



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil

THEME :

ETUDE DU VIEILLISSEMENT ACCELERE D'UN COMPOSITE A FIBRES VEGETALES

Proposé et dirigé par :

Mr. K. SILHADI

Mr. M. BENTCHIKOU

Etudié par :

BENCHABANA Mohamed Ryad

Promotion JUIN 2009

RÉSUMÉ

Le présent travail consiste à étudier la durabilité d'un matériau composite formé d'une matrice cimentaire et de fibres cellulosiques issues de la récupération et du recyclage de papier-carton. Trois composites ont été envisagés correspondant à trois teneurs différentes en fibres à savoir 0 %, 4% et 16 %.

Pour ce faire, nous avons soumis notre matériau à un vieillissement accéléré matérialisé par 12 cycles mouillage-séchage conformément à la norme ASTM D 559.

Il apparaît alors à travers des essais de résistances mécaniques effectuées avant et après les cycles mouillage-séchage que la perte de résistance en compression est sensiblement la même pour les trois teneurs en fibres. Il a été noté aussi une certaine concordance pour les essais de flexion entre la littérature et notre composé dosé à 16 % en fibres

MOTS CLÉS :

Composite, Matrice cimentaire, Fibres cellulosiques, Conductivité thermique, Résistance mécanique, Durabilité.

ABSTRACT

The present work present the results of an experimental program designed to assess the durability of composite formed by cement matrix and cellulose fibers as result of recuperation and recycling of paper and carton. Three concentrations of fibers were studies (0 %, 4 % and 16 %).

The composites were submitted to accelerate aging through 12 cycles of wetting and draying, in according of ASTM D 559 norm.

The durability was investigated by determining the effect of accelerated aging through the compressive and flexural behavior of our composite. The results are in according with other studies.

KEY WORDS

Mortar Composite, Cement matrix, Cellulose fiber, Thermal conductivity, Mechanical strengths, Durability

ملخص

هذه الدراسة تهدف لبيان ديمومة مادة مركبة مكونة من الاسمنت + ألياف سيلولوزية و هذا لمختلف الحمولات (0%، 4%، 16%)

تم خضع هذا المركب الى دورات من الشبخوخة المتسرة و هذا ضمن 12 دورة من الخوص في الماء ثم التجفيف وفقا ASTMD 559 الانشاء البنائي

تم فحص ديمومة المركب اثر المقاومة الميكانيكية قبل وبعد الدورات. أظهرت النتائج بأن هناك التوافق مع الدراسات الأخرى.

الكلمات الجوهرية

مركب ملاط، قالب منجمي، ألياف سيلولوزية، الناقلية الحرارية، المقاومة الميكانيكية، الديمومة

REMERCIEMENTS

Merci à notre bon Dieu, notre guide, notre force, notre bonheur, et la raison de notre existence. C'est lui qui nous a fait comprendre le but de cette vie, et qui nous a donné le pouvoir d'aimer les gens et d'apprécier les choses. Merci d'être là dans les moments les plus difficiles.

Tout d'abord, Je remercie Monsieur K.SILHADI de m'avoir fait l'honneur d'être mon promoteur et surtout de travailler avec lui. Je lui suis très reconnaissant pour sa disponibilité, pour son écoute, ainsi que la confiance qu'il m'a témoigné.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du département Génie Civil de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, je tiens donc à remercier Mme R.KETTAB Chef du département Génie Civil pour m'avoir fourni les moyens de mener à bien ce projet, je remercie aussi Mme DEBICHE du laboratoire de Mécanique des Solés et Mr. AMRI technicien au laboratoire Construction et Environnement de m'avoir épaulé soutenu au cours de mes essais.

Un immense remerciement à Mr. le Professeur A.BALI, responsable du Laboratoire Construction et Environnement, initiateur au Matériau de Construction à traves l'excellent enseignement qu'il m'a dispensé au cours de ma graduation, ainsi que pour son soutien et sa générosité.

Je tiens aussi à remercier le Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP), pour m'avoir permis d'effectuer une partie de mes essais au niveau de leurs laboratoire.

Je remercie aussi Monsieur OMRACI, chef du département Génie Minier pour m'avoir donné accès à leur laboratoire et permis donc de mener dans les meilleures conditions mon projet de fin d'étude

Je remercie toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail de près ou de loin.

INDEX DES FIGURES

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART ET MATERIAUX DE L'ETUDE

FIG.1.1 : REPRESENTATION BIDIMENSIONNELLE DE L'EMPILEMENT DE GRAINS DE CIMENT DANS LA PATE	04
FIG.1.2 : CRISTAUX DE PORTLANDITE	05
FIG.1.3 : MORPHOLOGIE DU C-S-H	05
FIG.1.4 : CRISTAUX D'HYDROGRENAT	06
FIG.1.5 : CRISTAUX D'ETTRINGITE	06
FIG. 1.6 : MICROFIBRES SYNTHETIQUES	08
FIG. 1.7 : MACROFIBRES SYNTHETIQUES	08
FIG. 1.8 : GEOMETRIE DES FIBRES METALLIQUES	09
FIG.1.9 : FIBRE DE VERRE TEXTILE (TYPE S)	10
FIG.1.10 : STRUCTURE D'UNE PAROI CELLULAIRE (TYPE BOIS)	12
FIG.1.11 : STRUCTURE CHIMIQUE DE LA CELLULOSE	14
FIG.1.12 : STRUCTURE D'UNE CLASSE D'HEMICELLULOSE	15
FIG.1.13 : REPRESENTATION DE LA STRUCTURE DE LA LIGNINE	17
FIG.1.14 : DESINTEGRATION DANS UN TAMBOUR DES PRODUITS PAPIERS-CARTONS RECUPERES	19
FIG.1.15 : SCHEMA DU DEFIBRAGE ET DU DESENCRAGE DES PRODUITS PAPIERS-CARTONS PAR FLOTTATION	20
FIG.1.16 : <i>RELATION ENTRE LA CONSOMMATION DE PAPIER ET DE CARTON ET LA RICHESSE D'UN PAYS (2004)</i>	21
FIG.1.17 : <i>DEMANDE MONDIALE DE PAPIERS ET DE CARTONS 1970-2015</i>	21
FIG.1.18 : <i>CLASSIFICATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE COMPOSITES</i>	21
FIG.1.18 : <i>CLASSIFICATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE COMPOSITES</i>	23

CHAPITRE II : PROPRIETES MECANIQUES ET THERMIQUES DES BETONS DE FIBRES

FIG.2.1 : EFFET DE LA TENEUR EN FIBRES D'ACIER ET LEUR ELANCEMENT SUR L'OUVRABILITE VEBe	30
FIG.2.2 : VARIATION DE LA TEMPERATURE DANS ELEMENT DE CONSTRUCTION HETEROGENE	42
FIG.2.3 : APPAREILLAGE UTILISE POUR LA MESURE DE CONDUCTIVITE THERMIQUE PAR LA METHODE DITE « LASER FLASH »	45

CHAPITRE III : ELABORATION DU COMPOSITE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

FIG.3.1. SCHEMA ILLUSTRATIF DES DIFFERENTES PHASES DE TRAITEMENT DES DECHETS DE PAPIER	47
FIG.3.2. FIBRES SOUS MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB)	48
FIG.3.3. TABLE A SECOUSSES	50
FIG.3.4. DISPOSITIF POUR L'ESSAI DE RESISTANCE PAR FLEXION A TROIS POINTS	50
FIG.3.5. DISPOSITIF DE RUPTURE EN COMPRESSION	51
FIG.3.6. CT – METRE	52
FIG.3.7. SCHEMA DE LA SONDE FIL DU CT – METRE	52
FIG.3.8. SCHEMA DE MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE	52
FIG.3.9. SCHEMATISATION DES CYCLES MOUILLAGE-SECHAGE	53

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

FIG. 4.1. ETALEMENT A LA TABLE A CHOC EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN FIBRES	55
FIG. 4.2. VARIATION DE LA DENSITE APPARENTE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN FIBRES POUR DIFFERENTS COMPOSITES	56
FIG. 4.3. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN FIBRES	57
FIG. 4.4. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION DE CERTAINS MATERIAUX COMPOSITES	58
FIG. 4.5. RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN FIBRES	59
FIG. 4.6. RESISTANCE A LA COMPRESSION DE CERTAINS MATERIAUX COMPOSITES	60
FIG. 4.7. VARIATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN FIBRES	61
FIG. 4.8. VARIATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE POUR DIFFERENTS COMPOSITE	61
FIG. 4.9. VARIATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA DENSITE DU COMPOSITE	62
FIG. 4.10. EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION AVANT ET APRES CYCLES MOUILLAGE-SECHAGE	63

INDEX DES TABLEAUX

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART ET MATERIAUX DE L'ETUDE

TABLEAU. 1.1 : COMPOSITION MINERALOGIQUE MOYENNE TYPIQUE D'UN CLINKER DE CIMENT	03
TABLEAU.1.2 : PROPRIETES DES FIBRES SYNTHETIQUES	09
TABLEAU.1.3 : INVENTAIRE DES PRINCIPALES FIBRES DISPONIBLES AU PLAN MONDIAL PAR AN	13
TABLEAU 1.4 : PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES FIBRES VEGETALES COMME RENFORTS DE MATERIAUX COMPOSITES	25

CHAPITRE II : PROPRIETES MECANIQUES ET THERMIQUES DES BETONS DE FIBRES

TABLEAU.2.1 : VARIATION DE L'OUVRABILITE EN FONCTION DU DOSAGE VOLUMIQUE DES FIBRES METALLIQUES ET DE LA TAILLE DES GRANULATS	30
TABLEAU.2.2 : TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE DES BETONS DE FIBRES	34
TABLEAU.2.3 : METHODES EN REGIME VARIABLE D'APRES (DEGIOVANNI A, DEGIOVANNI A)	44

CHAPITRE III : ELABORATION DU COMPOSITE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

TABLEAU 3.1. CONSTITUANTS DU COMPOSITE POUR UN METRE CUBE DE VOLUME	49
---	----

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

TABLEAU 4.1. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE SECHE DU COMPOSITE	55
TABLEAU 4.2. PARAMETRES THERMIQUES ET DENSITE APPARENTE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN FIBRES	60
TABLEAU 4.3. PERTES EN RESISTANCE A LA COMPRESSION DUE AUX EFFETS DES CYCLES MOUILLAGE-SECHAGE	62

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
------------------------------	-----------

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART ET MATERIAUX DE L'ETUDE

I.1- LA MATRICE CIMENTAIRE	03
I.1.1- INTRODUCTION	03
I.1.2- HYDRATATION DU CIMENT	04
I.1.2.1- HYDRATATION DES SILICATES DE CALCIUM	04
I.1.2.2- HYDRATATION DES ALUMINATES DE CALCIUM	05
I.1.2.3- HYDRATATION DES ALUMINOFERRITES DE CALCIUM	05
I.1.3- PROPRIETES DES PRINCIPALES PHASES HYDRATES	05
I.1.3.1- LA PORTLANDITE	05
I.1.3.2- LES SILICATES DE CALCIUM HYDRATES (C-S-H)	05
I.1.3.3- LES ALUMINATES DE CALCIUM HYDRATES	05
I.1.3.4- L'ETTRINGITE	06
I.2- GENERALITES SUR LES FIBRES	07
I.2.1- DIFFERENTS TYPES DE FIBRES UTILISEES DANS LE RENFORCEMENT DU BETON	07
I.2.1.1- FIBRES SYNTHETIQUES	07
I.2.1.2- FIBRES METALLIQUES	09
I.2.1.3- FIBRES DE VERRES	10
I.2.1.4- FIBRES VEGETALES	11
I.2.1.4.1- CLASSIFICATION DES FIBRES VEGETALES	11
I.2.1.4.2- CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES FIBRES VEGETALES	12
I.2.2- PROCEDE DE FABRICATION ET DE RECYCLAGE DU PAPIER-CARTON	17
I.2.2.1- LA FABRICATION DES PATES A PARTIR DE PAPIERS-CARTONS RECUPEREES	18
I.2.2.1.1- LE DEFIBRAGE	18
I.2.2.1.2- LE DESENCRAGE PAR FLOTTATION	19
I.2.2.2- LA CONSOMMATION DE PAPIER-CARTON EN CHIFFRES	20
I.3- LES COMPOSITES	22
I.4- MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE FIBRES NATURELLES	23
I.4.1- ENJEUX	24
I.4.2- MATRICE POLYMERE ET FIBRES VEGETALES	26
I.4.3- MATRICE MINERALES ET FIBRES VEGETALES	26

CHAPITRE II : PROPRIETES MECANQUES ET THERMIQUES DES BETONS DE FIBRES

II.1- INTRODUCTION	28
II.2- COMPOSITION ET MISE EN ŒUVRE DES BETONS DE FIBRES	29
II.2.1- OUVRABILITE	29
II.2.2- METHODE DE COMPOSITION	31
II.2.3- FABRICATION ET MISE EN ŒUVRE DES BETONS DE FIBRES	33
II.3- CARACTERISATION MECANIQUE DES BETONS DE FIBRES	35
II.4- GENERALITES SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES	38
II.4.1- GENERALITES	38
II.4.2- DIFFERENTS PARAMETRES DE TRANSFERT DE CHALEUR	40
II.4.2.1- CONDUCTIVITE THERMIQUE	40
II.4.2.2- CAPACITE CALORIFIQUE	41
II.4.3- PRINCIPE DE L'ISOLATION THERMIQUE	41
II.4.4- DIFFERENTES THECHNIQUES DE MESURES	43
II.4.4.1- SELON LE MODE DE CHAUFFAGE	43
II.4.4.2- SELON LE REGIME DE CHAUFFAGE	43

CHAPITRE III : ELABORATION DU COMPOSITE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1- INTRODUCTION	46
III.2- ELABORATION DU COMPOSITE	47
III.2.1- MATIERES PREMIERES	47
III.2.1.1- CIMENT	47
III.2.1.2- EAU	47
III.2.1.3- FIBRES	47
III.2.2- CONFECTION DU COMPOSITE	48
III.3- TECHNIQUES EXPERIMENTALES	49
III.3.1- CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE	49
III.3.1.1- MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	49
III.3.1.2- OUVRABILITE	49
III.3.1.3- RESISTANCE MECANIQUE	50
III.3.2- CARACTERISATION THERMIQUE	52
III.3.3- ETUDE DE LA DURABILITE	53

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

IV.1- INTRODUCTION	54
IV.2- DETERMINATION DE L'OUVRABILITE	54
IV.3- ETUDE DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	55
IV.4- CARACTERISTIQUES MECANIQUES	57
IV.4.1- RESISTANCE A LA FLEXION	57
IV.4.2- RESISTANCE A LA COMPRESSION	59
IV.5- ETUDE DES PARAMETRES THERMIQUES A L'ETAT SEC	60
IV.6- ETUDE DE LA DURABILITE DU COMPOSITE BINAIRE	62
IV.7- CONCLUSION	63
CONCLUSION GENERALES ET PERSPECTIVES	64
BIBLIOGRAPHIE	66

INTRODUCTION

Les bétons renforcés de fibres arrivent aujourd'hui à maturité. Depuis une quarantaine d'années, des milliers de publications ont décrit l'action des fibres, la formulation du matériau et ses performances potentielles. Il ne fait plus aucun doute aux yeux des chercheurs mais également de nombreux ingénieurs que certaines applications structurales peuvent intégrer les bétons renforcés de fibres comme matériau à part entière. En effet, ces matériaux, du fait de leurs propriétés (mécanique, thermique, acoustique etc.), permettent de remplir simultanément différentes fonctions (renfort, isolation, etc.). Toutefois, l'étude de tels matériaux doit de plus en plus, à cause des normes en vigueur, prendre en compte le volet environnemental dans leur développement.

Les composites fibres végétales / matrice cimentaire s'inscrivent parfaitement dans cette démarche de développement durable, que ce soit pour valoriser des ressources naturelles renouvelables, ou, grâce à leur caractère partiellement biodégradable, pour limiter la production de déchets. Les récentes recommandations sur les déchets ultimes sont d'ailleurs très restrictives quant au devenir des matériaux lors de la destruction des édifices. Les bonnes propriétés en termes d'isolation thermique et acoustique de ces matériaux en font également un atout majeur pour réaliser des économies d'énergie substantielles. Le choix du renfort reste cependant très important. Il doit avoir de bonnes propriétés intrinsèques de résistance (module d'élasticité, géométrie etc.) ou d'isolation (porosité etc.), doit être compatible avec la matrice cimentaire avec laquelle il va être associé et doit aussi avoir un coût acceptable.

Il faut donc pour franchir ce cap, c'est-à-dire passer du laboratoire aux bureaux d'études, établir des critères de caractérisation fiable des performances du matériau. Il n'est plus acceptable de se contenter d'apprécier de façon qualitative l'apport des fibres. C'est en fournissant aux bureaux d'études des grandeurs mécaniques pertinentes que les méthodes de dimensionnement qui immergent actuellement pour les structures en béton renforcé de fibres pourront s'ancrer durablement aux côtés des règlements en vigueur pour le béton armé. Le développement d'applications industrielles innovantes est à cette condition et c'est donc un défi aujourd'hui pour la recherche dans ce domaine.

Notre travail fait suite à une précédente étude [**Bentchikou M.** (2008)] qui élaborait et étudiait les propriétés d'un matériau composite à matrice cimentaire (Portland) et fibres cellulosiques. Visant, pour ce matériau, une application dans le bâtiment, et sans perdre de vue le coût du produit final, il a utilisé comme fibres, celles provenant des circuits de

recyclage par la récupération des papiers et cartons en participant ainsi à éliminer une part des déchets ménagers et ceux générés par l'emballage industriel. Il a pu en outre mettre en œuvre un matériau aux performances thermomécaniques acceptables suivant les normes en vigueur, contribuant à la fois à utiliser des produits de recyclage et à la réduction des dépenses d'énergie pour le chauffage et la climatisation dans le secteur du bâtiment.

Dans l'optique de passer à la production à grande échelle et dans un souci de développement durable, une étude de la durabilité s'avère indispensable afin d'anticiper et de mieux maîtriser le comportement à long terme de ce matériau.

C'est dans cette perspective que s'inscrit notre présent travail ; il s'agira d'étudier l'effet du vieillissement accéléré, conformément à la norme **ASTM D 559**, sur les propriétés mécaniques de composite.

