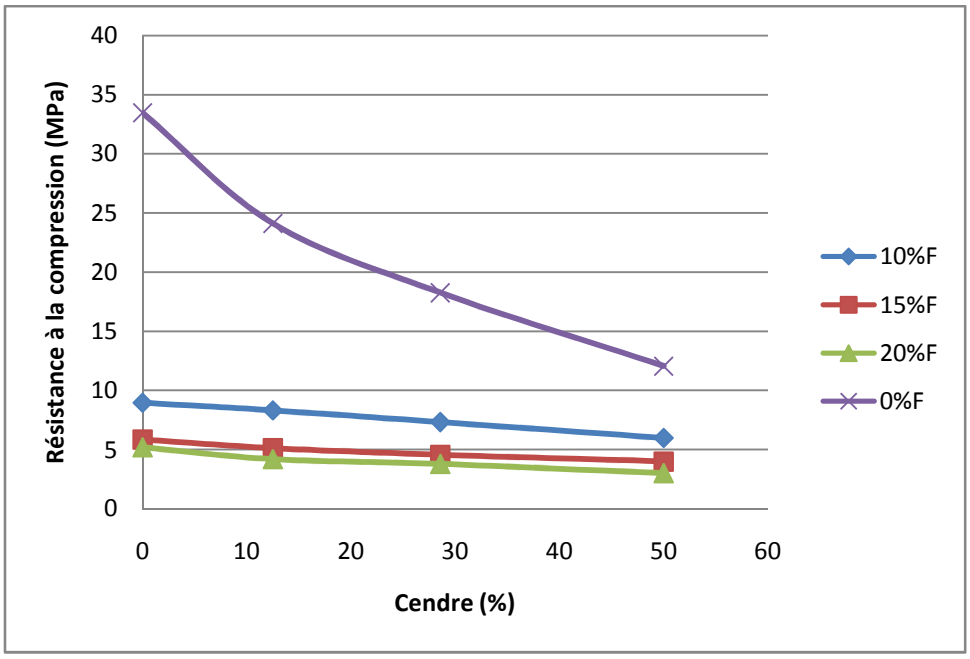


Figure.IV.10. Résistance à la compression des mortiers avec fibres et âgés de 7 jours

De même et d'après la figure .IV.10 donnant la résistance à la traction du mortier sans fibres à 28 jours, on constate que pour une teneur en cendre variant de 0 à 28.57%, la résistance à la traction baisse légèrement, ce qui laisse supposer une meilleure résistance à la traction pour ce

mortier, au delà de cette teneur, on remarque que la résistance à la traction baisse fortement, ce qui engendre une faible résistance au mortier. Par contre et d'après la figure V.6 on constate que dans l'intervalle 0 à 28.57 %, la résistance à la compression baisse fortement, mais reste pratiquement constante lorsque la teneur en cendre dépasse 28.57 %.

Les résultats des essais en compression et en traction des mortiers à base de fibres cellulosique en présence de la teneur en cendre sont interprétés ci-dessous ;

Les figures IV.8 et IV.11 montrent la variation de la résistance en traction en fonction du dosage en fibres respectivement pour les mortiers âgés de 7 et 28 jours.

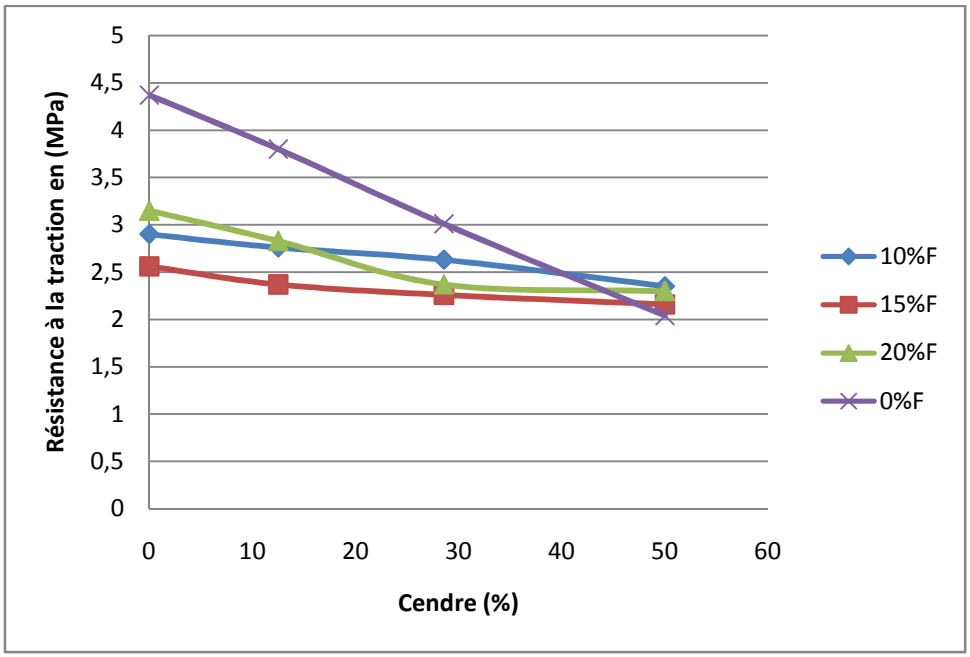


Figure. IV.11. Résistance à la traction des mortiers avec ajout de fibre à 28 jours

