



UNIVERSITE.

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE



Polytechnique première partenaire
de professionnel

DEPARTEMENT SCIENCE DES MATERIAUX ET METALLURGIE

Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du
Diplôme d'étude approfondie en science des matériaux

**INFLUENCES DES FIBRES CELLULOSIQUES
EXTRAITES DU BAMBOU
SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON**

Présenté par :

RAHARISOA Soloarilala Claudia

PROMOTION : 2010

Date de Soutenance : 17 Décembre 2012



UNIVERSITE.

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
000



Polytechnique première partenaire
de professionnel

DEPARTEMENT SCIENCE DES MATERIAUX ET METALLURGIE

Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du
Diplôme d'étude approfondie en science des matériaux

INFLUENCES DES FIBRES CELLULOSIQUES

EXTRAITES DU BAMBOU

SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON

MEMBRES DU JURY :

PRESIDENT : Professeur **ANDRIANARY Philippe** (Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique) ;

EXAMINATEURS :

- Docteur **RANARIVELO Michel** (Chef de Département Science des Matériaux et Métallurgie) ;
- Docteur **RANDRIANA Richard** (Chef de Département Génie Chimique) ;
- Docteur **RAKOTOSAONA Rijalalaina** (Directeur du Partenariat de l'Université d'Antananarivo).

RAPPORTEUR : Professeur **RANAIVONIARIVO Gabriely**.

« Fa ny fahasoavan'ANDRIAMANITRA no nahatoy izao ahy,ary tsy foana ny fahasoavany ato amiko »

I Korintiana 15: 10

Remerciements

D'abord, je voudrais remercier Professeur ANDRIANARY Philippe, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Un grand merci à monsieur à Monsieur RANARIVELO Michel, Docteur et Chef de département de Science des Matériaux et Métallurgie de m'avoir fait le plaisir de participer à mon jury de mémoire.

Toute ma gratitude aux examinateurs, Monsieur RANDRIANA Richard, Docteur et Chef de département Génie Chimique, et Monsieur RAKOTOSAONA Rijalalaina, Docteur et Directeur du Partenariat de l'Université d'Antananarivo qui m'ont fait le plaisir de participer à mon jury de mémoire et l'honneur de s'intéresser à ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Professeur RANAIVONIARIVO Gabriely qui, en tant que rapporteur de mémoire, a permis l'aboutissement heureux de ce travail. Je le remercie pour sa confiance, et pour son aide scientifique et qui par son expérience et sa compétence, et bien évidemment pour ses connaissances qu'il a su me transmettre, et dont j'en suis sûre me sera bénéfique dans les années futures, et surtout pour la profonde gentillesse et les discussions.

J'exprime mes sincères remerciements à Madame BAOFIZA et Monsieur RABETAFIKA Heriniaina pour l'utilisation des matériaux et leurs aides. Ce travail n'aurait pas pu se faire sans l'aide de toutes les personnes qui ont pris de leur temps pour analyser mes échantillons. Je remercie donc tous les responsables du laboratoire à Ankatso et Vontovorona.

Je n'oublie pas évidemment de remercier mes amis qui m'ont toujours suivi avec intérêt et m'ont apporté leur aide.

Enfin, un immense merci également à ma petite fille « chérie » qui m'a supporté, dans les deux sens du terme, tout au long de ce travail. Dans les moments difficiles comme dans les autres, elle a rendu tout ça faisable.

Sommaire

Remerciements

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des photos

Abréviation et symbole

Liste des annexes

INTRODUCTION GENERALE

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 01 : LE BAMBOU

- I- Introduction
- II- Classification
- III- Les espèces du bambou de Madagascar
- IV- Composition chimique du bambou
- V- Structure et morphologique du bambou
- VI- Utilisation et distribution

Chapitre 02 : LES FIBRES DU BAMBOU

- I- Introduction
- II- Présentation des fibres naturelles
- III- Composition chimique
- IV- Propriétés des fibres
- V- Type des fibres cellulosiques
- VI- Utilisation des fibres cellulosiques
- VII- Fibres de bambou

Chapitre 03 : LES CIMENTS

- I- Quelques définitions du ciment
- II- Constituants du ciment
- III- Les différents types de ciment
- IV- Propriétés et caractéristiques du ciment
- V- Fabrication du ciment
- VI- Hydratation du ciment Portland (CPA)
- VII- Domaine d'utilisation

Chapitre 04 : LES SABLES

- I- Généralités
- II- Analyse granulométrie
- III- Module de finesse

Chapitre 05 : LE BETON

- I- Quelques définitions sur le béton
- II- Formulation du béton

Chapitre 06 : LE BETON RENFORCE DE FIBRES

- I- Introduction
- II- Définition de béton de fibres
- III- Comportement mécanique des bétons de fibres
- IV- Microstructure de béton de fibres
- V- Durabilité des bétons de fibres
- VI- Conclusion

DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION

Introduction

Chapitre 07 : MATERIAUX ET MODE D'ESSAIS

- I- Introduction
- II- Matières premières
- III- Matériels utilisés
- IV- Conduite des essais

Chapitre 08: METHODE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

- I- Introduction
- II- Préparation des fibres
- III- Composition des mortiers
- IV- Essais mécaniques

Conclusion et recommandation

Bibliographie

ANNEXES

Table des matières

Liste des tableaux

Tableau 01 : Degré de polymérisation de celluloses de différentes origines..	7
Tableau 02 : Distribution mondiale du bambou.....	18
Tableau 03 : Composition des fibres naturelles.....	21
Tableau 04 : Principales propriétés physiques des fibres cellulosiques de différentes natures.....	24
Tableau 05 : Classe de résistance suivant la norme.....	31
Tableau 06 : Spécification et valeurs garanties.....	32
Tableau 07 : Désignation et symbole des ciments.....	33
Tableau 08 : Spécification chimique des ciments.....	35
Tableau 09 : Densité des ciments.....	36
Tableau 10 : Vitesse de prise des ciments.....	36
Tableau 11 : Retrait de ciments.....	36
Tableau 12 : Domaine d'utilisation des ciments courants de la norme NF EN 197-1.....	46
Tableau 13 : Classification du sol en fonction de la taille de constituants.....	53
Tableau 14 : Dosage en ciment.....	60
Tableau 15 : Classe de consistance (Slump test)	61
Tableau 16 : Classe de consistance vété.....	62
Tableau 17 : Spécification de la norme ACI 31889 concernant les bétons exposés à des cycles de gel-dégel.....	62
Tableau 18 : Différentes valeurs de A.....	66
Tableau 19 : Pourcentage des composants chimiques essentiels du ciment..	78
Tableau 20 : Composition minéralogique du ciment.....	78
Tableau 21 : Les principales propriétés physiques et mécaniques du ciment..	79-80
Tableau 22 : Propriété du sable norme NFP 18-541.....	83
Tableau 23 : Résultats d'équivalent de sable. Norme NFP 18-541.....	84
Tableau 24 : Résultats de l'analyse granulométrique.....	85
Tableau 25 : Résultats d'analyse granulométrique sommaire.....	87
Tableau 26 : Composition chimique de l'eau en mg/l.....	87
Tableau 27 : Composition chimique de fibres de bambou.....	88
Tableau 28 : Analyse minéralogique de fibre de bambou.....	89
Tableau 29 : Dimension géométrique de la fibre de bambou.....	89
Tableau 30 : Propriétés physiques de fibre de bambou.....	90
Tableau 31 : Masse des résidus du bambou obtenue en fonction du pourcentage d'acide et du temps.....	96
Tableau 32 : Perte en poids du bambou en fonction du pourcentage d'acide et du temps.....	97
Tableau 33 : Masse du résidu obtenu en fonction du pourcentage de soude et du temps.....	101
Tableau 34 : Teneur en fibres sèches dans la matière première.....	103
Tableau 35 : Teneur en eau dans la pâte.....	104

Tableau 36 : Teneur des fibres cellulosiques dans la pâte.....	104
Tableau 37 : Principales bandes infrarouges observées dans les polysaccharides.....	105
Tableau 38 : Composition pour deux éprouvettes.....	111
Tableau 39 : Résultats des essais de la porosité (fibre + sable).....	115
Tableau 40 : Résultats des essais de la porosité (fibre + sable + ciment).....	116
Tableau 41 : Résistance à la traction par flexion.....	116
Tableau 42 : Résistance à la compression.....	118
Tableau 43 : Résistance à la compression, en MPa, sous l'eau et l'air.....	119
Tableau 44 : Densité apparente des bétons de fibre.....	122
Tableau 45 : Avantage et inconvénients des fibres végétales dans les matériaux composites.....	ii
Tableau 46 : Normes suivies pour l'analyse chimique.....	ii
Tableau 47 : Propriétés physiques des fibres naturelles.....	iii
Tableau 48 : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales.....	iii

Liste des figures

Figure 01 : Constituants des végétaux.....	05
Figure 02 (I) : Structure de la chaîne de cellulose (R=H) et ses dérivées (R≠H).....	06
Figure 02 (II) : Molécule de la cellulose.....	06
Figure 03 : Structure de la micro fibrille de cellulose.....	08
Figure 04 : Structure d'un type de xyloglucane.....	11
Figure 05 : Représentation schématique de la lignine.....	12
Figure 06 : Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique et formation d'un coude par la présence de rhamnose.....	13
Figure 07 : Les longues chaînes de cellulose reliées entre elles en paquets microfibrilles.....	14
Figure 08 : Microstructure de la fibre de bambou.....	15
Figure 09 : Classification des fibres naturelles.....	20
Figure 10 : Structure du bois.....	22
Figure 11 : Schéma de la fabrication du ciment par voie sèche.....	38
Figure 12 : Four rotatif horizontal.....	41
Figure 13 : Four vertical.....	42
Figure 14 : Représentation schématique de l'hydratation du ciment.....	45
Figure 15 : Courbe granulométrie.....	48
Figure 16 : Diagramme triangulaire pour la classification des sols.....	53
Figure 17 : Traction directe.....	57
Figure 18 : Relation entre C/E et la résistance à la compression R_c d'après la formule de BOLOMEY.....	59
Figure 19 : Courbe contrainte déformation de quelques fibres végétales.....	68
Figure 20 : Résistance à la compression de quelques fibres végétales en fonction de la durée.....	69
Figure 21 : Le diagramme flèche- effort des BF en traction par flexion.....	70
Figure 22 : Fissuration dans le béton sans et avec fibres.....	71
Figure 23 : Comportement de charge-déformation de béton avec fibre et béton sans fibres.....	72
Figure 24 : Sables siliceux de l'est de Madagascar.....	81
Figure 25 : Essai d'équivalent de sable visuel.....	83
Figure 26 : Courbe granulométrie du sable.....	85
Figure 27 : Les trois étapes de l'hydrolyse acide des hémicelluloses.....	94
Figure 28 : Courbe de variation de la masse des résidus du bambou en fonction du pourcentage d'acide.....	97
Figure 29 : Courbe de variation de la perte en poids du bambou en fonction du pourcentage d'acide et du temps.....	98
Figure 30 : Courbe de variation de la masse du résidu obtenu en fonction du pourcentage de soude et du temps.....	101
Figure 31 : Schéma des matériels nécessaires à la cuisson.....	102
Figure 32 : Spectre IR des fibres de bambou non traitées et traitées à la soude pendant 1, 2, 3 jours.....	106
Figure 33 : Spectre IR des fibres de bambou traitées avec la soude pendant	

4 et 7 jours.....	107
Figure 34 : Fibres non traitées (A) et traitées avec la soude (B) observées en microscope électronique à balayage.....	108
Figure 35 : Influence du pourcentage des fibres sur la résistance à la traction par flexion à 28 jours.....	117
Figure 36 : Influence du pourcentage des fibres sur la résistance à la compression à 28 jours.....	119
Figure 37 : Résistance à la compression sous l'eau et sous l'air.....	120
Figure 38 : Corrélation entre porosité et résistance à la compression.....	121
Figure 39 : Influence de la densité de fibres sur la masse volumique du béton.....	122
Figure 40 : Essai de résistance à la compression norme SIA 162.....	iv
Figure 41 : Essai de résistance à la traction par flexion norme SIA 162.....	iv

Liste des photos

Photo 01 : Rhizome de bambou.....	16
Photo 02 : Bambou.....	17
Photo 03 : Machine multifonctionnelle du type TESWELL.....	91
Photo 04 : Photographie des morceaux de bambou.....	92
Photo 05 : La balance de précision utilisée.....	113

Abréviations et symboles

M : Masse molaire ;
DP : Degré de polymérisation ;
HM : Haut degré de méthylation ;
LM : Faible degré de méthylation ;
MFC : micro fibrilles cristallines ;
PP : Polypropylène ;
CPA : Ciment Portland ;
CPJ : Ciment Portland composé
CHF : Ciment de haut fourneau ;
CPZ : ciment pouzzolanique ;
CLC : Ciment du laitier et au cendres ;
CH : Portlandite ;
CSH : Hydrates silico-calciques
TSA : TrisulfoAluûminate ;
MSA : MonoSulfoAluminate ;
EU : Union Européenne ;
d : Diamètre minimum ;
D : Diamètre maximum ;
MF ou mf : module de finesse ;
 μ : Moment ;
CC : Cas courant ;
AS : Autocontrôle surveillé ;
LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées ;
P : Pourcentage de grains passant à la passoire ;
Y : ordonnée d'un point de brisure pour distinguer les grains fins ;
BF : Béton fibré ;
 ρ_a : Masse volumique apparente ;
 ρ_{ab} : Masse volumique absolue ;
Mt : Masse totale d'échantillon ;
Vt : volume total d'échantillon ;
Va : Volume absolu ;
Es ou E.S : Equivalent de sable ;
Esv : Equivalent de sable visuel ;
Esp : Equivalent de sable au piston ;
 γ_s : Masse volumique absolue ;
Rc : Somme des pourcentages des refus cumulés ;
PF : Perte au feu
IR : Infrarouge ;
Mh : Poids humide ;
 μ : Poids immergé dans l'eau ;
 α : Densité apparente ;
 π_o : Porosité ouverte ;
 π_t : Porosité totale ;
Rc : Résistance à la compression ;
Rf : Résistance à la flexion ;
m : Masse de l'échantillon de granulats ;

V : Volume du récipient ;
C : Compacité ;
Ma : Masse de l'échantillon imbibé ;
Ms : Masse de l'échantillon après étuvage ;
AB : Capacité des granulats à absorber de l'eau ;
fcbt : Résistance à la traction par flexion.

Liste des annexes

Annexe 1

Avantages et inconvénients des fibres végétales dans les matériaux composites

Annexe 2

Normes suivies pour l'analyse chimique

Annexe 3

Propriétés physiques des fibres naturelles

Annexe 4

Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales ;

Annexe 5

Essai de résistance à la compression du béton de fibres ;

Annexe 6

Essai de résistance à la traction par flexion du béton de fibre.

INTRODUCTION GENERALE :

Composé principalement d'un mélange de granulats et d'une pâte de ciment, de nos jours le béton est devenu le matériau par excellence dans le domaine du génie civil. De part son caractère fiable et économique, son utilisation est très vaste et très variée (environ 4 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans dans le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, notamment de bâtiments administratifs, d'immeuble d'habitation, de ponts, de centrales thermiques et nucléaire et de plates-formes offshore).

Ce matériau composite et hétérogène, qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats, d'eau (ces constituants sont dosés de manière à obtenir, après durcissement, un produit solide dont les propriétés peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles), a été et reste sujet à de multiples travaux d'étude et de recherche. Même si l'avancée est jugée considérable, les études d'adaptation et de formulation s'avèrent nécessaire en chaque région du globe.

L'objectif de ce travail est de mettre à la disposition des utilisateurs des bétons courants, un ensemble de modèle mathématiques simple à caractère prédictif des propriétés essentielles du béton sous la forme d'un procédé de formulation propre à la région. Donc un béton essentiellement composé des matériaux les plus utilisés localement à savoir :

- Sable du sud-est de Madagascar ;
- Ciment ;
- Fibre cellulosique ;

Enfin, ce mémoire comporte outre l'introduction deux grandes parties ;

PARTIE I : Etude bibliographique,

PARTIE II : Présentation de l'expérimentation.

PREMIERE PARTIE :
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 01: LE BAMBOU

I- INTRODUCTION :

Le bambou est une herbe dont le nom scientifique est *Gramineae* (*Poaceae*). Il fait partie de la sous-famille des *Bambusoideae* et de la branche des *Bambuseae* [1].

Il existe plus de 1200 espèces de bambou distribuées à travers le monde, mais principalement en Asie et en Amérique du Sud. Et Madagascar possède 35 espèces de bambou endémiques. Madagascar bambou s'intéresse plus particulièrement aux espèces *Volobemayo* et *Dendrocalamus asper* appartenant aux bambous géants, ces deux espèces possèdent la meilleure fibre, une croissance rapide et ne sont pas envahissantes. Le bambou est une plante qui repousse toute seule sans intervention humaine et peut atteindre une taille adulte en 100 jours. Les tiges de bambou peuvent être coupées à partir de la 4^{ème} et 7^{ème} année, alors que pour un bois tendre traditionnel il faut attendre normalement 10 voir 20 ans. Le bambou poussant très vite il stocke beaucoup de CO₂ près de 40 tonnes par an et par hectare [2].

II- CLASSIFICATION :

Règne : Plantae
Division : Magnoliophyta
Classe : Liliopsida
Sous-classe : Commelinidae
Ordre : Cyperales
Famille : Poaceae

III- LES ESPECES DU BAMBOU DE MADAGASCAR [2]:

- *Arundinaria ambositrensis*
- *Arundinaria humbertii*
- *Arundinaria ibityensis*
- *Arundinaria madagascariensis*

- *Arundinaria marojejensis*
- *Arundinaria perrieri*
- *Cathariostachis capitata*
- *Cathariostachys madagascariensis*
- *Decaryochloa diadelpha*
- *Hickelia madagascariensis*
- *Perrierbambus*
- *Sirochloa parvifolia*
- *Valiha diffusa*

IV- COMPOSITION CHIMIQUE DU BAMBOU :

L'étude des interactions entre les fibres de bambou et les composites nécessite de connaître la structure et la composition chimique des fibres.

La composition chimique du bambou est similaire à celle du bois. Les principaux constituants des tiges de bambou sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, qui représentent plus de 90% de la masse totale. Une étude de la composition chimique de bambous âgés d'un, deux et trois ans indique que la teneur en holocellulose ne varie pas beaucoup avec l'âge du bambou [3].

Le bambou contient d'autres composants organiques, en plus de la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Il contient environ 2 à 6% d'amidon, 2% de saccharide désoxydé, 2 à 4% de matières grasses, et 0,8 à 6% de protéines. Le bambou contient également des composants mineurs comme des résines, des cires, des tanins et des sels inorganiques [4]. Le bambou est connu pour être sensible aux attaques de champignons et d'insectes mais la résistance du bambou à la moisissure, aux champignons et aux insectes est fortement associée à sa composition chimique [3].

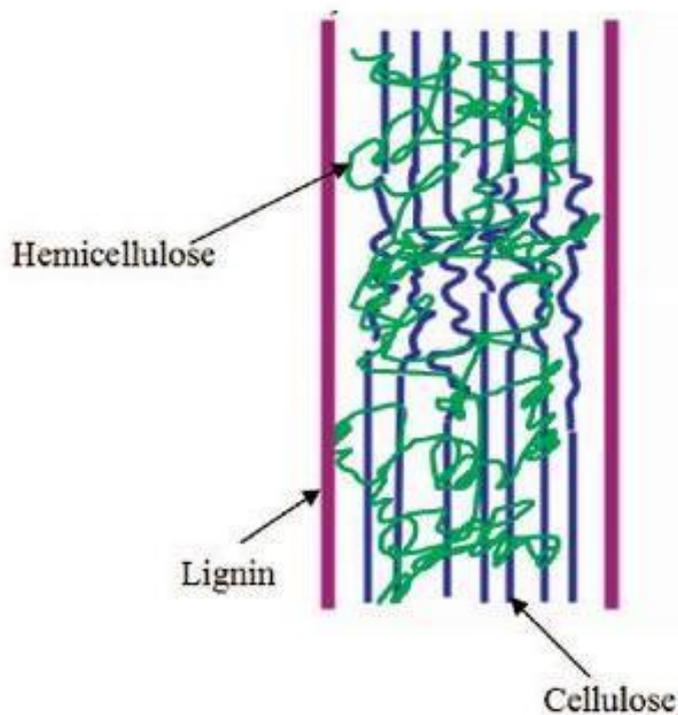


Figure 01 : Constituants des végétaux.

A- La cellulose :

1- Source :

La cellulose est un polymère d'origine naturel le plus abondant et aussi le plus intéressant technologiquement. Les fibres cellulosiques proviennent habituellement du bois, soit des feuillus, soit des résineux (conifères) [5 ;6]. La source de cellulose la plus utilisée actuellement est encore le bois avec environ 86% du total de la pâte produite. A peu près 52% de la pâte totale correspondant à la pâte de conifère et 35% à la pâte de feuillus [7 ; 8].

2- Structure :

a) Structure moléculaire :

La cellulose est un homopolymère dont les molécules, formées de longues chaînes, sont constituées de D-anhydroglucopyranoses liés par des liaisons β -(1,4)-glycosidiques en position C1 et C4 (Figure 02 : I et II).

La masse molaire de la chaîne de cellulose varie beaucoup ($50000 < M < 2,5 \times 10^6$ g/mol) en fonction du lignocellulosique d'origine [9]. Etant donné que la cellulose est un homopolymère linéaire, la grandeur de la chaîne moléculaire est habituellement caractérisée par le degré de polymérisation (DP), il est d'environ 10 000 et varie selon l'espèce végétale. Celui-ci exprime le nombre de monomère présents dans la chaîne de cellulose. Actuellement, on ne connaît pas la distribution en masse du polymère dans l'état naturel. Pour mesurer ses propriétés il faut solubiliser la cellulose dans un solvant approprié et ce procédé modifie plus ou moins sa structure une autre solution est de préparer un dérivé soluble sans modifier la masse molaire du produit natif, ce qui apparaît exclu [8]. A ce jour, la cuppriéthylènediamine semble le meilleur solvant pour déterminer le DP de la cellulose [Norme AFNOR NF G 06-037 (1981)] [10]. Dans le tableau 01 on montre quelques exemples de celluloses caractérisées par leur DP.

Chaque unité de répétition comporte trois groupes hydroxyyles. Ces groupes hydroxyyles et leur capacité à réaliser des liaisons hydrogène jouent un rôle majeur pour la cristallinité [11 ; 12 ; 13-14].

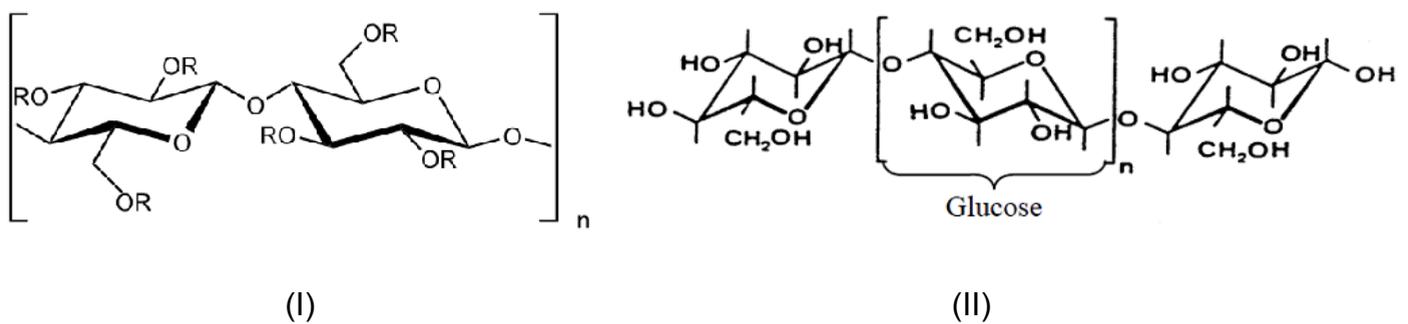


Figure 02 : (I) Structure de la chaîne de cellulose (R=H) et ses dérivés (R≠H)
(II) Molécule de la cellulose.

Tableau 01 : Degré de polymérisation de celluloses de différentes origines.

<i>TYPE DE CELLULOSE</i>	<i>DP</i>
Coton natif	Jusqu'a 12000
Coton purifié	300-1500
Linters coton	6500
Lin	8000
Ramie	6500
α -Cellulose isolée à partir de bois	800-1100
Pâte à dissoudre	600-1200
Pâte d'épicea	3300
Pâte de hêtre	3050
Pâte de tremble	2500
Cellulose bactérienne	2700
Filaments et fibres de cellulose régénérée	250-500
Poudres de cellulose (préparés par hydrolyse partielle et désintégration mécanique)	100-200

b) Structure supramoléculaire

A cause de la présence de groupes hydroxyle(-OH) nombreux, la chaîne de cellulose a une grande tendance à former des ponts hydrogène intramoléculaires et intermoléculaires. Ce type de liaisons est responsable de la formation de structures supramoléculaires. Les structures de base stabilisées par ponts hydrogène sont les microfibrilles, de dimensions assez variables selon la source d'origine [15], visibles par microscopie électronique, à partir desquelles se forment des agrégats nommés fibrilles et à partir desquelles se forment les fibres, observables au microscope optique [16].

Cette structure supramoléculaire des matériaux initiaux avec les différentes liaisons intra et intermoléculaires en plus du degré de cristallinité (qui contrôle la diffusion des réactifs) vont déterminer l'accessibilité des réactifs et aussi la réactivité des différents OH. Il n'y a qu'en passant par une complète déstructuration de la cellulose par dissolution et rupture de tous les ponts hydrogène qu'on peut obtenir une modification chimique homogène, c'est-à-dire régulière le long des chaînes de glucanes.

Les chaînes de cellulose sont rassemblées en structures basiques appelées micro fibrilles (Figure 03) qui ont des diamètres de 2 à 20 nm. Chaque micro fibrille peut être considérée comme des chaînes de cristaux de cellulose liés par des domaines amorphes [17].

Contrairement aux autres composants des fibres qui possèdent une structure amorphe, la cellulose possède en effet une structure en grande partie cristalline. La cellulose cristalline est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé, soit environ 136 GPa à comparer aux 75 GPa de la fibre de verre [12].

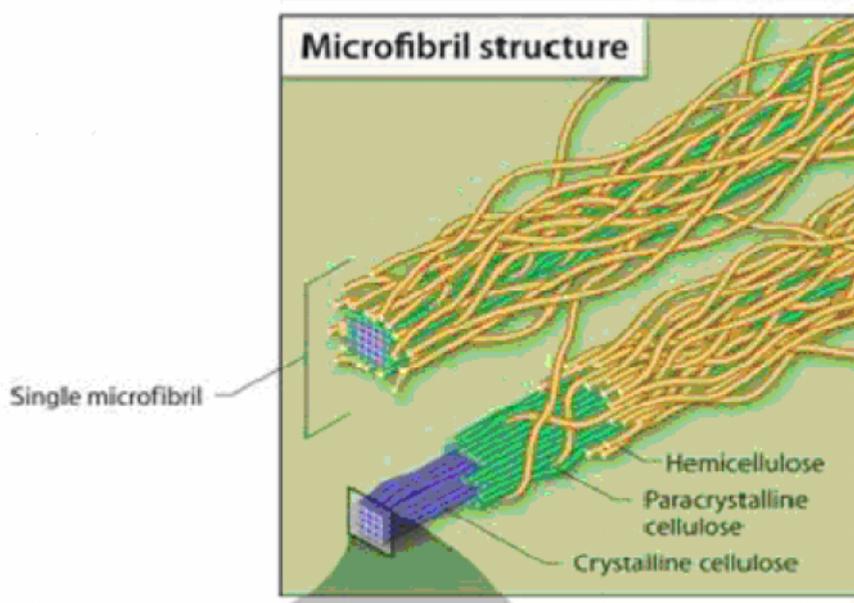


Figure 03 : Structure de la micro fibrille de cellulose [17].

La cellulose n'est pas hydrosoluble mais est fortement hydrophile, propriété qui est à l'origine, pour les fibres exploitées, de leur grand confort en tant que fibres textiles. Dans les conditions normales d'utilisation, elle peut contenir jusqu'à 70% d'eau plus ou moins liée. Le remplacement d'une partie des interactions inter-chaînes par des liaisons hydrogènes entre la cellulose et l'eau provoque une plastification du matériau et donc une diminution de ses caractéristiques mécaniques.

La cellulose est résistante aux alcalins forts, mais est facilement hydrolysée par les acides.

3- Propriétés :

Les propriétés de la cellulose utilisée pour les différentes applications varient beaucoup en fonction de la source et du traitement d'obtention selon le procédé de préparation (type de pâtes), ou du traitement ultérieur (par exemple si on veut obtenir de la cellulose régénérée). En conséquence, les propriétés comme la cristallinité ou la porosité, qui influencent l'accessibilité et la réactivité de ces matériaux, varient en fonction de l'origine et du traitement de la cellulose [18 ; 19].

B- L'hémicellulose :

1. Source et structure :

L'hémicellulose n'est pas une forme de cellulose. Elle comprend un groupe de polysaccharides composés d'une combinaison de cycles à 5 et 6 carbones (un exemple est représenté Figure 04) et qui se trouvent dans les lignocellulosiques à côté de la cellulose et des pectines. Les hémicellulose, à la différence de la cellulose sont composés de différents sucres qui forment des chaînes courtes avec ramifications (DP environ 150). Les sucres présents peuvent se diviser en différents groupes : les pentoses (xylose, arabinose) (conduisant à l'expression « pentosanes » pour les polymères constitutifs contenant des pentoses), hexoses (glucose, mannose, galactose), acides hexouroniques (acide glucuronique et méthylglucuronique) et les L-désoxyhexoses (rhamnose et fucose) [6,5]. L'hémicellulose forme la matrice de support des microfibrilles de cellulose [20].

L'hémicellulose a, de plus, une structure chimique très différente selon l'origine végétale type cellulaire, la localisation dans la paroi ou bien encore l'âge des tissus. Parmi les hémicelluloses les plus fréquentes de la paroi des cellules du bois se trouvent les familles des xylanes, des mannanes et des galactanes. La classe d'hémicellulose la mieux étudiée correspond aux xyloglucanes (Figure 04). Ils sont constitués d'une chaîne de glucose et de courtes chaînes latérales de xylose, galactose et fucose [21]. La chaîne principale d'une hémicellulose peut être constituée d'une seule unité (homopolymère) comme par exemple les glucomannanes.

La teneur en hémicelluloses, tant par la qualité que par la variété est très différente selon l'espèce, qu'il s'agisse de bois ou d'un autre matériau lignocellulosique. Dans le cas du bois on peut montrer la présence majoritaire de mannose et de galactose dans les confères tandis que la xylose et les groupes acétyle sont plus abondantes les feuilles [6 ; 5]. Dans d'autres lignocellulosiques, le principal monosaccharide dans la fraction hémicellulosique est la xylose tandis que les autres sucres sont très minotaires.

2. Propriétés :

D'une façon générale les hémicelluloses ont des propriétés d'épaississant, émulsifiant, gélifiant, adhésif et adsorbant. Les études réalisées avec différents types d'hémicelluloses en provenance des rafles de maïs, sorgho, de bambou, kénaf ou coques de tournesol montrent le comportement rhéologique épaississant [22;10]. En solution aqueuse les hémicelluloses sont rhéofluidifiantes, viscoélastiques, thixotropes et leur viscosité peut rester élevée pour des pH extrêmes [10]. Dans le cas du sorgho, du kénaf et de la rafle de maïs, les hémicelluloses conduisent à l'obtention de films souples possédant de bonnes propriétés mécaniques (résistance à la rupture de 15 à 40 MPa) [23]. Globalement ces polymères possèdent en solution une faible viscosité sous contrainte et une forte viscosité au repos à concentration élevée (g/L), ces caractéristiques étant celles recherchées pour les épaississants commerciaux d'origine naturelle tels que la gomme xanthane et la gomme caroube [24].