Afin de répondre à cet objectif, notre travail s'articule autour de quatre chapitres :

- Le premier chapitre, consacré à l'étude bibliographique et aux matériaux de l'étude, présente d'abord le ciment étudié et ses mécanismes d'hydratation, pour ensuite poursuivre sur le potentiel économique de l'utilisation des fibres issues du recyclage du papier et carton comme renfort dans le béton. Un état de l'art des composites à matrice minérale, renforcés par des végétaux de type bois / fibres végétales, est ensuite dressé. Une dernière partie est consacrée à l'enjeu et l'avantage des composites à fibres végétales ;
- Le deuxième chapitre passera en revue les propriétés physico-mécaniques et thermiques des bétons de fibres utilisés dans la construction. Différentes méthodes et techniques de caractérisations de ces paramètres seront en outre citées ;
- Le troisième chapitre donnera le mode opératoire pour l'élaboration de notre composite ; pour ensuite passer aux techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation de notre matériaux ;
- Le quatrième et dernier chapitre exposera les différents résultats établis par l'expérimentation de notre matériau, notamment celles relatives aux essais de durabilité. Ainsi que la comparaison de ces résultats avec ceux trouvés dans la littérature ;

Enfin nous clôturons cette étude en présentant les conclusions générales et les travaux et perspectives qui peuvent leur être donnés.

CHAPITRE I

*ETAT DE L'ART ET MATERIAUX DE
L'ETUDE*

ETAT DE L'ART ET MATERIAUX DE L'ETUDE

I.1- LA MATRICE CIMENTAIRE :

I.1.1- INTRODUCTION :

Le ciment est un matériau que tout le monde croit connaître tant il est courant. On l'emploie en effet pour fabriquer le béton qui est le matériau de construction le plus utilisé au monde. La raison en est son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et sa disponibilité pratiquement universelle. Il suffit, en effet, de mélanger un peu de poudre avec de l'eau, du sable et des graviers pour obtenir, à température ambiante et en quelques heures, un matériau dur [1].

Bien que déjà utilisé par les Romains, le béton a eu le développement qu'on lui connaît grâce à la découverte du ciment Portland au XIXe siècle. Celui-ci a été breveté par Aspdin sur la base des travaux de Louis Vicat sur les chaux hydrauliques. Le ciment Portland est un mélange de clinker et de sulfate de calcium dans un rapport d'environ 95-5 %. Le clinker est fabriqué par cuisson vers 1450 °C d'un mélange finement broyé et homogénéisé de calcaire et d'argile (ou de marnes) dans un rapport d'environ 80-20 % pour former des silicates de calcium ainsi que des aluminates et aluminoferrites de calcium.

La composition minéralogique moyenne du clinker de ciment Portland est donnée dans le tableau 1.1

Constituant	Notation cimentaire	Formule brute	% massique des différentes phases dans le clinker
Silicate tricalcique (alite)	C3S	3CaO SiO ₂	60-65
Silicate bicalcique (bélite)	C2S	2CaO SiO ₂	10-20
Aluminate tricalcique	C3A	3CaO Al ₂ O ₃	8-12
Aluminoferrite tétracalcique	C4AF	4CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	8-10

Tableau. 1.1 : Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment [1]

I.1.2- HYDRATATION DU CIMENT :

« Hydratation » est un mot utilisé pour décrire de la manière la plus générale, l'ensemble des réactions qui interviennent dès que l'on mélange le ciment avec de l'eau [1].

La principale propriété du ciment est, bien sûr, que son mélange avec l'eau conduit à un solide : la pâte de ciment hydratée. Sa microstructure résulte du caractère granulaire du produit de départ. Dans le milieu ionique que constitue la solution interstitielle et dans les secondes qui suivent la fin du gâchage, des forces attractives maintiennent les grains de ciment encore anhydres en contact formant ainsi un solide poreux peu résistant. Celui-ci va être renforcé au cours de l'hydratation par la formation des hydrates, d'abord près des points de contact entre les grains anhydres, puis tout autour des grains, comblant ainsi, au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit, l'espace laissé libre entre les grains et occupé initialement par l'eau. Cette évolution est schématisée sur la figure.1.2.

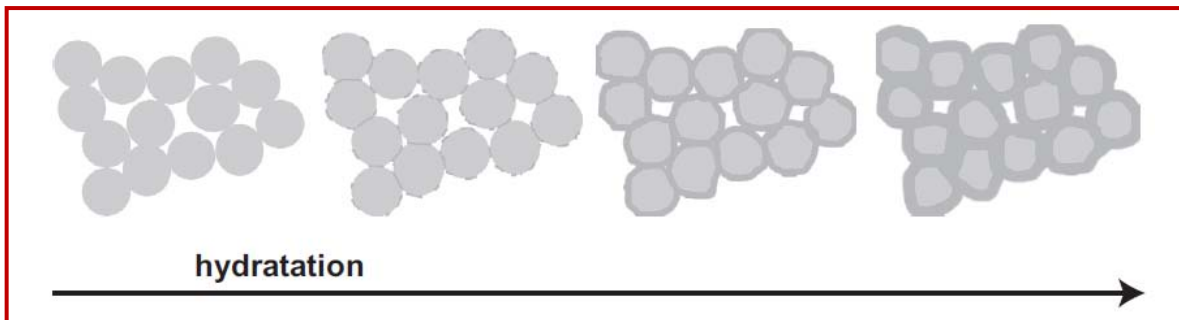


Fig.1.2 : Représentation bidimensionnelle de l'empilement de grains de ciment dans la pâte [1]

I.1.2.1- HYDRATATION DES SILICATES DE CALCIUM :

Le silicate tricalcique, Ca_3SiO_5 , ou C_3S en notation cimentière, est la principale phase constituant le clinker de ciment Portland. Dans le clinker on le nomme alite, ce n'est pas du silicate tricalcique pur, il contient un certain nombre d'impuretés en substitution dans son réseau cristallin. Dès qu'il est en contact avec l'eau, après une hydroxylation superficielle qui transforme les ions du solide en ions présents en solution, le C_3S se dissout selon l'équation bilan suivante :



Qui s'écrit en notation cimentaire:

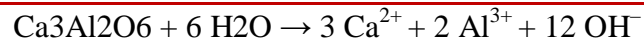


Le même enchaînement de réactions entre en jeu dans le cas du C_2S pour aboutir à l'équation bilan :



I.1.2.2- HYDRATATION DES ALUMINATES DE CALCIUM :

Le même type de processus que dans le cas des silicates de calcium intervient lorsque l'aluminate tricalcique est mis au contact de l'eau. Son hydrolyse et sa dissolution conduisent à :



I.1.2.3- HYDRATATION DES ALUMINOFERRITES DE CALCIUM :

En ce qui concerne l'hydratation du C4AF, elle conduit à la précipitation du même type de composés que ceux qui sont formés à partir de la dissolution du C3A, en particulier lorsque celle-ci est réalisée en présence d'hydroxyde de calcium. Dans ce cas, une partie des ions Al^{3+} dans les hydrates sont substitués par des ions Fe^{3+} . Dans le cas contraire, une partie importante du fer précipite sous forme d'hydroxyde de fer, $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

I.1.3- PROPRIETES DES PRINCIPALES PHASES HYDRATES :

I.1.3.1- La Portlandite :

La Portlandite est le nom minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé. Son nom vient, bien sûr, du fait qu'on la trouve dans le ciment Portland hydraté. C'est la phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée (1,6 g/L ce qui correspond à un pH de 12,6).

Sa présence dans la pâte de ciment, par son équilibre de solubilité maintient le pH élevé de la solution interstitielle.

C'est également une des phases les mieux cristallisées. Elle cristallise sous forme de cristaux hexagonaux plus ou moins développés dans la pâte de ciment, les pores et l'interface pâte/granulat.

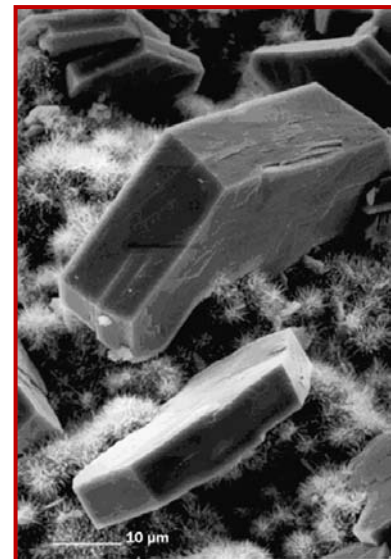
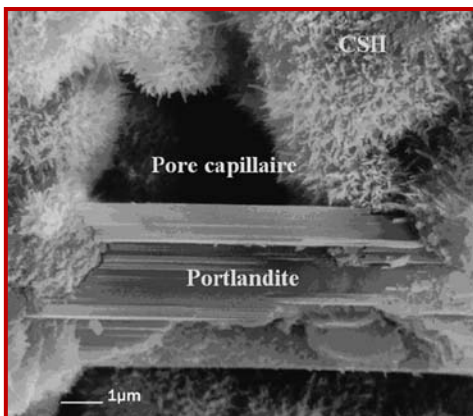


Fig.1.2 : Cristaux de Portlandite [1]

I.1.3.2- Les Silicates de calcium hydratés (C-S-H) :



Les C-S-H constituent la majeure partie de la phase liante de la pâte de ciment. On parle souvent de gel de C-S-H se référant à des composés amorphes. Ce sont en fait des composés nanocristallins constitués de particules nanométriques agrégées les unes aux autres.

Fig.1.3 : Morphologie du C-S-H [1]

La principale caractéristique du C-S-H est qu'il porte une forte densité de charges électriques de surface.

En ce qui concerne sa stabilité le C-S-H est très peu soluble dans une solution saturée par rapport à la portlandite (de l'ordre de 1 mg/L), sa solubilité augmente quand la concentration en hydroxyde de calcium en solution diminue et si le pH descend en dessous de 10, il se dissout au profit de la silice qui devient moins soluble.

I.1.3.3- Les Aluminates de calcium hydratés :

On distingue les phases hexagonales (C₂AH₈–C₄AH₁₃) et la phase cubique C₃AH₆.

▪ Le C₃AH₆ ou hydrogrenat :

Le C₃AH₆, Ca₃Al₂(OH)₁₂ est la forme la moins soluble des aluminates de calcium hydratés. C'est le produit de l'hydratation des ciments alumineux, on le trouve rarement dans les ciments Portland hydratés à des températures normales.

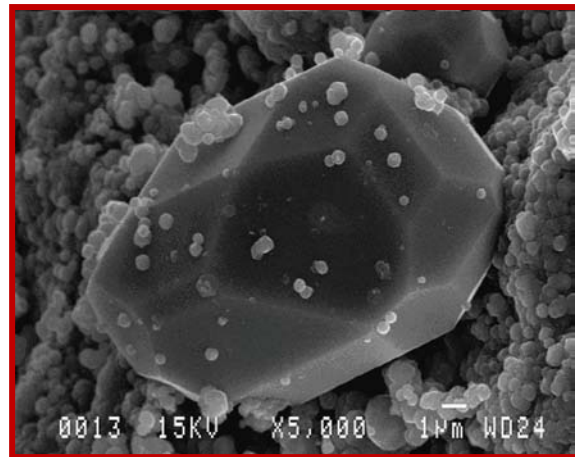
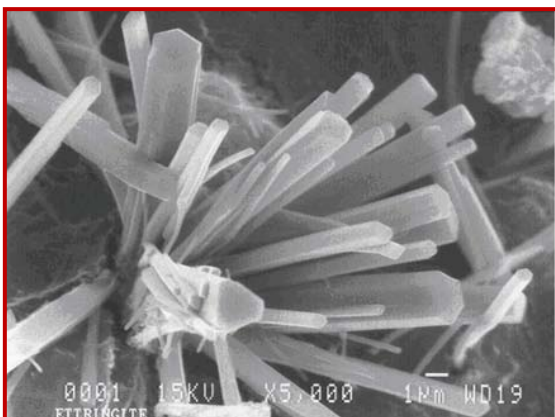


Fig.1.4 : Cristaux d'hydrogrenat [1]

▪ Les hexagonales :

La structure des aluminates de calcium hexagonaux dérive directement de celle de la portlandite. Les hydrates les plus stables sont les carboaluminates de calcium qui se forment dans les ciments contenant des ajouts calcaire ou simplement à partir des carbonates dissous dans la solution interstitielle du fait du contact avec le CO₂ atmosphérique.

I.1.3.4- L'ettringite :



La structure de l'ettringite est constituée de colonnes de cations coordonnés par les oxygènes des hydroxydes et des molécules d'eau

Fig.1.5 : Cristaux d'ettringite [1]

I.2- GENERALITES SUR LES FIBRES :

Depuis toujours, les chercheurs visent à l'amélioration des performances des matériaux de construction. Pour y parvenir, l'une des pratiques les plus utilisées est le renforcement par des fibres incluses en son sein.

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

Comme notre étude s'intéresse particulièrement à l'utilisation des fibres de papiers recyclés dans le béton, nous présenterons les différents types de fibres végétales utilisées dans la construction ainsi que le procédé de fabrication et de recyclage du papier-carton.

I.2.1- DIFFERENTS TYPES DE FIBRES INDUSTRIELLES UTILISEES DANS LE RENFORCEMENT DU BETON :

Il existe sur le marché diverses catégories de fibres pouvant être incorporées au béton. Voici les quatre classes de fibres existantes [2] :

- *Synthétique* (acrylique, aramide, carbone, nylon, polyester, polyéthylène et polypropylène);
- *Métallique* (inoxydable, galvanisé, fil étiré à froid, tôle découpée, extrusion de matière fondue);
- *Verre* (sodocalcique, borosilicaté, Cem-Fil et NEG);
- *Naturelle ou végétales* (bagasse, noix de coco, jute, maguey, banane, palmier et bambou, etc....);

I.2.1.1- Fibres Synthétiques :

Les fibres synthétiques proviennent des polymères organiques et sont le résultat de recherches et des développements de l'industrie pétrochimique et du textile. Les fibres reconnues comme les plus résistantes sont : les polyoléfines, les polypropylènes, les polyéthylènes, le nylon et le carbone.

Les fibres synthétiques s'incorporent à la pâte de ciment sans provoquer de réaction chimique et sans se corroder. De plus, l'allongement à la rupture des fibres synthétiques, qui est de 15 à 20 %, favorise la ductilité du béton. Les fibres synthétiques tirées des matières plastiques sont, par contre, peu résistantes au feu. La température de fusion ou température à laquelle les fibres deviennent très molles et perdent leurs propriétés est

d'environ 160°C. L'appendice H de la norme CSA A23.1 classe les fibres synthétiques en deux catégories selon leur dimension : les microfibres et les macrofibres synthétiques.

Les microfibres synthétiques : La classification des microfibres synthétiques s'effectue à partir de la dimension et du poids de la fibre, conformément à l'industrie du textile. Le diamètre ou le diamètre équivalent doit être converti en denier [2].

Les microfibres synthétiques sont en forme de monofilament très fin ou fibrillé, figure 1.6.

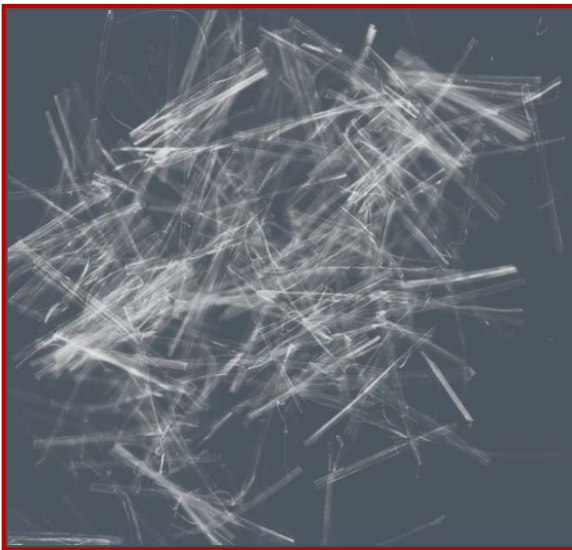


Fig. 1.6 : Microfibres synthétiques [2]

Leur longueur varie de 0,8 à 50 mm et leur diamètre est inférieur à 0,2 mm. Les microfibres synthétiques sont utilisées pour diminuer le retrait plastique des bétons.

L'amélioration des propriétés mécaniques par l'utilisation de macrofibres synthétiques est proportionnelle à leur taux d'addition et à leur efficacité. De plus, ces fibres apportent une augmentation de la ténacité du béton et, par le fait même, elles améliorent son comportement en postfissuration [2].

Les macrofibres synthétiques :

Ces fibres sont en forme de filaments grossiers. Leur longueur varie de 25 à 65 mm et leur diamètre équivalent est de 0,2 à 1,2 mm. L'utilisation de ce type de fibre permet une meilleure résistance aux impacts et à la fatigue et améliore le contrôle de la fissuration. Certains types de fibres sont aussi reconnus pour diminuer la fissuration provoquée par le retrait plastique.



Fig. 1.7 : Macrofibres synthétiques [2]

Le tableau 1.2, traduit du document de l'American Concrete Institut (ACI 544-1R), présente différents types de fibres synthétiques ainsi que leurs propriétés mécaniques [2] :

Type de fibres	Diamètre équivalent (x 10 ⁻⁶ m)	Densité relative	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Pourcentage d'allongement à la rupture	Température d'inflammation (°C)	Température de fusion d'oxydation ou de décomposition (°C)	Absorption d'eau (ASTM D 570) % de masse
Acrylique	5 - 17	1,16 - 1,18	200 - 1000	14 000 - 19 000	7,5 - 50	-	220-235	1,0 - 2,5
Aramide I	12	1,44	2900	62 000	4,4	élevée	480	4,3
Aramide II (module élevé)	10	1,44	2340	120 000	2,5	élevée	480	1,2
Carbone I	8	1,6 - 1,7	2480 - 3030	380 000	0,5 - 0,7	élevée	400	nul
Carbone II	9	1,6 - 1,7	3445 - 4000	230 000	1,0 - 1,5	élevée	400	nul
Carbone III	10 - 13	1,6 - 1,7	480 - 795	27 000 - 35 000	2,0 - 2,4	élevée	400	3 - 7
Carbone IV	9 - 18	1,8 - 2,15	1515 - 3100	150 000 - 480 000	0,5 - 1,1	élevée	500	nul
Nylon	23	1,14	1000	5200	20	-	200-220	2,8 - 5,0
Polyester	10 - 80	1,34 - 1,39	220- 1100	17 000	12 - 150	590	255	0,4
Polyéthylène	25 - 1000	0,92 - 0,96	80 - 600	5000	3 - 80	-	135	nul
Polypropylène	20 - 200	0,90 - 0,91	140 - 700	3400 - 4800	15	590	165	nul

Tableau.1.2 : Propriétés des fibres synthétiques [2]

I.2.1.2- Fibres Métalliques :

Les fibres métalliques sont de types et de formes variées et présentent une très bonne compatibilité avec le béton. La figure 1.8, présente différentes géométries de fibres métalliques.