On constate d'après les deux figures que la résistance en traction baisse légèrement dans l'intervalle de 0 à 28.57% en cendre pour différents pourcentages de fibres, au delà de 28.57%, on remarque que la résistance en traction retrouve une certaine stabilité. On constate dans ce cas une légère amélioration de la résistance en compression. Cela peut s'expliquer par le rôle que jouent les fibres dans le renforcement des matériaux composites élaborés.

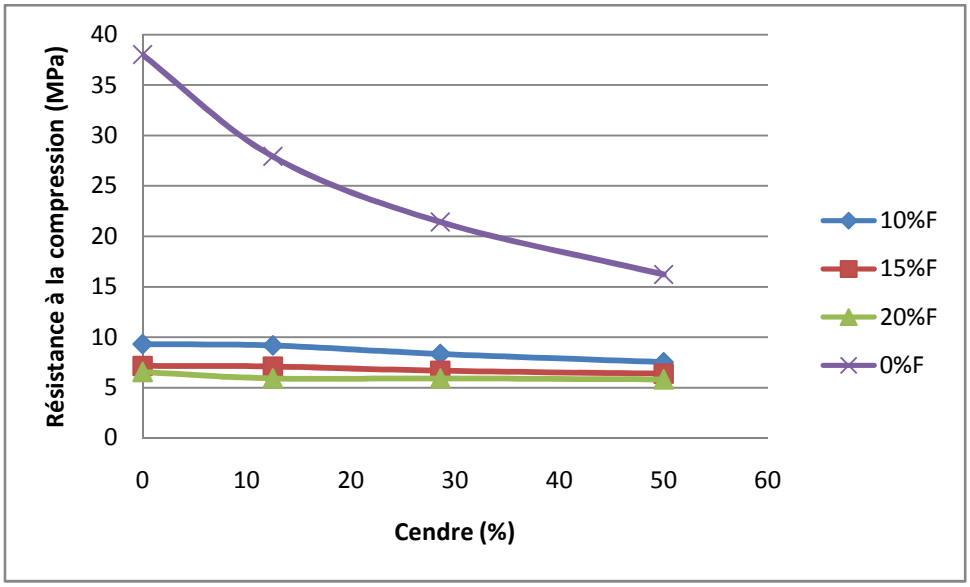


Figure. IV.12 Résistance à la compression des mortiers à fibres à 28 jours

Les figures IV.9 et IV.12 montrent l'évolution de la résistance en compression des composites à base des fibres et avec différents pourcentage en cendre respectivement à 7 et 28 jours.
On constate que la résistance en compression est très faible par rapport à un mortier sans fibres en raison probablement de la porosité élevée du mélange (cendre et fibre).

On constate aussi, sur le plan économique que le coût de revient du mortier composite est réduit, et cela dû à l'augmentation de la teneur en fibre qui engendre une baisse de consommation des quantités des constituants de bases tel-que le sable, le ciment.

Ce travail présente les résultats préliminaires d'une étude expérimentale du comportement mécanique d'un matériau composite à fibres cellulosiques avec des proportions de poudre d'incinération en substitution du ciment.

L'étude présentée dans ce travail vise à mettre en œuvre un nouveau matériau destiné à l'isolation thermique dans le domaine du bâtiment avec un coût de revient réduit par la substitution du ciment avec une poudre d'incinération récupérée des rejets du complexe ANTIBIOTICAL de Médéa.

La nécessité de connaitre les propriétés mécaniques de ce matériau étudié nous a conduit à effectuer des essais mécaniques sur les différentes éprouvettes étudiées à savoir sans fibres (0R, 1R, 2R, 3R) avec fibres (0F10, 0F15, 0F20) ou avec fibres et cendre (1F10, 2F10, 3F10, 1F15, 2F15, 3F15, 1F20, 2F20, 3F20).

L'incorporation aussi bien des fibres que de la cendre dans une matrice minérale (ciment + sable) a conduit à l'allégement du matériau qui est un point bénéfique sur le plan économique pour le transport de ce dernier.

Le mode de fabrication du matériau ne demande pas une grande énergie, ce qui est un autre point positif sur le plan économique.

Aussi et sur le même plan économique, l'incorporation des fibres et de la cendre contribue à diminuer la quantité des constituants rentrants dans la fabrication du mortier (ciment et sable), ce qui engendrait une diminution du prix de revient du composite d'où le gain économique qu'on peut avoir.