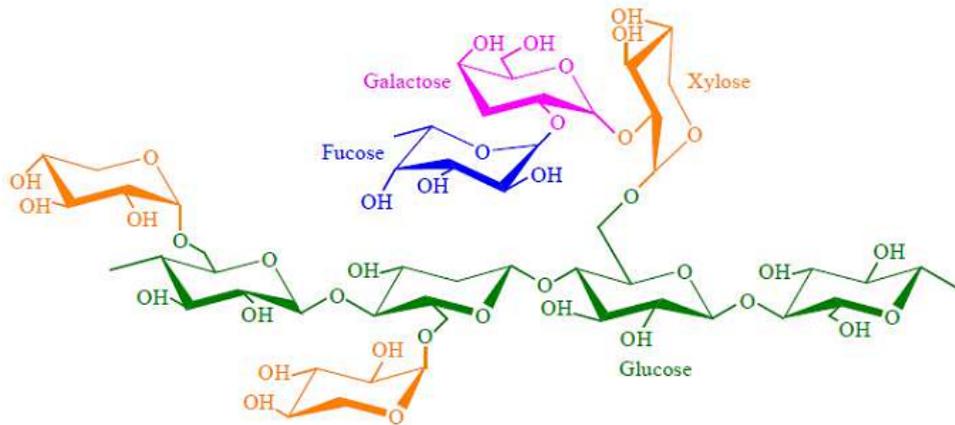


Figure 04 : Structure d'un type de xyloglucane [21].

C- La lignine :

1. Structure :

La lignine est une macromolécule extrêmement hétérogène composée de polymères aromatiques et varie en fonction des différentes espèces végétales. C'est pour cette raison qu'il est extrêmement difficile de préciser extrêmement difficile de préciser totalement une structure donnée et qu'on propose donc plutôt des structures schématiques [22].

Elle représente, après les polysaccharides, le polymère naturel le plus abondant sur terre. Elle participe à la rigidité structurale des parois cellulaires et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes. La lignine est une molécule à trois dimensions composée d'unités de phényle propane (Figure 05). Les unités primaires (monolignols) constituant la lignine sont l'alcool coniférylique, l'alcool sinapylique et l'alcool *p*-coumarylique. Au cours du processus de lignification, des phénoloxydases végétales telles que les laccases interviennent et permettent la polymérisation des différentes unités élémentaires. Une fois synthétisée, la lignine s'associe avec les différents polysaccharides pour former une matrice constitutive de la paroi végétale [14].

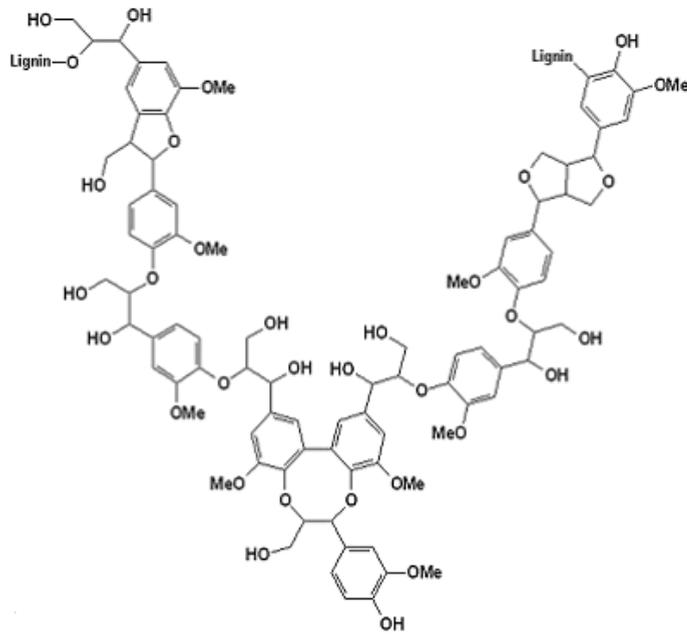


Figure 05 : Représentation schématique de la lignine [14].

2. Propriétés :

La lignine est totalement amorphe et hydrophobe. Elle n'est pas hydrolysée par les acides, mais soluble à chaud dans la soude, facilement oxydée et facilement condensable avec du phénol [24 ; 13].

D- Les pectines :

1. Structure :

La pectine est un polysaccharide hétérogène. Les constituants majeurs des pectines sont des séquences de 1 → 4 α-D-acide galactopyranosyluronique avec quelques groupements carboxyliques estérifiés avec du méthanol. La proportion d'unités d'acide galacturonique qui sont méthylées détermine les propriétés fonctionnelles de la pectine. (Figure 06) [21]

Régulièrement, des molécules de rhamnose s'intercalent entre ces monomères par des liaisons 1-2 et 1-4. Certaines de ces unités rhamnose portent des chaînes latérales composées d'oses neutres parmi lesquels le galactose et l'arabinose sont les plus abondants. Ce type de liaison entre les molécules d'acide uronique et de rhamnose forme des coudes (Figure 06) [21].

2. Propriétés :

La macromolécule de pectine ressemble à un zig-zag. Cet agencement lui confère des propriétés particulières. Elle procure une certaine flexibilité aux plantes [20]. Les pectines sont solubles ou insolubles dans l'eau pure en fonction de leur degré de méthylation et de la nature des ions de la solution.

Les pectines à haut degré de méthylation (HM) forment des gels à pH acide en présence de saccharose qui diminue l'activité de l'eau. Les pectines à faible degré de méthylation (LM) sont très solubles dans l'eau en présence de cations monovalents tandis que les sels di- ou tri- valent sont faiblement solubles ou insolubles. Les solutions de pectines montrent un comportement non-Newtonien et pseudoplastique et en conséquence peuvent être utilisées comme épaississant. La caractéristique commerciale la plus importante des pectines est leur capacité à former des gels en présence d'un agent déshydratant à pH=3 (HM) ou en présence d'ions calcium (LM).

Les facteurs qui déterminent la gélification et qui influencent les caractéristiques du gel sont le pH, la concentration de co-solutés (sucres) et pectines, la concentration et le type de cations et enfin la température [16 ; 25].

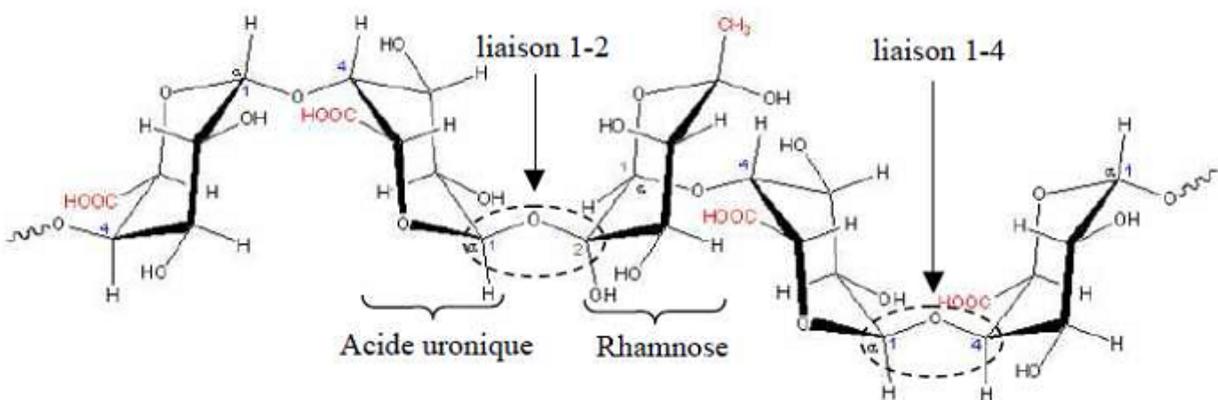


Figure 06 : Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique et formation d'un coude par la présence de rhamnose [21].

E- Cire :

Les cires sont des constituants des fibres naturelles, qui peuvent être extraits avec des solutions organiques. Ces matériaux se composent de différents types d'alcools insolubles dans l'eau et de plusieurs acides tels que l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique [26].

V- STRUCTURE ET MORPHOLOGIE DU BAMBOU :

A l'échelle microscopique, l'architecture de ces fibres est complexe. Elles sont en fait constituées par des fibrilles, elles-mêmes formées par des chaînes de cellulose (Figure 07). Les chaînes de cellulose s'associent entre elles de façon parallèle grâce à des liaisons hydrogène pour former des microfibrilles dont la section (de l'ordre de quelques nm) est variable selon les espèces végétales.

L'enchaînement des unités constitutives de la cellulose induit une rigidité des chaînes qui, alliée à la grande régularité des enchaînements et au développement des liaisons hydrogènes inter- et intra-chaîne est particulièrement favorable à une cristallinité élevée. La formation de zones cristallines très cohésives est responsable de l'essentiel des propriétés physiques et chimiques de ce matériau.

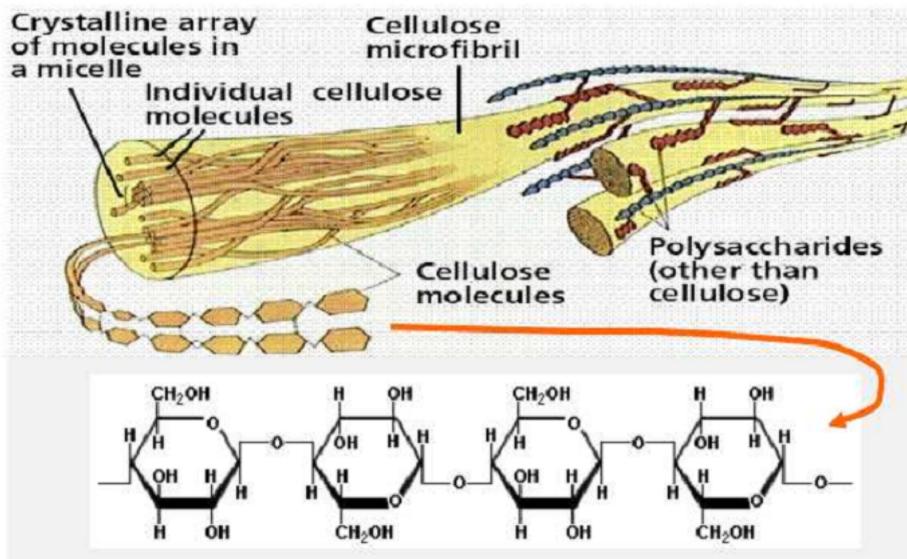


Figure 07 : Les longues chaînes de cellulose sont reliées entre elles en paquets, appelés microfibrilles [24].

Une fibre naturelle se compose de plusieurs parois (Figure 08). Ces parois sont formées de micro fibrilles cristallines (MFC) à base de cellulose reliées par la lignine et l'hémicellulose amorphe. Ces parois cellulaires diffèrent par leur composition (rapport entre la cellulose et la lignine/ hémicellulose) et par l'orientation des microfibrilles de cellulose [26].

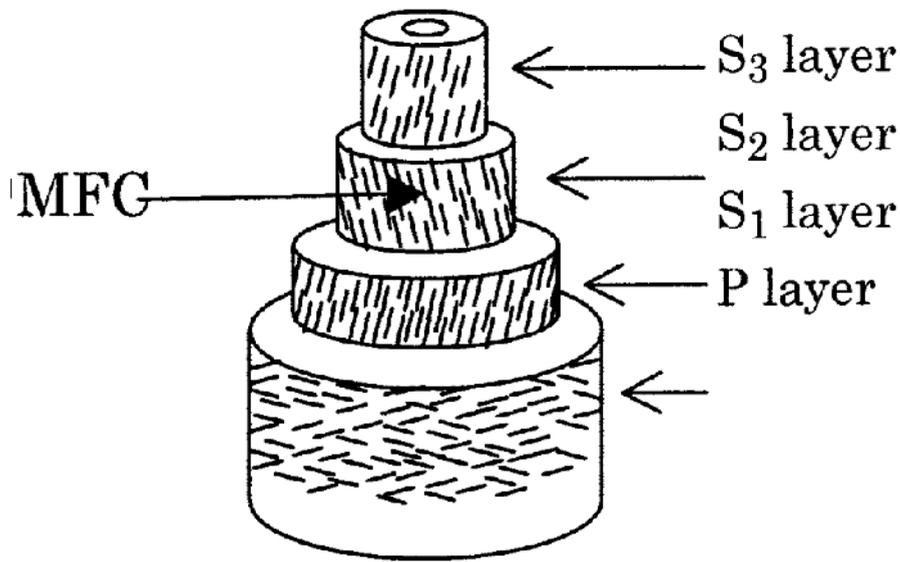


Figure 08 : Micro-structure de la fibre de bambou. P= paroi primaire, S= paroi secondaire.

A- Caractéristiques morphologiques :

1- Le rhizome :

Tous les bambous ont des tiges souterraines, appelées rhizome. Ils permettent à la plante de croître en formant des touffes plus ou moins serrées. C'est aussi un organe de réserve. (Photo 01)

Les racines sont adventives et se développent autour des nœuds du rhizome.



Photo 01 : Rhizome de bambou

2- La feuille :

Comme toutes les feuilles des graminées, elle comprend une gaine, le fourreau qui enveloppe le chaume, qui présente à son sommet une ligule et des oreillettes plus ou moins développées, le pétiole assez court et le limbe très allongé, à nervures parallèles, partie la plus apparente de la feuille.

3- Le chaume :

La tige principale du bambou est un chaume ou canne lignifié, fistuleux, cloisonné, aux nœuds. Le bambou des chaumes, riche en silice, est très dur et très résistant. La taille des tiges varie selon les espèces de moins d'un mètre à plus de 10m.

B- Présentation de la plante :

Ce sont des plantes monocotylédones, caractérisées par des tiges formées d'un chaume creux lignifié à la croissance très rapide.

Elles peuvent être différents de taille, de forme, voire de couleur suivant l'endroit où elles poussent, la nature du terrain, le climat, l'altitude.



Photo 02 : Bambou

VI- UTILISATION ET DISTRIBUTION :

L'évolution actuelle du bambou va vers son usage déstructuré. Ceux qui étaient restés à l'utilisation par Edition en 1882 d'une fibre carbonée de bambou de Yawata pour tailler le filament de ses ampoules, redécouvrent aujourd'hui cette plante qui en s'affranchissant de sa forme usuelle devient un matériau composite exceptionnel. A partir de lamelles rabotées, étuvées, séchées et compressées, on réalise une grande diversité de planche et des contre-plaqués qui peuvent être à leur tour cintrés ou mis en forme à chaud. Les possibilités de combiner le bambou à d'autres matériaux (métalliques, plastiques,...) ou de la substitution à certains composants, notamment dans le processus d'élaboration de bétons légers ont également été abordées.

En Chine, le bambou est la plante la plus emblématique, il existe 300 espèces différentes et se développe essentiellement dans les régions tropicales humides de la Chine du sud. Une de ses variétés présente uniquement dans la province du Sichuan. Au Sichuan, dans le bassin du fleuve bleu et dans le Sud, le bambou domine.

En Japon, une industrie appelée Vannerie est une industrie des plus anciennes et des plus immuables, Elle continue encore aujourd’hui à jouer un rôle prépondérant dans la vie quotidienne en raison de ses applications multiples. Bien qu’usant de toute manière fibreuse, la vannerie japonaise privilégie néanmoins le bambou qui, avec toutes ses variétés, se prête aux formes les plus différentes et répond aux fonctions les plus diverses. Le travail du bambou se pratique partout, mais se concentra d’avantage jusqu’à notre époque dans les régions septentrionales du pays, ainsi que dans les îles de Shikoku et de Kyustru.

La majeure partie des espèces de bambou est principalement originaire d’Asie et d’Amérique. Quelques rares espèces sont spontanées en Afrique continental et en Océanie. Aucune n’est spontanée en Europe. (Tableau 02)

Tableau 02 : distribution mondiale du bambou [27]

Localisation	Sous-tribus	Genres	Espèces
ASIE	6	44	Environ 600
AMERIQUE	2	21	Environ 400
MADAGASCAR	2	6	20
AFRIQUE	2	3	5
PACIFIQUE	2	2	4
AUSTRALIE	2	2	3

CHAPITRE 02 : LES FIBRES DU BAMBOU

I- INTRODUCTION :

Les fibres de bambou sont biodégradables et non abrasives, fibres à faible coût et faible densité et elles possèdent des propriétés spécifiques [28 ; 29].

Dans le domaine des matériaux, les fibres naturelles (fibres de bambou, fibres de sisal...) sont utilisées pour renforcer de nombreux polymères comme le polypropylène (PP) [30 ; 31 ; 27], les résines époxydes [24 ; 32], etc.

Les fibres cellulosiques actuelles ont oublié l'aspect soyeux pour se rapprocher de l'aspect coton comme le viloft, le lyecell (produit à partir de la cellulose naturelle tirée de la pâte à bois, au moyen d'un procédé de filage ou solvant), ou le tencel utilisé jusque dans la fabrication de jeans doux comme peau de pêche. Les fibres obtenues récemment à partir du bambou, du soja, de l'algue et du sapin obéissent à la même recherche de la cellulose.

II- PRESENTATION DES FIBRES NATURELLES :

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Egypte, où la paille et d'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés des fibres naturelles ont perçu une attention croissante, tant après du monde universitaire que de divers industrie. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges (figure 09) [33,11].

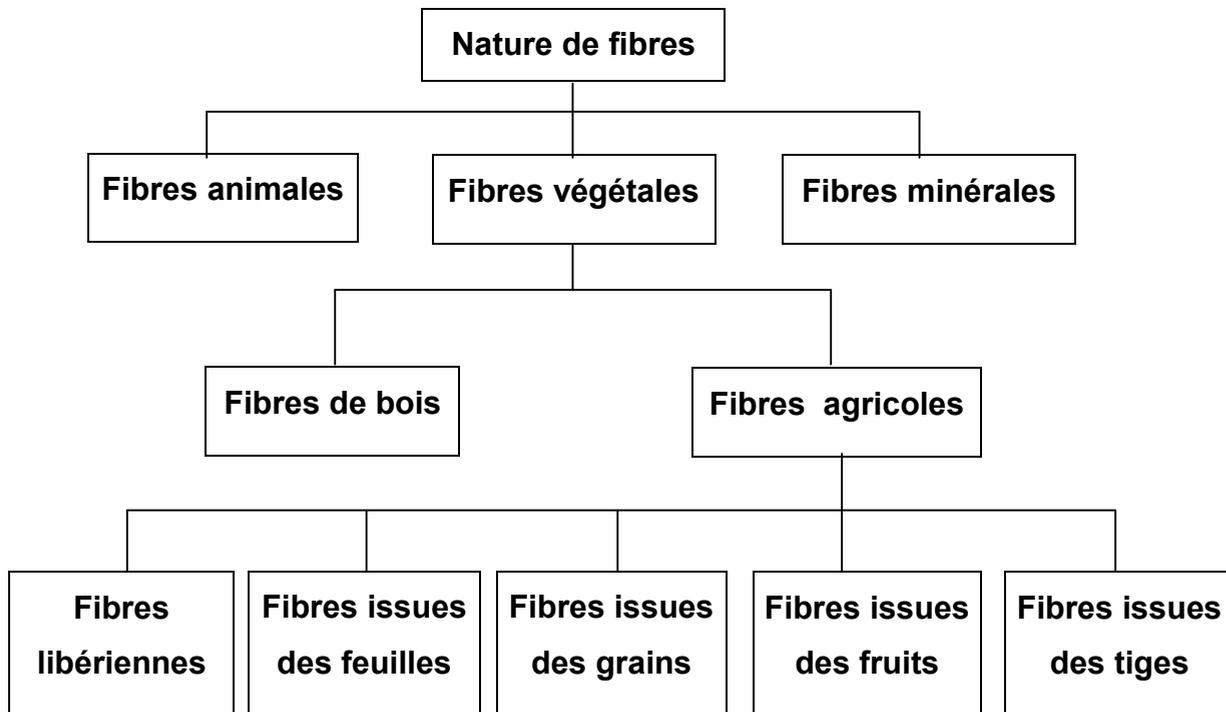


Figure 09 : Classification des fibres naturelles [24 ; 11]

Les principales catégories de fibres agricoles sont :

- Fibres libériennes : extraites de la partie extérieure de la tige (lin, chanvre jute, Kénaf, ramie...),
- Fibres extraites des feuilles : fibres de sisal, de bananier, de palmier...
- Fibres extraites de poils séminaux des graines (fibres de coton, de Kapok...)
- Fibres extraites de l'enveloppe du fruit : fibres de coco...
- Fibres extraites des tiges ou des troncs : paille de blé, de riz, d'orge ou d'autres cultures telles que le bambou.

III- COMPOSITION CHIMIQUE :

Chimiquement, les fibres naturelles contiennent principalement de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine ; il existe aussi, en faible proportion, des constituants extractibles comme les protéines ou encore des composés inorganiques.

La proportion d'holocellulose (comprenant la cellulose et l'hémicellulose) et de lignine varie selon les fibres naturelles et l'âge de ces fibres.

La composition dépend de la condition de croissance, de l'âge du végétal, des conditions climatiques et bien sur de la nature des fibres [12].

La composition de certaines fibres naturelles est présentée dans le tableau 03.

Tableau 03 : Composition des fibres naturelles [12].

Fibres	Cellulose en (%)	Lignine en (%)	Hémicellulose en (%)	Pectine en (%)	Cendre en (%)
Fibres de tige :					
Bambou	46-58	20-22	16-20	8-10	-
Kénafe	37-49	15-21	18-24		2-4
Jute	41-48	21-24	18-22	-	0,8
Fibres d'écorce/libériennes:					
Fibres de lin	71	2,2	18,6-20,6	2,3	-
Kénafe	31-57	15-19	21,5-23	-	2-5
Jute	45-71,5	12-26	13,6-21	0,2	2-5
Chanvre	57-77	3,7-13	14-22,4	0,9	0,8
Ramie	68,6-91	0,6-0,7	5-16,7	1,9	-
Fibres de feuillage :					
Abaca	56-63	7-9	15-17	-	3
Sisal	47-78	7-11	10-24	10	0,6-1
Henequen	77,6	13,1	4-8	-	-

Chaque fibre présente sous la forme d'un composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant l'élément structurant très rigide, la cellulose (figure 10).

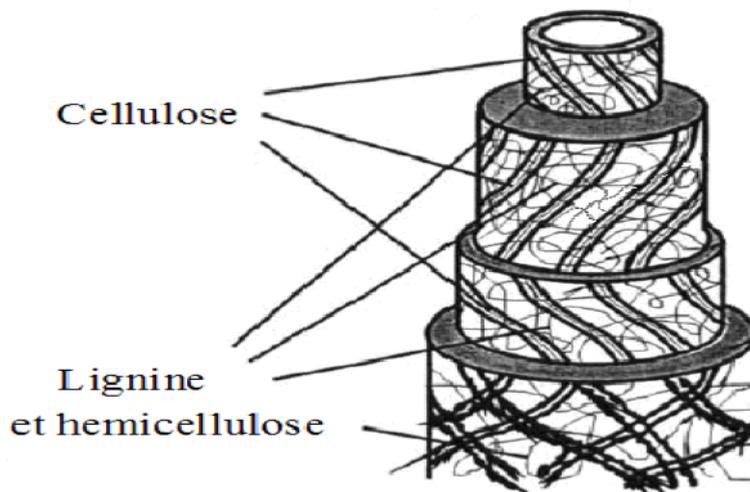


Figure 10 : structure du bois.

IV- PROPRIETES DES FIBRES :

La structure, les dimensions des cellules, les défauts, et la composition chimique des fibres sont les principales variables qui conditionnent l'ensemble des propriétés des fibres. En règle générale, la résistance à la traction et le module d'Young des fibres croît avec l'augmentation de la teneur en cellulose. Les fibres naturelles hydrophiles et le caractère hydrophobe de la plupart des polymères conduit à des difficultés de dispersion des fibres dans la matrice, ce qui perturbe les propriétés du composite résultant. Il s'agit d'un inconvénient majeur des composites renforcés par des fibres naturelles.

Un autre problème est que la température de traitement des composites est limitée à 200°C car les fibres végétales risquent de subir des dégradations à des températures plus élevées, ce qui limite le choix de la matrice.

Une autre restriction à l'exploitation des fibres naturelles pour des applications composites est la faible résistance microbienne et la sensibilité à la pourriture. Ces propriétés posent de graves problèmes durant le transport, le stockage, le traitement et la mise en œuvre des composites. L'hétérogénéité et les variations de dimensions et de propriétés mécaniques (même entre les plantes de la même culture) posent également un autre problème [13].

Mais il est clair que les avantages l'emportent sur les inconvénients. Pour améliorer la stabilité thermique, la compatibilité entre le polymère et les fibres naturelles, et ainsi améliorer les propriétés des composites, réduire la perméabilité à l'eau ..., la surface des fibres peut être modifiée par des méthodes physiques ou chimiques [34].

V- TYPE DES FIBRES CELLULOSIQUES :

Selon leur longueur, on observe deux types principaux de fibres cellulosiques :

➡ Les fibres courtes (peu résistants) : paille, bois feuillus ;

➡ Les fibres longues (résistants) : bois résineux (sapin, cyprès, thuyas...).

Les fibres appropriées aux conditions socio-économiques des pays en développement sont les fibres naturelles.

Le tableau synoptique (tableau 04) résume les principales propriétés physiques des fibres cellulosiques les plus fréquemment rencontrées.

Pour pouvoir être utilisée, une fibre doit remplir les conditions suivantes :

- ☞ Etre flexible (peu cassante) ;
- ☞ Avoir une texture superficielle rugueuse ;
- ☞ Ne pas être huileuse ;
- ☞ Etre exempte de produit chimique (sucre) qui inhibe la prise du ciment ;
- ☞ Etre stable dimensionnellement même en présence d'humidité.

Tableau 04 : Principales propriétés physiques des fibres cellulosiques de différentes natures [25].

<i>Types de fibres</i>	<i>longueur</i>	<i>largeur</i>	<i>Diamètre (mm)</i>	<i>Densité (Kg/m³)</i>	<i>Traction (Mpa) (1)</i>	<i>Elongation à la rupture en % (2)</i>	<i>Absorption d'eau en % (3)</i>	<i>Classification</i>
Kenaf	30-750 (mm)	–	0,05 à 0,09	–	295	–	–	Fibre longue
Coco	50-350 (mm)	–	0,1-0,4	1440	200	29	130-180	Fibre longue
Chanvre	20mm	25µm	–	–	–	–	–	Fibre longue
Linter de coton	2-5 (mm)	20-30 (µm)	–	–	–	–	–	Fibre longue
Bambou	1-4 (mm)	15µm	0,2-0,4	1500	575	3	40-45	Fibre longue
Sisal	3mm	–	0,2-0,3	1450	570	3	60-70	Fibre longue
Bagage de canne à sucre	0,8 à 2,8	10-34 (µm)	–	–	–	–	–	Fibre courte
Paille de riz	1,5mm	7 à 8 (µm)	–	–	–	–	–	Fibre courte
Bois feuillus	0,8 à 1,3 (mm)	15-20 (µm)	–	–	–	–	–	Fibre courte
Paille de mil	35 à 300 (µm)	10-70 (µm)	–	–	–	–	–	Fibre courte

(1) : MPa : Megapascal ;

$$1\text{MPa}=10\text{bar}=10,2\text{Kgf/cm}^2$$

(2) : capacité d'élongation de la fibre jusqu'à la rupture exprimée en pourcentage de la longueur initiale de la fibre ;

(3) : capacité d'absorption en eau de la fibre en pourcentage de sa teneur en eau initiale.

VI- UTILISATION DES FIBRES CELLULOSIQUES :

La fibre cellulosique est une importante matière première industrielle :

- Dans la papeterie ; elle sert à la fabrication de la pâte à papier, soit mécanique qui inclut la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, soit pâte chimique qui contient des fibres cellulosiques seulement.

- Elle peut servir, après transformation dans l'industrie chimique, à la fabrication des fibres textiles artificielles, acétate de cellulose, viscosse,...

- Dans la construction elle peut servir également (en tant que fibre) de liant dans le domaine de la stabilisation de terre ;

- Elle peut renforcer le béton ou servir le composite ciment fibre.

VII- FIBRES DE BAMBOU :

A- Quelques définitions et propriétés :

La fibre de bambou est une fibre de cellulose extraite ou fabriquée à partir naturelles de bambou et est fabriquée à partir de la cellulose de la pulpe de bambou. Il n'est généralement fait à partir des fibres de la plante, mais est une synthèse de viscosse fait de cellulose de bambou. La fibre est ainsi appelée viscosse de bambou. La fibre de bambou est une fibre naturelle (par opposition aux matières synthétiques comme le polyester populaire) dont la culture se traduit par une diminution des émissions de gaz et effet de serre.

Les fibres de bambou sont d'une résistance exceptionnelle et sa structure tubulaire autour d'un vide, renforcée par des cloisonnements, fait de lui une poutre caisson fine et légère capable de supporter des pressions considérables.

La fibre de bambou possède une résistance de 40kilogrammes par millimètre carré, en comparaison, la fibre de bois résiste en 5 kilogrammes par millimètre carré et le fer de construction à 37 kilogrammes par millimètre c

Les principales propriétés de cette fibre sont :

- Elle est biodégradable ;
- Elle est bactériostatique ;
- Elle est anti-odeur ;
- Elle est hydrophile 3 à 5 fois absorbante que le coton et (également plus absorbante que le lyocell) ;
- Elle est brillante ;
- Elle est d'une extrême douceur, ce qui en fait le matériau idéal des vêtements « seconde peau ».

La fibre de bambou est très souvent associée à la fibre de coton (65% bambou/35% coton) afin d'obtenir des textiles plus résistants et la lavables à 30-40°.

La fibre de bambou peut être dans une forme réduite dans lequel la matière est extrêmement fine et dans un état de poudre.

B- Description du produit :

La fibre de bambou est un nouveau type de produit vert respectueux de l'environnement.

Grâce à un processus d'hydrolyse-alcalisation et multi-phase de blanchiment, la pâte amylicée est raffinée à partir de bambou. Répétées de l'analyse technologique a prouvé que ce genre de fibre a la minceur et la blancheur proche finement blanchi viscose et a une durabilité forte, la stabilité et la ténacité.

Sans additifs chimiques et belle robe brillante, elle a cinq fonctions principales : absorption de l'humidité et de l'air, perméabilité, protection de la santé naturelle, l'antisepsie et de désodorisation, réduction, rayonnement et la souplesse et lissage.

Comme il est plein de fibre cavité ovale, il est facile à absorber et évaporer l'humidité et se sent frais. La fibre de bambou est une matière première de consommateurs à tricoter tissu et tissu à l'intérieur.

Le fils de fibres de bambou est tissu visage développée par notre compagnie en 2002 d'utiliser la culture du bambou largement en Chine comme matière première. Il s'agit d'un extrait et régénératrice fibre de cellulose après un spécial Salut-Tech traitement.

C- Caractéristiques de la fibre :

Une sensation de douceur et de la main, résistance à l'usure, brillant, lustre, bon absorbant, qualité, perméabilité à l'air, velours, sentir. Il a la fonction unique d'antibactérien, bactériostatique et anti-ultraviolet.

D- Utilisation :

Comme le bambou est tout à fait de sources naturelles et ses propriétés mécaniques sont comparables à celle de bois, on peut dire que la fibre de bambou est choisie comme renforcement. Ses avantages sont d'ordre économique, chimique et mécanique. Il est aussi facilement renouvelable et naturel.

CHAPITRE 03 : LES CIMENTS

I- QUELQUES DEFINITIONS DU CIMENT [35 ; 36 ; 37]:

Parmis les liants minéraux, certains ne peuvent durcir qu'à l'air libre, tandis que d'autres peuvent faire prise aussi bien à l'air que sous l'eau, ce sont des liants hydrauliques.

Les ciments sont des liants hydrauliques formés de constituants anhydres, cristallisés ou vitreux, renfermant de la silice, de l'alumine et de la chaux, dont le durcissement est dû à la formation par combinaison de ce constituant anhydre avec de l'eau, de silicates et d'aluminates de calcium hydraté très peu solubles dans l'eau.