Les fibres sont composées d'acier au carbone, d'acier inoxydable ou d'acier galvanisé contre la corrosion. En général, la longueur des fibres varie de 25 à 60 mm et le diamètre varie de 0,5 à 1,3 mm. La fabrication des fibres métalliques s'effectue selon plusieurs méthodes en relation avec leurs formes géométriques multiples (ASTM A 820) [2].

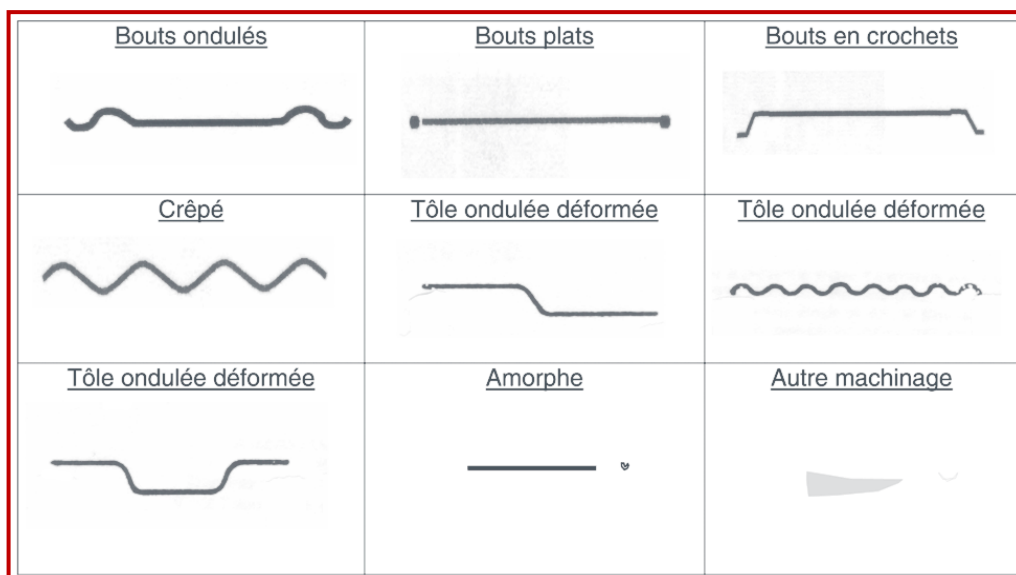


Fig. 1.8 : Géométrie des fibres métalliques

I.2.1.3- Fibres de Verre :

Les fibres de verre sont produites essentiellement sous deux formes : les fibres d'isolation et les fibres textiles.

Les fibres d'isolation se présentent sous la forme d'un enchevêtrement de fibres assez courtes constituant une sorte de matelas, souvent désigné sous le nom de « laine de verre ». Le diamètre moyen d'une fibre est de quelques microns. Le matelas est considéré comme un isolant thermique en raison de l'air emprisonné et immobilisé entre les fibres et qui représente plus de 99% de son volume.

La composition du verre à destination des fibres textiles est très différente de celle employée pour les verres courants. Les fibres doivent pouvoir résister aux agressions des agents chimiques et avoir une résistance mécanique à la traction exceptionnellement élevée. Leur composition, très pauvre en oxydes alcalins, contient des quantités importantes d'alumine, d'anhydride borique et d'oxydes alcalinoterreux. Elles sont destinées à différents domaines notamment celui du bâtiment.

Les fibres de verre sont très fragiles. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines ou de fils coupés. La plupart des verres peuvent être attaqués par les alcalis des ciments. Cependant, des recherches ont pu mettre en évidence une dernière génération de fibre de verre (type S) ayant une bonne résistance aux alcalis, ou encore des verres (type R) pouvant résister cette fois-ci à la corrosion [3 - 7 - 17].

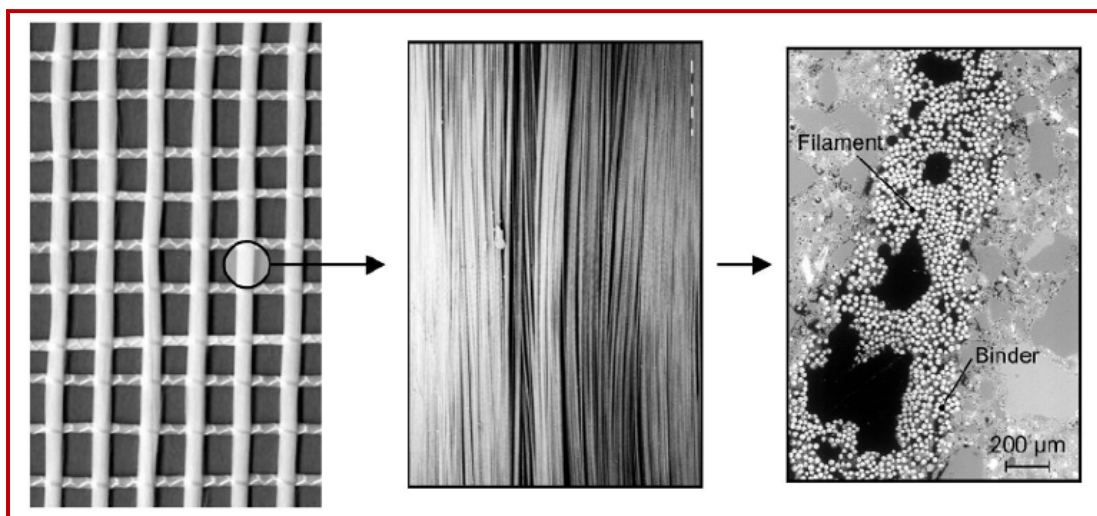


Fig.1.9 : Fibre de verre textile (type S) [3]

I.2.1.4- Fibres Végétales :

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétales dans la construction remonte aux années où l'on fabriquait des briques renforcées par de la paille ou des roseaux ; et c'est en 1970 qu'est apparu le premier composite associant un liant hydraulique à des fibres végétales, en effet le plâtre renforcé à servit dans la réalisation de plusieurs ouvrages.

Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine du renforcement de ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé rencontrés avec les fibres d'amiante, plusieurs axes de recherches se sont orientés vers la substitution de celles-ci par les fibres végétales [7].

I.2.1.4.1- Classification des fibres végétales :

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance, à savoir [7] :

a- Les Fibres de Feuilles :

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par un chevauchement de paquet qui entoure les feuilles pour les renforcer. Ces fibres sont dures et rigides. Les fibres de feuille les plus cultivées sont: la fibre de Sisal, de Henequen et d'Abaca [17].

b- Les fibres de tiges :

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

Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cordes de toutes longueurs. Elles sont par la suite séparées individuellement par un processus de défilage. Les fibres, une fois séparées, sont utilisées dans la fabrication de cordes ou de textiles ou bien dans le renforcement du ciment et béton.

Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie de sunn, de kenaf, d'urena et de chanvre [17].

c- Les fibres de bois :

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments [7].

d- Les fibres de surface :

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autre le coton et la noix de coco (coco). Les fibres de coco ont donné de bons résultats pour la résistance à la flexion du ciment de fibre [7].

I.2.1.4.2- Caractéristiques Chimiques des fibres végétales :

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

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

Mais avant d'aborder la caractérisation chimique des fibres végétales, nous rappelons dans la figure suivante la structure classique d'un matériau naturel avec la localisation des différents constituants [4].

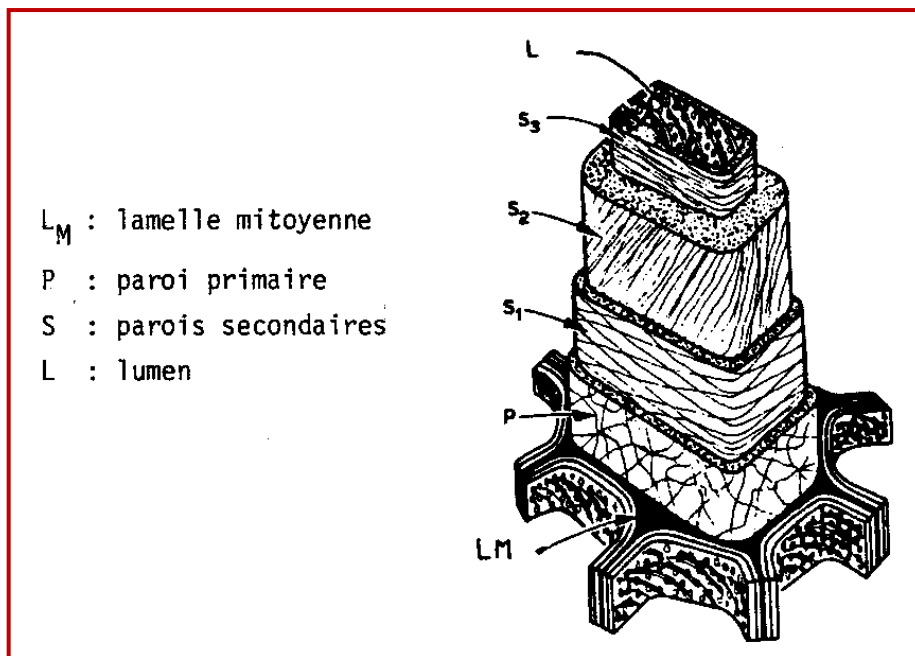


Fig.1.10 : Structure d'une paroi cellulaire (type bois). LM contient la lignine, P et S majoritairement les fibres cellulosiques [4].

De toute la grande variété de sources lignocellulosiques dont on peut disposer, le bois est le type de lignocellulosique le plus utilisé au niveau mondial spécialement à cause de son utilisation pour la fabrication des pâtes à papier, dans les industries du mobilier et la construction, et aussi comme combustible. La production globale du bois de scierie au niveau mondial était en 1997 de $122,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour les feuillus et $316,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour les conifères.

La majorité des fibres naturelles (fibres lignocellulosiques hors bois) proviennent de plantes qui se trouvent dans les pays en voie de développement comme l'Inde, la Chine ou le Brésil. La production de ce type de fibres est difficile à estimer à cause de la diversité des sources et des espèces. Cela dit, on peut faire une estimation à partir de différentes sources bibliographiques comme indiquée dans le tableau 1.3 [4] :

Source de fibres	Milliers tonnes fibres sèches
Bois	1 750 000
Pailles (Blé, riz, orge, avoine, seigle, lin)	1 145 000
Tiges (maïs, sorgho, coton)	970 000
Bagasse de canne à sucre	75 000
Roseaux	30 000
Bambou	30 000
Fibres de Coton	15 000
Tiges (jute, kénaf, chanvre)	8 000
Papyrus	5 000
Péribériennes (jute, kénaf, chanvre)	2 900
Linters de coton	1 000
Alfa	500
Feuilles (sisal, abaca, henequen)	480
Sabai (herbe à éléphant)	200

Tableau.1.3 : Inventaire des principales fibres disponibles au plan mondial par an [4]

a- La Cellulose :

La cellulose est le polymère d'origine naturelle le plus abondant et aussi le plus intéressant technologiquement. Les fibres cellulosiques proviennent habituellement du bois, soit des feuillus soit des résineux (conifères) mais ce sont également des fibres de tiges et feuilles comme les pailles de céréales, les cannes ou les roseaux , des fibres prélibériennes comme le lin, le chanvre ou le kénaf , des fibres de feuilles comme l'abaca ou le sisal ou les fibres de graines comme le coton ou les noix de coco.

La cellulose est composée de macromolécules constituées par la polymérisation d'une molécule élémentaire : le glucose. La cellulose est ainsi constituée exclusivement de carbone, d'oxygène et d'hydrogène. Les macromolécules groupées parallèlement en faisceaux forment les filaments micellaires qui, rassemblés en grand nombre donnent naissance aux fibrilles. Ces dernières associées entre elles, forment les fibres. La cellulose est une substance peu sensible à la plupart des agents chimiques [4 - 5].

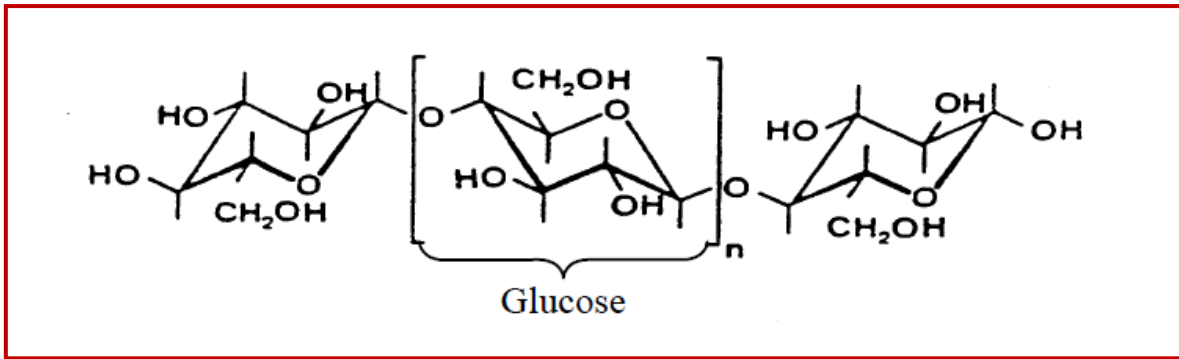


Fig.1.11 : Structure chimique de la cellulose [5]

Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogène qui se développent entre les chaînes. Malgré la présence multiple de groupements fonctionnels hautement réactifs que sont les hydroxyles, la cellulose réagit difficilement. Les interactions moléculaires intercaténares sont fortes et assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs car la rupture de ces interactions est le préalable à toute réaction. 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. Alors que la contrainte à la rupture des fibres de cellulose très cristalline peut atteindre 700 MPa à sec, elle peut perdre jusqu'à 30% de sa valeur en atmosphère humide. Toujours grâce à une grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. Comme tous les polymères qui contiennent de l'oxygène dans la chaîne principale, la cellulose est sensible à l'hydrolyse (fonction cétal ou acétal qui permet cette hydrolyse). En milieu acide par exemple, la coupure des chaînes est aléatoire et, à partir de la cellulose native, sont obtenus progressivement des espèces de degré de polymérisation inférieur puis des oses bien identifiés, jusqu'au glucose.

b- L'Hémicellulose :

De composition chimique très voisine de la cellulose, elle est combinée à la cellulose et partiellement à la lignine. L'hémicellulose permet d'unir les filaments micellaires de cellulose pour former les fibrilles.

On introduit sous cette dénomination tous les polysaccharides qui se trouvent dans les lignocellulosiques à côté de la cellulose et des pectines. Les hémicelluloses, à la différence

de la cellulose sont composés de différents sucres qui forment des chaînes courtes avec ramifications. Les sucres présents peuvent se diviser en différents groupes. La chaîne principale d'une hémicellulose peut être constituée d'une seule unité comme par exemple les xylanes ou de deux ou plusieurs unités de sucres différentes (hétéropolymère).

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 conifères tandis que le xylose et les groupes acétyle sont plus abondants dans les feuillus. Dans d'autres lignocellulosiques, le principal monosaccharide dans la fraction hémicellulosique est le xylose tandis que les autres sucres sont très minoritaires.

Les hémicelluloses se caractérisent par leur solubilité en solutions alcalines diluées. Il y a quelques hémicelluloses qui peuvent s'extraire à l'eau chaude mais dans la majorité des cas, on a besoin d'une solution à environ 10% NaOH pour les extraire. Après l'extraction alcaline, un groupe d'hémicelluloses précipite quand on neutralise la solution. Ce type d'hémicelluloses (nommées hémicelluloses A) sont des polysaccharides de masse molaire élevée, linéaires ou presque linéaires et normalement ayant très peu (ou aucun) de groupes carboxyliques. Les hémicelluloses qui restent en solution (nommées hémicelluloses B) sont généralement plus branchées, avec une masse molaire plus basse et avec de nombreux groupes carboxyliques.

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, kénaf ou coques de tournesol montrent le comportement rhéologique épaississant [4-5].

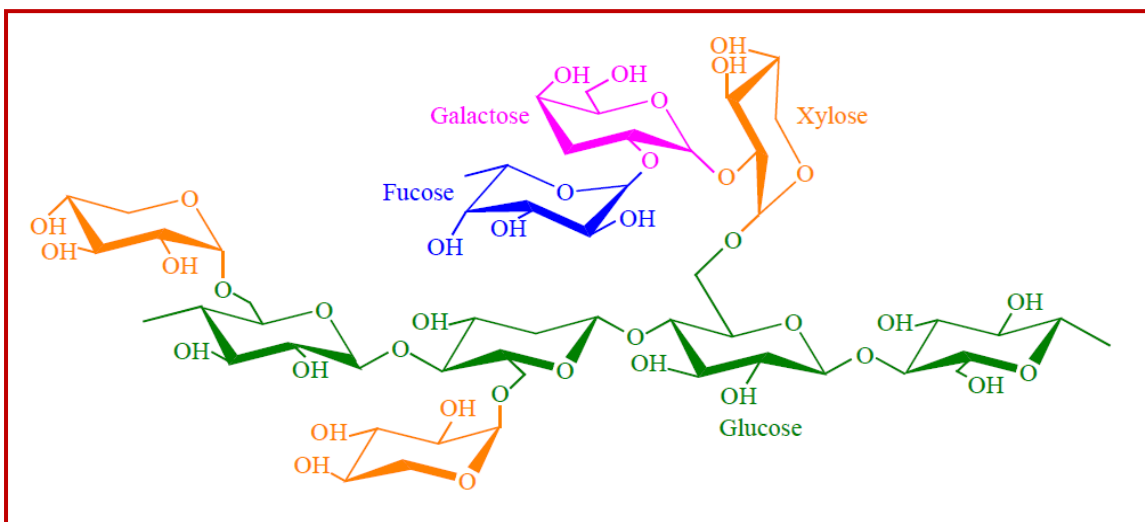


Fig.1.12 : Structure d'une classe d'hémicellulose [5]

c- La Lignine :

La lignine est composée comme la cellulose et l'hémicellulose de carbone, d'oxygène et d'hydrogène. C'est une matière qui soude les fibres entre elles et confère aux plantes leur rigidité. Il faudra soit la dissoudre à l'aide de produits chimiques, soit l'assouplir par montée de température, afin d'extraire du bois des fibres cellulosiques souples et individualisées.