Bien que les propriétés mécaniques du composite avec cendres et fibres diminuent avec la teneur en ces derniers, les résistances restent dans normes d'utilisation de ces matériaux en construction.

Le composite contribue au développement durable par le fait que sa mise en œuvre limite l'utilisation du ciment, contribue à la récupération des déchets et donc participe à la diminution de l'émission des gaz à effet de serre.

Référence bibliographique

[1] J. M. Christine Delisée, Jérôme Lux, and L. C. Patrick Castéra, Laurent Chrusciel, "Microstructure et propriétés de transport de matériaux isolants à base de fibres cellulosiques," 25eme rencontres de l'AUGC,Bordeaux, 2007.

[2] K. Abdelouahed, "Caractérisation des Fibres de Palmier Dattier Et Propriétés des Bétons et Mortiers Renforcés par ces Fibres en Climat Chaud et Sec," Thèse de doctorat, Université de Boumerdes, 2005, pp. 154.

[3] C. V. Rachid Tarik Bouhraoua, Mohamed Anouar Khelil, and S. Bouchaour, "Situation sanitaire de quelques subéraies de l'Ouest algérien : impact des xylophages," Integrated Protection in Oak Forests IOBC/wprs Bull, vol. 25, pp. 85- 92, 2002.

[4] HALADA (**K**) Progress of ecomaterials toward a sustainable society. Current Opinion in Solid State and Materials Science,7 (3), p. 209-216 (2003)

[5] www.theses.ulaval.ca (Pavithran et al, 1987 ; Mukhersee et Satyanarayana, 1986)

[6] A. KMOHANTY, MISRA (M) et HINRICHSEN (G) Biofibres, Biodégradable Polymers and biocomposites: an overview.Macromolecular Materialsand Engineering,276/277,p 1-24 (2000)

[7] BLEDZKI (AK) et GASSAN (J) Composites reinforced with cellulose based fibers. Progress in polymer Science, 24 p 221-274 (1999)

[8] MOHANTY (A.K), MISRA (M) et HINRICHSEN (G) Biofibres, Biodégradable polymers and biocomposites: an overview.Macromolecular Material sand Engineering, 276/277,p 1-24 (2000)

[9] http://www.basaltex.com

[10] www.madagascar-nosybe.com

[11] BROUWER, W.D. « Natural Fibre Composites in Structural Components: Alternative Applications for Sisal

[12] Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, Christophe BALEY , 2004, REF AM5 130 , Techniques de l'ingénieur

[13] Carma, glossaire des matériaux composites de fibres d'origine renouvelable, actualisation décembre 2006.

[14] Fiche technique : « Ciment MATINE CEM II/A 42.5 », Alger 2009.

[15] NA 442, Normes Algérienne : « Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », 1994, 2000.
[16] EN 197-1, Normes Européenne : « Ciments courants »,1994.
[17] NF P 15-301, « Liants hydrauliques – définitions, classification et spécification des ciments », Juin 1994.
[18] NF P 15-476, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments-Détermination de la finesse », Aout 1990.
[19] NF P 15-431, Normes AFNOR : « Liants hydrauliques – technique des essais-détermination du temps de prise sur mortier normal », Février 1994.
[20] NF P 15-473, Normes AFNOR : « Méthodes d'essai des ciments-partie 3 : détermination du temps du prise et de la stabilité », Aout 1995.
[21] NF P 15-471, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments -Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques », Aout 1995.
[22] NA 451, Normes Algérienne : « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée », 1989.
[23] Dr. CHERAIT Yacine, Mr NAFA Zahredine : « Eléments de matériaux de construction et essais », Direction de la publication universitaire de Guelma ,2007.
[24] NF P 18-598, Normes AFNOR : « Granulat- Equivalent de sable », Octobre 1991.
[25] R. DUPAIN. et all, « Granulats, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » ,2eme édition CASTEILLA, Paris ,2000.
[26] NA 2607, Normes Algérienne : « Granulats - Analyse granulométrique par tamisage », 1990.
[27] Kheir-Eddine OULD ROUIS, Zakaria OUDJOUADJ, Thèse d'ingéniorat : « Influence de la combinaison du sable de dunes avec le sable de concassage sur les performances du mortier », Université de Médéa, Juin 2010.
[28] (C.N.E.R.I.B) Centre national d'étude et de recherche intégrés du bâtiment « Les sables de concassage », Alger ,2005.
[29] GEORGES DREUX, JEAN FESTA « Nouveau guide du béton et ses constituants, 8eme édition, Eyrolles ,1998.
[30] NFP 18-303, Normes AFNOR : « Eau de gâchage pour béton », Aout 1990.
[31] CEN EN 196-1, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments – partie 1 : détermination des résistances mécaniques (indice de classement P15- 471) », Aout 1995.

[32] ENV 197-1, Normes Européenne : « Ciments courants »,1994.

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

[65] NBN NE 13057, Normes Belge, « 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.