II- CONSTITUANTS DU CIMENT :

Les constituants du ciment sont le clinker, les produits d'addition, les régulateurs de prise.

A- Le clinker

Le clinker est un produit obtenu par la cuisson d'un mélange bien défini de calcaire et d'argile ou d'autres constituants vers au moins 1200°C et en général à plus de 1400°C.

Il est composé de silicates et d'aluminates de calcium et éventuellement de chaux libre avec d'autres impuretés apportées par les matières premières.

B- Les produits d'addition

Ajoutés au clinker en certaines proportions, ces produits permettent d'obtenir différentes catégories et types de ciment.

On peut citer les principaux produits d'addition suivants :

- ◆ Laitier de Haut Fourneau : le traitement du minerai de fer dans un haut fourneau produit de la fonte et du laitier, à la sortie du haut fourneau, le laitier liquide est refroidi par l'eau ;

- ◆ Cendres Volantes : ce sont des produits pulvérulents formés de billes pleines vitreuses, résidus de la combustion de la houille dans une centrale thermique ;

- ◆ Pouzzolanes naturelles : ce sont des roches volcaniques alvéolaires et scoriacées, de couleur rougeâtre et noirâtre. Elles sont utilisées comme granulats pour la confection des bétons légers, ou après broyage, comme constituants des ciments ;

- ◆ Pouzzolanes artificielles : ce sont des produits obtenus par traitement thermique qui leur confère des propriétés pouzzolaniques;

- ◆ Fillers : ce sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches naturelles ou non.

C- Les régulateurs de prise

Ce sont des produits qui peuvent être additionnés au clinker dans des limites bien définies pour chaque type de ciment. Le plus important est le sulfate de calcium sous forme de gypse .

Ces constituants ont des propriétés qui peuvent être :

- ➔ hydrauliques : ils forment avec l'eau des composés peu solubles dans l'eau ;

- ➔ pouzzolaniques : ils forment avec l'eau et par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables.

III- LES DIFFERENTS TYPES DE CIMENT

A- Les modes de classification

Le choix d'un ciment, sa composition, ses propriétés ; est étudié de façon à le favoriser par rapport à un ou plusieurs paramètres de fabrication et/ou d'utilisation. D'où l'existence de plusieurs types de ciment.

On classe les ciments suivants :

- ☞ la nature des matières premières ;
- ☞ la nature des constituants ;
- ☞ la résistance mécanique.

➤ Classification suivant la nature des matières premières

On distingue :

➡ les ciments naturels qui proviennent des roches naturelles constituées de mélange de calcaire et d'argile, sans aucune addition ;

➡ les ciments artificiels qui sont obtenus par la cuisson de mélange artificiel dans de proportions bien définies de calcaire, d'argile et d'autres constituants de minéraux contenant de la silice et de l'alumine.

➤ **Classification suivant la nature des constituants**

Suivant ce mode classification, on distingue deux (2) catégories de ciment :

➡ les Ciments Portland Artificiels (CPA)

➡ les Ciments Portland Composés (CPJ)

Les Ciments Portland Artificiels sont obtenus par broyage du clinker avec 3 à 4% de gypse ou d'anhydrite.

Les Ciments Portland Composés sont des mélanges du clinker ou de ciment Portland artificiel avec d'autres composés qui peuvent avoir des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques.

➤ **Classe de résistance**

Ce mode de classement est le plus important et le plus utilisé. La classe de résistance d'un ciment est déterminée par la résistance à la compression à 28 jours du « mortier normal » confectionné avec le ciment. Le « mortier normal » est composé d'une (1) partie de ciment et de trois (3) parties de sable normal.

On définit une sous-classe R pour les ciments à prise rapide.

Pour les ciments dont $R_{c28} \geq 35\text{MPa}$, la classe de résistance est déterminée par la valeur de R_{c28} en MPa. Ils sont répartis en quatre (4) classes : 35-45-55- HP (Haute Performance).

Pour les autres ciments moins performants, la classe de résistance est déterminée par la valeur de R_{c28} exprimée en bar.

B- Les ciments de la norme NFP 15-301

➤ **Ancienne norme (encore en vigueur à Madagascar)**

➡ Les Ciments Portland Artificiels (CPA)

Ils contiennent au moins 95% de clinker, 3 à 4% de gypse ou d'anhydrite. On a quatre (4) classes de résistances : 35-45-55-HP

👉 Les Ciments Portland Composés (CPJ)

Ils contiennent au moins 65% de clinker et au plus 35% d'autres constituants qui peuvent être des cendres volantes, du laitier, de la pouzzolane ou des fillers. On a trois classes de résistance : 35-45-55

Les Ciments au Laitier

Ils contiennent au maximum 60% de clinker un certain pourcentage en laitier. On a trois classes de résistance : 45-55-HP. On distingue :

- ❖ les Ciments de Haut Fourneau (CHF) composé de 25% de clinker avec 40 à 75% de laitier

- ❖ les Ciments de Laitier aux Cendres (CLC) composés de 25 à 60% de clinker, de 20 à 45% de laitier et de 20 à 45% de cendres

- ❖ les Ciments de Laitier aux Clinker composés moins de 20% de clinker et plus de 80% de laitier.

➤ Norme NFP 15-301 révisée (en vue de la norme européenne)

1. Nouvelle définition de la classe de résistance

Dans la norme révisée, les chiffres indiquant la résistance moyenne à 28 jours sont remplacés par le chiffre qui indique la résistance garantie à 28 jours. Ainsi 45 est remplacé par 32.5 et on a :

Tableau 05 : Classe de résistance suivant la norme

Ancienne Norme	35	45	55	HP
Norme Révisée	*-	32.5	42.5	52.5

*On ne produit plus des ciments de classe 35

Remarque : ces trois classes principales ; 32,5 ; 42,5 et 52,5 doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 06 ;

Tableau 06: Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Stabilité
	Au jeune âge		A 28 jours		EN 196-3
	2 jours	7 jours	mini	maxi	mm
32,5	-	(17,5)	/32,5 (30)	≤52,5	≤10
32,5 R	/13,5 (12)	/ ≤	/32,5 (30)	≤52,5	≤10
42,5	/12,5 (10)		/42,5 (40)	≤62,5	≤10
42,5 R	/20 (18)		/42,5 (40)	≤62,5	≤10
52,5	/20 (18)		/52,5 (50)		≤10
52,5 R	/30 528°		/52,5 (50)		≤10

2. Nouvelle désignation des ciments et symbole

Tableau 07: Désignation et symbole des ciments

<i>Dénomination</i>	<i>Symbole</i>	<i>Pourcentage de clinker</i>
Ciments Portland Artificiel	CPA-CEMI	95-100
Ciments Portland Composé	CPJ-CEMII/A CPJ-CEMII/B	80-94 65-79
Ciments de Haut Fourneau	CHF-CEMIII/A CHF-CEMIII/B CLK-CEMIII/C	35-64 20-34 5-19
Ciments Pouzzolaniques	CPZ-CEMIV/A CPZ-CEMIV/B	65-90 45-64
Ciments de laitier aux cendres	CLC-CEMV/A CLC-CEMV/B	40-60 20-39

Remarque : La nouvelle norme européenne EN – 197 – 1 est applicable depuis Janvier 2001.

C- Les ciments de norme autre que la norme NFP 15-301

On peut citer :

- ◆ Le Ciment de Laitier à la Chaux (CLX) (NFP15-306)

C'est un mélange de laitier et de chaux. Ce sont des liants qui font partie des liants pouzzolaniques. On a deux classes de résistance : 60 -160.

- ◆ Le Ciment à maçonner (CM) (NFP 15-307)

C'est un mélange de liants hydrauliques (clinker de CPA, CPJ ou même chaux hydraulique) avec d'autres constituants qui peuvent avoir des propriétés pouzzolaniques ou non. On a deux classes de résistance : 160 – 250

◆ Les Ciments Naturels (CN) (NFP 15-308)

Ce sont des ciments obtenus par la cuisson de mélange naturel de calcaire et d'argile. La classe de résistance est très large en fonction de gisement utilisé.

◆ Le Ciment Sursulfaté (CSS) (NFP 15-313)

Il est composé de : 80% de laitier, 15% de gypse ou d'anhydrite, 5% de clinker.

On a deux classes de résistance : 35 – 45.

C'est un ciment à prise lente mais à durcissement rapide.

D- Les ciments en cours de normalisation

➤ **Ciments alumineux fondu**

Ces ciments résultent de la cuisson jusqu'à la fusion d'un mélange de calcaire et de bauxite suivi d'un broyage sans gypse avec une finesse comparable à celle de CPA. Ce sont des ciments à caractères réfractaire et surtout à prise et durcissement rapides.

➤ **Ciments blancs et ciments colorés**

Les ciments blancs sont obtenus par cuisson de mélange de matières premières très peu débarrassées d'oxyde de fer et avec l'utilisation de combustible fluide (sans cendres).

Les caractéristiques sont analogues à celles de Portland gris de la norme NFP 15 – 301 mais on en fabrique aussi des classes inférieures de faible résistance.

Les ciments blancs sont la base de fabrication des ciments colorés par incorporation des pigments minéraux de même granulométrie.

IV- PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DU CIMENT

A- Caractéristiques chimiques

La composition chimique du ciment donne la teneur en:

- ☞ Silice (SiO_2)
- ☞ Alumine (Al_2O_3)
- ☞ Oxyde de fer (Fe_2O_3)

- ☞ Magnésie (MgO)
- ☞ Chaux (CaO)
- ☞ Anhydrite sulfurique (SO₃)

Le tableau suivant indique les spécifications chimiques du ciment :

Tableau 08 : Spécifications chimiques des ciments

<i>Propriétés</i>	<i>Type de ciment</i>	<i>Classe</i>	<i>Exigences en %</i>
Perte au feu	CPA-CLK-CHF	Toutes	[5.0
Teneur en MgO	CPA	Toutes	[5.0
Résidu soluble dans HCl	CPA-CLK-CHF	Toutes	[5.0
Teneur en sulfates (SO ₃) (Limite Supérieure)	CPA-CPJ	32.5/32.5R/42.5R	[3.35
	CPZ-CLK	42.5R/52.5/52.5R	[4.0
	CHF	Toutes	
Teneur en chlorures (Cl ⁻)	Tous types	Toutes sauf 52.5R	[0.10
		52.5R	[0.05

B- Caractéristiques physiques

Parmi les plus importantes, on a :

- **la densité** : la valeur de la densité est donnée par le tableau ci-

après ;

Tableau 09 : Densité des ciments

<i>Densités</i>	<i>Pour les CPA</i>	<i>Pour les autres ciments</i>
Densités apparentes	1t/m ³	0.7 à 1.2 t/m ³
Poids spécifiques	3.1t/m ³	2.8 à 3.2 t/m ³

➤ **la vitesse de prise** : elle caractérise le temps de début de prise qui est fonction du type de ciment. Généralement, le début de prise se manifeste par une consistance devenue solide de la pâte.

Tableau 10 : Vitesse de prise des ciments

<i>Ciments</i>	<i>Début de prise</i>
CPA de classe 35-45	> 90mn
CPA de classe 55 et HP	> 60mn
Ciments prompts	< 2mn

➤ **le gonflement – expansion** : c'est un phénomène qui se passe lors de la prise et du durcissement du ciment par augmentation de volume due à la présence d'un excès de sulfate, de chaux libre et/ou de magnésie.

➤ **le retrait** : c'est une diminution de volume pendant le durcissement qui est dû au départ d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation.

Tableau 11 : Retrait des ciments

<i>Ciment</i>	<i>Retrait</i>
CPA et CPJ de classe 35 et 45	< 800m/m
CPA de classe 55 et HP	1000 m/m
Ciments prompt	< 400m/m

C- Caractéristiques mécaniques

La plus importante est la résistance à la compression. C'est le premier critère qui caractérise le choix d'un type de ciment et le dosage en ciment des mortiers et de béton.

Parfois, on doit aussi déterminer la résistance à la traction et la résistance à l'usure.

V- FABRICATION DU CIMENT [38] :

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru ;
- cuisson ;
- broyage et conditionnement.

Il existe deux procédés extrêmes de fabrication de ciment :

A- Le procédé par voie sèche :

La méthode de fabrication par voie sèche pose aux fabricants d'importants problèmes techniques.

La ségrégation possible entre argile et calcaire dans les préchauffeurs. En effet, le système utilisé semble être néfaste et en fait, est utilisé ailleurs, pour trier des particules.

Dans le cas de la fabrication des ciments, il n'en est rien. La poudre reste homogène et ceci peut s'expliquer par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité ($2,70 \text{ g/cm}^3$). De plus, le matériel a été conçu dans cet esprit et toutes les précautions ont été prises.

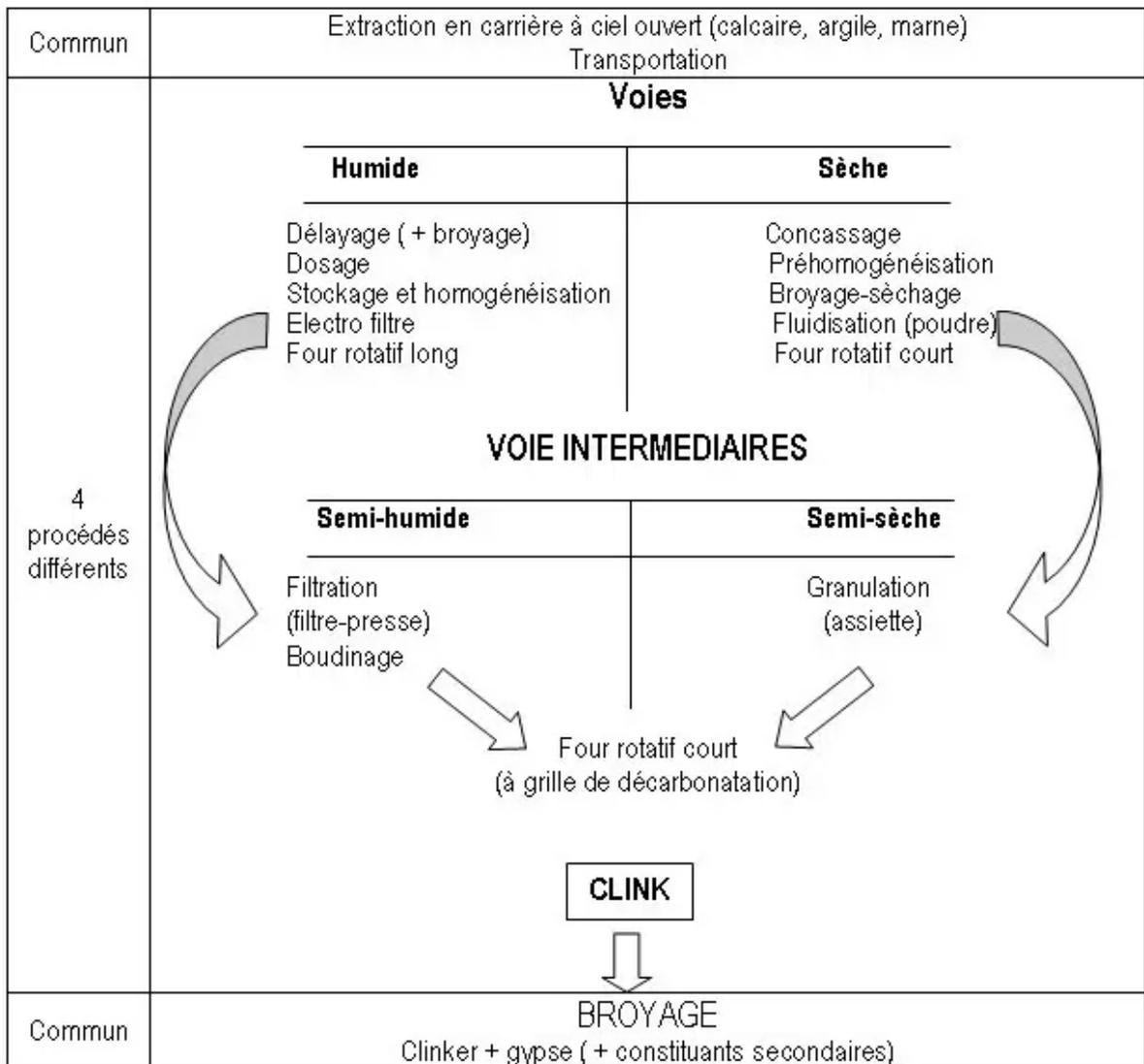


Figure 11 : Schéma de la fabrication du ciment par voie sèche

B- Le procédé par voie humide

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru.

Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre 200 mètres. On distingue à l'intérieure du four plusieurs zones, dont les 3 zones principales sont:

- Zone de séchage.
- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinkerisation.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four.

Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du clinker) dont il existe plusieurs types (refroidisseur à grille, à ballonnets). La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du clinker (phase vitreuse).

De toutes façons, quelque soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud de environ 600-1200 °C. Il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse CaSO_4 afin de «régulariser» la prise.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le clinker est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables.

Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20t/mn) et le ciment atteint une température élevée (160°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs.

On introduit le clinker avec un certain pourcentage de gypse en partie haute et on récupère la poudre en partie basse.

Dans le broyage à circuit ouvert, le clinker ne passe qu'une fois dans le broyage. Dans le broyage en circuit fermé, le clinker passe rapidement dans le broyeur puis à la sortie, est trié dans un cyclone. Le broyage a pour but, d'une part de réduire les grains du clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (environ 4%) pour réguler quelques propriétés du ciment portland (le temps de prise et de durcissement).

A la sortie du broyeur, le ciment a une température environ de 160°C et avant d'être transporter vers des silos de stockages, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que la température de ciment reste à environ 65°C.

Fabrication par voie sèche

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire (CaCO_3) environ de 80% et d'argile ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aérogليسeur.

Les fours sont constitués de deux parties:

- Un four vertical fixe, préchauffeur (cyclones échangeurs de chaleur).

- Un four rotatif.

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO_2) et son eau. La poudre pénètre ensuite dans un four rotatif analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.

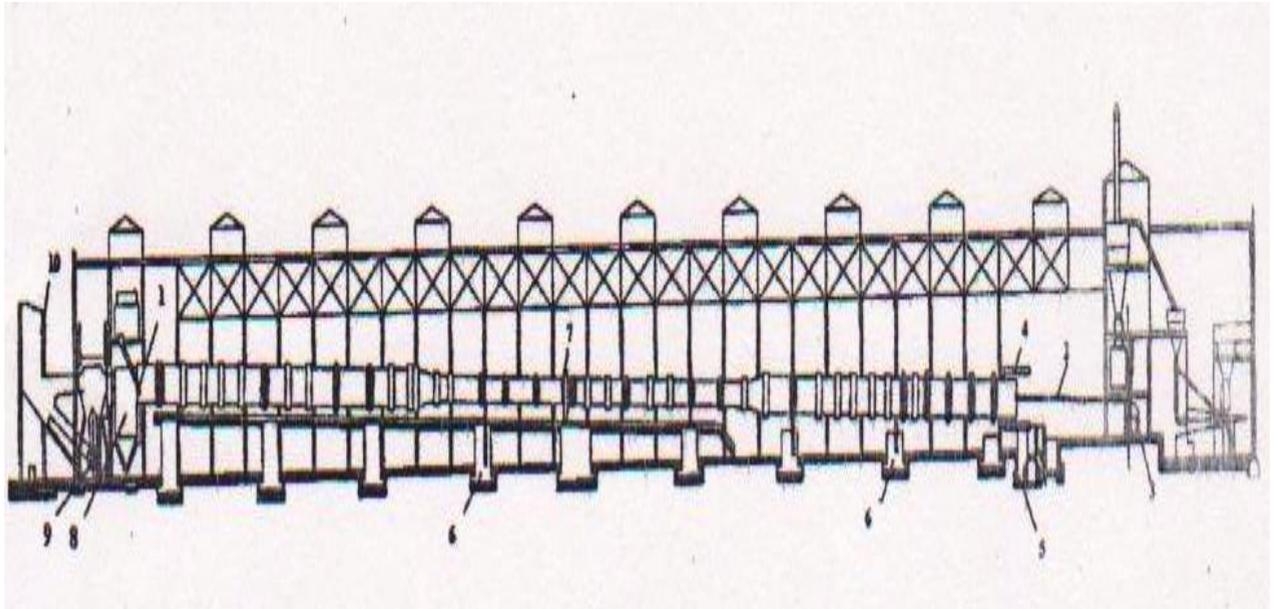


Figure 12 : Four rotatif horizontal

Avec :

- 1 : Four de mélange de matières premières ;
- 2 : Trou d'introduction de chaleur ;
- 3 : Vanne de ventilation ;
- 4 : Récupération du froid ;
- 5 : Transporteur de passage ;
- 6 : Transporteur de chaleur ;
- 7 : Boîte de dépôt de poussière ;
- 8 : Chambre de dépôt de chaleur ;
- 9 : Cheminée ;
- 10 : Tube de cheminée.

Les fours droits ou verticaux

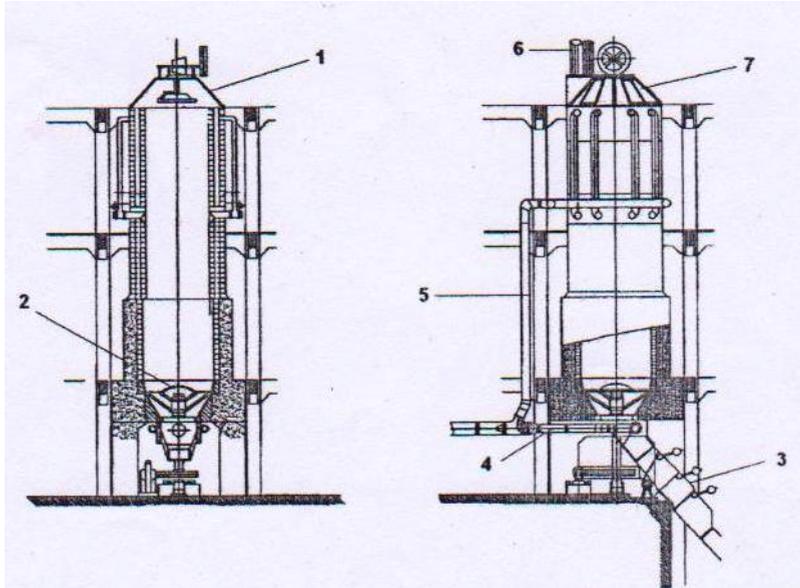


Figure 13 : Four vertical

Avec ;

- 1 : Plateau de distribution ;
- 2 : Moute charge ;
- 3 : Registre à trois canaux ;
- 4 : Soufflage inférieur ;
- 5 : Soufflage direct ;
- 6 : Cheminée ;
- 7 : Chapeau du four

VII- HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND (CPA)

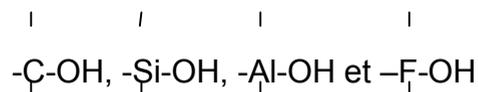
Le contact du ciment avec l'eau déclenche un mécanisme d'hydratation complexe [39 ; 40 ; 41] qui a été étudié pour la première fois par Henri Le Chatelier (1887). Schématiquement, le Chatelier a décrit trois étapes relatives à la prise du ciment :

- ◆ l'adsorption physique et chimique de l'eau par les grains de ciment,

- ◆ la dissolution ou solvatation, des grains de ciment ou phases anhydres, en présence d'eau,
- ◆ la précipitation des phases hydratées.

Pour décrire l'hydratation du ciment, différents travaux ont été publiés concernant des phases pures comme l'alite, C_3S [42 ; 28], la belite, C_2S , l'aluminate tricalcique, C_3A [43], ou encore la phase alumino-ferritique, C_4AF [43]. Pour la phase C_3S , de son mélange avec l'eau, des ions calcium, hydroxydes et silicates passent en solution. La solution devient alors rapidement sursaturée par rapport aux phases hydratées, à savoir l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ encore appelé portlandite, noté CH, ainsi que des hydrates silico-calciques, notés CSH qui sont des composés non stœchiométriques ou le rapport C/S varie entre 1,5 et 1,8. Les hydrates CSH ont les propriétés d'un gel.

Le ciment est un matériau fortement alcalin ($pH > 12,5$) et contient des groupes hydroxydes de métal comme :



Au fur et à mesure du temps écoulé après le gâchage ou mélange du ciment avec l'eau, le gel de silicate hydrate et les cristaux de portlandite formés s'enchevêtrent et remplissent les pores intergranulaires. La pâte se rigidifie, le matériau se densifie et devient solide. La couche d'hydrates a tendance à entourer les grains de silicate anhydre ce qui rend plus difficile le contact entre les grains anhydres et l'eau résiduelle. Les réactions d'hydratation de C_3S se poursuivent à des vitesses de plus en plus réduites jusqu'à épuisement de l'eau dans les pores capillaires de la pâte durcie.

L'hydratation de la phase C_2S a été peu étudiée malgré son impact sur la résistance mécanique finale du ciment [42]. Les mécanismes et les produits d'hydratation du silicate dicalcique sont similaires à ceux dérivés de C_3S . En revanche, son hydratation est généralement plus lente et la production de portlandite plus faible.

L'aluminate tricalcique est une phase extrêmement réactive en présence d'eau. Le C_3A est responsable du phénomène de « prise éclair » qui conduit à la formation d'aluminates hydrates, sans que la tenue mécanique de l'ensemble soit satisfaisante. Afin d'éviter ce phénomène de prise rapide dans un ciment Portland, l'hydratation du C_3A est contrôlée par l'addition d'environ 5% de sulfate de calcium $CaSO_4, xH_2O$ ($0 < x \leq 2$). C_3A va réagir avec le gypse pour former différents intermédiaires relativement stables : le TriSulfoAluminate de calcium ou ettringite, de formule ;

$[Ca_3(OH)_6]_2(SO_4)_3, 26H_2O$ et note TSA, et le MonoSulfoAluminate de calcium, de formule $(Ca_2Al(OH)_6)_2(SO_4), 15H_2O$ et noté MSA.

La phase ferritique (C_4AF) constitue environ 1 à 15% en masse d'un ciment Portland. Cette phase est en réalité une solution solide dont la composition répond à la formule $C_4(A_x, F_{1-x})$ pour x compris entre 0 et 0,7. La phase C_4AF adopte le même mécanisme d'hydratation que la phase C_3A . Les réactions sont cependant plus lentes. En présence de gypse, l'hydratation de C_4AF est plus efficacement retardée que celle de C_3A . Il y a formation d'intermédiaires analogues à l'ettringite et au monosulfate [43].

La réaction d'hydratation du ciment Portland va combiner les réactions d'hydratation des principaux constituants du clinker. Les mécanismes sont complexes du fait des interactions qui se produisent entre les différentes phases au cours du processus d'hydratation [44]. D'une manière générale, la vitesse de réaction, avec l'eau, des différentes phases minérales d'un ciment respecte l'ordre suivant : $C_3A > C_3S > C_4AF \approx C_2S$. Dans les premiers instants après la gâchée (0-15min), les éléments les plus solubles ($Na_2SO_4, K_2SO_4, CaSO_4, xH_2O$) sont dissous dans la phase aqueuse. Simultanément, les phases les plus réactives (C_3A et C_3S) libèrent des ions calcium, hydroxydes, silicates et aluminates.

Du fait que les silicates et les aluminates sont fortement solubles en milieu alcalin, leurs concentrations vont augmenter avec le pH de la solution tout en restant nettement inférieures à celles des alcalins, du calcium, des hydroxydes et des sulfates.

Suite à cette étape de dissolution des espèces, la formation des hydrates va être gouvernée par un processus de germination. Ce dernier peut se produire de manière homogène à partir de la solution ou de manière hétérogène à l'interface solide-solution. Le temps nécessaire à l'obtention d'un germe de taille critique va dépendre des fluctuations locales de concentration des espèces et des vitesses de précipitation-dissolution des hydrates.

Ensuite, la croissance des hydrates intervient (Fig.14) et sa vitesse est gouvernée par les concentrations des espèces au voisinage des sites réactionnels. A ce stade de l'hydratation, les principaux hydrates formés sont les composés CSH et l'ettringite.

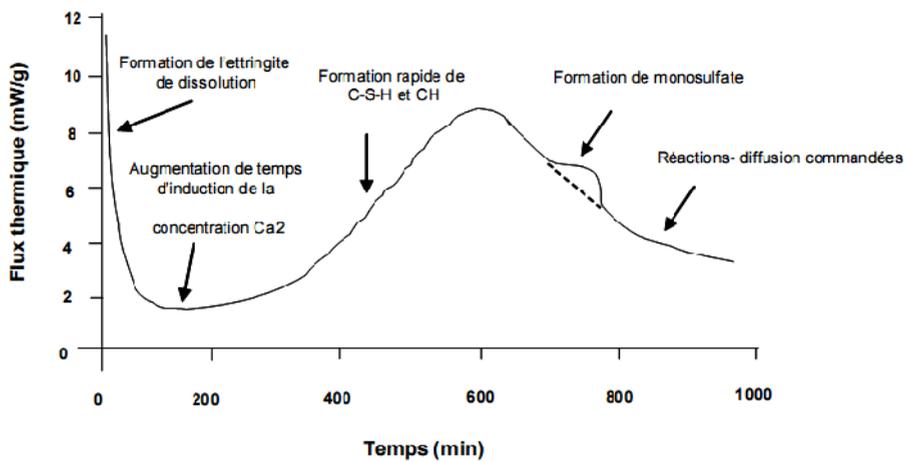


Figure 14 : Représentation schématique de l'hydratation du ciment [41]

VIII- DOMAINE D'UTILISATION :

Le domaine essentiel d'utilisation du ciment est constitué, par le béton et ses applications et, dans une bien moindre mesure, par les mortiers.

A titre indicatif, nous donnons dans le tableau suivant le domaine d'utilisation des différents types de ciments.

Tableau 12: Domaine d'utilisation des ciments courants de la norme NF EN 197-1

TYPES	DOMAINE D'UTILISATION	EMPLOIS NON RECOMMANDE
CEM I CEM II/A ou B CEM V/A ou B	Travaux courants de béton en élévation ou fondation	Présence d'eaux agressives
CEM III/A, B ou C	-Travaux de béton armé souterrains -Travaux en eaux agressives -Travaux hydrauliques	-Travaux en élévation -Enduits et chapes -Ouvrages de faible épaisseur
CEM VI/A ou B	-Construction sous-marine et souterraine en béton -Etanchéité et résistance à l'eau	-Travaux aériens -Bétonnage par temps froid
CNP	-Travaux à prise rapide : scellement aveuglement de voies d'eau -Travaux en milieu en agressif	Tout autre emploi
CA	-Doublure des appareils thermiques -Mortier et béton réfractaire -Bétonnage par temps froid -Pieux d'essai en béton armé	Bétonnage par temps chaud. Travaux de masse. Présence d'eau alcaline. Mélange avec d'autres ciments
CLX	-Travaux de maçonnerie -Présence d'eau quelque peu agressive -Travaux de génie rural -Travaux souterrains	Travaux en élévation Travaux en béton armé
CM	-Maçonnerie -Agglomérés	Travaux en béton armé
CN	-Petits travaux de bétonnage -Maçonnerie -Enduits -Agglomérés -Présence d'eau quelque peu agressive	Travaux en béton armé
(ES)(PM)	-Travaux de fondation à décoffrage rapide -Présence d'eaux agressives	Présence d'eaux acides Ouvrages soumis au gel Mélange avec d'autres ciments
(CP)	-Travaux de béton armé souterrain -Travaux en eau agressive -Travaux hydrauliques	Travaux en élévation Enduit et chapes Ouvrage de faible épaisseur

CHAPITRE 04 : LES SABLES

I- GENERALITES [45]:

La quantité du sable dépend de son origine (pétrologie-minéralogie) et de ses propriétés physiques (forme, texture, porosité, etc...). La résistance des produits en fibromortier varie en fonction du type de sable utilisé. L'adéquation du sable est difficile à déterminer à priori. Par des essais, on peut sélectionner le sable qui convient le mieux. Le choix d'un sable est son adéquation à la technologie dépendent de certains facteurs :

- ✓ Répartition granulométrique par taille des agrégats ;
- ✓ Forme des grains ;
- ✓ Teneur en argile (équivalent de sable) ;
- ✓ Présence de matières organiques ;

II- ANALYSE GRANULOMETRIE :

A- Définitions :

On appelle granulats un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125mm, de provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :

- ☞ Des mortiers, des bétons,
- ☞ Des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussés,
- ☞ Et des assises et des ballasts de voies ferrées.