La lignine qu'on utilise pour des applications en tant que polymère provient essentiellement des liqueurs noires issus des deux procédés de fabrication de pâtes papetières les plus répandus industriellement : le procédé au sulfate ou procédé kraft et le procédé au sulfite.

La lignine est un polymère polyphénolique formé à partir d'unités phénylpropane avec comme « monomères » principaux les alcools coumarilique, synapilique et coniférylique. Ces unités sont unies par des liaisons *aryl-alkyl-éther* pour donner un réseau tridimensionnel dans le végétal. La lignine a une structure très hétérogène qui varie en fonction des différentes espèces végétales. C'est pour cette raison qu'il est extrêmement difficile de préciser totalement une structure donnée et qu'on propose donc plutôt des structures schématiques qui représentent une distribution moyenne des différentes unités phénylpropane et montrent en plus la présence de fonctions minoritaires (C=C, C=O, ...).

On peut utiliser la lignine comme polymère dans les domaines d'application suivants [4]:
Adhésif ou liant pour : briquettes de charbon, céramiques, charbon actif, fertilisants, agent antistatique de la poussière, panneaux de particules, fibres de verre, pâte de linoléum, stabilisants de sols, minerais, sable dans l'industrie de fonderie, aliments pour animaux.

Dispersant pour : ciments, argiles, céramiques, teintures, pigments, boues de forage, tannage du cuir, mélanges de béton, gypse, charbon actif.

Stabilisateur d'émulsions : asphalte, cirage, pigments, teintures, pesticides, cires.

Séquestrant dans: systèmes de micronutriments, composés de nettoyage, traitement des eaux pour chaudières et systèmes de réfrigération.

Aide à la mouture dans : fabrication du ciment Portland, fertilisants de jardin.

Autres applications : charge dans le caoutchouc, précipitation de protéines, électrolyse (raffinage du cuivre), réduction de la teneur en eau dans le ciment et le béton, agents d'entraînement de l'air dans le ciment [4].

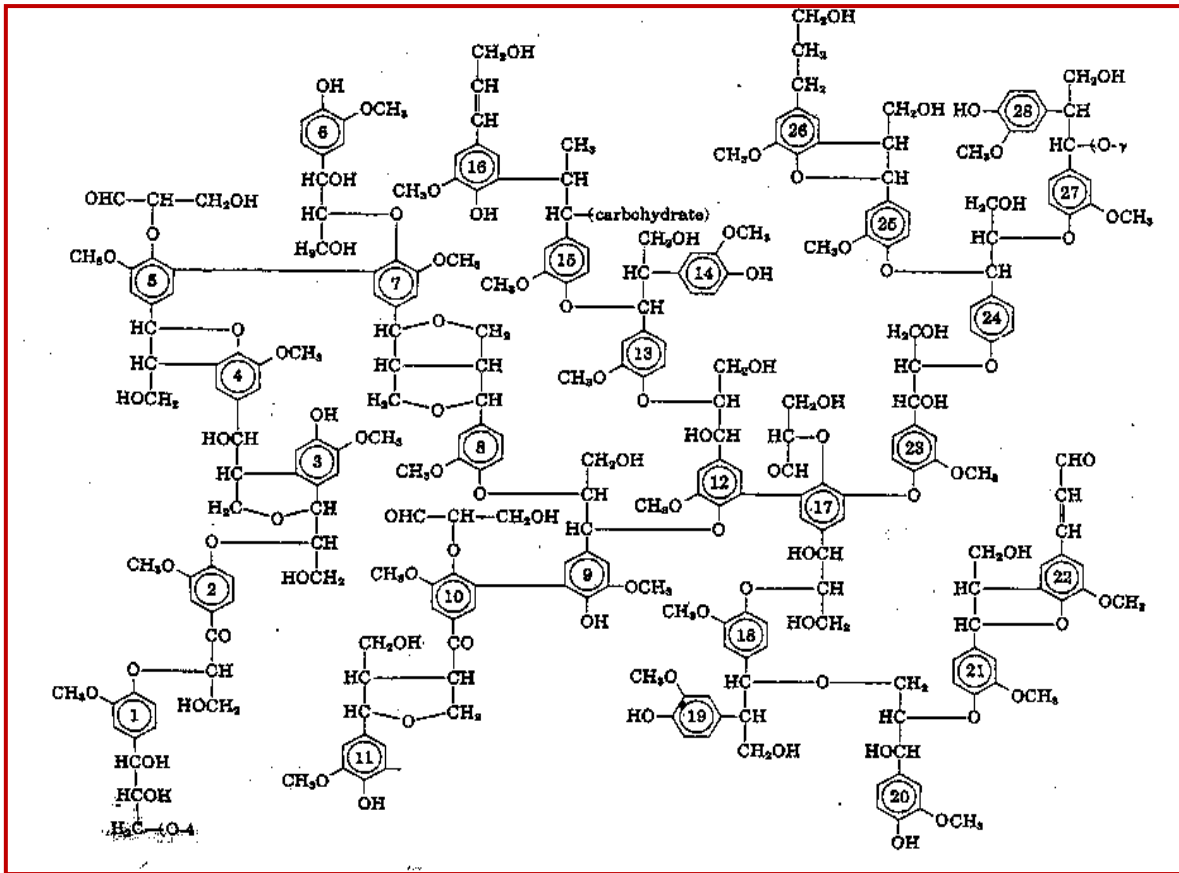


Fig.1.13 : Représentation de la structure de la Lignine [4]

I.2.2- Procédé De Fabrication Et De Recyclage Du Papier-Carton :

Après avoir passé en revue les différentes fibres utilisées pour le renforcement du béton, et étant donné à titre de rappel, que dans le cadre de ce projet, les fibres utilisées pour le renforcement du béton sont issues du recyclage de papier-carton, nous abordons maintenant le procédé de fabrication et de recyclage du papier-carton et ce afin de mieux cerner les propriétés intrinsèques du matériau composite.

Le papier et le carton sont deux matériaux fibreux de composition identique. Le grammage de ces matériaux (en g/m²) permet de définir plus précisément le terme à employer.

Le bambou, le chanvre, le lin, le bois sont les matières de base nécessaires à la fabrication du papier et du carton. On retrouve dans les fibres de ces végétaux un constituant commun : la cellulose. Cette substance est effectivement présente dans toutes les plantes supérieures (plantes compliquées qui constituent la végétation la plus aisément visible des prairies, des champs et des jardins) dans des proportions différentes, à savoir à titre d'exemple 95 % dans le coton, de 60 à 90 % dans le lin et le chanvre et environ 50 % dans le bois.

La cellulose est un composant majeur du produit fabriqué (papiers, cartons et textiles) à partir de ces végétaux. Le produit fabriqué devient ainsi, du fait même de sa composition,

une ressource cellulosique directement exploitable après sa récupération. Il ne faut pas chercher à extraire la cellulose du produit récupéré mais préparer son entrée dans un procédé de fabrication. L'utilisation de matériaux récupérés a été vite perçue comme intéressante par les fabricants de papiers-cartons. Au XIVe siècle, les vieux chiffons sont alors employés. Devenue très coûteuse, la fabrication du papier à partir de chiffons est désormais réservée à des produits finis luxueux. Actuellement, ce sont les déchets papiers-cartons qu'on tâche de récupérer. Abandonné ou destiné à l'abandon par son détenteur, le produit papier-carton devenu déchet papier-carton peut être collecté et trié en vue du **recyclage**.

Les produits papiers-cartons récupérés contiennent les fibres cellulosiques issues des deux familles d'arbres principalement utilisées. Il s'agit d'une ressource en cellulose que l'industriel papetier ne doit pas chercher à extraire du milieu naturel contrairement à la cellulose constitutive du bois. Les fibres cellulosiques de récupération, obtenues à partir des papiers et des cartons récupérés auprès de leurs détenteurs, peuvent ainsi retourner dans le cycle de la production du papier-carton ou être utilisées comme dans notre cas dans le bâtiment, pour l'élaboration d'un nouveau matériau isolant.

I.2.2.1- LA FABRICATION DES PATES A PARTIR DE PAPIERS-CARTONS RECUPERES [17] :

La préparation de la pâte à papier est l'étape précédant toute fabrication papetière. La pâte désigne ici la matière constituée de fibres cellulosiques en suspension fluide. Toutes les opérations sont effectuées en milieu aqueux pour assurer l'adhésion des fibres entre elles.

I.2.2.1.1- Le Défibrage :

Le défibrage dans l'eau des produits papiers-cartons récupérés a lieu :

- Soit dans un *Pulpeur*. C'est une cuve cylindrique dans laquelle un rotor crée de fortes turbulences qui désagrègent les produits papiers-cartons récupérés. Des dispositifs adaptés (poire à pulpeur, sacs de décontamination) permettent une première extraction des contaminants dans le pulpeur ;
- Soit dans un tambour en rotation et légèrement incliné, facilitant ainsi l'évacuation des matières indésirables. Le tambour peut atteindre une longueur de 28,5 m et un diamètre de 4 m. Il tourne à une vitesse de 13 tours/minute et peut traiter 1 300 tonnes de papiers-cartons récupérés par jour.

En sortie de pulpeur ou de tambour, une pré-épuration permet d'éliminer les impuretés grossières grâce à des tamis vibrants, des classeurs à fentes et à trous et des épurateurs

centrifuges. L'épuration fine complète cette opération et permet d'éliminer les contaminants résiduels selon leur densité (dans des cyclones) ou leur dimension (par classage très fin).

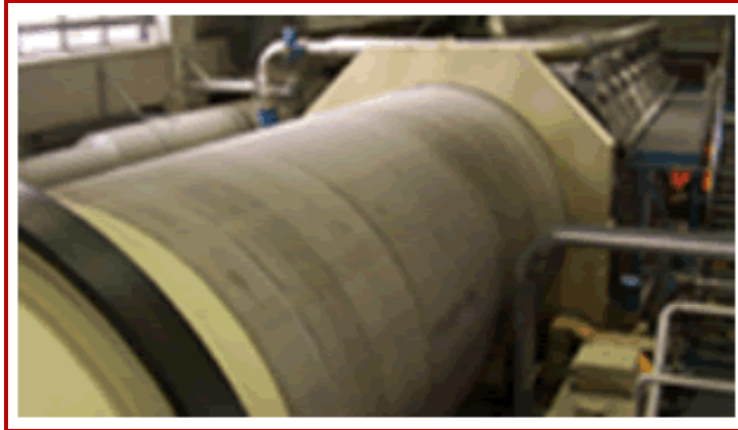


Fig.1.14 : Désintégration dans un tambour des produits papiers-cartons récupérés [17]

I.2.2.1.2- Le désencrage par flottation :

Pour désencrer un papier il est nécessaire dans un premier temps de décrocher les particules d'encre. Ce décrochage est facilité lors de l'étape de défibrage. On agit pour cela sur différents paramètres tels que la quantité et la nature des produits chimiques ajoutés, le pH, la température, le temps de contact, etc....

Les produits chimiques intervenant dans le désencrage de la pâte sont les suivants :

- La soude caustique est employée pour améliorer le détachement de l'encre en élevant le pH et en faisant gonfler les fibres ;
- Un surfactant permet de stabiliser les particules d'encre décrochées en solution et empêche qu'elles soient redéposées sur les fibres ;
- Le silicate de sodium séquestre certains ions métalliques présents dans l'eau (essentiellement les ions calcium et magnésium). En l'absence de ce produit, les ions métalliques formeraient des dépôts insolubles en réagissant avec le surfactant ;
- Le peroxyde d'hydrogène et un agent séquestrant sont utilisés pour maintenir un niveau de blancheur de la pâte. Celle-ci a tendance à jaunir du fait de l'action de la soude caustique sur la lignine. Le peroxyde d'hydrogène est un agent de blanchiment qui peut se décomposer sous l'action de métaux lourds en composés inutilisables pour le blanchiment. Un agent séquestrant est alors utilisé afin de capter les métaux lourds présents dans l'eau.

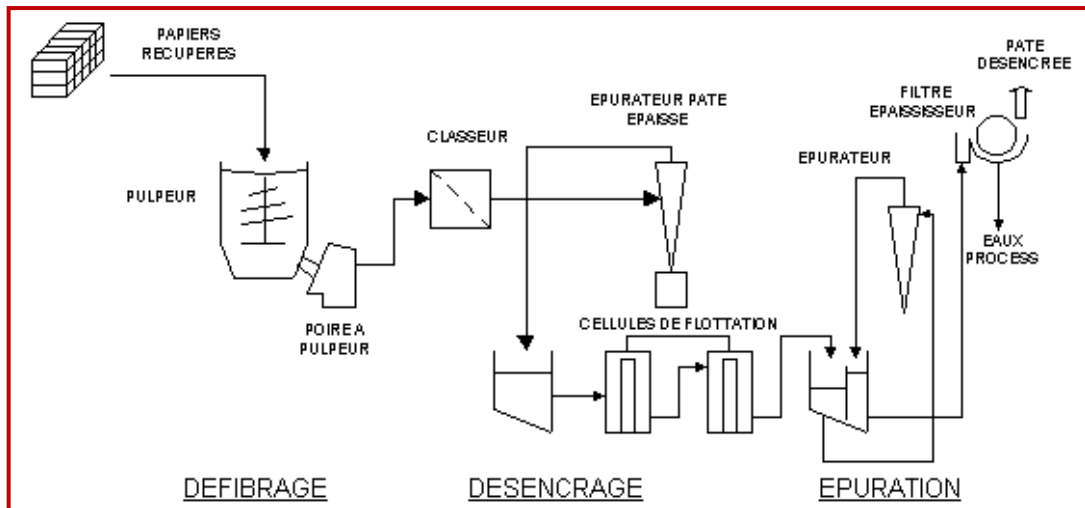


Fig.1.15 : Schéma du défilage et du désencrage des produits papier-cartons par flottation [17]

La principale technique utilisée pour la phase d'élimination de l'encre est le procédé par flottation. Le procédé repose sur les différences physiques et physico-chimiques superficielles des fibres et des particules d'encre. La suspension fibreuse est envoyée dans une succession de cellules à la base desquelles des bulles d'air sont injectées. En montant à la surface, ces bulles d'air se chargent des particules d'encres, séparées des fibres, qui se concentrent sous forme de mousses à la surface des cellules. Ces mousses sont raclées, aspirées puis évacuées vers l'installation de traitement des boues de l'usine.

Ces boues peuvent être récupérées et recyclées sous la forme d'un amendement calcique pour les sols agricoles. Elles sont fortement chargées en calcium provenant des substances introduites pour améliorer la blancheur et les qualités d'imprimabilité du papier. L'industrie papetière exploite ce sous-produit en le commercialisant afin de répondre en partie aux besoins de l'agriculture.

I.2.2.2- LA CONSOMMATION DE PAPIER-CARTON EN CHIFFRES [17 - 18] :

Le papier accompagne notre développement et rien n'indique qu'il en sera autrement dans les dix prochaines années.

La consommation de papier par habitant dans les différents pays du globe est fortement corrélée avec leur PIB par habitant. La figure suivante illustre la relation entre la consommation de papier et de carton et la richesse d'un pays (2004) [18-d] :

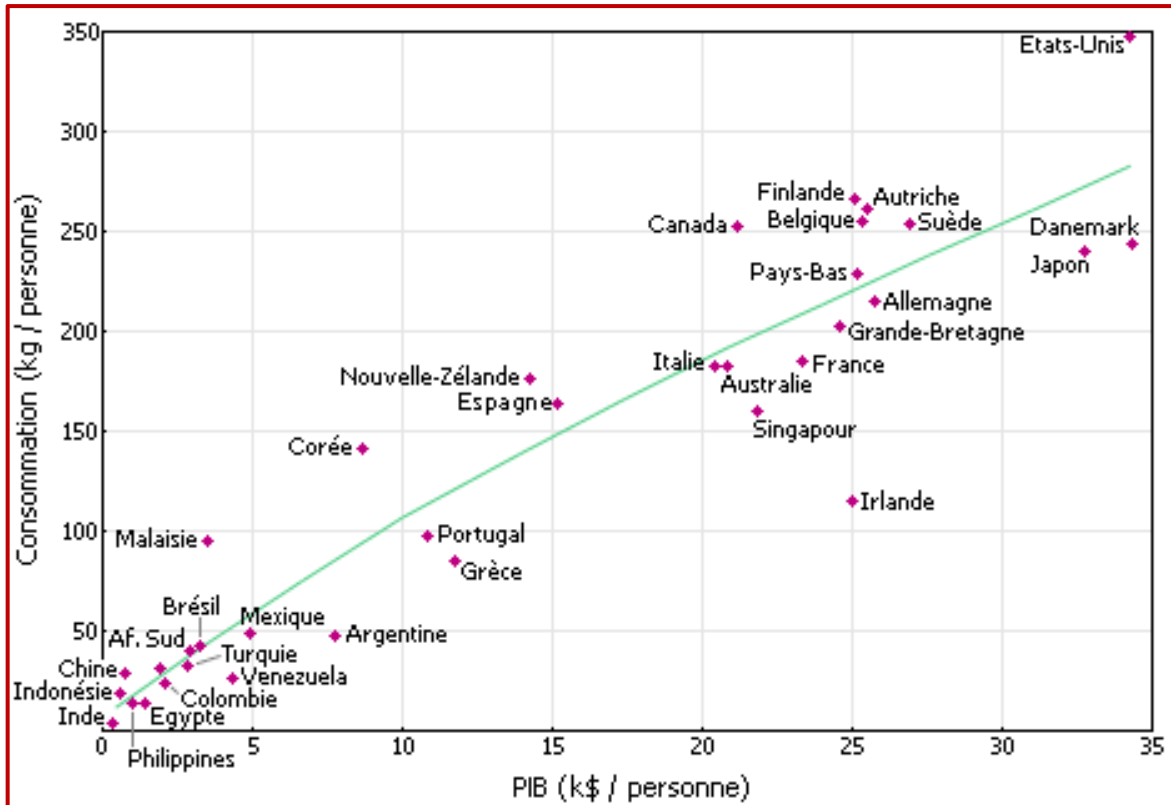


Fig.1.16 : Relation entre la consommation de papier et de carton et la richesse d'un pays (2004) [18-d]

Les plus fortes perspectives de croissance s'observent en Europe de l'Est, en Asie notamment en Chine, aujourd'hui principal investisseur et, dans une moindre mesure, en Amérique Latine.

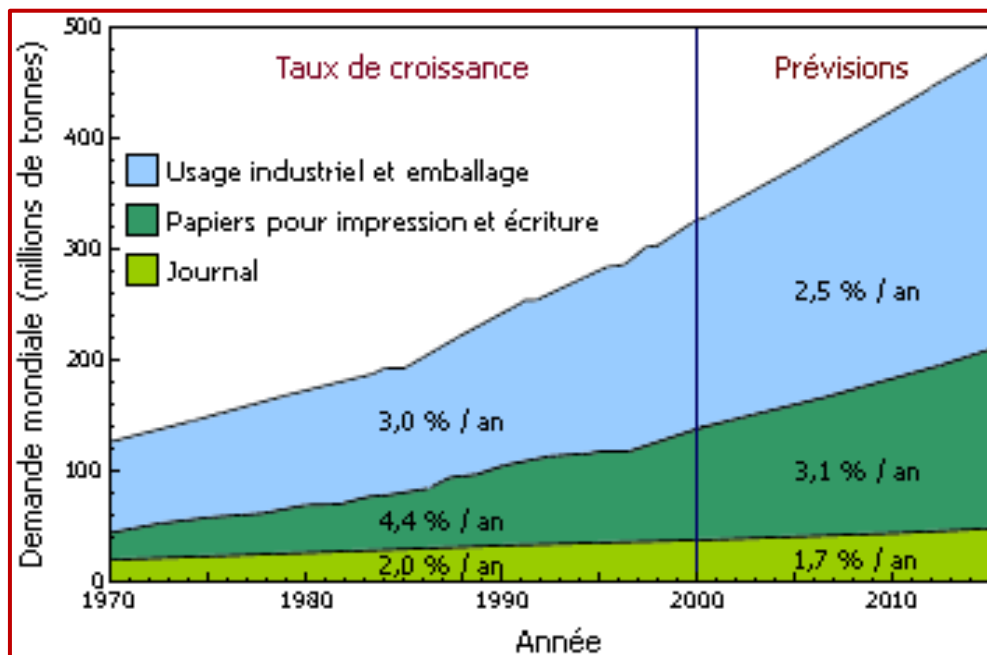


Fig.1.17 : Demande mondiale de papiers et de cartons 1970-2015[18-d]

Les autres parties du monde se contenteront d'une croissance plus faible, si bien qu'on estime que la demande de papiers et cartons croîtra en moyenne de 2,2 % jusqu'en 2015 (à comparer au chiffre de 2,9 % pour la croissance économique), ce qui fera passer la consommation de 320 millions de tonnes aujourd'hui à plus de 450 millions de tonnes [18-d].

Qu'en est-il de l'Algérie ? D'après une étude statistique menée avant 2005 la consommation nationale en papier et carton était de 600 mille tonnes par an pour une production locale, tous produits confondus, ne dépassant pas 50 mille tonnes par an ; à noter qu'en cette période l'Algérie importée plus de 275000 tonnes de papier et de carton pour les besoins de l'industrie du papier, chiffre qui est passé en 2007 à 130 000 tonnes et ce grâce à « Tonic » qui mit en place un vaste réseau de récupération réparti sur l'ensemble du territoire national visant un objectif de 220 000 tonnes de déchets récupérés par an. Ce qui représente un taux de 38%, qui va s'ajouter au taux national actuel de 10 % [18-a-b-c]. Tous ces chiffres démontrent le potentiel de récupération du papier-carton en Algérie et incitent de nombreux secteurs à essayer de valoriser ce matériau, et c'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet afin d'exploiter cette ressource dans le domaine de la construction.

I.3- LES COMPOSITES :

Un composite correspond à l'association de matériaux élémentaires aux caractéristiques complémentaires, en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants, pris isolément, ne permettent pas d'atteindre. Légèreté et résistance mécanique ou fragilité et ténacité peuvent ainsi être associées. Un des constituants peut remplir la fonction de matrice tandis que l'autre, immergé dans le premier, joue un rôle de renfort. Dans ce type de composite, la matrice (organique ou inorganique) est continue et enrobe une phase distincte, le renfort, qui se présente sous forme de particules ou de fibres plus ou moins longues.

Le domaine des composites est vaste et ceux-ci peuvent être divisés en trois types. La figure 1.18 présente une classification schématique des matériaux composites [5]. Nous y distinguons trois catégories principales : les composites renforcés par des particules, les composites renforcés par des fibres et les composites structuraux. Chacune de ces catégories se divise en au moins deux sous-catégories.

Le but de la fabrication d'un matériau composite est de profiter des propriétés reconnues de chaque composant afin d'en constituer un qui sera mieux adapté à certaines applications. Un composite est un matériau qui essaie de combiner les propriétés de ses

composants pour permettre d'améliorer certaines caractéristiques comme la résistance à la rupture, ou la rigidité, pour des composites à usages mécaniques.

Ces technologies trouvent une application dans des domaines tels que l'industrie aéronautique, la construction automobile, la fabrication d'appareils de plongée ou d'objets sportifs, ou encore des structures minces en béton. Les ingénieurs en aéronautique recherchent de plus en plus des matériaux de construction légers, robustes, rigides et capables de résister aux chocs, à l'abrasion et à la corrosion : une combinaison de propriétés assez exceptionnelle. Dans le cas des bétons, l'utilisation de composites a permis d'améliorer leur résistance à la traction et leur ductilité.

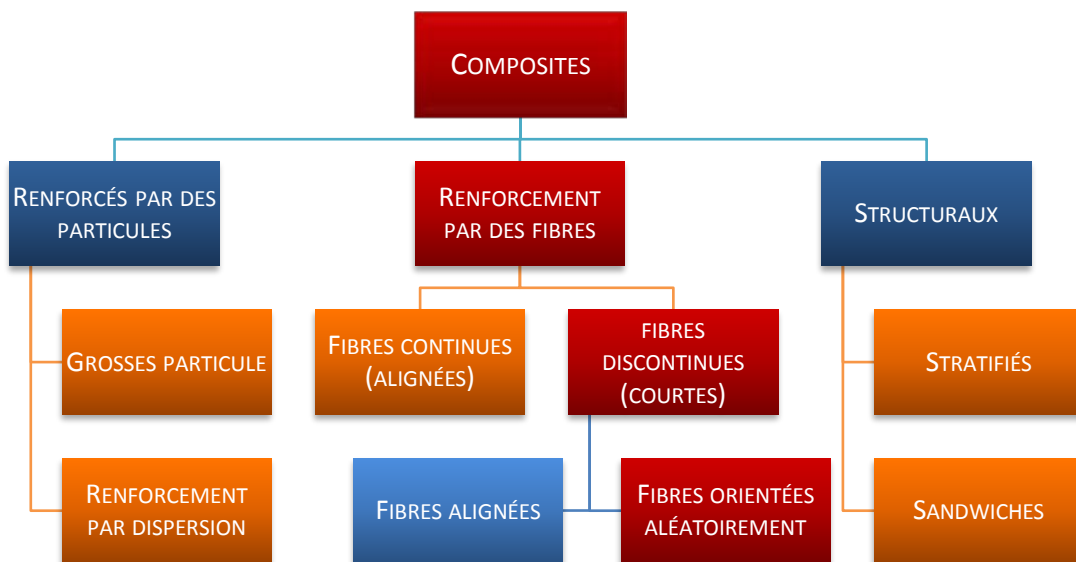


Fig.1.18 : Classification schématique des différents types de composites [5]

Le type de composite que nous étudierons au cours de ce travail suit le chemin coloré en Rouge.

I.4- MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE FIBRES NATURELLES:

Parmi les matériaux composites, nous distinguons ceux à matrice polymérique et ceux à matrice minérale. Nous nous attarderons plus spécialement sur les matrices à base de matériaux de grande diffusion tel que le ciment. Mais dans un premier temps, nous allons présenter les enjeux liés à l'utilisation de fibres naturelles.

I.4.1- Enjeux :

D'une manière générale, l'utilisation de fibres naturelles comme renforts de matériaux composites se justifie pour :

- ✓ Valoriser une ressource locale dans des pays industrialisés ou peu industrialisés, les composites à fibres naturelles ouvrant de nouveaux débouchés aux produits agricoles ;
- ✓ Développer des matériaux et des technologies prenant en compte l'impact sur l'environnement. Les fibres naturelles sont produites et se recyclent naturellement sur terre depuis des millions d'années (matériaux biodégradables et renouvelables par culture).

Le choix des fibres provenant d'un milieu naturel et présentant des performances mécaniques intéressantes est guidé par :

- ✓ Leur origine et leur fonction ;
- ✓ Leur disponibilité : une fibre naturelle est considérée comme disponible si le volume de fibres présent sur le marché est suffisant pour réaliser des pièces industrielles. Sa production est liée aux débouchés ;
- ✓ Leur composition et leur structure souvent complexes. Bien que les matériaux composites soient souvent présentés comme originaux et innovants, le milieu naturel en offre déjà un large panel, que ce soit dans le monde végétal ou dans le monde animal. Une multitude de matériaux naturels, les uns rigides mais légers, comme les coquilles de noix, et les autres souples mais résistants, comme le bois, doivent leurs propriétés mécaniques à leur structure composite.

Un matériau est dit biodégradable s'il est totalement décomposé par des micro-organismes (des bactéries par exemple). Les fibres naturelles sont biodégradables et doivent le rester à la suite des traitements qu'elles subissent pour une application de renfort d'un matériau composite (la vitesse de dégradation peut être, elle, modifiée). Le résultat de cette décomposition est la formation d'eau, de dioxyde de carbone et/ou de méthane et éventuellement de sous-produits non toxiques pour l'environnement [5].

Ces fibres sont considérées comme neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ dans l'atmosphère puisque leur combustion ou leur biodégradation ne produit qu'une quantité de dioxyde de carbone égale à celle que la plante a absorbé pendant sa croissance. Les objets en composites à fibres naturelles sont donc plus faciles à recycler et, si leur matrice est biodégradable (biopolymères), ils sont compostables après broyage. Les matériaux composites renforcés par des fibres naturelles sont actuellement en cours de

développement pour remplacer les matériaux traditionnels ; leurs applications sont encore limitées mais devraient s'élargir dans le futur, notamment dans le domaine de la construction [5].

Le tableau 1.4 présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales comme renfort de matériaux composites. La biodégradabilité des fibres peut être considérée comme un avantage ou un inconvénient. Par ailleurs, il n'existe pas de pièces industrielles à durée de vie illimitée, tout matériau étant voué à devenir déchet. L'utilisation de ce type de matériau impose, par une conception réfléchie, de placer la structure en matériaux composites en dehors des conditions de biodégradabilité. Cette démarche est appliquée depuis longtemps pour des ouvrages en bois [5].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Faible coût ; - Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité) ; - Biodégradabilité ; - Non abrasif pour les outillages ; - Neutre pour l'émission de CO₂ ; - Demande peu d'énergie pour de production ; - Pas de résidus après incinération ; - Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres ; - Ressource renouvelable ; - Bon isolant thermique et acoustique 	<ul style="list-style-type: none"> - Absorption d'eau ; - Faible stabilité dimensionnelle ; - Biodégradabilité. - Faible tenue thermique (200 à 230°C) ; - Fibres anisotropes ; -Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, des conditions météorologiques ; - Pour des applications industrielles, nécessite de gestion d'un stock ; - Renfort discontinu.

Tableau 1.4 : Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites [5].

I.4.2- Matrice polymère et fibres végétales :

Les composites à matrice polymérique (CMP) sont généralement constitués d'une matrice de résine (substance macromoléculaire formée par polymérisation ou polycondensation) et d'un renfort de fibres. Les matrices communément utilisées dans l'élaboration de composites à fibres naturelles vont des thermoplastiques, tels le polypropylène et le polyéthylène, aux thermodurcissables tel le polyester.

Plusieurs études dans le passé ont déjà tenté de modifier les propriétés de surface des fibres de cellulose afin d'améliorer leur adhésion avec une matrice polymérique. Des méthodes variées comme les traitements corona, plasma, alcalin, thermique, etc...ou encore avec d'autres produits chimiques ont permis d'améliorer la compatibilité des fibres avec la matrice. Cependant, certaines de ces méthodes posent les inconvénients d'utiliser des équipements et/ou des produits chimiques onéreux.

Les fibres naturelles possèdent donc un fort potentiel de développement comme agent de renfort dans les matrices polymères [5].

I.4.3- Matrice minérale et fibres végétales :

Dans le domaine de l'habitat, le torchis est considéré comme le premier matériau composite de l'histoire. Il est composé d'une matrice plastique (terre) et de renforts (fibres végétales). C'était le matériau de construction des habitations des le néolithique. Les Celtes l'ont utilisé pour construire les murs de leurs maisons. Le torchis est une technique de construction du type ossature remplissage.

Traditionnellement, l'ossature porteuse principale est constituée de solives en bois, complétée par un clayonnage à base de bois, qui sont de petits morceaux de bois de châtaignier appelés fuseaux, joncs, roseaux ou bambous. Ces fuseaux sont enroulés d'un mélange de terre à l'état plastique auquel sont souvent ajoutées des fibres végétales ou animales. Seule l'ossature joue un rôle structurel. Le mélange en torchis ne détient pas de fonction porteuse.

Potentiel et compatibilité des fibres avec le ciment :

Les fibres végétales comme le sisal, le jute, le lin, le chanvre ou encore le bambou, et les fibres de bois ont été utilisées comme renforts des matrices cimentaires dans les pays en voie de développement, dans le secteur du bâtiment. La résistance en flexion de ces matrices fragiles, telles les mortiers ou les pâtes de ciment, peut être considérablement améliorée grâce aux propriétés mécaniques des fibres (résistance en traction élevée). De

plus, une modification notable dans le comportement du matériau est observée une fois que la matrice s'est rompue : passage d'un comportement fragile à un comportement composite.

Si la fonction de ces fibres dans une matrice ciment est de réaliser et maintenir la résistance et la ductilité du composite, des modifications de la surface des fibres peuvent s'avérer nécessaires afin d'améliorer leur durabilité dans un milieu cimentaire très alcalin.

Le traitement des fibres de sisal avec des agents tels que le silicate de sodium, le sulfure de sodium, le sulfate de magnésium, des composés à base de cuivre ou de fer ainsi que des sels de baryum et de sulfure a été étudié par certains chercheurs [5 -10]. Cependant, aucun d'entre eux n'a amélioré la durabilité des fibres dans la matrice cimentaire. L'imprégnation des fibres avec des agents hydrophobes a également été envisagée. Excepté les acides stéarique et formique, qui entraînent un retard du recouvrement des fibres par le ciment, tous les autres traitements (acétate de polyvinyle, huile de silicone, goudron, latex ou asphalte) n'ont pas empêché la minéralisation de la fibre. L'imprégnation des fibres de sisal avec des composants organiques dérivés du bois, comme les tanins ou les huiles végétales, a été étudiée par Canovas. Cet auteur indique une légère diminution dans le procédé d'enrobage par la matrice cimentaire, mais la dégradation de la fibre n'est pas complètement évitée [5 - 10].

La réduction de l'alcalinité de la matrice par l'utilisation de matériaux pouzzolaniques a été reportée dans plusieurs études [5]. Les matériaux étudiés incluaient les ciments alumineux et les ciments Portland modifiés par l'ajout de fumée de silice, de cendres ou de pouzzolanes naturels comme la pierre ponce ou la diatomite. Le remplacement de 45% en masse du ciment par de la fumée de silice entraîne une perte de résistance du composite.

Une amélioration a cependant été observée lorsqu'un ciment alumineux est utilisé avec des pouzzolanes naturelles. Concernant le ciment Portland, aucune amélioration réelle n'a été observée [5].

Toledo-Filho et al, proposent alors d'immerger préalablement les fibres dans de la fumée de silice et de remplacer une partie du ciment Portland par de la fumée de silice non dense ou de la poussière de hauts fourneaux [10].

CHAPITRE II

*PROPRIETES MECANQUES ET THERMIQUES DES
BETONS DE FIBRES*

PROPRIETES MECANQUES ET THERMIQUES DES BETONS DE FIBRES

II.1- INTRODUCTION :

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

Néanmoins, son utilisation est limitée par deux caractéristiques : sa fragilité et sa faible résistance à la traction et à la fissuration. Il faut mentionner que ces faiblesses sont sensiblement amplifiées dans des conditions climatiques sévères telles que le climat saharien, qui présente un environnement sec et chaud ou encore dans un environnement au climat froid avec des cycles gel dégel. A cet effet, plusieurs chercheurs ont montré que les performances mécaniques du béton courant chutent dans ces types de climat [7].

Plusieurs travaux ont donc été effectués dans le but d'améliorer les performances mécaniques du béton en de tels climats. L'un de ces axes de recherches récentes est le renforcement par des fibres. Ainsi, des fibres de toutes natures (Acier, Verre, Polymère et Végétale) sont ajoutées au béton.

Il apparaît alors que la maîtrise du comportement de ce nouveau matériau composite nécessite une multitude d'essais expérimentaux qui demandent parfois l'adaptation des méthodes d'essais classiques aux conditions nouvelles. En effet, l'incorporation des fibres dans la matrice du béton à différents pourcentages et différentes longueurs change le comportement de cette dernière, ce qui complique souvent le déroulement de quelques essais classiques du béton. Plusieurs modes d'essais spécifiques ont été proposés, par plusieurs chercheurs, pour caractériser les bétons de fibres [7].

Mais avant toute chose, lors de l'utilisation des fibres naturelles dans le renforcement du béton, il est important de vérifier que ces fibres aient certaines propriétés physique et mécanique appropriées à leur application. Nagaraja [7] a étudié les propriétés de résistance

de cubes de béton renforcés avec de courtes fibres de nylon et de bambou disposées aléatoirement et a constaté que seul le renforcement avec le bambou améliore la contrainte de compression du béton. Une autre recherche menée par Lin [7] a montré que les fibres de Sisal contribuent légèrement à une augmentation de la ténacité du béton renforcé. D'autres publications ont porté sur le comportement des bétons renforcés de fibre de jute, paille de riz, canne à sucre, ou encore fibre de bois. A travers les résultats tirés de ces études, il a été prouvé que l'addition de ces fibres naturelles n'améliore en rien la résistance à la compression des bétons de fibres comparativement au béton pure. Cependant, la capacité de chargement ou encore d'absorption d'énergie en flexion est sensiblement améliorée.

Au contraire des fibres d'acier ou de carbone, les fibres naturelles ne sont pas commercialisées pour le renforcement du béton, cela est probablement du à l'inconsistance de l'apport de la fibre et à la qualité du béton obtenu, ainsi qu'à l'absence de procédé de malaxation uniformisé.