Les granulats sont appelés fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballast suivant leurs dimensions.

L'analyse granulométrique a pour objet de la taille des particules élémentaires qui constituent les éléments de grains de substances diverses, telles que farines, poudre, sable, etc..., et la définition des fréquences statistiques des différentes tailles de grains dans l'ensemble étudié (figure 15).

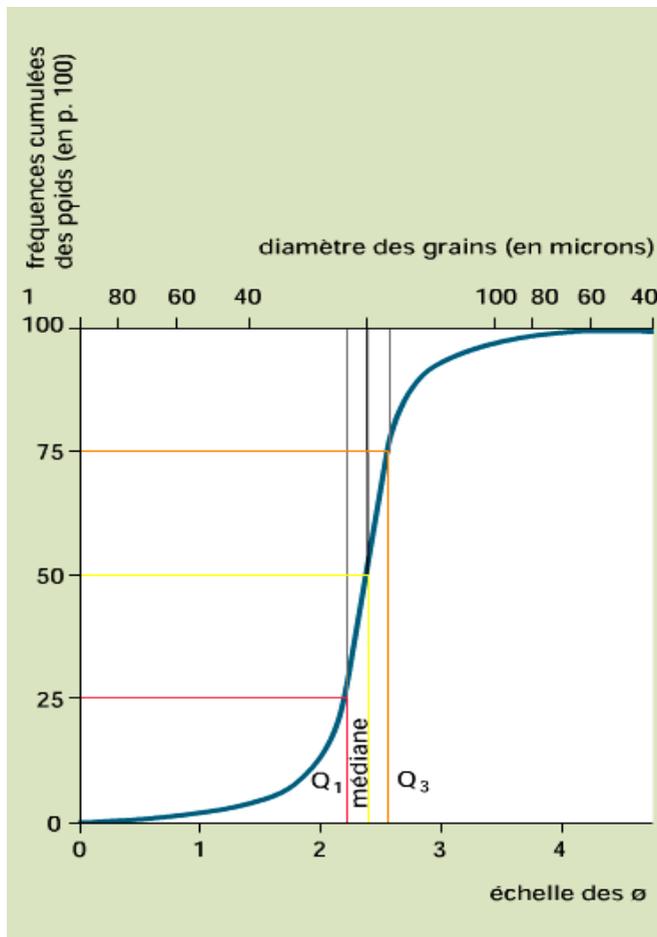


Figure 15: Courbe granulométrie.

Bien que cette technique soit couramment utilisée dans l'industrie pour les farines, les ciments, les abrasifs, c'est dans les sciences de la terre que l'analyse granulométrique connaît les applications les plus nombreuses et les plus variées : elle permet en particulier, en géologie, de préciser les conditions de sédimentation ; en pédologie, elle offre une définition quantitative d'un des caractères fondamentaux des sols : la texture.

La désignation même de la plupart des formations géologiques meubles dans le langage courant est fondée sur leurs dimensions : suivant que des fragments arrondis des roches sont de plus en plus petits, on parle de galets, de graviers, de sables... Ces expressions courantes ont été le plus souvent adoptées par le langage scientifique, et les noms des fractions granulométriques sont assez nombreux.

Les modes d'analyse sont également variés, ils dépendent de la nature des grains ; qui peuvent être plus ou moins friables, solubles ou insolubles ; flocculés ou déflocculés, ainsi que de leur dimension ; par exemple, le tamisage, couramment employé pour les sables quartzes ne peut plus l'être pour les gros blocs ou les particules très petites. Enfin, les modes d'expression de granulométries (indices, graphiques) dépendent en particulier du caractère plus ou moins détaillé des analyses effectuées et de l'interprétation envisagée.

B- Classes granulaires :

- ➡ Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D.
- ➡ Le premier désigne le diamètre minimum des grains d et le deuxième le diamètre maximum D.
- ➡ Lorsque d est inférieur à 0,5mm, le granulat est désigné 0/D.
- ➡ Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés (Norme NFP18-101) :

- ➡ Les fines 0/D avec $D \leq 0,08\text{mm}$,
- ➡ Les sables 0/D avec $D \leq 6,3\text{mm}$,
- ➡ Les gravillons d/D avec $d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 31,5\text{mm}$,
- ➡ Les cailloux d/D avec $d \geq 20\text{mm}$ et $D \leq 80\text{mm}$,
- ➡ Les graves d/D avec $d \geq 6,3\text{mm}$ et $D \leq 80\text{mm}$.

Le tamisat au tamis d est compris entre :

- ◆ 1 et 15% si $D > 1,56d$,
- ◆ 1 et 20% si $D \leq 1,56d$.

Le refus sur le tamis $1,56D$ est nul.

Le tamisat au tamis $0,63d < 3\%$; toutefois pour $D \leq 5\text{mm}$, cette limite est portée à 5%.

Les noms donnés aux différentes fractions sont aussi divers, en particulier pour les fractions fines. Bourcart distinguait les colloïdes (inférieurs à $0,1\mu\text{m}$), le pré colloïdes (de $0,1$ à $1\mu\text{m}$), les poudres (de 1 à $20\mu\text{m}$), les sables (de $20\mu\text{m}$ à 2mm). D'autres expressions sont employées : fines, lutites, péliste pour les fractions inférieures à $50\mu\text{m}$ ou $40\mu\text{m}$; silt, poussière, limons, farines... (de $2\mu\text{m}$ à $50\mu\text{m}$ environ). Bien qu'il existe aucune classification universelle des matériaux géologiques selon leurs dimensions, on distingue en général ;

☞ Les rudites, au-dessus de 2mm , subdivisées en blocs, au-dessus de 20cm ; cailloux (anguleux) ou galets (arrondis), de 20cm à 2cm ; gravier de 2cm à 2mm ;

☞ Les arénites, de 2mm à $50\mu\text{m}$ subdivisées en sables grossiers et moyens, de 2mm à $200\mu\text{m}$; sables fins (ou sablons) de $200\mu\text{m}$ à $50\mu\text{m}$;

☞ Les pélistes, au-dessous de $50\mu\text{m}$, subdivisées en : limon grossiers, de 50 à $20\mu\text{m}$; limons fins, de 20 à $2\mu\text{m}$; argiles, au-dessous de $2\mu\text{m}$ (le sens du mot « argile », ici purement dimensionnel, diffère du sens minéralogique).

Lorsque les éléments constitutifs des roches sont consolidés, les rudites forment des brèches ou conglomérats, les arénites des grès, et les pélistes des argilités.

C- Technique d'analyse :

Une méthode consiste à mesurer directement la dimension des grains observés à l'œil nu pour les galets et graviers, sous la loupe binoculaire pour les sables, au microscope pour les éléments plus petits. Mais cette méthode ne saurait s'appliquer à des échantillons très nombreux, sauf lorsque les opérations de mesure et de comptage des grains sont automatiques, comme dans l'étude des certaines poudres métalliques industrielles. Dans les sciences de la terre, les méthodes les plus courantes consistent à déduire les grains de sable et de gravier de leur admission ou de leur refus par des orifices des dimensions connues (tamisage). D'autres méthodes utilisent les compteurs de particules, les analyseurs automatiques d'image ou la diffraction laser.

1. Le tamisage de sables et graviers :

Le tamisage consiste à répartir les grains d'un échantillon en une série de classes dimensionnelle de plus en plus petite, par passage à travers des orifices de plus en plus étroits. En réalité, lorsque les grains ne sont pas sphériques, les orifices les trient selon leur largeur, et non seulement leur longueur. Les orifices sont formés par des mailles carrées de toile métallique ou, parfois, pour les diamètres supérieurs à 3mm, par des trous ménagés dans des tôles. On admet que le diamètre des trous d'une passoire doit être 1,25 fois plus grand que le côté des mailles d'un tamis pour avoir le même effet de triage.

Les tôles ou les toiles garnissent les montures cylindriques de diamètre divers (31,5cm, 25cm, 15cm etc.) qui peuvent s'emboîter les une dans les autres en formant des séries de tamis ou de passoire. Ces séries sont en générales constituées de telle sorte que les ouvertures présentent une progression géométrique régulière.

La progression adoptée par l'association française de la normalisation (AFNOR) a pour raison $1,25(\sqrt{10})$. On utilise aussi d'autre progression, de raison $1,189(\sqrt{12})$, $1,414(\sqrt{12})$. Le tamisage peut être effectué par agitation à sec ou à sous l'action d'un courant d'eau ; la quantité à tamiser dépend de la taille des grains et de la surface des tamis. La durée du tamisage, en général de l'ordre d'un quart d'heure, dépend de la fiabilité de l'échantillon.

Les refus successifs et l'ultime tamisât sont pesés, l'analyse fournit donc le poids et non le nombre des grains de chaque classe dimensionnelle.

Les résultats de l'analyse granulométrique peuvent être exprimés de bien des manières, outre les tableaux numériques : représentation graphique, indices statistiques.

2. Les graphiques granulométriques :

Parmi les représentations graphiques, le diagramme triangulaire est une des très simples. Il est établi sur un triangle équilatéral où trois systèmes de coordonnées sont parallèles à chacun des côtés.

Ainsi peuvent être figurés des ensembles composés de trois fractions. Utilisé en sédimentologie, le diagramme triangulaire est surtout connu en pédologie, les trois systèmes de coordonnées indiquent alors les argiles, les limons et les sables.

D- Objectif :

❖ L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre **0,063** et **125mm**. On appelle :

❖ **REFUS** sur un tamis: la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

❖ **TAMISAT** (ou **Passant**): la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

CONCLUSION PARTIELLE

La répartition par taille des grains de sable influence la résistance aux contraintes des produits en fibromortier. Si le sable contient une forte majorité de particules identiques, il n'y aura pas de cohésion naturelle. Un sable de bonne qualité est composé d'un éventail d'agrégats de tailles différentes. Cette variété de taille favorise la cohésion qui est nécessaire pour plusieurs raisons :

☞ Le mélange des particules de plusieurs tailles implique la diminution des espaces interstitiels ;

☞ Le nombre de contacts entre les granulats permet au ciment de lier les particules entre elles ;

☞ Le peu d'espace interstitiels (densité) empêche un retrait important (apparition de microfissures) lors de la prise du ciment ;

☞ Le remplissage des espaces interstitiels par des particules fines et moyennes retient le lait du ciment lors de la vibration du mortier ;

☞ Une très forte proportion de « fine » nécessitera davantage l'eau de gâchage pour obtenir un mortier, ce qui affaiblit les qualités de résistance.

On classifie le sable en fonction de la taille des particules.

Tableau 13 : Classification du sol en fonction de la taille de constituants :

<i>Diamètre des particules (mm)</i>	<i>Nom</i>
60,0 – 20,0	Gros gravier
20,0 – 6,0	Gravier moyen
6,0 – 2,0	Gravier fin
2,0 – 0,6	Sable gros
0,6 – 0,2	Sable moyen
0,2 – 0,06	Sable fin
0,06 – 0,02	Gros limon
0,02 – 0,006	Limon moyen
0,006 – 0,002	Limon fin
≤0,002	Argile

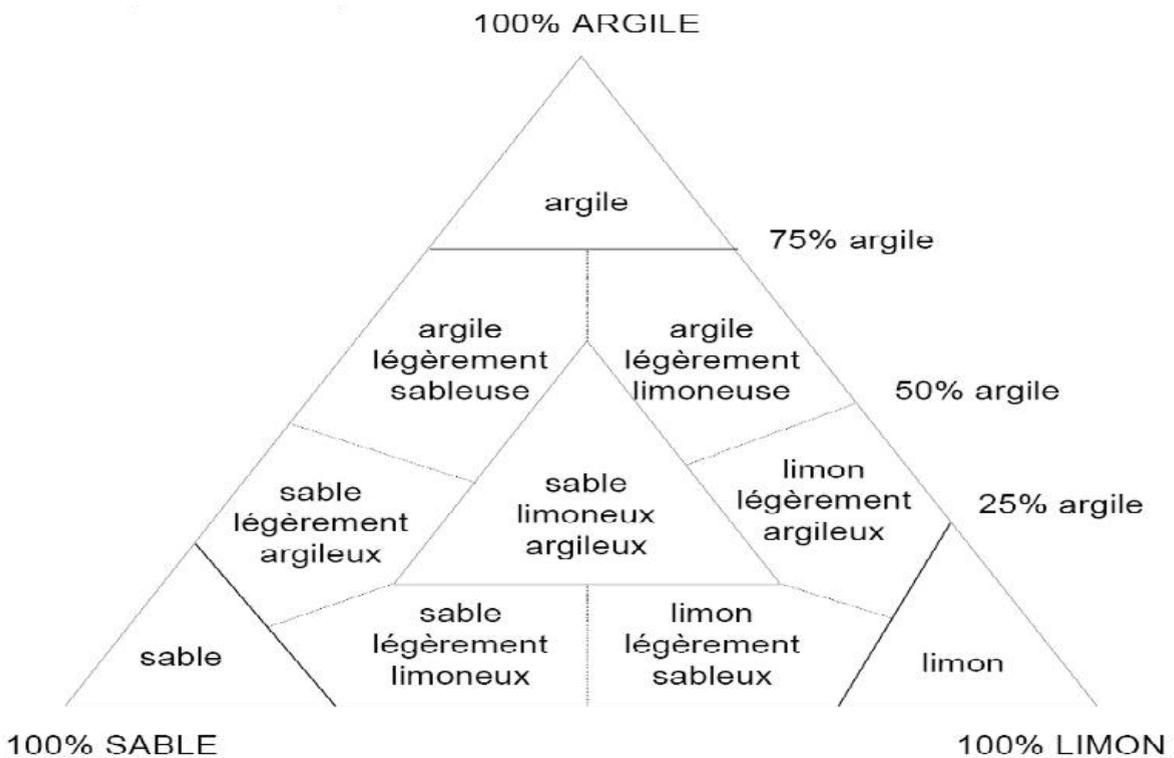


Figure 16: Diagramme triangulaire, pour la classification des sols.

III- MODULE DE FINESSE :

➡ Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

➡ Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (M_f)

➡ Le module de finesse est autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

➡ Norme française [NFP 18-540]

Le module de finesse est égal au $1/100^e$ de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentage sur les tamis de la série suivante : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5mm.

$$M_F = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,50 - 5\}$$

➡ Norme Européenne [EN 12620]

$$M_F = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% de tamis } \{0,125 - 0,25 - 0,50 - 1 - 2 - 4\}$$

Lorsque M_F est comprise entre:

- 1,8 et 2,2 : le sable est à majorité des grains fins ;
- 2,2 et 2,8 : on est en présence d'un sable préférentiel ;
- 2,8 et 3,3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des

bétons résistants mais moins maniables.

CHAPITRE 05 : LE BETON

I. QUELQUES DEFINITIONS SUR LE BETON [46 ; 47 ; 48]:

Le **béton** est un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats naturels (sable, gravillons) ou artificiels (granulats légers) agglomérés par un liant. Le liant peut être qualifié d'« hydrique », lorsque sa prise se fait par hydratation. Ce liant est appelé couramment « ciment » ; on obtient dans ce cas un « béton de ciment » un des plus souvent utilisés. On peut aussi utiliser un liant hydrocarboné (bitume), ce qui conduit à la fabrication du « béton bitumineux ».

Enfin, lorsque les granulats utilisés avec le liant hydraulique se réduisent à des sables, on parle alors de « mortier ». On peut largement optimiser la courbe granulaire du sable, auquel cas on parlera de « béton de sable ». Le béton frais associé à de l'acier permet d'obtenir le « béton armé », un matériau de construction courant. Le béton frais associé à des fibres permet d'obtenir des « bétons fibrés ».

Le béton est le deuxième matériau minéral le plus utilisé mondialement par la société, après l'eau potable : 1 m³ par an et par habitant.

C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde : on estime que sa production annuelle correspond à environ une tonne par habitant de notre planète (en France c'est environ trois fois plus). Ce succès est dû à plusieurs facteurs : le béton est un matériau économique, fabriqué à partir de ressources le plus souvent locales ; il est résistant, durable, isolant thermique et phonique ; il participe à l'architecture par les formes, les textures, les teintes qu'il permet d'obtenir ; il est facile à mettre en œuvre et se marie bien avec l'acier.

II- FORMULATION DU BETON :

A- Introduction :

Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué ces dernières années. Car, de nouveaux constituants tels que les adjuvants organiques, les additions minérales (cendres volantes, fillers etc.) ou les fibres sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et des ciments.

Même si la conception des structures en béton n'est généralement pas influencée par sa formulation, elle impose à celle-ci un minimum de critères: résistance ; durabilité dans le temps et maniabilité lors de sa mis-en œuvre.

Le problème de la formulation des bétons comporte de nos jours davantage de variables, et l'espace dans lequel on évolue est beaucoup plus vaste (on peut viser des résistances de 1 à 2 MPa pour des matériaux ré-excavables destinés au remplissage de tranchée comme des résistances supérieures à 200 MPa pour des bétons à haute résistance). Face à ces réalités, provenant sans doute d'un progrès normal de la technologie, le formulateur est soumis à une pression croissante en termes de délais et de coûts.

Nous présentons dans ce chapitre une synthèse non exhaustive sur les différentes méthodes de formulation existantes et les qualités requises pour tout béton de structures ainsi que les différents facteurs qui les régissent.

B- Facteurs régissant la formulation des bétons :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser le béton qui satisfait les qualités recherchées dont les plus essentielles sont : la résistance, la maniabilité et la durabilité.

1- Résistance mécanique :

La résistance mécanique a été longtemps considérée comme la caractéristique la plus essentielle pour le béton. Bien qu'elle soit étroitement liée à l'ouvrabilité, elle s'est vue attribuer une grande part en matière de recherche et développement.

a. Essais et mesure des résistances mécaniques :

➤ Résistance à la compression :

Elle est mesurée en compression axiale sur cylindre d'une hauteur double de son diamètre. Le plus couramment employé est le cylindre de 16 (=15,96 cm) dont la section est de 200 cm².

➤ Résistance à la traction :

La résistance à la traction peut être déterminée par différents essais :

➤ Traction directe :

Essai très délicat à réaliser, il consiste en la mise en traction du cylindre en béton après collage des têtes de traction sur les deux faces. Seule difficulté rencontrée, le centrage de ces têtes. L'opération doit être réalisée sans efforts de flexion.

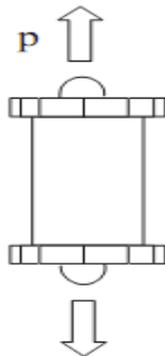


Figure 17 : Traction directe

➤ Traction par fendage : (essai brésilien)

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton couché suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux de la presse.

Si « p » est la charge de compression maximale entraînant l'éclatement du cylindre par mise en traction du plan diamétrale verticale, « D » diamètre et « L » longueur du cylindre, la résistance en traction est égale à

$$F_{tj} = 2 \times \frac{p}{\pi DL}$$

➤ Traction par flexion :

L'essai consiste à rompre une éprouvette prismatique de longueur « 4 a » et de côté « a » sous une flexion à quatre points et une charge totale « p ».

Le moment étant constant entre les deux points d'application de la charge :

$$u = \frac{pa}{2}$$

La résistance à la traction :

$$Ftj = \frac{Mv}{I} = \frac{6M}{a^3}$$

$\frac{I}{v}$: Module d'inertie = $\frac{a^3}{6}$. Moment d'inertie de la section.

b. Influence du dosage en ciment et du dosage en eau (E/C)

Les deux facteurs sont essentiels à la confection du béton. Ils présentent deux effets totalement opposés sur sa résistance. Si l'augmentation du ciment favorise son accroissement, un surplus d'eau entraîne sa diminution.

Ces deux effets sont le plus souvent rencontrés sous forme de rapport (E/C) alors que plusieurs recherches et formulations faites par le passé utilisent (C/E) qui se traduit par une fonction de résistance linéaire et croissante, et une plage de variation usuelle plus annoncée. (De 1,5 à 2,5 contre 0,4 à 0,66 pour E/C). (Figure.18).

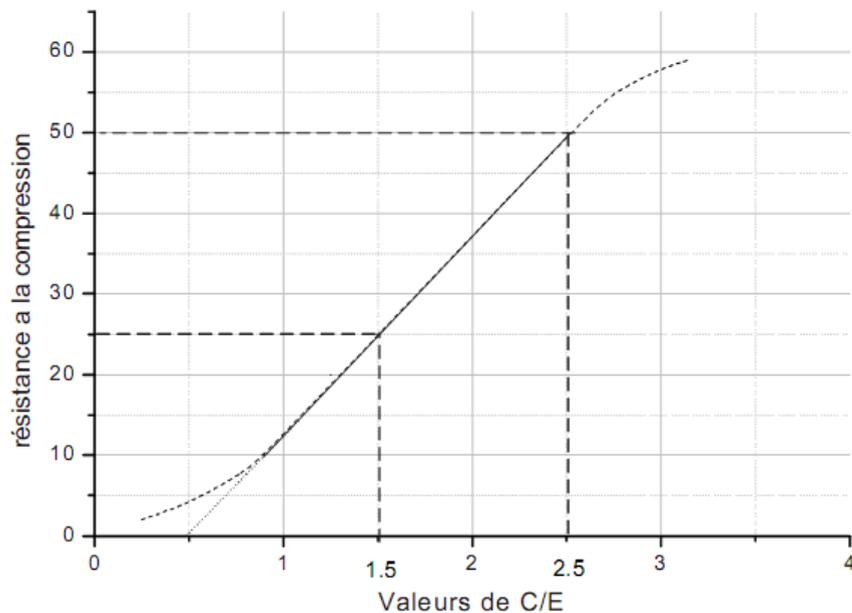


Figure 18 : relation entre (C/E) et la résistance à la compression (R_c) d'après la formule de BOLOMEY

$$\{R_c = G \times C_E (C / E - 0.5)\}.$$

G : coefficient de granularité égal à 0.5. C_E : classe vraie du ciment, égale à 50 Mpa.

De nos jours la tendance n'est plus de fixer le dosage en ciment lors de passation de marché ou de contrat. Mais exiger une résistance caractéristique pour le béton une fois durci. Donc il appartient à l'entreprise chargée de la réalisation d'utiliser le dosage en ciment nécessaire. Par ailleurs un dosage minimal peut être exigé par le maître d'œuvre mais seulement afin de garantir l'ouvrabilité et l'étanchéité.

Nombreux sont les textes réglementaire qui spécifient des dosages minimaux en ciment tel que :

c. La norme P 18 011 sur la classification des environnements agressifs qui spécifie les dosages suivant

$$\Rightarrow C \geq \frac{550}{\sqrt[5]{D}} \quad \text{pour des environnements à}$$

moyenne agressivité.

$$C \geq \frac{700}{5 \sqrt{D}} \text{ pour des environnements à forte et}$$

très forte agressivité.

D : Dimension maximale des granulats (Dmax).

d. Le BAEL 91 prescrit des dosages minimaux permettant d'obtenir des résistances caractéristiques dans les cas courants (CC) et les cas d'autocontrôle surveillé (AS).

Tableau 14 : Dosage en ciment [49]

classe de ciment	32,5 et 32,5 R		42,5 et 42,5 R	
	CC	AS	CC	AS
D max = 16	300 kg/m ³			
20	350 kg/m ³	325 kg/m ³	325 kg/m ³	300 kg/m ³
25	à justifier	400 kg/m ³	375 kg/m ³	350 kg/m ³
30	non admis	à justifier	à justifier	à justifier

e. Influence de la granularité :

Moins influente que le dosage en ciment ou le dosage en eau, la composition granulométrique du mélange n'intervient que d'une manière relativement faible sur la plupart des propriétés du béton.

f. Dimension maximale des granulats D :

L'utilisation de granulats de dimension maximale contribue de façon très significative à l'augmentation de la résistance du béton. Mais cela reste dans les limites de la faisabilité, parce que le choix de Dmax reste conditionné par : [50]

- ◆ L'ouvrabilité demandée ;
- ◆ Les dimensions de l'ouvrage et l'épaisseur des pièces

- ◆ L'espacement des armatures ;
- ◆ L'enrobage des armatures.

2- L'ouvrabilité :

a- Définition :

Propriété essentielle pour le béton elle est définie comme étant la qualité qui permet de garantir la facilité de sa mise en œuvre. Qualité sur laquelle repose différents aspects du béton une fois durci (résistance, état de parement, enrobage des armatures,...). Sachant que la tendance actuelle est tournée vers une multitude de techniques de bétonnage et de serrage (béton pompé, béton projeté, béton autocompactant, autonivelant,...), son inclusion dans les études de formulation du béton devient primordiale.

b- Mesure de l'ouvrabilité :

Des mesures simples et facilement exécutables au laboratoire ou sur chantier nous permettent de classer le béton suivant la plasticité qu'il présente.

c- affaissement au cône d'Abrahms : (Slump test)

Faisant l'objet de la norme NF P 18 305 l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique ($D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $h = 30$ cm), le remplissage s'effectue en trois couches tassées avec une tige en acier de 16mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.

Tableau 15 : Classe de consistance (Slump test)

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	1
Plastique P	5 à 9	2
Très plastique TP	10 à 15	3
Fluide FL	> 16	3

➤ **Essai vété** : ISO 4110 (VB test)

Utilisé pour tester les bétons de faible ouvrabilité, il consiste en la mesure du temps nécessaire que met un cône de béton à remplir un volume connu, sous l'effet d'une vibration donnée.

Tableau 16: Classe de consistance vété.

Classe vété	V₀	V₁	V₂	V₃	V₄
Temps à l'essai Vété	> 31 s	30s à 21s	20s à 11s	10s à 5s	< 5s

De V0 à V4. De ferme à fluide

➤ **Essai d'étalement sur table** : EN 12 358 (flow test)

On démoule sur la table un tronc de cône de béton (D = 25 cm, d = 17 cm, h = 12.5 cm) rempli en deux couches et compacté à laide d'une tige à raison de 10 coups par couche. Puis on le soumet à une série de 15 secousses de 15 secondes. On mesure le diamètre d'étalement et on l'exprime en pourcentage par rapport au diamètre initial.

- très ferme : 10 à 30 %.
- Ferme : 30 à 50 %
- Plastique : 50 à 70 %.
- Très plastique : 70 à 100 %

➤ **Maniabilimètre LCPC** :

Le maniabilimètre est un appareil mis au point par le laboratoire central des ponts et chaussées de Paris (LCPC). Il comporte une cuve parallélépipédique de 30cm de largeur, 60 cm de longueur et 30 cm de profondeur, une paroi mobile de forme triangulaire de séparation et alimentée en vibration.

On mesure le temps nécessaire au béton pour s'écouler dans la partie que sépare la paroi mobile et atteindre le trait repère [23] ;

- ☞ Béton mou très fluide : $t \leq 10s$
- ☞ Béton très plastique : $t \approx 15 s$
- ☞ Béton de bonne ouvrabilité : $20s \leq t \leq 30s$
- ☞ Béton peu maniable : $t \geq 30 s$

➤ **Dosage en eau :**

Le dosage en eau est un élément capital en matière d'ouvrabilité du béton. Bien qu'il soit nécessaire, son augmentation entraîne une baisse des qualités intrinsèques du béton : diminution des résistances mécaniques, augmentation du retrait, de la porosité et de la perméabilité,... C'est pour quoi les chercheurs et laborantins essayent toujours de trouver un compromis entre la maniabilité et les autres qualités du béton. Chose qui n'est pas évidente, surtout lors qu'il s'agit de déterminer la quantité réelle d'eau dans le mélange. Puisque les granulats ne sont pas totalement secs lors de leur utilisation. Pour connaître la quantité d'eau apportée par les granulats, plusieurs méthodes sont proposées tel que : le chauffage d'un échantillon humide à une température de 100°C, le brûlage à l'alcool, la pesée hydrostatique, l'extraction de l'eau par distillation, la mesure de la résistance électrique du sable mouillé. [49]

3- La durabilité :

Le choix des proportions d'un béton ne doit pas satisfaire les conditions de maniabilité et de résistance seulement, il doit aussi garantir une durabilité convenable dans le temps. Certes à l'heure actuelle il n'existe aucune approche générale permettant de garantir la durabilité sous n'importe quelles conditions d'exposition à cause de leurs grandes diversités. En se basant sur des critères de durabilité spécifique nous pouvons tout de même arriver à trouver des solutions convenables et efficaces à des cas d'expositions spécifiques. Des textes réglementaires existent pour remédier à quelques cas précis d'exposition tel que : La norme ACI 318 89 (révisée en 1992) qui limite le rapport (E/C) et la résistance en compression minimale.

Tableau 17 : Spécification de la norme ACI 318 89 concernant les bétons exposés à des cycles de gel-dégel.

<i>Condition d'exposition</i>	<i>Rapport (E/C)</i>	<i>Résistance en compression minimale (Mpa)</i>
Exposé à l'eau lorsqu'une faible perméabilité est nécessaire	0.50	28
Exposé au gel-dégel en atmosphère humide ou au sel fondants	0.45	31
Exposé aux chlorures provenant des sels fondants où a l'éclaboussement par l'eau de mer ou aux embruns marins avec protection contre la corrosion nécessaire	0.40	34

Les normes françaises P18 011 (1992) et P 18 305 (1996) définissent les différents environnements suivant un classement auquel correspond dans chaque cas des limites sur le dosage en liant, le rapport (E/C) et les caractéristiques minimales [48].

C- Quelques méthodes de formulation de béton :

Entre partisans de la granularité continue et la granularité discontinue les chercheurs formulateurs se sont succédés avec chacun son approche. Chacun essaye de justifier ces raisons, or si pour une granularité continue on favorise des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité. Une granularité discontinue conduit à des bétons à maximum de gros élément et à minimum de sable, certes plus résistant mais moins ouvrables. Dilemme éternel auquel est toujours confrontée la formulation du béton [49].

1- Méthode de BOLOMEY [39]:

Pour avoir une compacité du mélange sec, Bolomey propose une courbe granulométrique de référence, et qui répond à la formule :

$$P=A + (100-A)\sqrt{\frac{d}{D}}$$

Avec ;

d : diamètre passoire,

P : pourcentage de grains passant à la passoire du diamètre d ,

A : varie de 8 à 16, sa valeur est autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

D : diamètre du plus gros granulat

Le principe est de construire une composition granulaire à partir des classes de granulats disponibles et dont la courbe granulométrie soit le plus proche de possible de la courbe de référence.

Cette méthode aboutit généralement à une granularité continue.

2- Méthode d'ABRAMS [39]:

Le principe de cette méthode est de construire une composition granulaire, ciment compris, basée sur l'obtention d'un module de finesse global, à partir des différents modules de finesse des classes de granulats disponibles.

Abrams propose des valeurs optimales du module de finesse globale en fonction du dosage en ciment et qui sont supposées réduire au minimum les vides dans le mélange.

3- Méthode de FAURY [51]:

La courbe de référence proposée par FAURY favorise une loi de granulation de type continu. Il s'inspira d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen.

Loi de fonction de $\sqrt[5]{D}$, FAURY adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$ pour avoir une courbure linéaire, puis adopta un point de brisure pour distinguer les grains fins et moyens des gros.

Ce point aura pour abscisse (D/2) et pour ordonnée la valeur Y qui se calcule par la formule suivante :

$$Y = A + 17^5 \bar{D} + \frac{R-B}{0,75}$$

Avec ;

B : varie entre 1 et 2 selon que le béton est fermé ou mou,

R : rayon moyen du moule ; R=surface / périmètre,

A : valeurs données par le tableau 14 suivant .

Tableau18: différentes valeurs de A. [49]

	Sables et graviers roulés usuels	Sables roulés et graviers de broyage usuels	Sable et graviers de broyage usuels
Consistance fluide, mise en œuvre sans serrage	32 et au-dessus	34 et au-dessus	38 et au-dessus
Consistance fluide pour faible serrage	30-32	32-34	36-38
Consistance molle pour serrage moyen	29-30	30-32	34-36
Consistance ferme pour serrage soigné	26-28	28-30	32-34
Consistance très ferme pour serrage puissant	24-26	26-28	30-32
Consistance de terre humide, serrage très puissant	22-24	24-26	28-30
Serrage exceptionnellement puissant	< 22	< 24	< 28

CHAPITRE 06 : LE BETON RENFORCE DES FIBRES

I- INTRODUCTION :

Depuis l'antiquité, les fibres naturelles ont été utilisées comme renfort dans diverses applications (habitation, poteries...). Cependant, c'est seulement ces vingt dernières années qu'elles suscitent un engouement dans le secteur des composites à base cimentaire, que ce soit dans le domaine du bâtiment ou en science des matériaux [52].

II- DEFINITION DE BETON DE FIBRES

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

III- COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS DE FIBRES

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

- Les propriétés des fibres qui dépendent de :
 - La nature de fibre (acier, verre, polymère ou végétale)
 - L'élanement des fibres.
 - La quantité d'incorporation des fibres.
- Les propriétés de la matrice qui dépendent aussi :
 - De la qualité et la quantité de ciment.
 - De la qualité et les dimensions des granulats.
 - Du rapport E/C.
- Le comportement de la bande d'interface qui dépend :
 - De la longueur des fibres.
 - De la distribution des fibres, leur orientation et leur espacement.
 - De type de cure.

- Du mode de chargement.
- Les conditions de la mise en œuvre qui dépendent :
 - Du mode de remplissage du béton (pression, vibration).

Dans un premier temps, nous allons présenter le comportement des éléments qui constituent ce matériau composite à savoir les fibres et la matrice de béton. Par la suite sera donné, le comportement à l'interface fibre-matrice, la microstructure des bétons de fibres, et en fin la durabilité. [53]

A- Comportement en traction des fibres [54] :

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

La Figure19 présente quelques courbes expérimentales (contrainte déformation) données par SWAMY. Selon ces courbes nous constatons que les fibres testées (Canne de sucre, Jute ou Noix de coco) ont un comportement presque élastique et linéaire au démarrage de l'essai ensuite un comportement plastique jusqu'à la rupture.

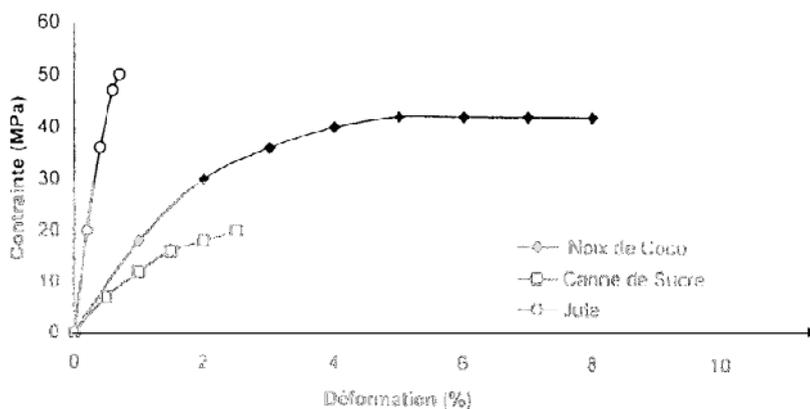


Figure 19 : courbe contrainte déformation de quelques fibres végétales.

B- Comportement de la Matrice

Le comportement de la matrice des bétons de fibres est similaire à celui du béton classique qui est assez compliqué et le débat est relativement ouvert quant au choix des théories et des méthodes de calcul pour sa modélisation. La rupture des bétons peut être caractérisée par la naissance des propagations puis la coalescence des macro fissures qui conduisent à la formation des macro fissures et à la ruine finale. [55]

C- Comportement du Matériau Composite

Le comportement du matériau composite de béton de fibres est très compliqué du moment que c'est le résultat du comportement de deux matériaux non homogène, comme nous avons vu précédemment. Dans ce qui suit nous allons examiner le comportement de ces matériaux sous différentes sollicitation.

1- Comportement en Compression

La plupart des auteurs affirment que la résistance à la compression des bétons de fibres est en générale légèrement inférieure à celle du béton classique et spécialement pour les fibres végétales voir figure 20 [56, 57], Certains chercheurs [56,58] révèlent qu'une orientation adéquate des fibres métalliques a permis d'améliorer la résistance à la compression des bétons de fibres par rapport au béton classique d'environ 15%.

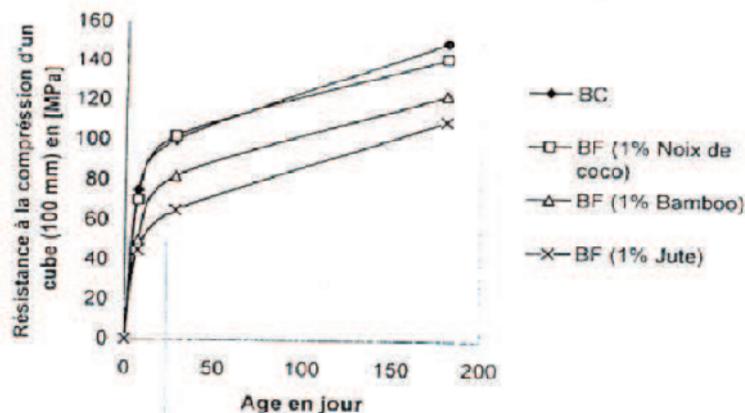


Figure 20: Résistance à la compression de quelques bétons de fibres végétales en fonction de la durée [54].

Le comportement et le mécanisme de rupture des bétons de fibres en compression a été interprété par MONGAT et AZARI [59], qui rapportent qu'en compression, la présence des fibres favorise l'apparition des micro fissures. Celle-ci se propagent rapidement et entraînent la rupture du matériau.

2- Comportement en Traction

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

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

3- Comportement en traction par flexion

Les fibres sont très efficaces dans l'amélioration de la résistance à la flexion. Le comportement en flexion des bétons de fibres est largement influencé par la nature, le pourcentage et l'orientation de fibres dans la matrice.

La figure 21 présente le diagramme flèche-effort des BF en flexion quatre points.

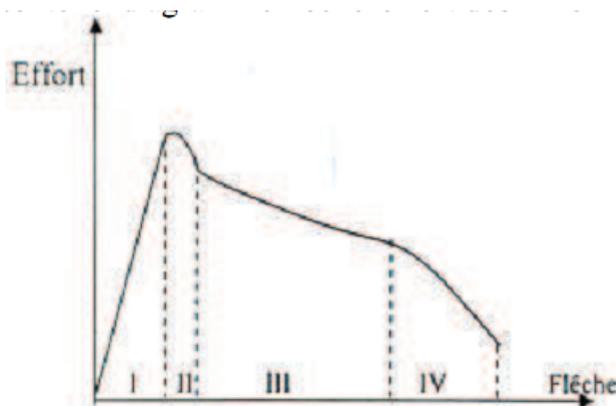


Figure 21 : Le diagramme flèche-effort des BF en flexion comporte quatre zones Norme 18-409.

- Zone I : Comportement élastique : Les fibres n'interviennent pas. Seules les caractéristiques de la matrice régissent le comportement.
- Zone II : Localisation des microfissures qui conduit à l'apparition de la première macro fissure.
- Zone III : Propagation de la macro fissure. Le dosage et l'orientation des fibres sont fondamentaux.
- Zone IV : Ouverture de la principale macro fissure de manière importante qui corresponde à une dégradation du renforcement soit par déchaussement soit par rupture des fibres.

D- Effet des fibres dans une matrice

1- Rôles des fibres dans le béton [60]

Dans les premières études, les chercheurs ont essayé, par l'incorporation de fibres dans le béton, d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion, mais les résultats obtenus n'étaient pas ceux escomptés.



Figure 22 : Fissuration dans le béton sans et avec fibres

Il est à noter que le rôle principal des fibres dans un matériau peut être lié à deux points essentiels :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme il est indiqué dans la figure 22.
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes voir figure 23.

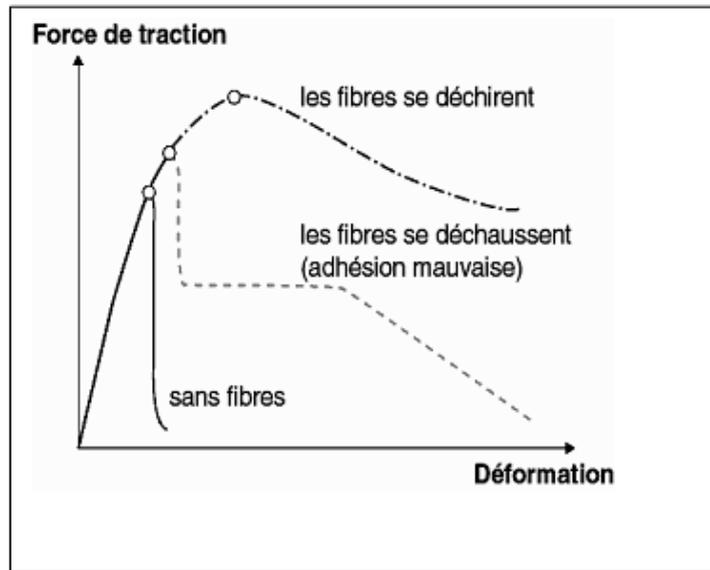


Figure 23 : Comportement de charge-déformation de béton avec fibres et béton sans fibres.

2- Influence de l'adhérence fibres-matrice [61]

L'adhérence fibres-matrice est un facteur très important vis-à-vis de l'efficacité des fibres dans la matrice. D'après Bartos (1981) ; l'adhérence entre fibres et matrice est assurée par trois liaisons :

- Une liaison élastique,
- Une liaison de frottement,
- Une liaison créée par un ancrage mécanique dans le cas des fibres non rectilignes (crochets ondulatoire dentelles).

3- Mécanisme de la rupture d'une fibre dans la matrice

La résistance à la fissuration et la résistance ultime du composite dépendent du transfert des efforts matrice-fibres. Lorsque la fibre est soumise à un effort d'arrachement, le transfert des charges à l'interface s'effectue par les contraintes d'adhérence. La distribution de ces contraintes le long des parties ancrées des fibres associées aux modèles de comportements utilisés peut être éventuellement confirmée par des essais peuvent nous ramener à déterminer des relations entre divers paramètres géométriques et mécaniques utilisable et permettre de définir et déterminer les coefficients d'efficacité des fibres [60].

IV- MICROSTRUCTURE DE BETON DE FIBRES [51, 62, 57]

Pour mieux comprendre le comportement mécanique, physique ou chimique des bétons de fibres, il est important de connaître leur microstructure.

En effet, il est évident que les propriétés du BF dépendent directement de la nature, la quantité des fibres et la matrice du béton ainsi que l'adhérence entre eux.

L'étude microstructurale des BF nous permet aussi d'élucider sa structure chimique, et de comprendre son comportement mécanique et son mode de rupture.

V- DURABILITE DES BETONS DE FIBRES [63, 64, 65]

La durabilité à long terme des BF est un problème qui se pose aux fabricants et aux utilisateurs. Elle dépend de la nature et du traitement des fibres de la qualité des ciments utilisés ainsi que du mode de conservation.

Plusieurs essais effectués à long terme sur les résistances à la traction et à la flexion des BF d'acier et de polymère, révèlent que ces types de béton présentent une bonne durabilité dans les milieux secs et humides.

TOLÉDO et al. ont étudié l'effet des cycles de séchage mouillage sur la charge de rupture des matrices cimentaires renforcées par des fibres végétales de sisal et de coir. Ils ont remarqué que la charge de rupture diminue avec le temps, surtout la charge de rupture supportée par les fibres après fissuration de la matrice et après un certain nombre de cycles de séchage mouillage.

KHENFER a étudié la durabilité des ciments autoclaves renforcés de fibres cellulosiques dans différents milieux hygrométriques, il a constaté que :

➡ Pour les éprouvettes conservées à l'air ambiant du laboratoire, le module de Young et la résistance à la flexion sont presque inchangés, par contre la rupture est devenue de plus en plus fragile.

➡ Pour les éprouvettes conservées dans l'eau, il a remarqué la diminution de module de Yang et de la résistance à la flexion, par contre l'énergie de rupture des éprouvettes a augmentée.

➡ Pour les éprouvettes soumises aux cycles de séchage-mouillage, les propriétés mécaniques diminuent un petit peu à partir des dix premiers cycles.

CONCLUSION PARTIELLE

L'introduction des fibres dans une matrice béton amène une certaine ductilité au comportement mécanique du matériau, cet ajout retarde la microfissuration et permet de retenir les « morceaux » en cas de rupture accidentelle. Il a été mis en évidence une légère augmentation de la résistance à la compression et aussi et aussi à la flexion, Par ailleurs, sa résistance à la compression est généralement inférieure à celle du béton classique. Mais, sa résistance à la compression peut être légèrement améliorée par une bonne orientation des fibres dans la matrice.

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

DEUXIEME PARTIE :

PRESENTATION

DE

L'EXPERIMENTATION

INTRODUCTION :

Le renforcement des matériaux de construction, en l'occurrence les bétons et les mortiers, par des fibres est une technique, de plus en plus utilisée dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques, notamment leurs résistances à la traction et à la fissuration ainsi que la ductilité. Le rajout de fibres pour renforcer est une technique très ancienne, en effet, nos prédécesseurs utilisaient la paille pour renforcer l'argile, et le crin (poils de chevaux) pour renforcer différents mortier ou le plâtre.

Des fibres de toutes natures ont été expérimentées. Les plus répandues sont les fibres d'amiantes, de verre, d'acier, de plastique, de carbone et végétales.

Dans la présente étude, nous nous intéressons à l'utilisation des fibres cellulosiques pour le renforcement du béton. Ces fibres proviennent des plantes. Les fibres de bambou sont retenues pour des raisons de disponibilité et d'économie. Elles proviennent d'une source renouvelable et peuvent être intégrées d'une façon rationnelle dans le domaine de la construction.

Nous avons procédé en premier lieu à des essais de caractérisation en laboratoire du Département Science des Matériaux de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et à une collecte d'informations à partir de la documentation disponible en second, et ce, pour pouvoir réunir toutes les données et les classer dans un tableau récapitulatif.

Le béton de fibres est constitué de :

- Liant (ciment ou chaux) ;
- Eau ;
- Sable ;
- Fibres.

CHAPITRE 07: MATERIAUX ET MODE D'ESSAIS

I- INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous étudions les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition des bétons classiques et de fibres à savoir : la masse volumique, la granulométrie, la propreté, la composition chimique et minéralogique ainsi que d'autres propriétés physiques.

II- MATIERES PREMIERES :

A- Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ-CEMII/A 42.5. Les résultats des essais de la masse volumique apparente et absolue du ciment utilisé sont :

- La masse volumique apparente $\rho_a = 1020\text{Kg/m}^3$.
- La masse volumique absolue $\rho_{ab} = 3034\text{Kg/m}^3$.

1- Surface spécifique :

Selon la norme EN-196-6, la surface spécifique des ciments est mesurée par comparaison avec un ciment de référence dont la surface spécifique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de ciment, plus la surface spécifique de cette poudre est importante plus le temps mis par l'air, pour traversé la poudre, est long. Dans les conditions normales la surface spécifique est proportionnelle à \bar{t} . La surface spécifique du ciment utilisé est de $3891\text{cm}^2/\text{g}$.

2- Temps de prise

Il constitue une indication précieuse pour la mise en œuvre des bétons normaux. Il varie en fonction du ciment (à prise lente ou rapide), de la finesse de mouture qui favorise l'hydratation et la température qui influe sur la vitesse des réactions chimiques et accélère la prise ; il est généralement supérieur à 90mn pour les ciments courants à une température de 20°C. L'essai de prise est réalisé par l'appareil de Vicat. Selon la norme NF P15-431.

Le temps de prise du ciment est :

➔ Début de prise : 02h 08.

➔ Fin de prise : 03h 04.

3- Caractéristiques chimiques

La composition chimique du ciment est présentée dans le tableau 19.

Tableau 19 : Pourcentage des composants chimiques essentiels du ciment.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PF	Total
%	21,90	5,73	60,18	1,85	3,13	2,29	0,19	0,83	4,07	97,84

On remarque que le ciment utilisé contient des pourcentages appréciables en chaux et en silice.

Pourcentage des Alcalis = Na₂O + 0,658 K₂O = 0,736 > 0,6%.

Mais il n'y a pas de risque de réaction alcalis-granulats car ces derniers ne sont pas des calcaires dolomitiques.

4- Composition minéralogiques :

Selon les normes NF P15-301, le clinker est obtenu par la cuisson des matières premières constitué principalement de calcaire et d'argile, la composition chimique du ciment entrant dans la composition du ciment composé est donnée par le tableau 20.

Tableau 20 : Composition minéralogique du ciment.

Elément	Silicate tricalcique 3CaO, SiO ₂ (C ₃ S)	Silicate bicalcique 2CaO, SiO ₂ (C ₂ S)	Aluminate tricalcique 3CaO, Al ₂ O ₃ (C ₃ A)	Alumino-ferrite tétracalcique 3CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ (C ₄ AF)
Moyenne en %	56,60	22,98	9,87	8,25

5- Indice d'hydraulicité :

L'indice d'hydraulicité ou l'indice de vicat, est le rapport de la fraction acide du ciment à la fraction basique.

$$I = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO}) = 0,44 < 0,5$$

Pour le ciment utilisé $I = 0,44 < 0,5$ notre ciment est dit portland basique.

6- Propriétés physiques et mécaniques du ciment

La résistance mécanique minimale à la compression à 28jours est de 30MPa.

Tableau 21 : Les principales propriétés physiques et mécaniques du ciment

a) Caractéristiques physiques du ciment

<i>Temps de prise</i>	2h 08
<i>Temps de fin de prise</i>	3h 04
<i>Expansion de CHATELIER à chaud</i>	2.90mm/m
<i>Expansion de CHATELIER à froid</i>	1.65mm/m
<i>Surface spécifique (BLAINE)</i>	3891cm ² /g
<i>Consistance normale</i>	26.91%

b) Résistances mécaniques du ciment en MPa

Age	A la compression	A la traction par flexion
2jours	14,32	3,57
7jours	26,64	5,83
28jours	43,31	7,79

Le ciment est de classe de résistance 32.5.

B- Le sable [66, 67, 68]

Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains se disposent dans les interstices entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Ils peuvent être :

- Naturels et roulés (de rivières, de sablières, ...), de nature siliceuse ou silico-calcaire ;
- Naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- Spéciaux (lourds, réfractaires, léger) :
 - Sable de laitier ;
 - Sable d'oxydes de fer, de chromite ;
 - Sable de briques concassées.

Certains sables sont à éviter, notamment les sables très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent

des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les bétons est :

- Extra-fins : jusqu'à 0,8mm (en tamis), soit 1mm (en passoire) ;
- Moyen : jusqu'à 3,15mm ;
- Gros : jusqu'à 5mm.

Le sable que nous avons utilisé pour notre béton provient du sud-est de Madagascar.



Figure 24 : Sable siliceux de l'est de Madagascar.

1. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente du sable est la masse à l'état naturel du matériau rapportée à l'unité du volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides, elle est donnée par la formule suivante :

$$\rho_a = M_t / V_t$$

M_t : masse totale de l'échantillon et V_t : volume total d'échantillon.

On a trouvé pour notre sable siliceux : $\rho_a = 1540\text{Kg/m}^3$.

2. Masse volumique absolue

C'est la masse par unité de volume de la matière solide qui constitue le sable sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains, elle est donnée par la formule suivante.

$$\rho_{ab} = M_t / V_a$$

M_t : masse totale d'échantillon et V_a : volume absolu d'échantillon.

Pour le sable utilisé on a : $\rho_{ab} = 2500\text{Kg/m}^3$.

3- Equivalent de sable (E.S)

La propreté du sable est déterminée par la mesure de l'équivalent de sable (E.S) d'après la norme NF P 18-541. Cet essai est défini par la norme NF P 18-598 il est utilisé pour évaluer la propreté du sable entrant dans la composition du béton, par conséquent ; la proportion des impuretés argileuses contenues dans le sable par rapport à la quantité des grains solides sableux. Il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Il consiste de laver un poids défini de sable dans une solution lavante. Après agitation, on laisse le mélange se décanter pendant 20mn.

Tableau 22 : Propreté du sable norme NF P 18-541

<i>E.S</i>	<i>Commentaire</i>
$E.S < 60$	Sable argileux risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour les bétons de qualité.
$60 \leq E.S < 75$	Sable légèrement argileux, de propreté admissible pour les bétons de qualité courante, à moins de craindre particulièrement le retrait.
$75 \leq E.S < 85$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses, convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité, valeur optimale à vue 75.
$E.S > 85$	Sable très propre l'absence presque totale des fines argileuses, risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton, qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

La figure 25 représente cet essai de l'équivalent de sable.

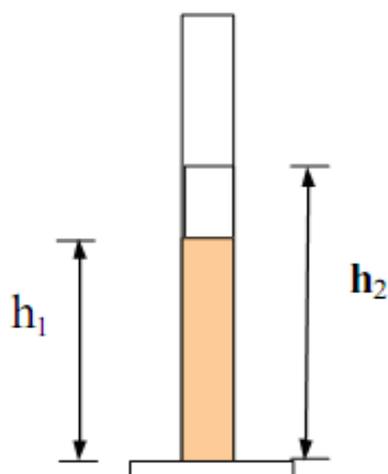


Figure 25 : Essai d'équivalent de sable visuel

Avec ;

h_1 : hauteur des grains solides sableux ;

h_2 : hauteur des grains solide sableux + des impuretés argileuses

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine :

→ E. S_v (équivalent de sable visuel) ;

→ E. S_p (équivalent de sable au piston).

On en déduit l'équivalent de sable qui est par convention :

$$E.S = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

Tableau 23 : Résultats d'équivalent de sable. Norme NF P 18-541

<i>Désignation</i>	<i>Equivalent de sable</i>	<i>Spécification du béton hydraulique</i>
Sable	68%	>65%

On remarque que $65\% < E.S_v < 75\%$. Donc notre sable est légèrement argileux, mais utilisable pour les bétons courants.

4- Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF P 18-560 EN 933-2.

L'analyse granulométrique est effectuée après l'élimination des particules supérieures à 5mm et inférieures à 0,02mm avec le passage de sable sur les tamis (5mm et 0,02mm).

Tableau 24 : Résultats de l'analyse granulométrique

D [mm]	0,08	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	5
Module AFNOR	20	23	26	29	32	35	38
CLI	0	3	15	30	50	80	94
CLS	10	20	40	70	90	98	100
Sable	3	17	38	62	85	96	100

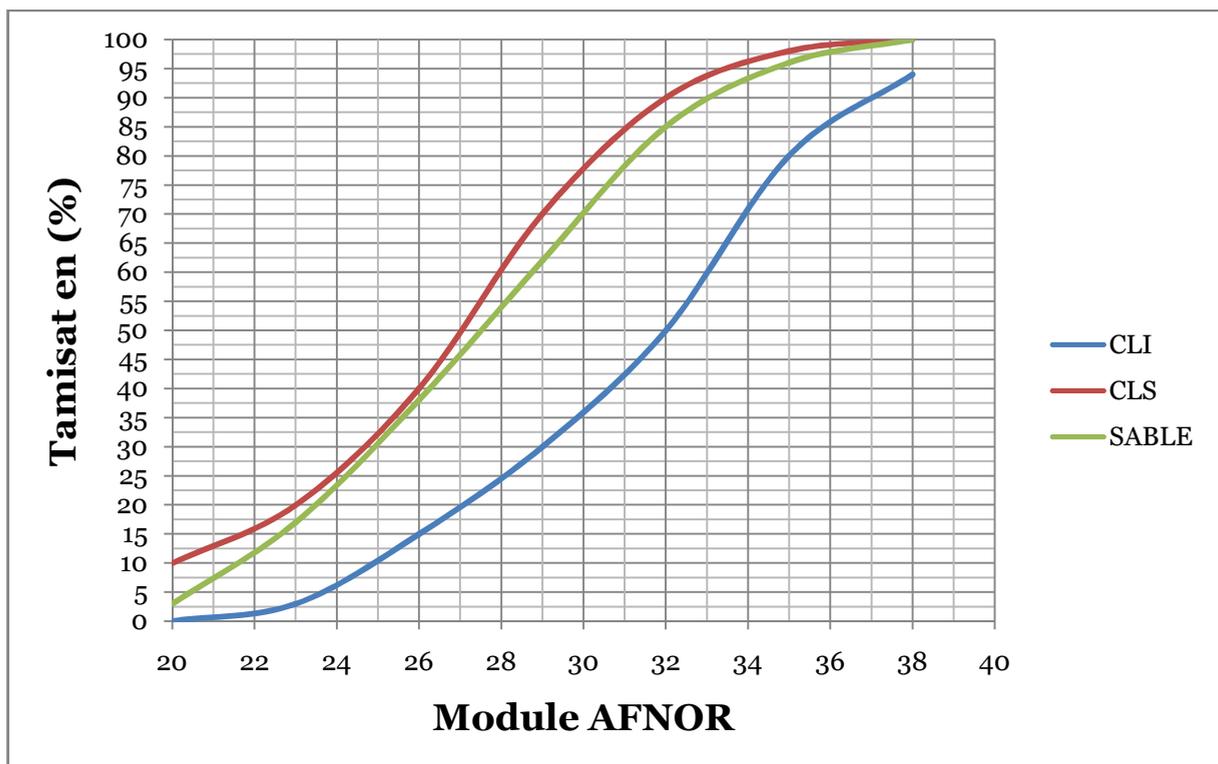


Figure 26 : Courbe granulométrie du sable

Avec ;

CLI : Courbe limite inférieure

CLS : Courbe limite supérieure

5- Module de finesse

Il présente le caractère plus ou moins fin du sable. Il correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenée à l'unité pour la série normalisée de tamis d'ouvertures (exprimée en mm) :

0,16–0,315–0,63–1,25–2,5–5 ou en module AFNOR 23–26–29–32–35-38

$$M_f = \frac{\text{refus}}{100}$$

$$M_f = \frac{83+62+38+15+4+0}{100}$$

$$M_f = 2,02$$

Nous pouvons dire que le sable est moyen à granulométrie étalée et qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons ordinaires.

Le coefficient d'uniformité de ce sable est $CU = 0,19$

avec ;

$$CU = D_{10} / D_{60}$$

Comme $CU < 2$, ceci confirme la granularité étalée du sable.

Dans notre cas, $D_{10} = 0,115$ (module 21,6) et $D_{60} = 0,602$ (module 28,8).

6- Analyse chimique sommaire :

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

- Equivalent de sable : cette valeur caractérise un sable propre
- Analyse chimique sommaire : les analyses chimiques montrent que le sable analysé présente un fort pourcentage d'insoluble ce qui montre que le matériau est issu d'une roche dure.

Tableau 25 : Résultats d'analyse chimique sommaire.

Désignation	Insolubles	Sulfates	Carbonates	Chlorures
Sable	95,90%	Traces	3,25%	Traces

C- Eau de gâchage

L'eau utilisée est celle du robinet de la ville d'Antananarivo.

L'eau sert d'une part à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte. Dès que l'eau entre en contact avec le ciment anhydre, réagit pour se combiner et former les hydrates de ciments.

L'analyse chimique de l'eau a été effectuée au laboratoire de traitement des eaux et elle a donné la constitution suivante ;

Tableau 26 : Composition chimique de l'eau en mg/l

Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	pH	Salinité
242	125	31	536	755	14,5	755	124	7,75	2799

On remarque que l'eau ne contient pas d'éléments nocifs en pourcentage important et elle a une faible salinité.

D- Les fibres

Les fibres utilisées dans le projet sont les fibres de bambou. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des bétons.

1- Présentation de la fibre de bambou

Nos essais sont menés sur le matériau composite béton fibre. La fibre de bambou est retenue pour raison de disponibilité et économique. Le végétal croit naturellement sans apport de traitement sylvicole particulier.

Afin d'utiliser ces fibres de bambou, une phase de défibrage préalable qui constitue en la préparation d'une pâte cellulosique s'avère nécessaire.

2- Analyse des matières organiques

L'analyse des matières organiques des fibres de bambou a donné les proportions de cellulose, d'hémicellulose et de lignine illustrée sur le tableau 27.

Tableau 27 : Composition chimique de fibres de bambou [34]

Composants	Proportion en pourcentage (%)
Cellulose 1.	47,1
Lignine	20,2
Hémicellulose	16,1
Pectine *	9,6
Cendre	1,1
Cires	5,9
Silice	0,7

3- Analyse des matières minérales

L'analyse minérale des cendres de la fibre de bambou a donné les résultats illustrés dans le tableau 28.

Tableau 28: Analyse minéralogique de fibre de bambou

Elément	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	PF (perte au feu)
%	34,13	6,57	4,64	2,51	1,47	1,31	47,5

Nous constatons que les fibres utilisées contiennent un taux remarquables de SiO₂ et de CaO. La présence de ces dernières dans le bambou est due la fixation des poussières, des vents, de sable sur la cuticule.

4- Biométrie des fibres

Les dimensions des fibres, et spécialement la longueur, sont largement liées à la qualité de la pâte.

Pour notre cas, nous avons utilisé une méthode manuelle à l'aide d'un microscope. Les caractéristiques dimensionnelles moyennes des fibres de l'échantillon analysé se résument dans le tableau 29.

Tableau 29 : Dimensions géométriques de la fibre de bambou

Longueur L [mm]	2,4
Largeur D [µm]	20
L/D	120
Diamètre moyen [µm]	15-25

5- Propriétés physiques de fibres de bambou

Les valeurs représentantes des propriétés physiques de fibres de bambou sont présentées dans le tableau 30 ci-dessous ;

Tableau 30 : Propriétés physiques de fibres de bambou

Contrainte à la rupture [MPa]	500
Module d'élastique [GPa]	30
Déformation [%]	~ 2
Densité [g/cm³]	1,4

III- MATERIELS UTILISES

Les matériels utilisés sont :

- Une balance de précision ;
- Moule 4x4x16 ;
- Machine multifonctionnelle du type TESTWELL ;
- L'éprouvette 4 X 4 X 16 cm³.



Photo 03 : Machine multifonctionnelle du type TESTWELL

IV- CONDUITE DES ESSAIS

Les essais à réaliser sont :

- Essai de traction par flexion à « 28jours »
- Essai de compression à « 28 jours ».

CHAPITRE 08 : METHODE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

I- INTRODUCTION :

Le béton de fibres végétales est un matériau composite qui se compose de deux matériaux non homogènes à savoir le béton et les fibres végétales. Les qualités fondamentales du béton de fibres sont largement marquées par divers facteurs tel que: la composition du béton classique, le dosage et les dimensions des fibres, le malaxage, la maniabilité, la mise en place, la vibration, les dimensions de l'échantillon ainsi que le mode et la vitesse de chargement.

Dans ce présent chapitre, seront exposées, la préparation des fibres végétales de bambou, en outre, nous allons donner les modes opératoires des différents essais réalisés dans la partie expérimentale, dans le but d'une bonne interprétation des différents résultats expérimentaux sur les bétons classiques et fibrés.

II- PREPARATON DES FIBRES

A- Préparation de la tige :

Les bambous sont tout d'abord coupés en morceaux de 10 à 15cm de large, le nœud et le tégument sont éliminés (photo 04). Puis, ces morceaux sont lavés à grande eau. Ensuite, ils sont séchés à vide. Enfin, ils sont fendus en minces lamelles d'épaisseur de 1 à 1,5cm.



Photo 04: Photographie des morceaux de bambou.

B- Préparation de la pâte :

Il existe deux principales familles de procédés pour extraire les fibres de cellulose à partir du bambou : le procédé mécanique et le procédé chimique. On s'est intéressé dans ce mémoire au procédé chimique.