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

II.2- COMPOSITION ET MISE EN ŒUVRE DES BETONS DE FIBRES :

II.2.1- Ouvrabilité :

A l'issue de certaines recherches [7] portant sur l'ouvrabilité des bétons de fibres, il a été trouvé que l'ajout des fibres au béton lui confère une certaine cohésion au repos, apportée par le réseau frottant des fibres, ce qui entraîne une nette diminution de l'ouvrabilité de ces bétons, et qui est fonction de certains paramètres tels que :

- Le dosage en fibre ;
- L'élanement (longueur / diamètre) ou encore (longueur / épaisseur) ;
- Le diamètre du plus gros granulat ;

A titre d'exemple la figure 2-1 montre la chute d'ouvrabilité des Bétons de Fibres métalliques en fonction de l'augmentation du dosage en fibres ainsi qu'en fonction de la diminution de leur élanement (l/d) [7].

D'autres chercheurs [7] proposent des relations empiriques pour limiter le volume des fibres métalliques en fonction de leur élanement (l/d) et de leur volume (V_f), pour obtenir une bonne ouvrabilité, il en ressort :

$$V_f(l/d) < 3$$

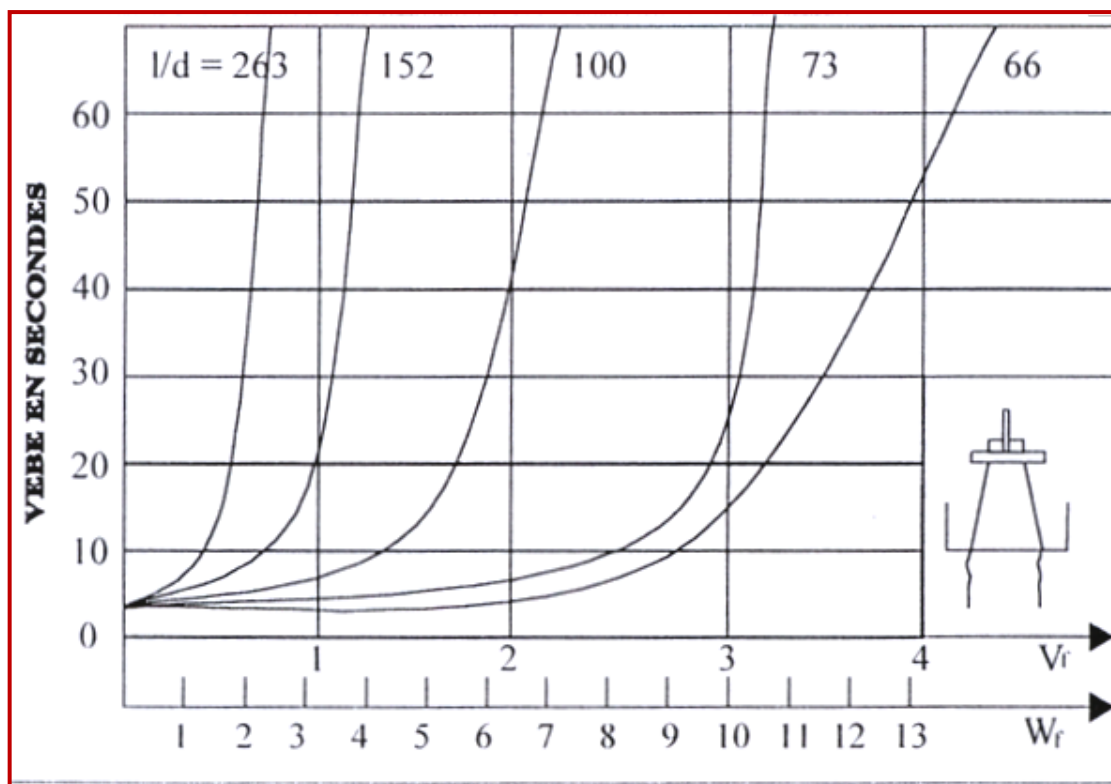


Fig.2.1 : Effet de la teneur en fibres d’acier et leur élancement sur l’ouvrabilité VeBe [7]
 V_f : dosage volumique – W_f : Dosage massique

Le tableau 2-1 met en évidence la chute d'ouvrabilité des Bétons de Fibres métallique ($l = 38$ mm, $D = 0.4$ mm) en fonction de l'augmentation du pourcentage des fibres ainsi qu'en fonction de l'augmentation du diamètre des gros granulats [7]. Généralement l'ouvrabilité diminue quand le dosage et la taille des granulats augmentent.

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

Tableau.2.1 : Variation de l'ouvrabilité en fonction du dosage volumique des fibres métalliques et de la taille des granulats [7]

Certaines fibres telles que les fibres végétales absorbent une partie de l'eau de gâchage, ce qui diminue de façon remarquable l'ouvrabilité des bétons de ce type de fibres [8].

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

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

Dans ce contexte, il est à préciser que l'utilisation des essais statiques d'ouvrabilité en l'occurrence le cône d'ABRAMS ne donnera pas des résultats significatifs pour les bétons des fibres. Il est nécessaire de développer d'autres essais adéquats qui font intervenir un aspect dynamique. Ainsi, la tentative de trouver de nouveaux modes d'essais ou de développer les essais existants, pour mesurer l'ouvrabilité des bétons de fibres, est actuellement un axe de recherche assez développé.

Un rapport de recherche du 544 ACI Comité [7] a mis en évidence un essai du cône d'ABRAMS inverse (ASTM 143) avec l'association d'une vibration interne verticale au centre du cône pour déterminer l'ouvrabilité des bétons de fibres métalliques.

En outre, GROTH [7] rapporte qu'une nouvelle méthode développée par une entreprise japonaise est utilisée pour mesurer l'ouvrabilité des bétons de fibres métalliques. Elle consiste à utiliser un cône d'ABRAMS et un anneau de 50 cm de diamètre avec l'association d'une vibration externe durant un temps T_{50} compris entre 2 et 10 s. Si durant ce temps la surface d'étalement S est comprise entre 65 et 75 cm le béton est de consistance normale. Cette méthode peut être utilisée en laboratoire ou in situ.

D'autre part, SACHANT et al. [9] ont développé un appareil qui mesure l'ouvrabilité des bétons de fibres cellulosique dénommé "New Cone Penetration test (NCPT)". C'est un cône métallique creux avec un angle de 30° au sommet équilibré avec une masse de plomb afin d'atteindre un poids de 4 kg. Ainsi, si la pénétration du NCPT dans le béton de fibres sous son propre poids est comprise entre 60 et 200 mm, le béton sera plastique.

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

II.2.2- Méthode de composition :

Les méthodes de compositions des Bétons de Fibres sont basées sur l'optimisation des constituants de sorte que la compacité soit maximale et l'ouvrabilité optimale soit proche de celle du béton classique. En effet, plusieurs auteurs montrent que la compacité du béton frais est en fonction de sa maniabilité. Ce qui rend possible l'étude de la composition à partir des mesures de maniabilité [7].

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

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

Parmi les méthodes utilisées pour la confection des bétons de fibres métalliques, qui tiennent compte de l'ouvrabilité, Kriker [7] cite différentes méthodes à savoir la méthode de SWAMY et al, la méthode de SERNA-ROS et la méthode de ROSSI et al. Ces deux dernières sont basées sur un développement de la méthode de BARON LESAGE, qui se base sur les trois hypothèses suivantes:

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

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

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

Par ailleurs, ROSSI et al, procèdent aussi en trois étapes. Les deux premières sont identiques à celles de SERENA-ROS, mais pour la troisième étape ils procèdent différemment ; sur la base des deux premières hypothèses ROSSI et al, ajustent la quantité d'eau et de ciment en gardant constant le rapport E/C afin d'obtenir la maniabilité voulue, mais cette fois ci mesurée avec un maniabilimètre L.C.P.C ;

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

En plus de l'optimisation du squelette solide (S/G), d'autres auteurs tel BOUCHEKOUK et al. [7] optimisent aussi la forme des fibres pour avoir un gain de résistance du béton de fibres tout en travaillant avec une matrice fixe et une maniabilité correcte. Cette méthode a été appliquée pour les bétons et mortiers des fibres métalliques, de verre et de polymère.

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

II.2.3- Fabrication et mise en œuvre des bétons de fibres :

Les opérations de malaxage et de mise en œuvre des bétons de fibres sont des étapes très importantes dans la détermination de leurs propriétés à l'état frais ou durcis. Toutefois, dans le malaxage des bétons de fibres, il faut veiller à obtenir une ouvrabilité acceptable et une bonne dispersion des fibres dans le mélange pour éviter la formation de pelotes de fibres "oursins". Pour cela il faut respecter le pourcentage critique qui est le pourcentage limite admissible de fibres à introduire dans la matrice pour éviter les problèmes de mise en œuvre.

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

Ainsi les pourcentages limite des fibres introduites sont toujours limités par la technique de mise en œuvre. A titre d'exemple le tableau 2-2 donne les techniques de mise en œuvre de quelques bétons de fibres [7].

Type de béton de fibres	Méthode de mise en œuvre
Fibres de Verre	Malaxage Projection manuelle Projection automatique
Fibres Métalliques	Malaxage Projection
Fibres de Polypropylène	Malaxage Magnani (méthode de production de l'amiante ciment)
Fibres Cellulosiques	HATSHEK (méthode de production de l'amiante ciment)
Fibres de Sisal	Malaxage

Tableau.2.2 : Techniques de mise en œuvre des bétons de fibres [7]

Suivant la nature des fibres utilisées, le COMITE 544 de l'A.C.I. [7] recommande plusieurs méthodes pour la fabrication des bétons de fibres, qui varient en fonction du type de fibres comme suit:

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

Concernant les bétons de fibres végétales, plusieurs chercheurs [10-11] préconisent la méthode suivante:

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

D'autres recherches menées par BENTCHIKOU [12] sur un composite binaire (ciment-fibres de papier recyclé) préconisent une méthode simplifiée pour l'élaboration de ce composite à savoir le mélange des fibres avec le ciment à sec puis ajout de l'eau tout en

poursuivant le malaxage. Etant donné que ce projet à été établi dans la continuité des travaux de BENTCHIKOU, nous utiliserons logiquement le même mode opératoire lors de la réalisation du composite binaire ;

Une méthode assez analogue a été proposée par BEDERINA [13] lors de la confection d'un béton de sable avec ajout de copaux de bois et ce en ajoutant les copaux saturés en eau à un mélange des matières premières sèches constituant le béton de sable.

II.3- CARACTERISATION MECANIQUE DES BETONS DE FIBRES :

L'association Fibres-Ciment constitue un matériau composite ayant un comportement assez différent de celui du béton classique, ce nouveau composite se caractérisera généralement par une certaine ductilité accompagné d'une amélioration de la résistance à la traction et donc à la fissuration.

Le comportement de ce composite étant assez compliqué et difficile à cerner, car dépendant de plusieurs facteurs qui eux mêmes varient selon certains paramètres à savoir:

- Propriétés des fibres :
 - ✓ nature de la fibre (acier, verre, végétale...);
 - ✓ élancement des fibres (l/d);
 - ✓ quantité de fibres incorporée ;

- Propriétés de la matrice:
 - ✓ qualité et quantité de ciment ;
 - ✓ qualité et dimensions des granulats ;
 - ✓ rapport E/C ;

- Comportement de la bande d'interface :
 - ✓ géométrie des fibres ;
 - ✓ type de cure ;
 - ✓ mode de chargement ;

- Conditions de mise en œuvre :
 - ✓ distribution, orientation et espacement des fibres ;
 - ✓ mode de remplissage du béton (pression, vibration) ;

Le développement de méthode de dimensionnement de structures en béton renforcé de fibres passe incontestablement par la définition de grandeurs caractéristiques qui intègre le potentiel du matériau. En accord avec les règlements usuels du béton armé qui sont

basés sur l'analyse de l'équilibre mécanique d'une section, il paraît naturel de prendre en compte l'apport des fibres dans une matrice cimentaire sous la forme d'une loi de comportement en traction des fibres. C'est sur cette base qu'une méthode de dimensionnement à d'ores et déjà été développée en France en intégrant directement la notion d'ouverture de fissure [15].

Cependant, les essais de traction directe nécessitent des matériels de laboratoire très performants et le protocole d'essais, relativement délicat, conduit souvent à préférer les essais de flexion dans le cadre d'études prospectives sur les performances du béton renforcé de fibres.

Dans cette logique, des normes, dont la norme ASTM C-1018 [14-15], ont défini des indices de ténacité (cf. annexe), sur des bases énergétiques, pour qualifier les performances du matériau. Malheureusement, il a été démontré que ces indices ne peuvent pas être utilisés pour caractériser les qualités du matériau requises dans le cadre d'une conception de structures [14]. C'est peut être la raison pour laquelle ce type de norme ne fournit aucune directive quant à l'exploitation possible de ces indices de ténacité.

Une méthode alternative sera donc proposer afin de caractériser les performances du béton renforcé de fibres.

Sachant que le potentiel de ce type de matériau peut être évalué de façon intrinsèque sur la base d'une loi de comportement en traction intégrant directement la notion d'ouverture de fissure, l'approche consistera à exploiter les essais de flexion, conscient bien entendu des limites en termes de représentativité des échantillons utilisés en flexion.

Notion de fragilité d'une section en flexion :

Cette notion fait référence à la capacité d'une section de reprendre un effort post fissuration supérieur à l'effort qui a initié la fissuration. Dans le cas d'un élément sollicité en traction uniaxiale homogène, ce critère de non fragilité est indispensable pour assurer une multi fissuration. Par contre, dans le cas d'un élément sollicité en flexion, le champ de contrainte n'est pas homogène dans la section. Par suite, l'appréciation de la non fragilité apparaît comme plus délicate.

Deux considérations ont été envisagées : la première consiste à chercher une non fragilité immédiate à la fissuration, c'est-à-dire que la capacité de résistance post fissuration de la section est immédiatement supérieure au moment de fissuration. Dans ce premier cas, la multifissuration engendrée sera basée sur une multitude de fissure très peu ouverte.

La deuxième admet une chute de capacité de résistance après fissuration, puis après une certaine propagation de la fissure, la contribution des fibres permet de retrouver une

capacité de résistance égale voire supérieure au moment de fissuration. Dans ce deuxième cas, la multifissuration sera obtenu avec un nombre de fissure plus restreint que dans le premier cas et ayant des ouvertures plus prononcées.

Quelques calculs préliminaires seront donnés en annexe afin d'évaluer le comportement d'une section sollicitée en flexion au moment de la fissuration. Il s'agit d'étudier l'influence de la contrainte post fissuration apportée par les fibres sur la capacité de la section à reprendre des efforts après fissuration.

Autres techniques de caractérisation mécaniques :

En plus des techniques usuelles telles que la sollicitation à la compression ou la sollicitation à la traction par flexion à trois ou quatre points, on peut citer d'autres techniques de caractérisation physico-mécaniques telles que :

- L'échographie ultrasonore pour caractériser les propriétés d'élasticité d'un matériau durcis ;
- Le Prisomètre pour la détermination du temps du début et fin de prise de la pâte de ciment ;
- Pycnomètre à hélium pour la détermination de la densité ;

II.4- GENERALITES SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES :

II.4.1- Généralités :

La Thermique : c'est la science relative à la chaleur. Si depuis toujours l'homme avait constaté les effets de la chaleur : dilatation, fusion, ébullition et ceux inverses du froid : rétraction, solidification, liquéfaction, il n'en avait pas tiré de lois jusqu'à un passé récent. Les mesures de températures datent du début du XVIII^{ème} siècle [16].

La Chaleur : la chaleur peut se définir comme une sensation. Celle que nous éprouvons devant un foyer en activité par exemple [16].

La chaleur est produite par :

- La combustion principalement ;
- Le frottement de deux corps ;
- Le passage du courant électrique ;
- La compression brusque d'un gaz ;
- Certaines réactions chimiques et nucléaires.

La principale source de chaleur est le soleil.

La chaleur est une forme d'énergie et elle peut donc produire du travail.

Qu'est-ce qu'un **isolant thermique** ?

En fait, en thermique, comme en électricité, il n'existe pas d'isolants parfaits, mais des corps mauvais conducteurs de chaleur et capables de freiner l'intensité d'un flux thermique. Ils sont caractérisés par un coefficient de conductivité aussi bas que possible. La presque totalité des matériaux dits isolants répondent à cette définition, quelques uns sont à la fois employés pour l'isolation thermique et acoustique.

Le premier isolant thermique connu a été le vêtement qu'il soit constitué de peaux de bête ou de tissage laineux. Ensuite l'homme tenta de se protéger en conservant et en construisant son habitat de manière à y maintenir une température convenable. Il évitait ainsi que la chaleur dégagée par le foyer soit totalement perdue.

Le centre de vie mitoyen d'une étable et qui profite de la chaleur naturelle, est surmonté du grenier à fourrage. Celui-ci isole l'ensemble sur sa surface la plus vulnérable aux déperditions de chaleur, cette répartition des locaux est intelligente sur le plan de son exploitation hivernale.

Il faut reconnaître que c'est là le seul exemple ancestral de construction où apparaisse le souci d'isoler du froid d'une manière proche de notre conception moderne de l'isolation thermique. En fait pendant des siècles, les constructeurs ont été beaucoup plus soucieux

de solidité que de confort et les installations romaines de chauffage central resteront sans lendemain. D'ailleurs, en Europe, les événements ne se prêtent pas particulièrement à une évolution dans ce sens, que l'on soit dans la zone d'influence romaine, où la pierre marque l'architecture, ou dans la zone nordique, où le bois, le pisé et la terre cuite sont les matériaux courants, partout s'élèvent des constructions massives pour résister plus aux intempéries qu'aux variations de température.

Les avantages évidents de l'isolation :

L'isolation réduit les consommations de chauffage : toute augmentation de l'isolation d'une paroi va réduire les déperditions thermiques à travers cette paroi. Cette réduction sera d'autant plus importante que la paroi était thermiquement mauvaise.

Elle se réduit par une économie d'énergie, donc par une réduction de la consommation de chauffage que l'on peut chiffrer assez facilement. C'est cette économie de chauffage qui va permettre d'amortir la dépense d'isolation.

Elle constitue donc la principale justification de la décision d'isoler.

L'isolation élimine les facteurs d'inconfort : le confort est une donnée subjective, qui dépend des échanges de chaleur entre le corps et l'environnement dans lequel il se trouve. Ces échanges de chaleur se font par convection avec l'air ambiant et par rayonnement avec les parois qui délimitent la pièce et les objets qu'elle contient.