La qualité de l'interface fibre matrice est importante pour l'utilisation des fibres naturelles comme fibre de renfort pour les composites Il est très souvent nécessaire de modifier la surface des fibres pour optimiser l'interface. Les méthodes de modifications sont différemment efficaces en ce qui concerne l'adhésion entre la matrice et les fibres [69, 13, 70,29].

La méthode chimique réduit juste un peu le diamètre de la fibre et modifie les fibres de renfort.

Les fibres cellulosiques ont été obtenues par la méthode de la mise en pâte. Cette méthode s'opère en deux étapes : **La cuisson et le lavage.**

1- La cuisson :

C'est l'opération d'effectuer une libération des fibres cellulosiques en solubilisant la lignine et l'hémicellulose [19,57]. Elle se fait en deux phases :

- l'hydrolyse en milieu acide dilué et chaud ;
- l'hydrolyse en milieu basique dilué et chaud.

a- l'hydrolyse à l'acide dilué et chaud

a/1 But :

Ce type de traitement vise à solubiliser les hémicelluloses (source en ses sucres monomères «pentoses »).

A l'issue de ce traitement l'effluent liquide renferme des sucres provenant de l'hydrolyse des hémicelluloses, le résidu renferme la partie cellulosique et les lignines.

a/2 Mécanisme de l'hydrolyse acide des hémicelluloses :

L'hydrolyse acide des hémicelluloses est une réaction typique des polysaccharides et ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau et sous catalyse acide. Ce traitement présente trois étapes successives définies par Feriget et Wegener :

- ➔ Une protonation rapide de l'oxygène et de la liaison glycosidique (I) ;
- ➔ Un transfert lent de la charge positive au carbone et conduisant à la formation de l'ion carbonium et la rupture du lien glycosidique.
- ➔ Une attaque rapide de l'ion carbonium par l'eau pour donner un sucre libre et reformer le catalyseur (III).

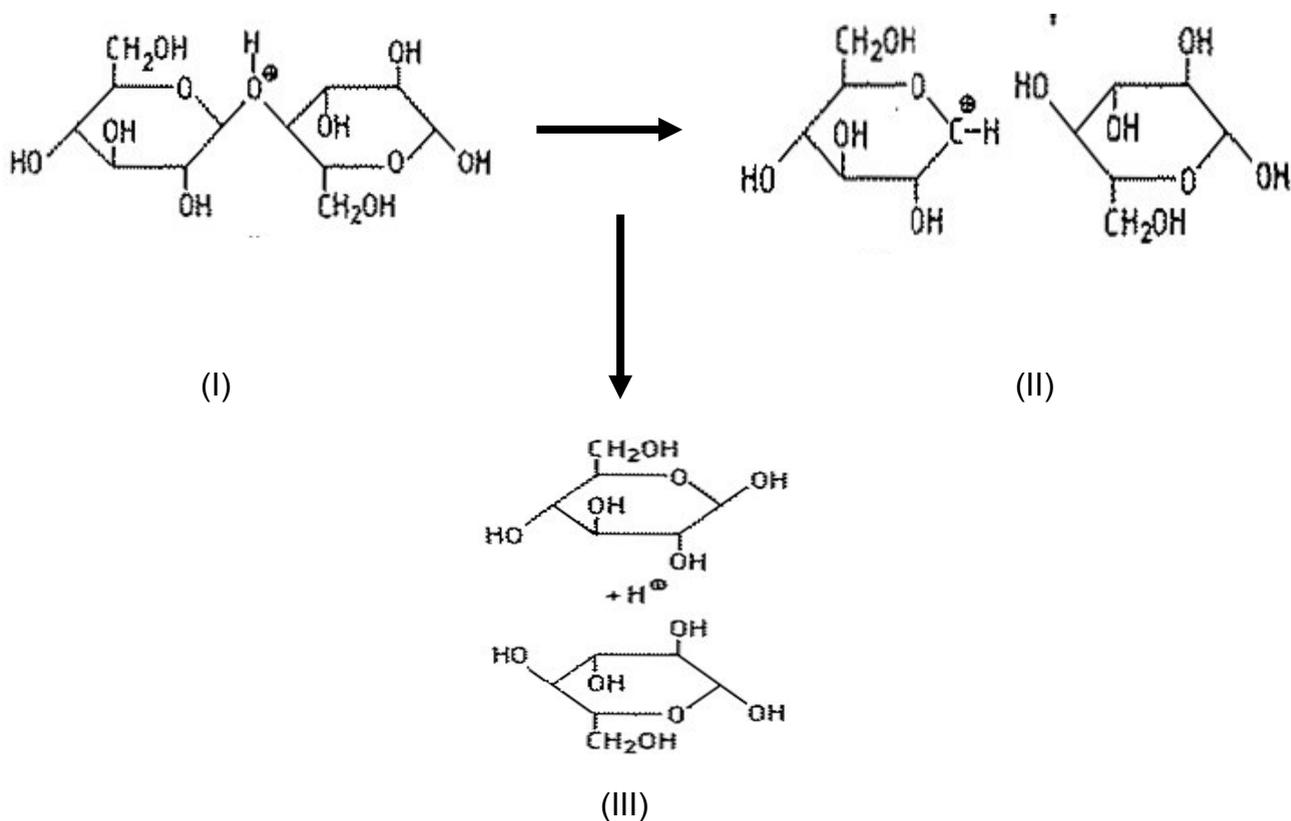


Figure 27 : Les trois étapes de l'hydrolyse acide des hémicelluloses.

a/3-Conditionnement du milieu réactionnel

Le milieu réactionnel est caractérisé par la concentration de l'acide utilisé, le temps de cuisson, la température et surtout la structure du substrat. La réaction sous pression, est nécessaire pour l'hydrolyse rapide (quelques minutes). Pour avoir une idée, il est nécessaire de présenter ci-dessous les conditions d'hydrolyse à l'acide dilué, réalisée en Afrique sur les tiges des cyperus (fibres longues) et les tiges de manioc (fibres courtes) :

- Solution aqueuse d'acide nitrique à 7,5%.
- Temps de séjour de 4heures (pour le manioc)

et 2heures30 minutes (pour le cyperus) ;

- Température : 85°C ;

Nous utilisons dans notre étude une partie de ces conditions, c'est-à-dire ;

Fixons la température à 85°C mais faisons varier la concentration acide et le temps de la réaction pour déterminer l'optimum des conditions pour d'extraction des hémicelluloses.

a/4-Optimum des conditions d'hydrolyse acide de la matière première :

➤ Protocole de l'extraction acide :

Le protocole de la détermination de l'optimum des conditions de l'hydrolyse acide est décrit ci-après :

☞ Dans une série de 10 béchers : B₁, B₂, B₃, B₄, B₅, B₆, B₇, B₈, B₉, B₁₀ mettre 10g d'une matière première préalablement séchée et 20 ml d'une solution d'acide nitrique à 2,5%.

☞ Faire chauffer les béchers au bain-marie bouillant.

Remuer de temps en temps le contenu de chaque bécher et noter Le temps.

☞ Au bout de 30minutes retirer le contenu du bécher B₁, le laver et sécher à l'étuve 105°C pendant 24 heures avant de peser sur une balance de précision.

☞ Effectuer la même opération au bout de :

- ◆ 1heure pour le bécher B₂
- ◆ 1heure 30minutes pour le bécher B₃
- ◆ 2heures pou le bécher B₄
- ◆ 2heures 30minutes pour le bécher B₅
- ◆ 3heures pour le bécher B₆
- ◆ 3heures 30 pour le bécher B₇

- ◆ 4heures pour le bécher B₈
- ◆ 4heures 30 pour le bécher B₉
- ◆ 5heures pour le bécher B₁₀

☞ Enfin, refaire toutes les opérations avec une solution d'acide nitrique de 5%, 7,5% et 10%.

➡ Expression des résultats :

L'extraction de l'hémicellulose conduit à une perte de poids au niveau de la matière première : la masse perdue représente la masse de l'hémicellulose solubilisée.

Les résultats regroupés dans les tableaux ci-dessous représentent les résidus et les pertes en masse de la matière première et permettent de déterminer les conditions optimales de l'hydrolyse acide de l'hémicellulose

Tableau 31 : Masse des résidus du bambou obtenue en fonction du pourcentage d'acide et du temps.

Pourcentage d'acide	2,5%	5%	7,5%	10%
Temps en mn				
30minutes	10,00g	10,00g	9,65g	9,33g
60minutes	9,99g	9,88g	9,51g	9,12g
90minutes	9,98g	9,86g	9,34g	8,85g
120minutes	9,97g	9,84g	9,22g	8,32g
150minutes	9,96g	9,81g	9,14g	7,88g
180minutes	9,91g	9,72g	9,08g	7,61g
210minutes	9,89g	9,58g	8,69g	7,53g
240minutes	9,85g	9,35g	8,36g	7,52g
270minutes	9,85g	9,04g	8,13g	7,51g
300minutes	9,82g	8,87g	7,68g	7,51g

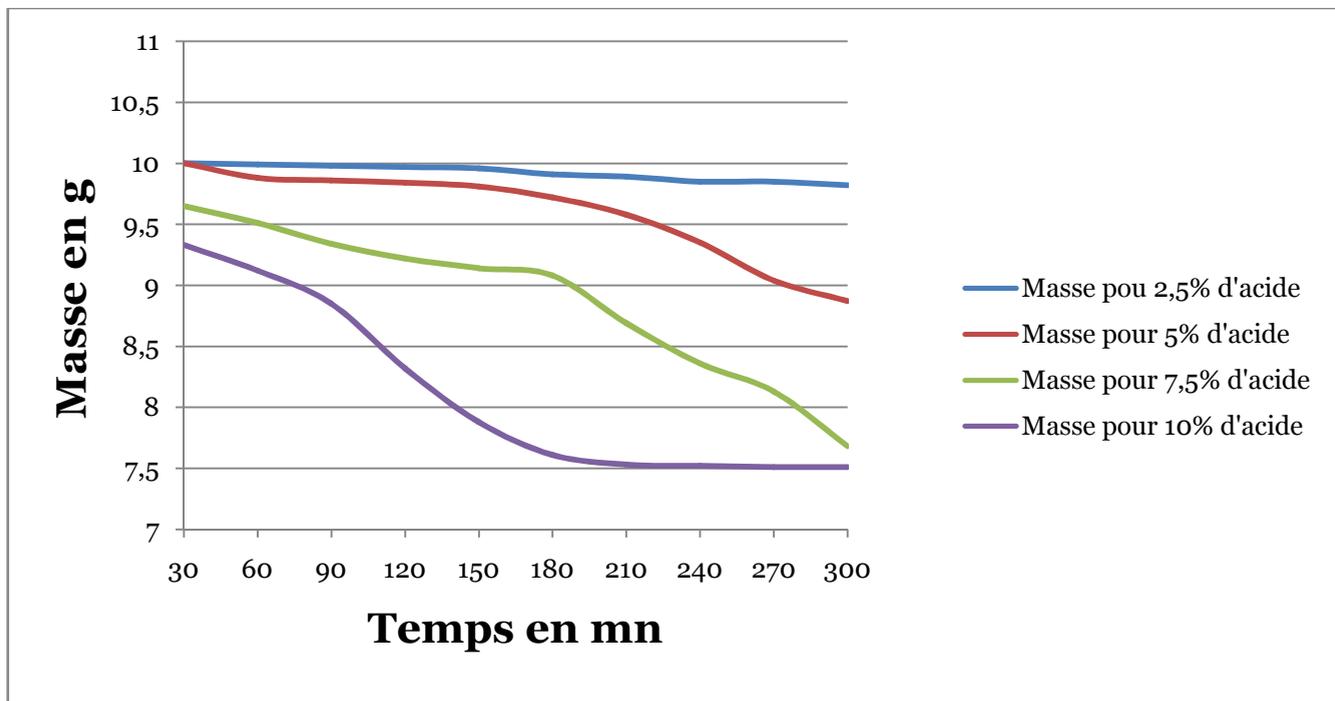


Figure 28 : Courbe de variation de la masse des résidus du bambou en fonction du pourcentage d'acide et du temps.

Tableau 32 : Perte en poids du bambou en fonction du pourcentage d'acide et du temps.

Pourcentage d'acide	2,5%	5%	7,5%	10%
Temps en mn				
30minutes	0g	0g	0,35g	0,67g
60minutes	0,01g	0,12g	0,49g	0,88g
90minutes	0,02g	0,14g	0,66g	1,15g
120minutes	0,03g	0,16g	0,78g	1,68g
150minutes	0,05g	0,20g	0,86g	2,12g
180minutes	0,09g	0,29g	0,92g	2,39g
210minutes	0,11g	0,42g	1,31g	2,47g
240minutes	0,15g	0,65g	1,64g	2,48g
270minutes	0,15g	0,6g	1,87g	2,49g
300minutes	0,18g	1,13g	2,32g	2,49g

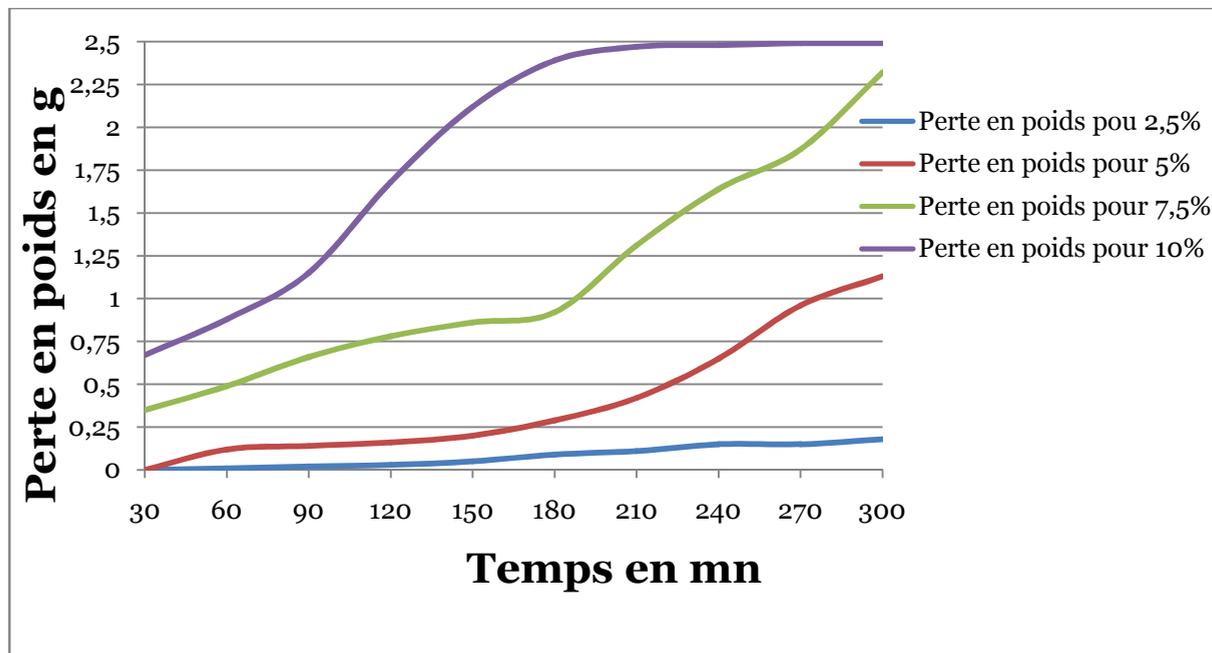


Figure 29: Courbe de variation de la perte en poids du bambou en fonction du pourcentage d'acide et du temps.

➡ Interprétation :

Ces résultats nous montrent que la perte en poids due à la solubilisation des celluloses croît avec la concentration en acide utilisé, elle est maximale lorsqu'elle commence à garder une valeur presque constante.

Les conditions optimales sont donc :

- ◆ 4h 30mn
- ◆ 10% d'acide

b- L'hydrolyse à la soude diluée et chaude :

b/1-But :

La définition standard du traitement à la soude (proposée par la norme ASTM D 1965) est la suivante :

procédé qui consiste à soumettre une fibre végétale à une interaction avec une solution aqueuse concentrée d'une base forte dans le but de provoquer un gonflement important résultant un des changements dans la structure fine, la dimension, la morphologie, les propriétés mécaniques [25], de changer la topographie de la surface des fibres, supprimer la cire, la pectine, une partie de la lignine, et l'hémicellulose ce qui est favorable à l'utilisation ultérieure des fibres comme renfort de matériaux polymères [19,57].

b/2-Mécanisme de l'hydrolyse à la soude diluée de la lignine :

L'hydrolyse de la lignine ne peut avoir qu'à une cuisson en présence de soude. Ce traitement a pour but de couper les liaisons éthers (C-O-C) entre les phénols constitutifs de la lignine et les liaisons hydrogènes entre la lignine et les carbohydrates (cellulose et hémicellulose)

b/3-Conditionnement du milieu réactionnel :

Le milieu réactionnel est aussi caractérisé par la concentration de la soude utilisée, le temps de cuisson et la température. Avant de continuer notre étude, observons les conditions d'hydrolyse à la soude diluée, réalisé en Afrique sur les tiges de cyperus (fibres longues) et les tiges de manioc (fibre courte) :

- Solution de soude à 1% ;
- Temps de séjour de 1 heure ;
- Température : 100°C.

Nous utilisons, dans notre étude, une partie de ces conditions, c'est-à-dire fixons la température à 100°C mais faisons varier la concentration en soude et le temps de réaction pour déterminer l'optimum des conditions de l'extraction de la lignine du bambou.

b/4-Optimum des conditions d'hydrolyse à la soude diluée

de la lignine :

➤ Protocole de l'hydrolyse à la soude diluée

☞ Dans une série de 6 béchers : B₁, B₂, B₃, B₄, B₅, B₆ mettre 10g de l'hydrolysât 1 (résidu obtenu par l'hydrolyse acide nitrique dans les conditions optimales) et 20ml d'une solution de NaOH à 1%.

☞ Faire chauffer les béchers au bain-marie bouillant. Remuer le temps en temps le contenu de chaque bécher et noter le temps.

☞ Au bout de 30minutes retirer le contenu de B₁, le laver sur un tamis d'ouverture 0,5mm, sécher le tamisât à l'étuve 105°C pendant 24 heures avant le peser sur une balance de précision.

☞ Effectuer la même opération au bout de :

- ◆ 1 heure pour B₂ ;
- ◆ 1 heure 30 minutes pour B₃ ;
- ◆ 2 heures pour B₄ ;
- ◆ 2 heures 30 minutes pour B₅ ;
- ◆ 3 heures pour B₆

☞ Enfin refaire toutes les opérations avec une solution de soude 2%, 3%, et 4%.

➤ Expression des résultats :

La lignine est totalement solubilisée lorsque la masse du résidu retenu sur le tamis commence à se stabiliser : la masse constante du résidu représente la masse définitive de la fibre cellulosique.

Ces résultats de l'hydrolyse à la soude diluée sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 33: Masse du résidu obtenu en fonction du pourcentage de soude et du temps.

Pourcentage de soude Temps en mn	1%	2%	3%	4%
30 mn	10,01g	8,01g	6,60g	6,57g
60 mn	9,80g	7,83g	6,58g	6,57g
90 mn	8,87g	7,00g	6,57g	6,57g
120 mn	8,03g	6,57g	6,57g	6,57g
150 mn	7,98g	6,56g	6,57g	6,57g
180 mn	7,52g	6,56g	6,57g	6,57g

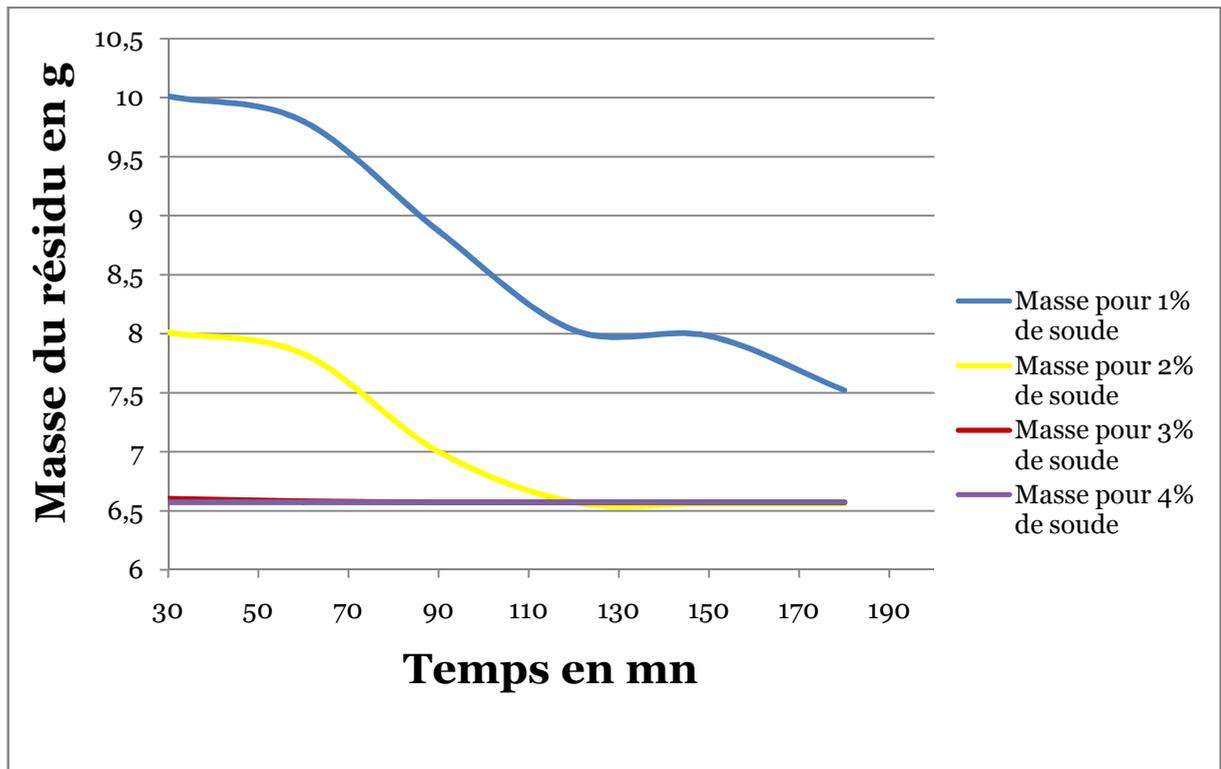


Figure 30 : Courbe de variation de la masse du résidu obtenu en fonction du pourcentage de soude et du temps.

➤ Interprétation et discussion :

Ces résultats nous montrent que la masse des résidus (fibres) obtenus par l'hydrolyse alcaline commence à se stabiliser à certaines valeurs de la concentration de soude et du temps.

La masse invariante (6,57g) est observée à partir de :

- ◆ 2 heures de cuisson dans une solution de soude à 2% ;
- ◆ 1 heure 30 minutes de cuisson dans une solution de soude 3% ;
- ◆ 30 minutes de cuisson dans une solution de 4%.

➤ Conclusion :

Les concentrations mentionnées ci-dessus sont les conditions favorables à l'hydrolyse à la soude diluée de notre matière première.

Puisque la soude entraîne une pollution non négligeable de l'environnement en sodium, nous retenons les valeurs optimales suivantes : **cuisson pendant 2 heures dans une solution de soude à 2%.**

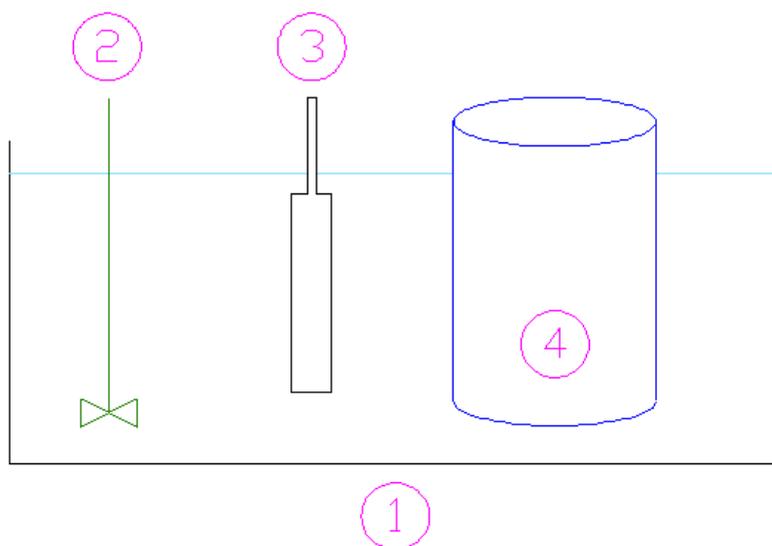


Figure 31: Schéma des matériels nécessaires à la cuisson.

Avec ;

- (1) Bain thermo staté ;
- (2) Agitateur ;
- (3) Résistance chauffante ;
- (4) Cuve de cuisson.

Ce double traitement chimique permet de séparer les fibres sans action mécanique, par suppression de la lignine, et d'atteindre de propriétés mécaniques : un module d'élasticité comprise entre 20 et 40GPa, et une résistance à la traction d'environ 500MPa.

2- Le lavage :

Une fois la cuisson terminée, on rince abondamment les fibres dans l'eau distillée jusqu'à pH neutre. L'objectif de ce lavage est de séparer les fibres des eaux résiduelles contenant les matières à rejeter. Ensuite les fibres obtenues (sous forme de pâte) sont conservées dans un flacon hermétique jusqu'à l'utilisation.

Les fibres de bambou sont ensuite séchées au soleil pendant 48 heures, puis dans une étuve à 80 - 85°C avant incorporation dans les mortiers. Après extraction, les dimensions des fibres sont mesurées par tamisage et microscopie.

Les tableaux suivants récapitulent les résultats des extractions :

Tableau 34: Teneur en fibres sèches dans la matière première :

Matière première	Masse de la matière première utilisée	Masse des fibres sèches obtenues	Teneur en fibre
Bambou	100g	47,68g	47,68%

Tableau 35 : Teneur en eau dans la pâte :

<i>Pâte</i>	Masse de la pâte utilisée	Masse des fibres sèches obtenues	Teneur en eau dans la pâte
<i>Bambou</i>	184g	47,68g	74,09%

Tableau 36 : Teneur des fibres cellulosiques dans la pâte :

<i>Pâte</i>	Masse de la pâte utilisée	Masse des fibres sèches obtenues	Teneur en fibres sèches dans la pâte
<i>Bambou</i>	184g	47,68g	25,91%

D- Modification de la surface de fibres:

L'incorporation de fibres végétales dans une matrice nécessite une connaissance préalable de la réaction des fibres dans le milieu et également d'optimiser l'interface. Pour cela, différents traitements ont été utilisés.

L'influence du traitement à la soude sur les fibres de bambou a été étudiée par spectrométrie infrarouge et par microscopie optique.

Tous les résultats montrent que le traitement par la soude conduit à une solubilisation des parties amorphes de la fibre.

Les spectres infrarouges obtenus après un temps de traitement variant entre 1 et 7 jours sont présentés par les figures 32 et 33 et les bandes associées aux fonctions les plus fréquemment rencontrées dans l'étude des polysaccharides par spectrométrie infrarouge sont rassemblées dans le tableau 37.

Tableau 37: Principales bandes infrarouges observées dans les polysaccharides [34].

Bande (cm-1)	Attribution majeure	Source
3125-3600	liaison O-H	Polysaccharides
2885	C-H (élongation symétrique)	Polysaccharides
2850	CH ₂ (élongation symétrique)	Graisses
1730-1760	Groupe ester C=O (élongation symétrique)	Xylanes (hémicelluloses)
1630-1670	H ₂ O absorbée	Eau
1505	C=C cycle aromatique (élongation symétrique)	Lignines
1425	Déformation dans le plan de groupes C-H et vibration aromatique	Pectines, lignines, hémicelluloses, pectates de calcium
1375	Déformation dans le plan de groupe CH ₂	Polysaccharides
1335	C-O cycle aliphatique	Cellulose
1240	Déformation des groupes acétyles (xylanes)	Lignine
1162	C-O-C (élongation antisymétrique)	Cellulose, hémicelluloses
895	Vibration des liaisons glycosidiques	Polysaccharides
670	C-OH de déformation	Cellulose

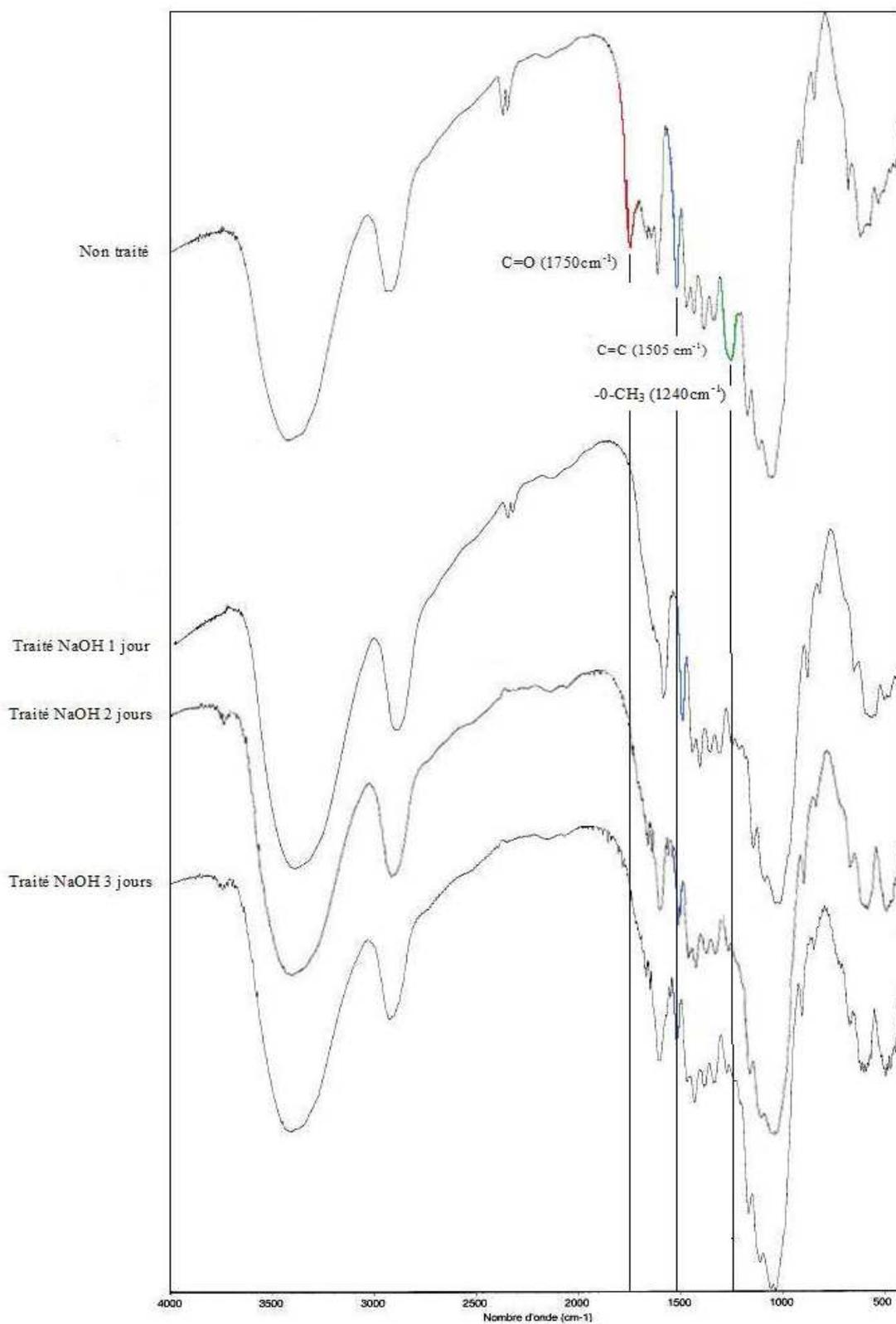


Figure 32 : Spectres IR des fibres de bambou non traitées et traitées avec la soude pendant 1, 2, 3 jours [34].