La sensation de confort varie bien sûr selon les individus, leur activité, leur habillement, mais elle est fonction de la température moyenne des parois.

Pour des températures intérieures et extérieures identiques, non seulement le confort ne se trouve pas affecté par les économies d'énergie réalisées, mais de plus l'isolation relèvera les températures superficielles des parois. On ne ressentira plus l'effet désagréable « de paroi froide » pour une même température de l'air intérieur, la sensation de confort s'en trouvera donc accrue.

L'isolation évite les condensations superficielles : en hiver, la température sur la face intérieure d'une paroi non isolée est plus basse que la température de l'air du logement. Si cet air est humide, il en résulte des condensations sur cette paroi ; ces condensations dégradent les revêtements de murs, abiment les menuiseries et peuvent entraîner l'apparition de moisissures.

Après l'isolation de la paroi, la température sur la face intérieure est proche de la température ambiante et les risques de condensation superficielle diminuent considérablement.

II.4.2- Différents paramètres de transfert de chaleur :

II.4.2.1- Conductivité thermique [17] :

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température [17].

Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en watts par mètre par kelvin, ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

La conductivité dépend principalement de :

- la nature du matériau,
- la température.
- d'autres paramètres comme l'humidité, la pression interviennent également.

D'un point de vue atomique, la conductivité thermique est liée à deux types de comportements :

- le mouvement des porteurs de charges, électrons ou trous.
- l'oscillation des atomes autour de leur position d'équilibre.

Dans les métaux, le mouvement des électrons libres est prépondérant alors que dans le cas des non-métaux, la vibration des ions est la plus importante.

La conductivité thermique est donc liée d'une part à la conductivité électrique (mouvement des porteurs de charge) et à la structure même du matériau (vibrations des atomes). En effet dans un solide, les vibrations des atomes ne sont pas aléatoires et indépendantes les unes des autres, mais correspondent à des modes propres de vibration, aussi appelés « phonons » (on peut faire par exemple l'analogie avec un pendule ou une corde de guitare, dont la fréquence de vibration est fixée. Ces modes propres de vibration correspondent à des ondes qui peuvent se propager dans le matériau, si sa structure est périodique (organisée).

Mathématiquement, la conductivité thermique λ peut donc écrire comme la somme de deux contributions :

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_p$$

Où

- λ_e est la contribution des porteurs de charge (électrons ou trous) ;
- λ_p est la contribution des vibrations des atomes (phonons) ;

On considère généralement que le transfert de chaleur s'effectue par conduction pure, dans la matrice solide et le gaz interstitiel immobile, en l'absence de convection naturelle et transfert de chaleur par rayonnement. La densité de flux thermique ϕ ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) est exprimée par la loi de Fourier :

$$\Phi = - \lambda \text{ grad } T$$

Pour des matériaux hétérogènes anisotropes tels que les composites, les milieux fibreux, etc., la relation précédente peut également être utilisée si l'on peut définir un milieu homogène équivalent.

II.4.2.2- Capacité thermique [17] :

La capacité thermique (ou capacité calorifique) d'un corps est une grandeur permettant de quantifier la possibilité qu'a un corps d'absorber ou restituer de l'énergie par échange thermique au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie. La capacité thermique est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température de un Kelvin. Elle s'exprime en Joule/Kelvin. C'est une grandeur extensive : plus la quantité de matière est importante plus la capacité thermique est grande. Toute chose étant égale par ailleurs, plus la capacité thermique d'un corps est grande, plus grande sera la quantité d'énergie échangée au cours d'une transformation s'accompagnant d'une variation de la température de ce corps.

Avant le développement de la thermodynamique moderne, on pensait que la chaleur était un fluide (vision dite *substantialiste*) : le *fluide calorifique*. Les corps étaient donc susceptibles de contenir une certaine quantité de ce fluide d'où l'appellation *capacité calorifique*. Pour des raisons historiques, la calorie était définie comme la « chaleur » nécessaire pour élever de 15 °C à 16 °C la température d'un gramme d'eau, d'où le nom de capacité *calorifique*.

Aujourd'hui, on considère que l'énergie interne des systèmes est constituée des énergies cinétique et potentielle microscopiques. La chaleur n'est plus un fluide, c'est un transfert d'énergie désordonnée à l'échelle microscopique. La *capacité calorifique*, est désormais appelée *capacité thermique* [12-17].

II.4.3- Principe de l'isolation thermique :

Isoler thermiquement un bâtiment signifie concevoir et exécuter la structure du bâtiment et tous les éléments de l'enveloppe extérieure (façades, toit, fenêtres, portes, plancher inférieur) de tel façon qu'ils aient la résistance thermique et une inertie thermique aussi que convenables aux pertes et aux apports de chaleur [16].

Pour obtenir un résultat valable et permanent, il faut établir des données optimales pour ces deux caractéristiques du bâtiment, vu la croissance continue du prix et de la pénurie de l'énergie.

A cet effet il convient d'étudier des dispositions constructives visant à réduire les déperditions à travers l'enveloppe du bâtiment. Afin de réduire ces déperditions, il est nécessaire que les parois du bâtiment aient la capacité de résister au flux de chaleur. Cette propriété est définie par la résistance thermique R_{th} .

Du côté extérieur, les échanges thermiques ont lieu par convection entre la paroi et l'ambiance extérieure et par rayonnement entre la paroi et les objets entourant le local.

Les échanges ont lieu ensuite par conduction à travers la paroi.

Au niveau de la face intérieure d'une paroi les échanges ont lieu par convection et par rayonnement. Si q est le flux de chaleur traversant la paroi de surface unité, et pour le cas d'une paroi composée de deux matériaux d'épaisseurs e_1 et e_2 (figure 2.2), sa valeur est donnée par

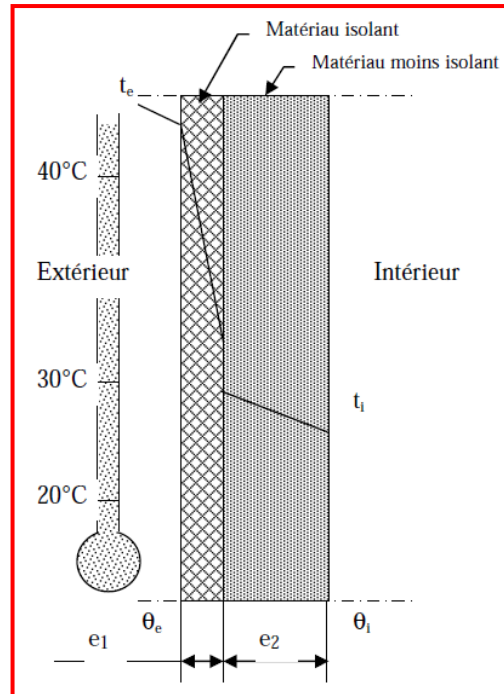


Fig.2.2 : Variation de la température dans élément de construction hétérogène [12]

l'expression [12]:

$$q = \frac{t_e - t_i}{\frac{1}{h_e} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_i}}$$

Où :

e_i : épaisseur de la paroi i (m) ; λ_i : conductivité thermique de la paroi d'épaisseur e_i ;

h_i et h_e : Coefficients d'échange (par rayonnement et convection) des surfaces intérieure et extérieure respectivement ;

Par définition on appelle coefficient de transmission thermique K de la paroi, la quantité :

$$q = K (t_e - t_i)$$

La valeur du coefficient K est donc donnée par l'expression :

$$1/K = 1/h_e + e_1/\lambda_1 + e_2/\lambda_2 + 1/h_i = R_{th}$$

$1/K$: Résistance thermique de la paroi du composite.

II.4.4- Différentes techniques de mesure [13 - 17]:

De nombreuses méthodes et différents instruments de mesure ont été utilisés pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux. Aujourd'hui, et avec l'évolution des appareillages de mesure (ordinateur, etc.) et des systèmes d'acquisition de données couplés à des techniques d'inversion et de traitement de signal, la qualité de mesure est meilleure. Plusieurs paramètres, de milieux ou systèmes hétérogènes, peuvent être estimés simultanément avec des conditions instrumentales simplifiées [13].

II.4.4.1- Selon le mode de chauffage :

Selon le mode du chauffage de l'échantillon étudié on distingue :

- i- *Les Méthodes Electrothermiques* : Le chauffage du matériau est obtenu à l'aide d'une résistance électrique ;
- ii- *Les Méthodes Photothermiques* : Le matériau est chauffé, donc, par l'absorption des photons ou, plus rarement, par des électrons ;

II.4.4.2- Selon le régime de chauffage :

Selon le régime de chauffage employé, on distingue deux grandes classes :

- i- *En Régime Stationnaire (permanent)* : il s'agit de chauffer un échantillon sur une de ses faces, de le refroidir sur l'autre et de mesurer, en régime stationnaire, la différence de température résultante. Connaissant la densité de flux d'énergie utilisée pour le chauffage, la conductivité est calculée à travers la relation de Fourier.

Il faut noter enfin que cette méthode a toutefois ses limites en ce qui concerne la précision de la mesure (fuites thermiques par les capteurs, qualité des contacts capteurs-matériau, etc.) ;

- ii- *En Régime Non-Stationnaire (variable)* : Les méthodes en régime variable, les plus utilisées actuellement, sont fondées sur l'exploitation de la variation de la température dans l'échantillon en régime transitoire après une excitation (la sonde à flux linéaire). Toutes ces méthodes consistent à appliquer, sur un échantillon à l'équilibre, une perturbation thermique, et à mesurer une ou plusieurs températures (ou flux) en fonction du temps.

Ce qui les différencie :

- ✓ Le type de perturbation (échelon, Dirac, périodique ou quelconque) ;
- ✓ Le type de mesure (et le lieu) (températures et/ou flux);
- ✓ La géométrie du problème (mur, cylindre, sphère) ;

Le tableau 2.3 présente la classification de ces méthodes selon ces trois critères :

Perturbations												
	type échelon			type Dirac			périodiques			de forme quelconque mais finie		
Géométrie	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
I				A			B					
II		C		D	E-F		G					
III	H						I					
IV	N	O	P	Q				J		K	L-M	

Mesure :	Géométrie du problème :
I : Température sur la perturbation	1 : Mur
II : Température hors de la perturbation	2 : Cylindre
III : Température	3 : Sphère
IV : Flux et une température	

Tableau.2.3 : Méthodes en régime variable d'après (Degiovanni A, Degiovanni A) [13]

Dans les milieux poreux humides, l'établissement d'un flux permanent entraînerait une migration de l'eau interstitielle alors que l'utilisation des sondes à choc thermique permet d'éviter en grande partie ce phénomène.

Parmi les méthodes non stationnaires on peut citer :

- i- *Méthode du Thermocouple Chauffant* : Le principe consiste à insérer un thermocouple comme élément chauffant avant le coulage du matériau, ce qui diminue considérablement la résistance de contact. Ce thermocouple servira aussi comme capteur de température d'où l'avantage de cette méthode [13] ;
- ii- *Méthode du Film Chauffant* : Une impulsion d'énergie finie de quelques secondes est produite au centre de l'éprouvette par un filament chauffant. Cette impulsion se propage radialement et est enregistrée par un thermocouple placé à une distance d de l'axe de l'éprouvette. La réponse thermique de l'échantillon est mesurée pendant quelques secondes ;
- iii- *Techniques de mesures avec les Sondes à Choc Thermique, « Méthode de la sonde monotige »* : Dans ces techniques on utilise un élément chauffant, en général filiforme,

placé dans le matériau et on effectue une mesure de la température en un point du matériau, situé soit sur l'élément chauffant (sonde monotige), soit à une certaine distance de celui-ci (sondes bitige ou tritige, etc.) ;

iv- *Méthode de la Sonde Plane* : Elle fait partie des sondes à choc. Le signal d'entrée est le flux de chaleur dissipé par effet Joule dans l'élément chauffant et le signal de sortie est l'élévation de température mesurée au centre de la sonde. Une résistance de chauffage est insérée entre deux blocs d'échantillons. Cette sonde débite une puissance constante par unité de surface pendant un bref laps de temps (quelques centaines de secondes) au milieu environnant ;

v- *Méthode « Laser Flash »* : Un échantillon cylindrique dont l'épaisseur d est nettement plus faible que son diamètre est placé dans un porte-échantillon qui se trouve à l'intérieur d'un four maintenu à température constante. Une de ses faces est illuminée par des pulses (de l'ordre de la milliseconde) émis par un laser, ce qui assure un chauffage uniforme de la face avant. La température de la face arrière est mesurée, en fonction du temps, à l'aide d'un capteur de mesure infrarouge. En l'absence de pertes thermiques de l'échantillon, la température devrait augmenter de manière monotone. Dans une situation réelle, l'enregistreur mesurera un pic de température suivi d'un retour à la température du four. Le temps t nécessaire pour que la face arrière atteigne la moitié de la température de pic (par rapport à la température du four), permet de déterminer la conductivité thermique ;

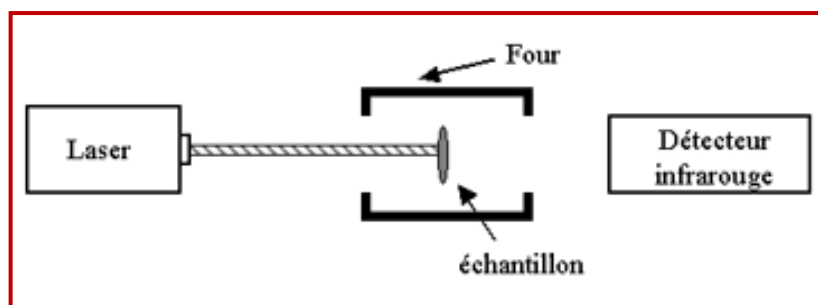


Fig.2.3 : Appareillage utilisé pour la mesure de conductivité thermique par la méthode dite « laser flash » [17]

vi- *Méthode de la Bande Chauffante « T.H.S »* : Le principe consiste à placer entre deux échantillons de même composition une bande métallique faisant office d'élément chauffant et de capteur de température. Après l'établissement de l'équilibre thermique, une puissance constante, que l'on mesure, est appliquée pendant une courte durée et la variation de température de la bande est obtenue à partir de la mesure de sa résistance.

CHAPITRE III

*ELABORATION DU COMPOSITE ET TECHNIQUES
EXPERIMENTALES*

ELABORATION DU COMPOSITE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1- INTRODUCTION :

Le matériau étudié au cours de ce projet est un composite dit binaire, constitué d'une matrice cimentaire et de fibres végétales issus du recyclage du papier-carton. Ce composite est destiné à servir de base d'essais pour l'élaboration d'un béton léger de remplissage, qui de par la faible conductivité thermique des fibres végétales aura la propriété d'isolant thermique.

Avant d'aborder la caractérisation physico-mécanique de ce matériau ; nous présenterons au cours de ce chapitre le procédé d'élaboration du composite binaire, puis nous passerons brièvement en revue les techniques expérimentales utilisées.

Il est important de rappeler que le comportement de ce nouveau matériau composite est différent de celui d'un mortier classique. Cela nécessite une amélioration des méthodes d'essais traditionnels et le développement de nouveaux procédés d'expérimentation.

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

Cependant, si actuellement, il existe plusieurs normes relatives à la caractérisation du béton composite, et quelques normes relatives à la caractérisation des bétons de fibres d'acier, il n'existe pratiquement aucune norme relative à la caractérisation des bétons de fibres végétales, et ce en dépit des nombreux travaux de recherches menés à ce sujet. Il est ainsi nécessaire de penser à l'élaboration d'une norme propre aux bétons de fibres végétales pour uniformiser les essais et faciliter la comparaison des résultats entre les chercheurs dans ce domaine.

En outre, nous allons donner les modes opératoires des différents essais réalisés dans la partie expérimentale, dans un but de collaborer à la normalisation des essais.

III.2- ELABORATION DU COMPOSITE :

III.2.1- Matières premières :

III.2.1.1- Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé dont la dénomination est **CPJ-CEM II/A 42,5 NA 442** ; $5\% \leq L \leq 15\%$; conforme à la norme NF P 15-301 ;

III.2.1.2- Eau :

L'eau qui a été utilisée pour le gâchage est une eau potable du robinet exempte d'impuretés.

III.2.1.3- Fibres :

a- Préparation :

Les fibres utilisées proviennent de cartons et papiers recyclés. Pour être utilisés dans le composite, ces dernières subissent un traitement physico-chimique comme indiqué sur la figure 3.1



Fig.3.1. Schéma illustratif des différentes phases de traitement des déchets de papier

- La première étape consiste à immerger le carton, en l'occurrence les plaquettes d'œufs, dans une solution constituée d'un volume d'eau de javel à 12° diluée dans cinq volumes d'eau, puis on mélange par malaxage pendant une heure de temps, cette étape servira à blanchir et homogénéiser les fibres ; on procédera par la suite au lavage à l'eau du robinet ;
- Afin de faciliter le défibrage, les fibres récupérées sont installées dans une étuve à 104°C pendant 24 heures afin de dessécher complètement les fibres ;
- Le défibrage constitue la troisième étape. Il est réalisé à l'aide d'un broyeur à boulet, actionné pendant 8 heures pour une quantité de fibres à peu près équivalente à 250 gr ;

- Les fibres sont finalement stockées à l'abri de l'humidité et du rayonnement pour servir ultérieurement à la confection du composite.

b- Tamisage :

Après récupération des fibres du broyeur, celles-ci sont passées aux tamis ; seul la fraction inférieure à 5 mm dite mélange de grosses et de fines sera retenu.

Un examen microscopique d'un amas de fibres, illustré par la figure 3.2, à été réalisé par BENTCHIKOU [12], cet examen révèle une longueur moyenne (pondérée) des fibres égale à 1,5 mm avec un diamètre moyen de $18 \pm 2 \mu\text{m}$.