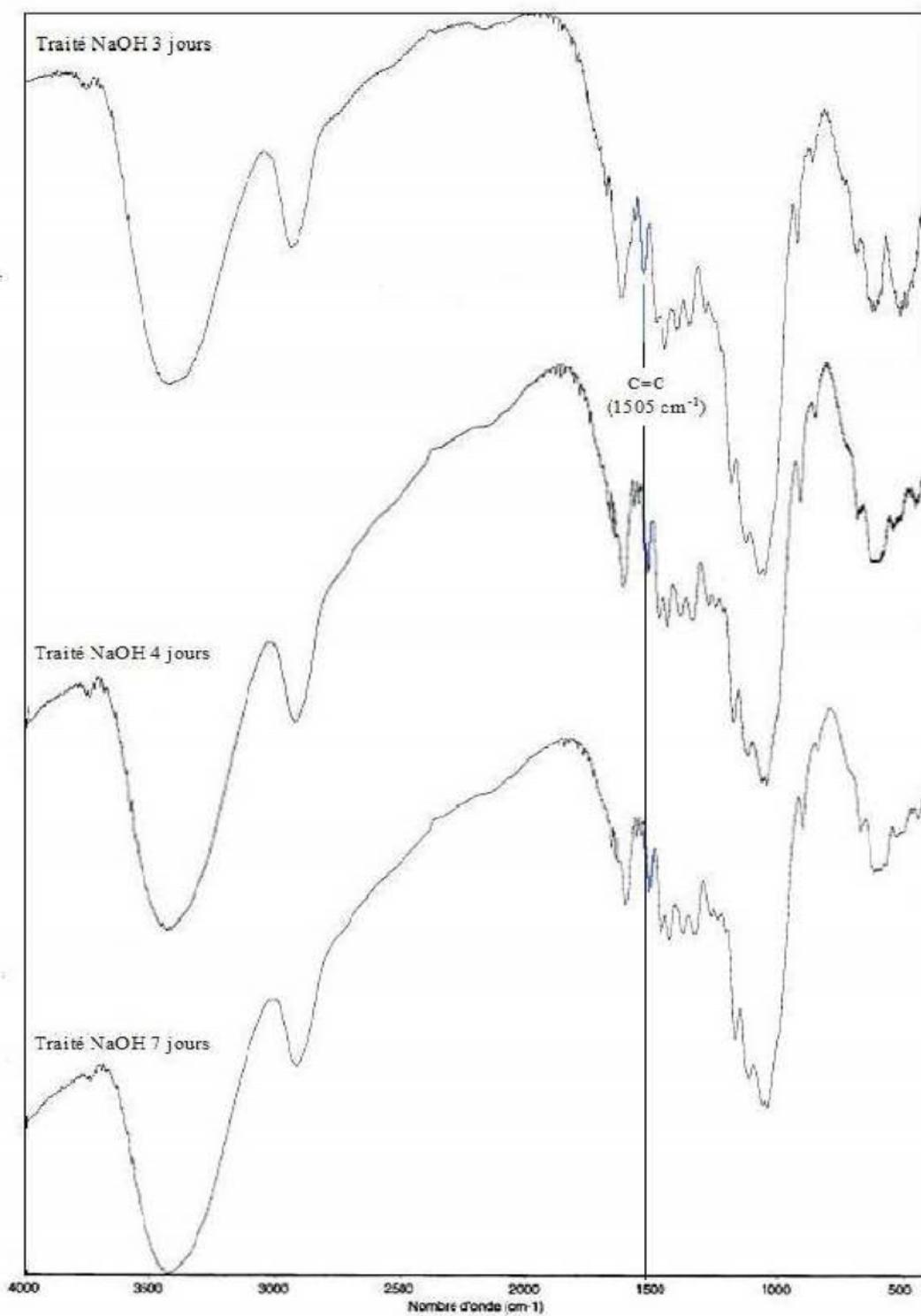


Figure 33: Spectres IR des fibres de bambou traitées avec la soude pendant 4 et 7 jours.[33]

Après 1 jour de traitement par NaOH, le pic correspondant aux groupements carbonyles C=O (1750cm^{-1}) n'est plus observé. Une explication est une hydrolyse partielle des hémicelluloses en milieu alcalin, caractérisée par la rupture des liaisons C-O-C entre deux monomères. Le pic à 1240cm^{-1} caractéristique du groupe -O-CH₃ de la lignine disparaît également, par contre l'intensité du pic à 1505cm^{-1} caractéristique du groupe C=C diminue seulement un peu.

Il ne semble donc plus y avoir beaucoup d'hémicellulose et de lignine après seulement 1Journée de traitement avec la soude. Toutefois, les pics dus à la lignine faisant partie d'un groupe de pics assez touffu il est difficile d'affirmer que le pic a totalement disparu, il peut être seulement diminué et se retrouve maintenant noyé dans le pied des pics adjacents.

Les changements morphologiques des fibres peuvent également être observés par microscopie électronique à balayage. La Figure 34 présente des images obtenues en microscopie optique sur des fibres non traitées et des fibres traitées pendant 3 jours dans la solution de soude à température ambiante. On peut voir que les fibres non traitées présentent beaucoup plus de matières en surface. La surface des fibres a également été étudiée en microscopie électronique à balayage (Figure 34). La surface des fibres brutes est recouverte par les graisses, les cires ou encore des polysaccharides tels que les lignines, hémicelluloses ou pectines et donc beaucoup plus rugueuse. Que ce soit en microscopie optique ou électronique, les fibres traitées ont un diamètre inférieur à celui de fibres non traitées et leur rugosité de surface est réduite du fait de la dissolution partielle des parties amorphes des fibres [33].

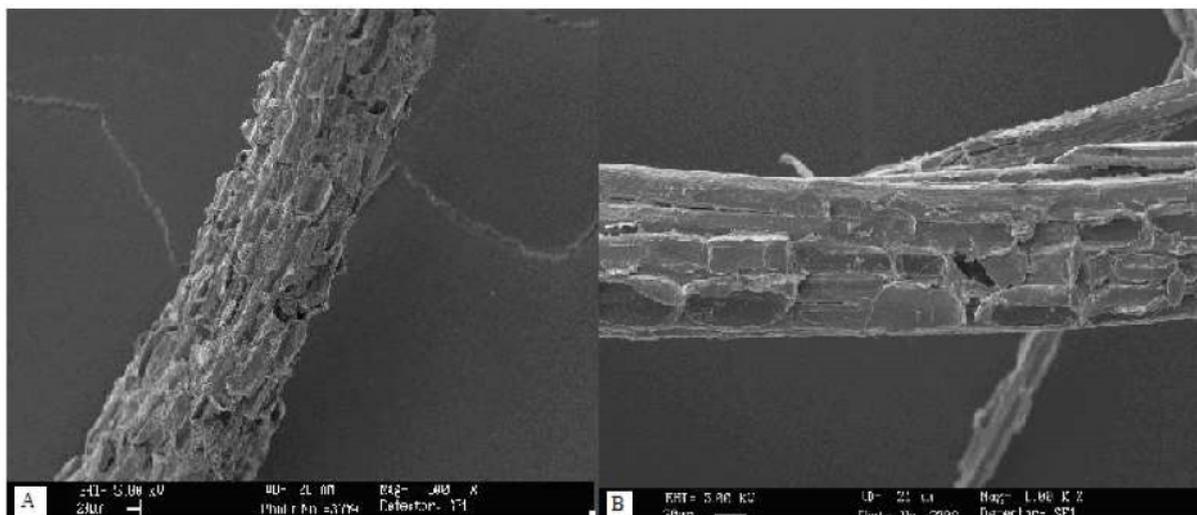


Figure 34 : Fibres non traitées (A) et traitées avec la soude (B) observées en microscopie électronique à balayage [33]

CONCLUSION PARTIELLE

Pour que les fibres de bambou soient efficaces en ce qui concerne le renforcement de la matrice mortier, il faut traiter les fibres avant leur utilisation. En utilisant les méthodes reportées dans la bibliographie, nous avons traité les fibres avec de la soude pour éliminer la lignine et l'hémicellulose, et donc augmenter le module des fibres. Les caractérisations ont montré que la plupart de l'hémicellulose et de la lignine est éliminée après 3 jours d'immersion dans la solution de soude à 1% à température ambiante.

Ces modifications de surface jouent un rôle majeur dans la liaison entre la matrice et les fibres lors de l'élaboration de matériaux composites, et peuvent ainsi influencer considérablement leurs propriétés mécaniques. Le chapitre suivant de cette étude concerne la méthode d'essai en utilisant ces fibres de bambou.

III- COMPOSITION DES MORTIERS

A- Mortier témoin :

Le mortier témoin se compose du liant, du sable et de l'eau. Pour la préparation de l'éprouvette dimension 4x4x16 cm, les quantités sont respectivement les suivantes :

- Ciment CEM II/A 42.5 : 500g ± 2g
- Sable: 1350g ± 5g
- Eau : 300g ± 1g

Le rapport E/C est maintenu constant à 0,60.

B- Mortier de fibres :

La même composition que le mortier témoin a été utilisée pour la confection de la matrice des mortiers de fibres de bambou. On y a incorporé différents pourcentages volumiques de fibres, notamment 0,5 ; 1 ; 1,5 et 2% c'est-à-dire pourcentage en volume d'éprouvette.

Le grand pouvoir d'absorption des fibres de bambou conduit à une réduction importante de l'ouvrabilité avec l'augmentation du dosage en fibre. Ce phénomène entraîne un serrage défectueux et une répartition hétérogène des fibres dans le mortier.

Les essais ont été élaborés sur des éprouvettes avec différents pourcentages de fibres en volume, notamment (0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2%) pour différents milieux de cure (air du laboratoire, eau douce) et avec une durée de conservation de 28 jours et cela pour mortier témoin sans fibre (MT), les mortiers de fibres (MF).

Afin de pouvoir comparer la variation de performance des différents mortiers, le maintien d'une maniabilité relativement constante s'avère nécessaire. Pour cela on essaye de garder le rapport E/C constant de telle sorte que le temps d'écoulement dans les différents mortiers frais soit sensiblement le même.

Tableau 38 : Composition pour 2 éprouvettes :

	FIBRES		SABLE M_s	CIMENT M_c	EAU M_E
	Volume V_f	Masse M_f			
Témoin (0% de fibre)	0	0	900g	333g	200g
E_1 (0,5% de fibre)	2,56cm ³	3,84g	898g	331g	200g
E_2 (1% de fibre)	5,12cm ³	7,68g	896g	329g	200g
E_3 (1,5% de fibres)	7,68cm ³	11,52g	893g	327g	200g
E_4 (2% de fibres)	10,24cm ³	15,36g	889g	325g	200g

Les formules qui expliquent ce tableau sont les suivantes :

☞ La formule pour calculer V_f

$$V_f \% = V_f / (V_f + V_m)$$

et

$$V_f = V_f \% \times V_m / (1 - V_f \%)$$

Avec ;

V_f % : volume en pourcentage de fibres ; 0% ; 0,5% ; 1%, 1,5% et 2%

V_m : volume du mélange pour deux éprouvettes égale à 512cm³

☞ La formule pour déterminer M_f

$$M_f = \rho_f \times V_f$$

C- Mode opératoire :

La préparation du mélange a été faite en respectant soigneusement les démarches suivantes :

➤ Préparation du sable :

- ◆ Laver puis sécher le sable
- ◆ Tamiser le sable

Avant de préparer du mortier, il est nécessaire d'éliminer les gros grains de sable. Le sable est tamisé sur une maille de plus ou moins 2mm d'ouverture. Le tamisage est fait à côté du lieu de stockage sur une surface propre. Il peut s'effectuer de plusieurs façons : le tamis peut être posé sur le sol, sur un Engin de transport ou suspendu à des poteaux, arbres, etc.

Si le test de convenue en argile et micro-organisme montre trop d'impureté, il faudra laver abondamment le sable par arrosage. Toutefois, cette opération est délicate car un lavage énergique risque d'entraîner toutes les fines particules donc de créer une granulométrie trop grossière.

Dans ce cas, bien que cette technique donne des résultats hasardeux quant aux granulométries finales, on peut ajouter une quantité à déterminer de sable très fin.

➤ Tronçonnage de fibre :

Les fibres sont en générales longues. Il faut donc les couper en morceaux de plus ou moins 15mm. Le tronçonnage peut se faire à l'aide d'une machette et d'un billot. On peut également utiliser une tronçonneuse qui permet de découper les fibres à une dimension constante. Cette activité doit être effectuée de manière à préparer suffisamment de fibre pour chaque journée.

➤ Préparation des matières premières :

- ◆ Peser le sable, le ciment et la fibre à l'aide d'une balance électronique de précision photo.05.
- ◆ Disposer dans un sac en plastique de tous le composant des mélanges.



Photo 05: La balance électronique de précision utilisée.

➤ Préparation du matériel à utiliser

Vider et bien nettoyer le moule puis laisser sécher.

➤ Préparation du mélange :

◆ Introduire le sable et le ciment dans le malaxeur. Le tout est ensuite malaxé pendant 60 secondes.

◆ Introduction des fibres.

Quand le mélange est homogène, on ajoute les fibres. La quantité de fibre varie de 0,5 à 2 pour cent du volume du mortier. Les fibres doivent être saupoudrées de manière à ce qu'il n'y ait pas formation d'amalgame.

La bonne répartition des fibres dans le mortier garantit la solidité du matériau lors des manipulations.

◆ Introduire de l'eau puis malaxer pendant 40 secondes.

Pour que le mortier puisse être travaillé (moulage, compactage, répartition homogène des matières), il doit être plastique mais ne doit pas contenir trop d'eau de gâchage. On recommande donc d'ajouter l'eau graduellement et avec parcimonie. La quantité exacte d'eau à ajouter au mélange (sable, ciment, fibres) est difficile à déterminer à priori.

Elle dépend essentiellement de la teneur en eau du sable. Il faut procéder à un test de consistance et de maniabilité. Plus le mortier est gorgé d'eau, plus il a tendance à se répandre. En principe, le ratio idéal ciment : eau (par le poids) est de 0,60.

D- Précaution à prendre :

- Bien nettoyer le malaxeur avant chaque essai ;
- S'assurer de l'homogénéité du mélange à chaque remplissage du moule ;
- Utiliser de l'eau en abondance pour bien nettoyer le moule et le récipient après chaque usage ;
- Essayer de garder la même cadence pour tous les essais.

E- Détermination des porosités :

1- Principe :

Par la porosité à l'eau, nous pouvons déterminer directement la densité apparente et la porosité ouverte d'un échantillon. Le principe est simple. Après séchage à l'étuve à 50°C des éprouvettes jusqu'à poids constant (M_o), celles-ci sont introduites dans un dessiccateur et maintenues, pendant une heure, sous vide partiel. Les éprouvettes sont ensuite immergées dans l'eau et maintenues une heure supplémentaire sous vide partiel. Puis par mesure du poids humide (M_h) et du poids immergé dans l'eau (μ) de l'échantillon, nous pouvons déterminer sa densité apparente :

$$= \frac{M_o}{M_h - \mu}$$

Ainsi que sa porosité ouverte :

$$\pi, \% = 100 \left[\frac{M_h - M_o}{M_h - \mu} \right]$$

A partir de la densité absolue (ρ) de l'échantillon (déterminée soit par pycnométrie, soit par porosité au mercure), nous déduisons la porosité totale (π_T) et la porosité fermée (π_f).

$$\pi_f \% = \pi_T - \pi$$

$$\pi_T \% = 100 \left[1 - \frac{1}{\rho} \right]$$

2- Résultats :

➔ Mélange sans liant: (fibre + sable)

Tableau 39 : Résultats des essais de la porosité (fibre + sable) :

<i>Echantillon</i>	<i>Moyenne des porosités au 28 jours (%)</i>	<i>Moyenne des porosités aux 60 jours (%)</i>
E ₀ (témoin)	Désagrégation	Désagrégation
E ₁	29,2	27,0
E ₂	35,0	24
E ₃	42,4	40,7
E ₄	46,3	44,9

➤ Mélange avec liant : (fibre + sable + ciment)

Tableau 40 : Résultats des essais de la porosité (fibre + sable + ciment).

<i>Echantillon</i>	<i>Moyenne des porosités au 28 jours (%)</i>
E ₀ (témoin)	20,9
E ₁	23,2
E ₂	25,4
E ₃	30,2
E ₄	37,1

IV- ESSAIS MECANIQUES :

A- Résistance à la traction par flexion en MPa: R_f

1- Résultats des essais :

Le tableau 39 rassemble les valeurs de la résistance à la traction par flexion des cinq échantillons suivant les pourcentages de fibres ; 0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2%

Tableau 41 : Résistance à la traction par flexion

<i>Echantillon</i>	<i>Pourcentages en fibres</i>	<i>Résistance à la traction par flexion</i>
E ₀	0%	90
E ₁	0,5%	100
E ₂	1%	100
E ₃	1,5%	110
E ₄	2%	140

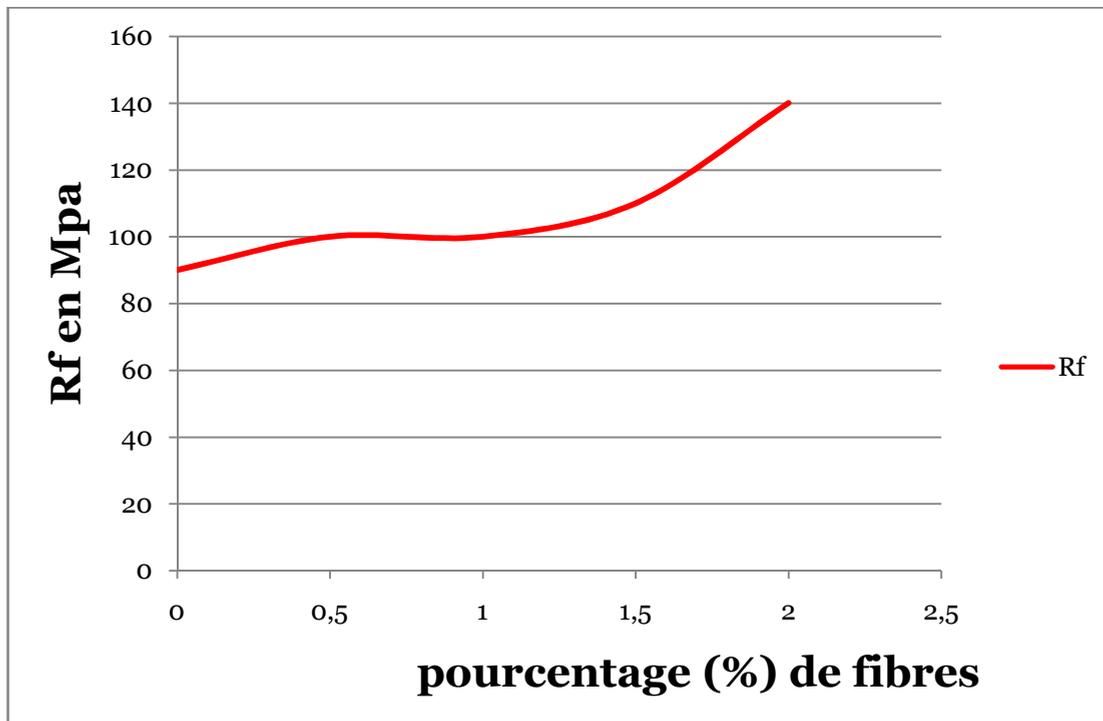


Figure35 : Influence du pourcentage des fibres sur la résistance à la traction par flexion.

2- Interprétation :

La résistance à la traction par flexion augmente avec le pourcentage de fibres. Ceci peut s'expliquer par le rôle de renfort que jouent ces fibres. Le mode de traction des fibres est effectivement très élevé et les fibres permettent de stopper l'évolution des fissures des éprouvettes.

3- Intérêt :

On peut avoir des fibres comme en papeterie.

Remarque :

Cette augmentation de la résistance avec le taux de fibres sera limitée pour une certaine quantité de fibre pour la quelle l'excédant de fibres ne jouera plus le rôle de renfort.

B- Résistance à la compression en MPa : (R_c)

1- Résultats des essais :

Les résultats d'essai de compression sur les bétons fibrés de trois échantillons sont présentés dans le tableau 42. Cinq différents pourcentages de fibres sont utilisés pour chaque échantillon.

Tableau 42 : Résistance à la compression :

N° De l'échantillon	Béton à 0% de fibre	Béton à 0,5% de fibre	Béton à 1% de fibre	Béton à 1,5% de fibres	Béton à 2% de fibres
N° 1	34,02	27,52	32,22	28,03	27,05
N° 2	27,02	25,02	28,02	29,42	24,12
N° 3	35,82	39,52	28,72	26,62	29,92
MOYENNE	32,29	30,68	29,65	28,02	27,03

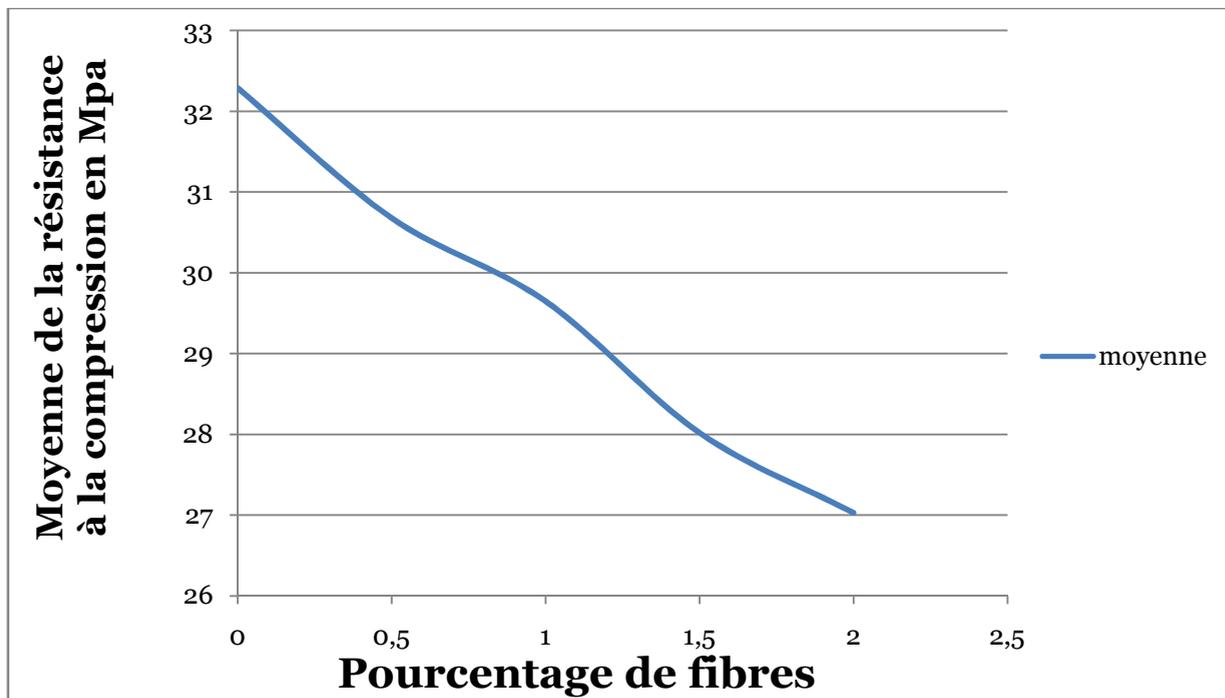


Figure 36: Influence du pourcentage des fibres sur la résistance à la compression à 28 jours.

Le tableau 43 représente les résultats d'essai de la résistance à la compression sur les bétons fibrés à 0%, 1% et 2% de fibres sous l'eau et dans l'air en fonction de l'âge.

Tableau 43 : Résistance à la compression en, MPa, sous l'eau et l'air

Age en jour	7	14	28	64
Témoin (eau)	10,02	26,11	32,29	35,04
Témoin (air)	8,06	24,15	30,41	32,45
E₂ (eau)	7	23,8	29,65	31,5
E₂ (air)	4,91	20,84	26,52	28,62
E₄ (eau)	3,9	17,6	27,03	28,4
E₄ (air)	3,1	16,4	23,54	25,6

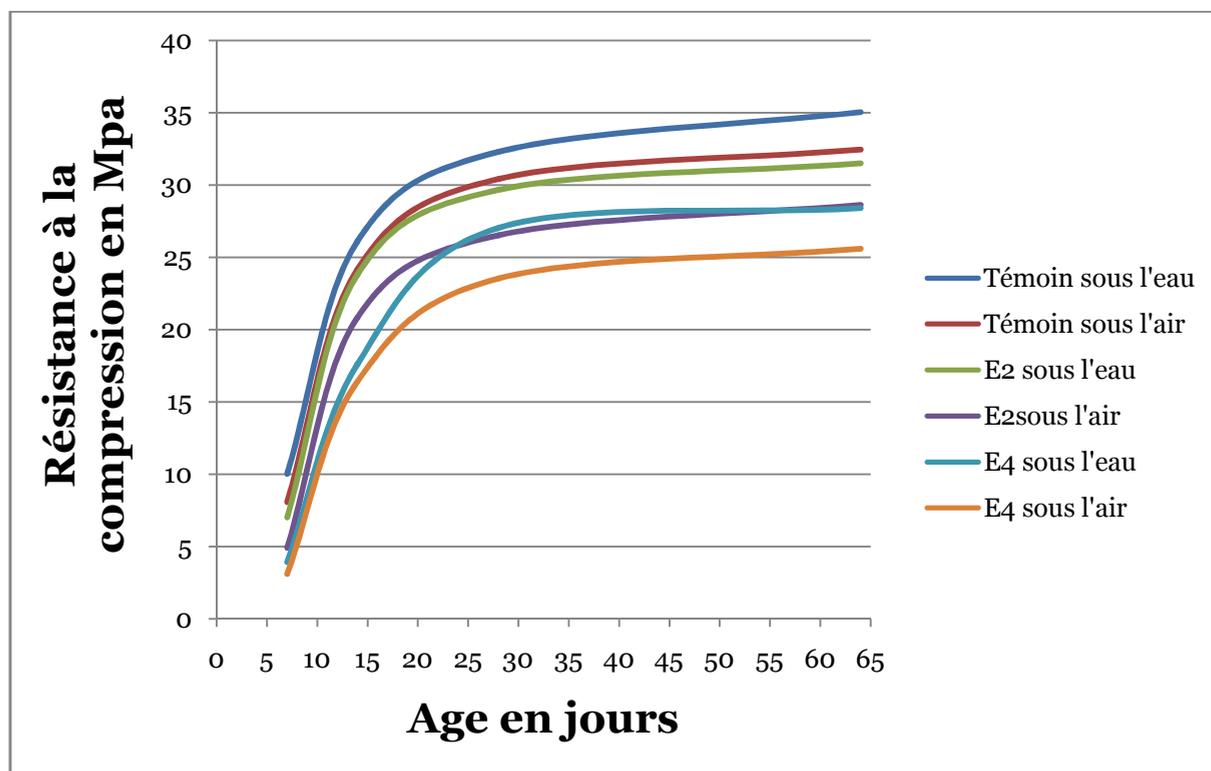


Figure 37 : Résistance à la compression sous l'eau et l'air

2- Interprétation :

Cette figure montre les résultats à la compression à 28 jours des différents composites en fonction de la variation du pourcentage de fibres. On constate que la résistance à la compression **diminue** avec l'augmentation du pourcentage de fibres dans les différents mortiers et que le témoin reste le plus résistant. Cette diminution est une fonction linéaire de pourcentage de fibres : ($R^2 = 0,914$).

Cette constatation est en accord avec de la littérature [10 – 11 – 12 – 13], qui affirme que l'ajout de fibres végétales au mortier n'a aucun effet bénéfique sur la résistance à la compression. Cela est expliqué par le fait que l'incorporation des fibres dans la matrice du mortier augmente le volume des vides et diminue la compacité du mortier, d'où une diminution de résistance à la compression ; Ceci peut être illustré par la figure 37 représentant la corrélation entre porosité et résistance à la compression.

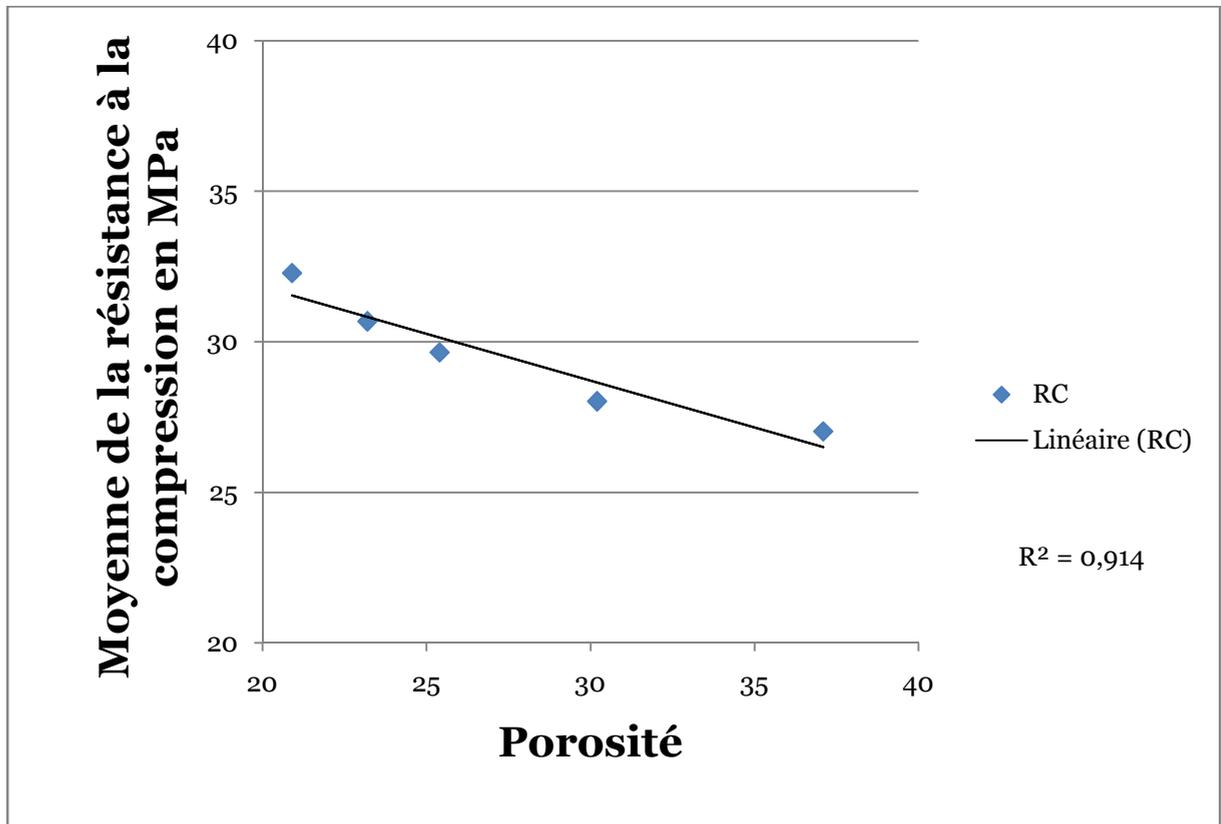


Figure 38 : Corrélation entre porosité et résistance à la compression

Par ailleurs, bien qu'il y ait une évolution de résistance en compression en fonction de l'âge pour les types de cures, les mortiers de fibres conservés dans l'eau douce, offrent des résistances supérieures à celles des mortiers conservés à l'air (figure 36).

Enfin, on peut conclure que les fibres végétales n'améliorent pas la résistance à la compression.

V- MESURE DES DENSITES APPARENTES DE BETONS DE FIBRES :

On a mesuré les densités apparentes des bétons de fibres. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 44 : densités apparentes des bétons de fibre.

Pourcentage de fibres en %	0	0,5	1	1,5	2
Masse volumique apparente en Kg/m³ du béton	2799	2756	2723	2695	2675

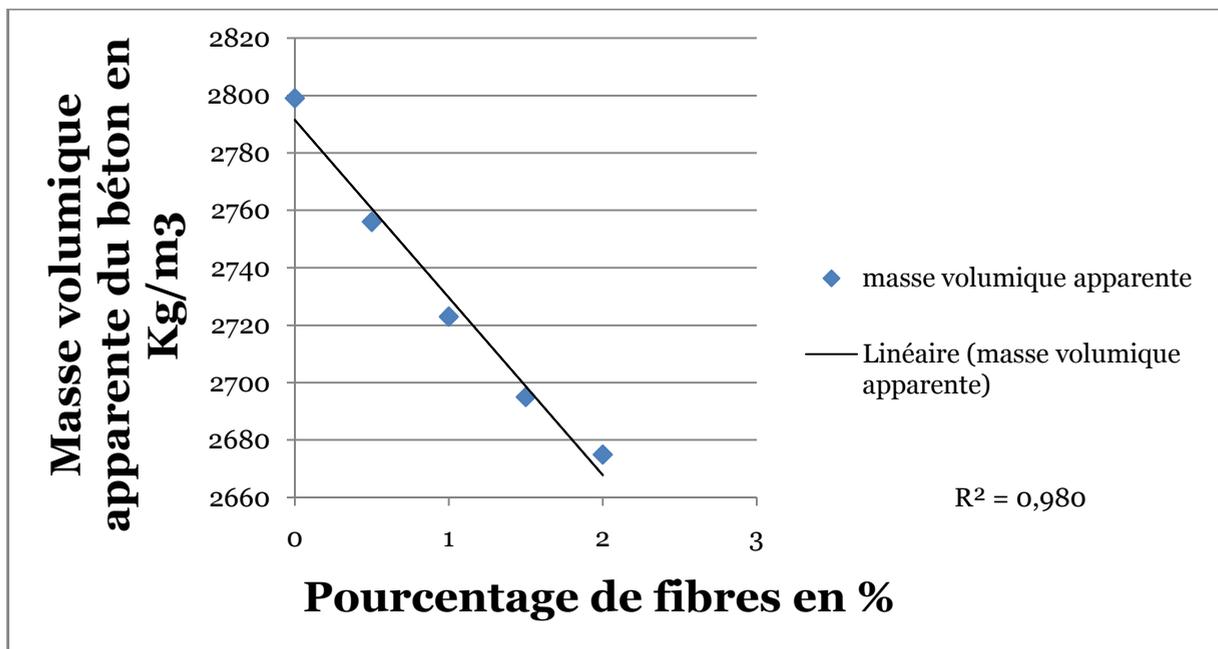


Figure 39 : Influence de la densité de fibres sur la masse volumique du béton.

On remarque que la densité des bétons de fibres diminue linéairement avec le taux de fibres ce qui est logique les fibres sont plus légères que les autres constituants.

CONCLUSION

ET

RECOMMANDATION

CONCLUSION GENERALE

L'étude de l'influence des fibres cellulosiques sur le comportement mécanique du béton, nous a montré que, seule la résistance à la traction par flexion est améliorée, par l'ajout des fibres suivant leur pourcentage (fibre de bambou de 0,5 à 2%), les composites cimentaires.

Ainsi, les fibres conduisent, en tant que fibres longues, à des difficultés de leur dispersion dans la matrice, ce qui perturbe les propriétés du composite résultant, malgré son caractère hydrophobe.

La résistance à la compression des bétons de fibres du bambou, comme pour tous les bétons de fibres végétales, cette résistance diminue en fonction de l'augmentation du dosage en fibres.

Quant à la cristallinité de fibres, la vitesse de la cristallisation est faible si la viscosité de la solution augmente. Le maximum de vitesse de cristallisation se situe autour de la température ambiante.

En ce qui concerne le choix des milieux d'essai de la résistance à la compression sur les bétons de 0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 et 2% de fibres, en fonction de l'âge pour les types de cure : les mortiers de fibres conservés dans l'eau douce offrent des résistances supérieures à celles des mortiers conservés à l'air.

RECOMMANDATION :

Les recommandations suivantes sont issues des observations de ce travail. Ils visent, « prévenir » ou plutôt conseiller, les personnes désirant effectuer des études similaires à celle-ci.

1. Recommandation sur la fabrication des bétons fibrés : Afin de tirer bénéfice de la présence de fibres cellulosique, il est nécessaire de comprendre les répartitions des fibres dans le mélange sable – ciment et le processus qui permet une bonne dispersion de fibres dans le béton fibré.

2. Recommandation concernant les propriétés mécaniques du béton fibré : Lors d'une étude de la résistance par compression et par flexion de fibres de bambou, nous recommandons avoir une connaissance complète de la méthodologie utilisée pour arriver à l'amélioration de la durabilité de la matrice cimentaire. Autrement dit, il est très important de savoir s'il y a d'autre procédure chimique de traitement de fibre qui peut influencer les bétons et notamment leur comportement mécanique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]** : Maya Jacob John. Sabu. Thomas. Nanocomposites Préparation, properties and application; chapitre 8, Sabu Thomas and Ranimol Stephen (Ed), John Wiley & Sons pte Ltd, 2010.
- [2]**: “Revue Madagascar Bambou” copyright 2012 Madagascar bambou.
- [3]**: Xiaobo Li; Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiber board manufacturing, Master, the school of Rerewable Natural Resources, 2007.
- [4]**: Haping Yang, Rong Yan, Hanping Chen, Dong Ho Lee, Chuguang Zheng, 2007; characteristics of hemicelluloses, cellulose and lignin pypolysis; Fuel 86, 1781-1788.
- [5]**: Y. Tong, H, DU, L; Fei, “Comparison between the hydratation processes of tricalcium silicate and beta-dicalcium silicate”, cement and concrete Research, vol.21, 1991, pp. 509-514.
- [6]**: Rowell, R., M., Sanadi, A.R., Caulfield, D.F., and Jacobson, R.E. Utilization of Natural Fibers in plastic composites: problems and opportunities, in “Lignocellulosic plastics-composites”. A.L. Leao, FX. Carvalho, and E. Frollini, (Eds) USP, UNESP, Sao Paulo, 23,1997.
- [7]**: FAO <http://www.fao.org>, 1999.
- [8]**: Reguant, J. Thèse. Tarragona (Espagne).
- [9]** : Fengel, D. AND Wegener, G. Wood-chemistry, Ultrastructure, Reactions, De Gruyter, Berlin-Neww York, 1983.
- [10]**: Rinaudo, M., La Papeterie, 90, 479, 1968.
- [11]**: Suganti Ramard, preparation and properties of kenaf bast fiber filled (plasticized) poly (lactic acid) composites; Master, 2008.
- [12]**: Mohammad Dalour Hossen Beg; the improvement of Interfacial bonding, weathering and Recycling of wood fiber Reinforced Polypropylene composites, these de doctorat, university of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2007.

- [13]:** Maya Jacob John, Rajesh D. Anandjiwala, 2008; Recent Developments in chemical Modification and characterization of Natural Fiber. Reinforced. Composites; polymer composites, 187-207.
- [14]:** Enrique. Alarcon-Gutiérrez; Influence de facteurs abiotiques sur la regulation de parameter microbines impliqués dans la degradation de la matière organiqued'une litière forestière méditerranéenne, these de doctorat, Faculté des sciences et techniques, l'université Paul Cezanne, 2007.
- [15] :** Klemm, D., Philipp, B., Heinze, T., U, and Wagenknecht, W. Comprehensive cellulose chemistry. Fundamentals and Analyical Methods, Wiley-VCH, Weinheim, 1998.
- [16]:** Krässig, H. and Schurz, J. cellulose, in "Ullmann's Encyclopeda of Industrial chemistry" W. Gerhartz, (Ed) VCH, Manhein, New Yok, A5, 375, 1986.
- [17]:** Gilberto Siqueira, Julien Bras, Alain Dufresne, 2010 ; cellulosic Bionanocomposites : A Reviw of Preparation, Proêrties and Application ; Polymers, 728-765.
- [18]:** Fink, H, -P . and Walenta, E., Papier (Darmstadt), 48,739, 1994.
- [19]:** Fink, H, -P., Phylip, B., Zscunke; C., and Hayn, M., 43, 270, 1992.
- [20]:** M. Nicolas le Moigne; Mecanismes de gonflement et de dissolution des fibres de cellulose ; thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des mines de Paris, 2008.
- [21] :** David Sedan ; Etude des interactions physico- chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite ; thèse de doctorat, faculté des sciences et technique, Université de Limoges, 2007.
- [22] :** Atchinson, J.E, Twenty – five years of glo bal progress in nonwood plant fiber repulping, Tappi J., 79 (10), 87, 1996.
- [23]:** A.C.I COMMITTEE 544-IR82., "State of the art repot on fiber reinforced concrete". Concrete international, 1982, Vol. 4, N°5, pp. 2-30.
- [24]:** Doan Thi THU Loan. Investigation on jute fibers and their composites based on polypropylene and epoxy matrices, these de doctorat, l'université de Dresden, 2006.

- [25]:** Treiber, E. Die. Chemie der Pflanzellwand, Springer verlag, Berlin- Göttingen-Heidelberg, 1957.
- [26]:** AK. Bledzki, J. Gassan, 1999; Composites reinforced with cellulose based fibers; Prog. Polym. Sci. 24, 221-274.
- [27]:** NGUYEN Huy TUNG? Hirishi Yamamoto, Takaschi Matsuoka, Toru Frijü; 2004. Effect of surface treatment on interfacial Strength between bamboo fiber and ppsin; JSME. International Journal, series A, vol. 47, N°4, 561-565.
- [28]:** D. Nabi, Saheb, J. P Jog, 1999; Natural Fiber Polymer Composites: A Review Advances in Polymer Technology; vol. 18, No. 4, 351-363.
- [29]:** Xue Li, Lope G; Tabil, Satyanarayan Panigrahi; 2007; chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber- Reinforced composites: A Review; J Polym Environ 15, 25-33.
- [30]:** AK. Bledzki, A. A Mamun, M. Lucka-Gabor, V. S. Gutowski, 2008; the effects of acetylation on properties of flax fiber and its polypropylene composites; EXPRESS Polymer Letters vol. 2, No. 6, 413-422.
- [31]:** Fernanda M. B. Coutinho, Thais H. S. Costor, 1999 ; Performance of polypropylene-wood fiber/pp composites ; Polymer. Testing 18, 581-587.
- [32]:** Miin Zhi Rong, Ming Qiu Zahang, Yuan Liu, Gui Cheng Yang, Han Min Zeng, 2001; the effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal reinforced epoxy composites; composites Science and Technology 61, 1437-1447.
- [33]:** M. Abdelmouleh, S. Boufi, M. N. Belgacem, A. Dufresne, 2007 ; short natural fiber reinforced polyethylene and natural rubber composites : Effect of silane coupling agents and fibers loading ; composites : science and technology 67, 1627-1639.
- [34]:** DO THI ViVi. "Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodegradable ou non". Thèse de docteur de Grenoble et de l'université des sciences de Hochiminh ville. 7 Août 2006.
- [35] :** RH BOGUE « La chimie du ciment Portland » Paris 1976, 645p ;
- [36] :** RALAMBO Faratiana « Rapport de stage effectué au sein de la Société Malgache des ciments » Année 2001, 30p ;

[37] : RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely « cours de liant minéraux » ESPA 2003, 2006 et 2010.

[38] : Holcim mg/fr/produits et services/ciments/la fabrication du ciment.

[39] : C. Vernet, Evolution de la microstructure des hydrates des ciments, Aspect théorique, Dans 8^{ème} congrès International Journal of Cement composites and light weight concrete, vol. 11, 1989, pp. 11-19.

[40] : G. Seidel, H. Huckuf et J. Stark, « Technologie des ciments, chaux et plâtre, processus et installations de cuisson » Paris : septima, 1980.

[41]: I. Jawwed, J. Skalny et J. F. Young, « structure and performance of cement », Hydratation of Portland cemeny structure and performance of cements, 1985, pp. 237-317.

[42]: OLDER, S. Abdul-maula, “Possibilities of quantitative determination of the Alft. (ettringite) and Afm. (monosulfate) phases in hydrated cement pastes”, cement and concrete Reseach, vol 14, 1984, pp. 133-141.

[43]: V. S. Ramachandran, “concrete science”, concrete admixture Handbool, secnd Edition, Noyes Publication, 1995, pp. 12-13.

[44]: M. Fukuhara, S. Goto, K. Asaga, M. Daimon et R. Kondro, “Mechanisms and Kinetics of C₄AF hydratation with gypsum”, cement and concrete Research, vol. 11, 1981, pp. 407-414.

[45]: A. Nonat, “Hydratation et prise de sliants hydrauliques”. Paris I et II, Physique chimie et Mécanique des matériaux cimentaires, Ecole Thématique ATHIL, 2003.

[46] : C. Bonnet. Développement de bioessais sur sédiment et application à l'étude en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés. Thèse de doctorat. Université de Metz, UFR Sciences fondamentales et appliquées. Septembre 2006.

[47] : De LARRARD/SEDRAN. Une nouvelle approche de la formation des bétons Annales du BTP-Version.

[48] : Propriétés des bétons.

[49] : G. DREUX et FESTA. Nouveau guide de béton et de ses constituants Huitième Edition EYROLLES mai 1998.

[50] : J. P. MOUGIN. Cours de béton armé. BAEL 91.

[51] : KHENFER. M. M, BALI. A, MORLIER. P. « the effect of water and fiber length on the fracture resistance of cellulosic fibers cement ». Concrete science and engineering, vol.2, pp. 56-62, Mars 2000.

[52] : S. K. Canovas, « New economical solution for improvement of durability of Portland cement mortars reinforced with sisal fibers », Materials and structures, 19925, pp. 417-422.

[53]: MOKHTARI ABDESSAMED. "Influence des ajouts de fibres minérales sur les Performances Mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales de Palmier Dattier. Faculté des Sciences et Sciences de L'ingénieur. Département d'Hydraulique et Génie Civil. 06 Novembre 2006.

[54]: SWAMY, R.H.S, AHUJA, B. M, KRISHAMOORTHY, S., "Behavior of concrete reinforced with jute coir, bamboo fibers". The international journal of cement composite and light weight concrete, volume 5, p13 N°1, 1984.

[55]: DEVENNE, L., SOURIDIS, C., PIAU; J.M., "Un code de calcul pour la prevision du comportement de structures en dommageables en béton, en b&ton arm&, ou en béton de fibres » Annales ITBTP, N°478, 1989.

[56] : AIT. AMEUR, M. M., « Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés des fibres d'acier locale ». Mémoire de magister, U Tiaret, 1998.

[57] : KHENFER, M. M. « caractérisation structural et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés des fibres cellulosiques ». Thèse de docteur université de Bordeaux, juin 1990.

[58] : M. Nicolas le Moigne ; Mecanismes de gonflement et de dissolution des mines de Paris, 2008.

- [59]** : Min Zhi Rong, Ming Qiu Zhang, Yuan Liu, Giu Cheng Yang, Han Min Zeng, 2001; the effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites; composites Science and Technology 61, 1437-1447.
- [60]**: MAKHLOUF Née CHERGUI NADIA. "Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux ». Mémoire de magister, université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzon
- [61]**: P.K. MEHTA (1986), « concrete : structure, properties, and materials »; Prentice-Hall Inc., Englewood cliffs, New Jersey, 1986, 450p.
- [62]**: KHENFER. M. M., MORLIER, P., "Caractérisation et microstructure des ciments renforcés des fibres de cellulose ». Bulletin des L.C.P.C 224, Réf 4236, pp. 49-58, Jantfev 2000.
- [63]** : MOMKHTARI, F., « contribution à l'étude des composites à base de liants pouzolaniques et de bambou ». Thèse de doctorat, insa Lyon, 1991.
- [64]** : TOLÈDO, F. R. D, GHAVAMI, K. ENGLAN, D. G. L SCRIVENER, K., "development of vegetable fibers-mortar composites of improved durability". ELSEVIER.
- [65]**: TOLÈDO, F. R. D, SCRIVENER, k., "Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites" ELSEVIER, cement and concrete composite, volume 22, pp. 127-143, 2000.
- [66]**: DREUX, G., FESTA, J; "Nouveau guide du béton". Edition EYROLLES Paris ? Mai 1998.
- [67]** : DUPAIN, R., SAINT ARROMAN, J. C, « Granulats, sols, ciments et béton-caractérisation des matériaux de génie civil par les essaisde laboratoire » Collection CAPLIEZ, édition CASTEILLA, V 235, Paris 2000.
- [68]** : GORISSE F. « Essais et contrôle des bétons » Edition EYROLLES, vol 200, Paris, 1978.

[69] : L. Y. Mwaikambo, M. P. Ansell, 1999 the effect of chemical treatment on the properties of hemp, sisal, jute and kapok fibers for composite reinforcement; Die Angewandte Ma Kromolekulare chemie 272, 108-116.

[70]: M. S. SREEKALA M; g; Kumarn, Sabu Thomas, 1997, Oil Palm Fibers: Morphology, chemical composition, surface, modification, and Mechanical Properties; Journal of Applied polymer science, vol. 66, 8216835.

ANNEXES

ANNEXE 1:

Tableau 45: Avantages et inconvénients des fibres végétales dans les matériaux composites [20, 32].

Avantages	Inconvénients
- Faible coût.	- Absorption d'eau. - Pour des applications industrielles, nécessite de gestion d'un stock.
- Biodégradabilité.	- Fibres anisotropes. - Faible stabilité dimensionnelle.
- Neutre pour l'émission de CO ₂ .	- Renfort discontinu.
- Pas de résidus après incinération.	- Faible tenue thermique (200 à 230°C max)
- Ressource renouvelable.	-Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, des conditions météorologiques.
- Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité).	
- Non abrasif pour les outillages.	
- Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres.	

ANNEXE 2:

Tableau 46 : Normes suivies pour l'analyse chimique.

Propriété	Norme
Solubilité alcool-toluène	ASTM D 1107-56 (Reapproved 1972)
Solubilité dans l'eau chaude	ASTM 1110-56 (Reapproved 1977)
Lignine	ASTM D 1106-56 (Reapproved 1977)
Holocellulose	ASTM D 1104-56 (Reapproved 1978)
Alpha-cellulose	ASTM D 1103-60 (Reapproved 1978)
Teneur en cendres	ASTM D 1102-84 (Reapproved 1990)

ANNEXE 3:

Tableau 47: Propriétés physiques des fibres naturelles.

Fibre	Contrainte à la rupture (MPa)	Module d'élastique (GPa)	Déformation (%)	Densité (g/cm³)
La soie d'araignée	1300-2000	~30	28-30	1,3
Lin	500-900	50-70	1,5-4,0	1,45
Chanvre	350-800	30-60	1,6-4,0	1,48
Kéna	400-700	25-50	1,7-2,1	1,3
Jute	300-700	20-50	1,2-3,0	1,3
Bambou	500-740	30-50	~2	1,4
Sisal	300-500	10-30	2-5	1,5
Fibre de coco	150-180	4-6	20-40	1,2
Fibre de verre	1200-1800	72	~2,5	2,5
Carbone	~4000	235	~2	1,4

ANNEXE 4:

Tableau48: Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales [55]

Fibre	Diamètre (mm)	Densité (g/cm³)	Résistance à la traction (MPa)	Module De Young (GPa)	Teneur en eau à l'état naturel (%)	Absorption d'eau après 5min (%)	Absorption d'eau à la saturation (%)
Cotton		1.5-1.6	587-597	5.5-12.6			
Jute		1.3	393-773	26.5			
Lin		1.5	345-1035	27.6			
Chanvre			690				
Ramie			400-938	61.4-128			
Sisal	0.08-0.30	0.75-1.5	278-577.5	9.4-26.7	10.97-14.44	67-92	92-250
Noix de coco	0.08-0.30	0.67-1.33	72-175	2.0-6.0	11.44-15.85	22-43.2	85-135

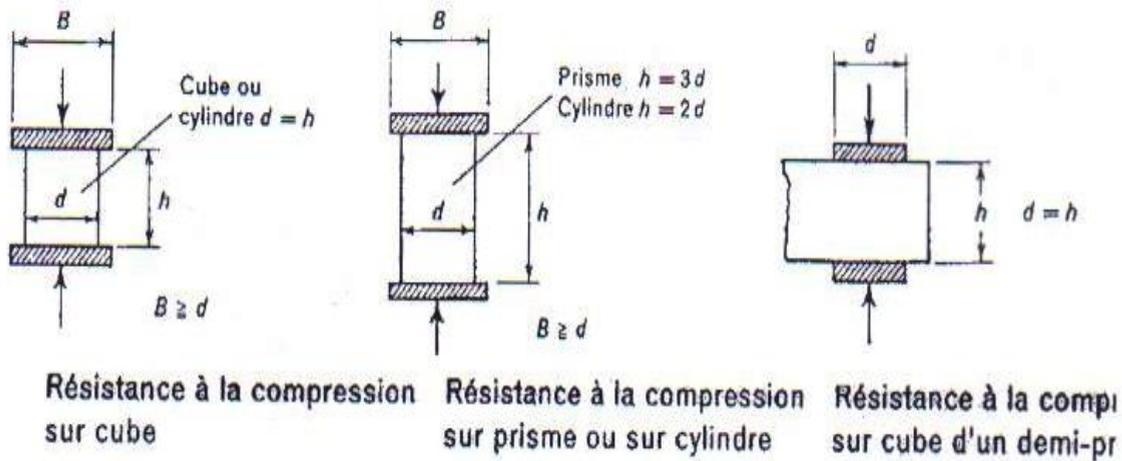


Figure 40: ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION

METHODE: Selon la norme SIA 162

Les résistances sur cylindre (hauteur = 2 x diamètre) ou sur prismes (hauteur = 3 x diamètre) peuvent être estimées à partir des formules suivantes:

$$R_{C, \text{cylindre}} = 0,80 R_{C, \text{cube}} \quad (h = 2d)$$

$$R_{C, \text{prisme}} = 0,75 R_{C, \text{cube}} \quad (h = 3d)$$

ANNEXE 6:

Exécution des essais

Grandeur des prismes	∅ des appuis	Portée
12/12/36 cm	30 mm	30 cm
20/20/60 cm	50 mm	50 cm

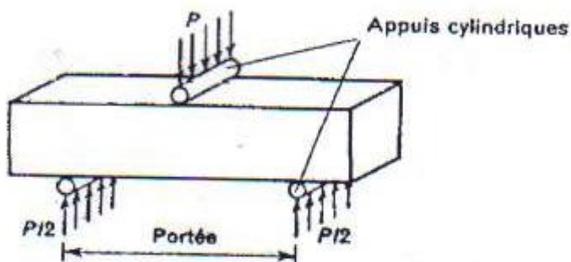


Figure 41: ESSAI DE RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION

METHODE: Selon la norme SIA162

L'essai se fera toujours transversalement par rapport au sens de remplissage. Les faces des éprouvettes sur lesquelles on applique la charge devront être rectifiées ou apprêtées.

La résistance à la traction par flexion se calcul comme suit:

$$R_f = 3PI / 2bh^2$$

TABLE DES MATIERES

Remerciement.....	II
Sommaire.....	III
Liste des tableaux.....	V
Liste des figures	VII
Liste des photos.....	IX
Abréviations et symboles.....	X
Liste des annexes.....	XII
INTRODUCTION GENERALE.....	1

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 01 : LE BAMBOU.....	3
I- Introduction.....	3
II- Classification.....	3
III- Les espèces du bambou de Madagascar.....	3
IV- Composition chimique du bambou.....	4
A-La cellulose.....	5
1-Source.....	5
2-Structure.....	5
3-Propriétés.....	9
B-L'hémicellulose.....	9
1-Source et structure.....	9
2-Propriétés.....	10
C-La lignine.....	11
1-Structure.....	11
2-Propriétés.....	12
D-Les pectines.....	12
1-Structure.....	12
2-Propriétés.....	13
E-Cires.....	14
V- Structure et morphologie du bambou.....	14
A-Caractéristiques morphologiques.....	15
1-Le rhizome.....	15
2-La feuille.....	16
3-Le chaume.....	16
B-Présentation de la plante.....	16
VI- Utilisation et distribution.....	17
Chapitre 02 : LES FIBRES DE BAMBOU.....	19
I- Introduction.....	19
II- Présentation des fibres naturelles.....	19
III- Composition chimique.....	20

IV-	Propriétés des fibres.....	22
V-	Type des fibres cellulosiques.....	23
VI-	Utilisation des fibres cellulosiques.....	25
VII-	Fibres de bambou.....	25
	A-Quelques définitions et propriétés.....	25
	B-Description du produit.....	26
	C-Caractéristiques de la fibre.....	27
	D-Utilisation.....	27
Chapitre 03 : LES CIMENTS.....		28
I-	Quelques définitions du ciment.....	28
II-	Constituants du ciment.....	28
	A-Le clinker.....	28
	B-Les produits d'addition.....	28
	C-Les régulateurs de prise.....	29
III-	Les différents types de ciment.....	29
	A-Les modes de classification.....	29
	B-Les ciments de la norme NFP 15-301.....	30
	1-Nouvelle définition de la classe de résistance.....	31
	2-Nouvelle désignation des ciments et symbole.....	33
	C-Les ciments de norme autre que la norme NFP 15-301.....	33
	D-Les ciments en cours de normalisation.....	34
IV-	Propriétés et caractéristique du ciment.....	34
	A-Caractéristiques chimiques.....	34
	B-Caractéristiques physiques.....	35
	C-Caractéristiques mécaniques.....	37
V-	Fabrication du ciment.....	37
	A-Le procédé par voie sèche.....	37
	B-Le procédé par voie humide.....	38
VI-	Hydratation du ciment Portland (CPA).....	42
VII-	Domaine d'utilisation.....	45
Chapitre 04 : LES SABLES.....		47
I-	Généralités.....	47
II-	Analyse granulométrie.....	47
	A-Définition.....	47
	B-Classe granulaire.....	49
	C-Technique d'analyse.....	50
	1-Tamisage de sables et gravier.....	51
	2-Les graphiques granulométrique.....	51
	D-Objectif.....	52

III-	Module de finesse.....	54
Chapitre 05 : LE BETON.....		
I-	Quelques définitions sur le béton.....	55
II-	Formulation du béton.....	55
	A-Introduction.....	55
	B-Facteur régissant la formule des bétons.....	56
	1-Résistance mécanique.....	56
	2-L'ouvrabilité.....	61
	3-La durabilité.....	63
	C-Quelques méthodes de formule de béton.....	64
	1-Méthode de BOLOMEY.....	64
	2-Méthode d'ABRAMS.....	65
	3-Méthode de FAURY.....	65
Chapitre 06 : LE BETON RENFORCE DE FIBRES.....		
I-	Introduction.....	67
II-	Définition de béton de fibres.....	67
III-	Comportement mécanique des bétons de fibres.....	67
	A-Comportement en traction des fibres.....	68
	B-Comportement de la matrice.....	69
	C-Comportement du matériau composite.....	69
	1-Comportement en compression.....	69
	2-Comportement en traction.....	70
	3-Comportement en traction par flexion.....	70
	D-Effet des fibres dans une matrice.....	71
	1-Rôles des fibres dans le béton.....	71
	2-Influence de l'adhérence fibres-matrice.....	72
	3-Mécanisme de la rupture d'une fibre dans la matrice.....	72
IV-	Microstructure de béton de fibres.....	73
V-	Durabilité des bétons de fibres.....	73
	Conclusion partielle.....	74
DEUXIEME PARTIE : PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION		
	Introduction.....	76
Chapitre 07 : MATERIAUX ET MODE D'ESSAIS.....		
I-	Introduction.....	77
II-	Matières premières.....	77
	A-Ciment.....	77

	1-Surface spécifique.....	77
	2-Temps de prise.....	77
	3-Caractéristiques chimiques.....	78
	4-Composition minéralogique et chimique du clinker.....	78
	5-Indice d'hydraulicité.....	79
	6-Propriétés physiques et mécaniques du ciment.....	79
	B-Le sable.....	80
	1-Masse volumique apparente.....	81
	2-Masse volumique absolue.....	82
	3-Equivalent de sable.....	82
	4-Analyse granulométrique.....	84
	5-Module de finesse.....	86
	6-Analyse chimique sommaire.....	87
	C-Eau de gâchage.....	87
	D-Les fibres.....	88
	1-Présentation de la fibre de bambou.....	88
	2-Analyse des matières organiques.....	88
	3-Analyse des matières minérales.....	89
	4-Biométrie des fibres.....	89
	5-Propriétés physiques de fibres de bambou.....	90
III-	Matériaux utilisés.....	90
IV-	Conduite des essais.....	91
 Chapitre 08 : METHODE ET RESULTATS EXPERIMENTAUX.....		92
I-	Introduction.....	92
II-	Préparation des fibres.....	92
	A-Préparation de la tige.....	92
	B-Préparation de la pâte.....	93
	1-La cuisson.....	93
	2-Le lavage.....	103
	C-Modification de la surface de fibres.....	104
III-	Composition des mortiers.....	110
	A-Mortier témoin.....	110
	B-Mortier de fibres.....	110
	C-Mode opératoire.....	112
	D-Précaution à prendre.....	114
	E-Détermination des porosités.....	114
	1-Principe.....	114
	2-Résultats.....	115
IV-	Essais mécaniques.....	116
	A-Résistance à la traction par flexion.....	116
	B-Résistance à la compression.....	118

V-	Mesure des densités apparentes de béton de fibres.....	121
----	--	-----

ANNEXE

		ii
		ii
Annexe 1.....		ii
Annexe 2.....		ii
Annexe 3.....		iii
Annexe 4.....		iii
Annexe 5.....		iv
Annexe 6.....		iv

CONCLUSION ET RECOMMANDATION.....	123
--	------------

BIBLIOGRAPHIE

TITRE : INFLUENCES DES FIBRES CELLULOSIQUES EXTRAITES A PARTIR DU BAMBOU SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON

AUTEUR : RAHARISOA Soloarilala claudia

NOMBRE DE TABLEAU : 48

NOMBRE DE FIGURE : 41

NOMBRE DE PHOTO : 05

NOMBRE D'ANNEXE : 06

RESUME

Ce travail concerne d'une part l'étude du comportement mécanique et chimique des matériaux utilisés et d'autre part, l'analyse expérimentale de fibres de bambou et du mortier renforcé.

Dans la première partie ; les fibres naturelles ont récemment attiré l'attention des scientifiques en raison de leurs propriétés, de leur faible coût, de leur faible densité, de leur caractère renouvelables, biodégradables et non abrasif, le choix de la méthode de pré-formulation et la réalisation des gâchées préliminaire afin de définir le domaine d'étude.

La deuxième partie comporte deux phases essentielles : une phase préliminaire ; la base des données expérimentales recueillies sur une série d'essais prédéfinis par la méthode des plans d'expérience ; et une deuxième phase ; comportant le modèle établi dans la première partie, une différente nouvelle série les essais exécutés, et les résultats qui ont servi à établir d'autre modèle prédisant les valeurs de la résistance mécanique en compression et en flexion à « 28 » jours.

Mots clé : Fibre de bambou, Béton, Béton renforcé de fibres.

ABSTRACT

This work deals with the study of the mechanical, chemical of materials used and experimental analysis of bamboo fibers, mortar reinforced.

Into the first part; natural fibers have recently attracted the attention of scientists because of their properties of their low cost, of their low density, of their renewable character, biodegradable and nonabrasive, the choice of the method of preformulation and the realization of the preliminary batches in order to define the field of study.

A second part comprises three essentials phases; a preliminary phase; on the basis of experimental data collected on a series of preset tests by the method experimental designs; and a second part, containing the model established in the first part, anew series of tests will be carried out, and the results will be used to establish other models predicted the values of the mechanical resistance in compression and flexion at "28" days.

Key words: Bamboo fiber, Concrete, Concrete reinforced.

DIRECTEUR DE MEMOIRE: Professeur RANAIVONARIVO Gabriely

Madame RAHARISOA Soloarilala Claudia

Tél: 0343914200

Lot 36 II E HATer Ankadindramamy Antananarivo -101-