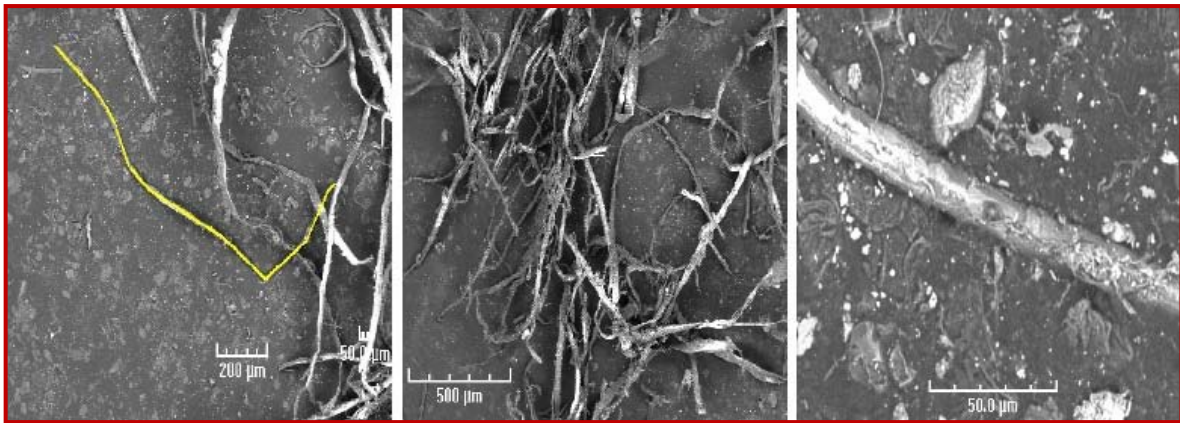


Fig.3.2. Fibres sous Microscope Electronique à Balayage (MEB) [12]

III.2.2- Confection du composite :

Afin d'étudier l'influence des fibres cellulosiques sur les propriétés du composite, on utilise une composition à deux constituants : Ciment + fibres, dite binaire.

Suite aux travaux menés par BENTCHIKOU [7] qui étudia 9 compositions différentes selon la concentration en fibres, seul trois de ces valeurs, jugées caractéristiques ont été retenues pour cette présente étude.

Afin d'évaluer les caractéristiques mécaniques et thermique du composite, des éprouvettes prismatiques ont été réalisées, ayant pour dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ pour les essais mécaniques et $20 \times 85 \times 160 \text{ mm}^3$ pour les essais thermiques.

Les quantités de matériaux utilisées en fonction du pourcentage de fibres et correspondants à un rapport E/C_{optimum} ; sont résumées dans le tableau 3.1 :

Teneur massique en fibres (%)	0	4	16
E/C optimum	0,36	0,41	0,92
Ciment (kg)	1518	1354	670
Eau (kg)	546	555	607
Fibre (kg)	0	54	108

Tableau 3.1. Constituants du composite pour un mètre cube de volume [7]

La procédure d'élaboration du composite binaire est décrite comme suit :

- 1- Mélange des fibres et du ciment à sec pendant 3 min à vitesse lente ;
- 2- Ajout de l'eau en tenant compte de la quantité absorbée par les fibres, tout en malaxant pendant 3 min ;
- 3- Arrêt du malaxeur et raclage puis malaxage pendant 1 min à vitesse rapide ;
- 4- Mise en place dans des moules, suivie de vibration sur l'appareil à chocs (Cf. norme NFP 15-412) ;
- 5- Stockage en chambre humide à température ambiante ;
- 6- Démoulage 24 h après ;
- 7- Disposition des éprouvettes dans un bac d'eau pour optimiser la cure durant 28 jours ;

III.3- TECHNIQUES EXPERIMENTALES :

III.3.1- Caractérisation physico-mécanique :

III.3.1.1- Masse volumique apparente :

Définie comme le rapport de la masse de l'échantillon à son volume apparent à l'état sec, la masse volumique est calculée en pesant l'échantillon préalablement étuvé à 70 °C jusqu'à masse constante tel que spécifié dans **RILEM**. (1974). Les pesées sont effectuées à 0.01g près et le volume apparent est déterminé à l'aide de la méthode de la poussée d'Archimède.

Trois mesures de la masse et du volume sont effectuées sur chaque échantillon et la masse volumique apparente est calculée comme la moyenne des trois mesures prises.

III.3.1.2- Ouvrabilité :

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de plusieurs appareils, l'un des plus connu d'entre eux est la table à chocs.

L'essai a été effectué sur une table à choc modèle 63-L40/A ayant pour spécifications : Diamètre de la table 600 mm. Hauteur de chute 10 mm. Moule tronconique en bronze (base 100 mm, sommet 70 mm et hauteur 60 mm).

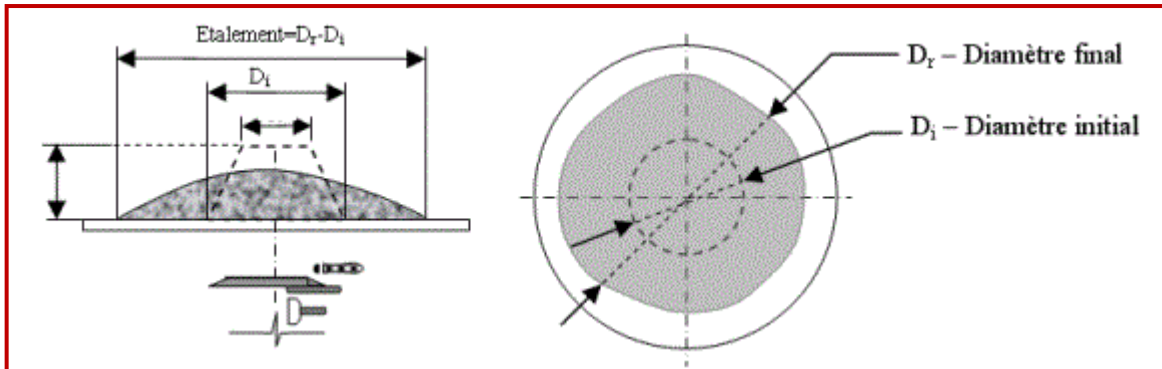


Fig.3.3. Table à secousses

Le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec : D_r = Diamètre final et D_i = Diamètre initial.

Deux essais ont été réalisés pour chaque concentration de fibres, et l'étalement est calculé comme étant la moyenne des deux.

III.3.1.3- Résistance mécanique :

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ mm}^3$, qui après démoulage sont conservées dans l'eau à température ambiante, pendant 28 jours.

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion à trois points puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

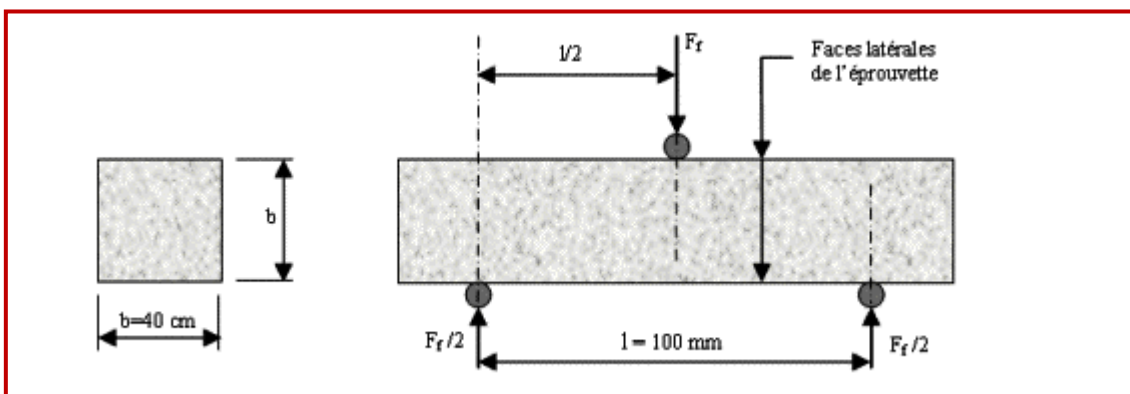


Fig.3.4. Dispositif pour l'essai de résistance par flexion à trois points

Les essais de flexion ont été réalisés sur un appareil de type UPD 10, instrument de marque *Mohr & FEDERHAFF/AG Sintco*, au niveau du Département de Génie Civil de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique.

Les éprouvettes reposent sur deux appuis distants de 100 mm (centrés) et sont soumises à une charge verticale, appliquée au milieu de la travée centrale (Figure 3.4). La charge est appliquée progressivement à vitesse de chargement contrôlée qui varie de 3 à 5 kN/s suivant la concentration en fibres du composite testé et ce jusqu'à la rupture. La charge à la rupture F_f est donnée par la machine en kN. La résistance à la flexion est calculée à partir de cette charge maximale, la contrainte dans ce cas sera donnée par la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{M}{I} y = \frac{3}{2} \frac{F l}{b^3}$$

Les essais de compressions ont été réalisés sur un appareil de marque FORM-TEST SEIDNER (BUEHL+FAUBEL), au niveau du Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP) d'Alger.

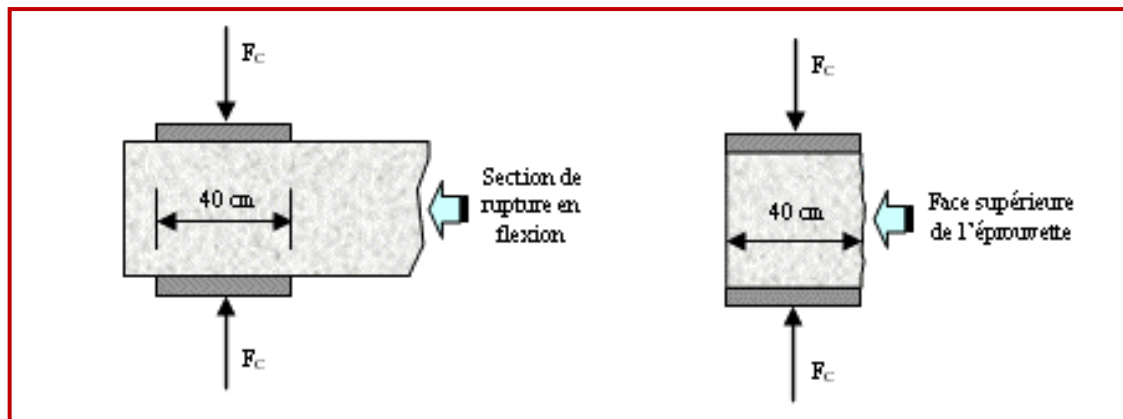


Fig.3.5. Dispositif de rupture en compression

Les éprouvettes sont issues des chutes obtenues de l'essai de flexion, elles sont disposées entre deux éléments carrés de 40 mm de côté comme indiqué dans la figure 3.5. La force F_c causant la rupture est donnée en kN ; la contrainte de compression est donnée par :

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

III.3.2- Caractérisation thermique:

Les essais de caractérisation thermique ont été réalisés au Laboratoire Construction et Environnement (*Lce*) de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. La mesure a été faite avec un CT Mètre équipé d'une sonde monotige à choc thermique.

Le principe de fonctionnement consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans la même sonde), à mesurer l'élévation de température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau.



Fig.3.6. CT - mètre

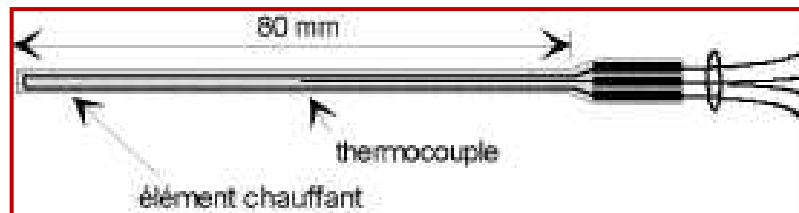


Fig.3.7. Schéma de la sonde fil du CT - mètre

La sonde monotige est ensuite insérée entre deux échantillons identiques ; après réglage des paramètres de mesure, la conductivité thermique est directement donnée sur le cadran.

Un essai a été réalisé pour chaque concentration de fibre sur des éprouvettes $2 \times 8,5 \times 16$ mm³.

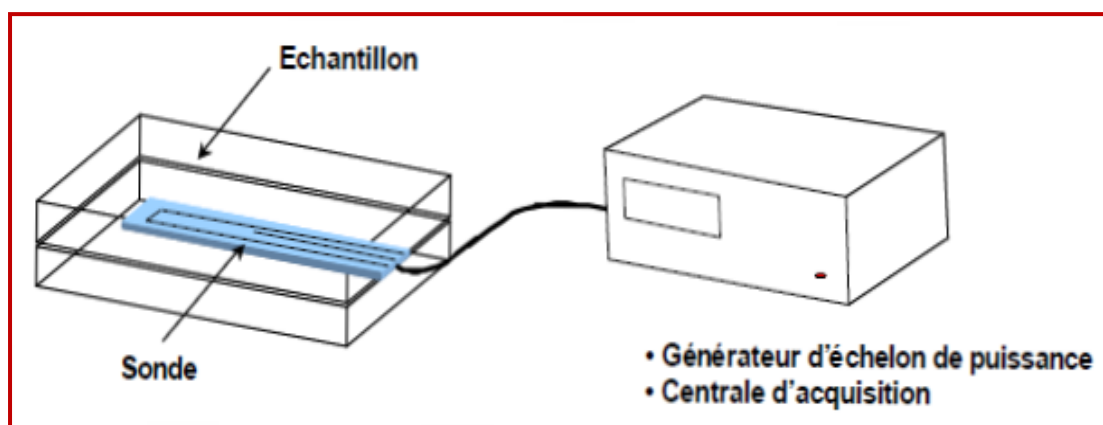


Fig.3.8. Schéma de mesure de la conductivité thermique

III.3.3- Etude de l'effet du vieillissement accéléré [10-13-19-20]:

Les essais de durabilité sont des essais spécifiques qui ont pour objectif de vérifier la préservation au cours du temps, des qualités des matériaux, leur dégradation peut être due à plusieurs facteurs (attaques par des agents agressifs, éclatement du au gonflement, fissuration due aux fortes variations dimensionnelles, etc..). Dans la présente étude, nous avons essayé de soumettre, en laboratoire, notre composite à des essais de vieillissement accélérés afin d'apprécier sa tenue dans le temps vis-à-vis de ces derniers. Pour cela nous avons opté pour l'essai mouillage-séchage.

Essai Mouillage Séchage :

Cet essai est réalisé selon la norme **ASTM D 559**. Il comprend douze cycles de vieillissement accélérés dont chacun consiste à immerger les éprouvettes prismatiques **40 x 40 x 160** cm³ dans de l'eau pendant cinq heures, suivi d'un séchage à l'étuve pendant 42 heures à 70°C. Les cycles mouillage-séchage ont commence après 28 jours de cure dans de l'eau.

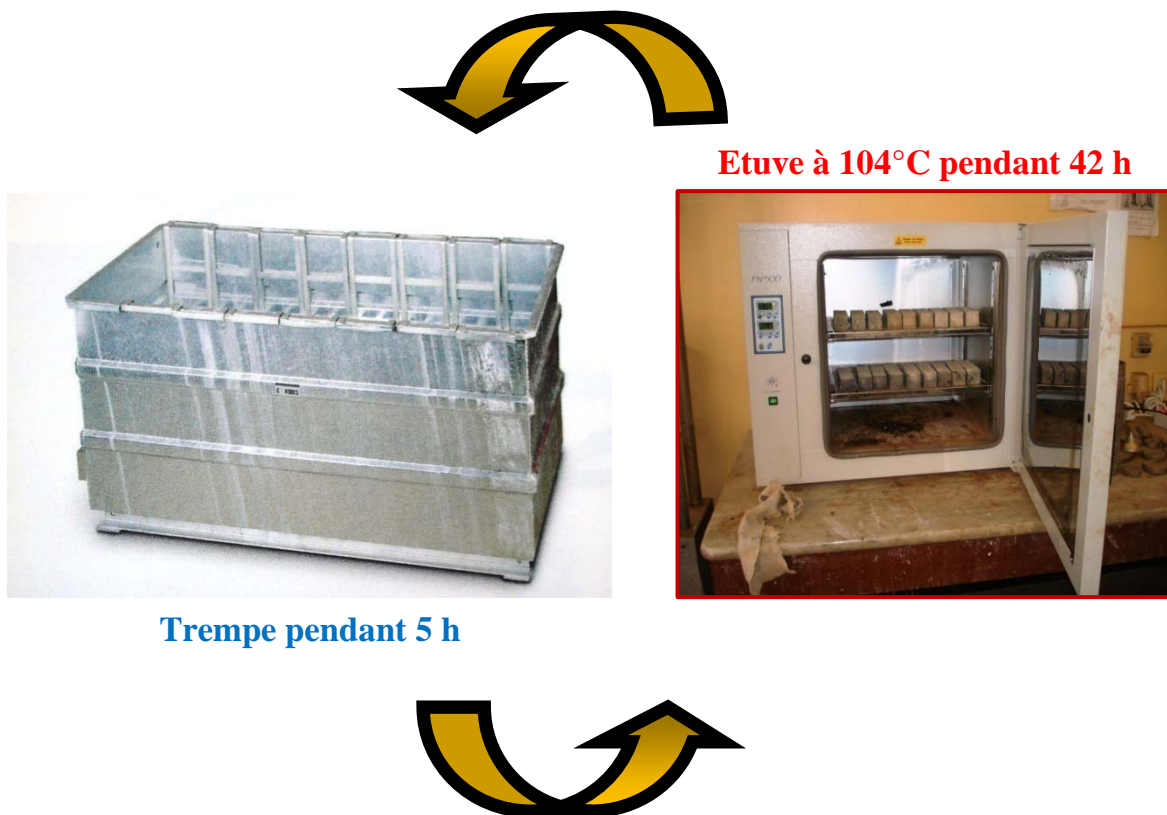


Fig.3.9. Schématisation des cycles mouillage-séchage

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS

IV.1- INTRODUCTION :

Le but recherché à travers cette étude est de caractériser la durabilité de notre matériau composite à base de fibres cellulosiques. Nous avons pour cela soumis notre matériau avec différentes concentrations en fibres à des cycles de vieillissement accéléré et ce, afin de pouvoir apporter des éléments de comparaisons avec différentes recherches menées sur des sujets analogues. Cela permettra, en fin, d'estimer la durabilité de notre matériau.

Le composite étudié ici à été élaboré avec des dosages Eau/Ciment optimaux, tels que décrit par M. BENTCHIKOU [12].

Nous avons en outre caractérisé la masse volumique ρ , l'ouvrabilité E , la conductivité thermique λ et les résistances mécaniques.

IV.2- DETERMINATION DE L'OUVRABILITE :

Pour la détermination de la maniabilité de notre mortier, on a eu recours à la table à choc. Le mode opératoire est décrit au § III.3.1.2, l'étalement étant déterminé par le pourcentage d'augmentation du diamètre de la galette.

L'ouvrabilité d'un mortier dépend du dosage de tous les constituants et essentiellement du dosage en eau. Elle s'améliore donc avec l'augmentation du rapport E/C. Cependant elle diminue avec l'augmentation du dosage en filler jusqu'à un certain optimum pour ensuite enregistrer une amélioration.

Toutefois l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage améliore la maniabilité mais diminue la résistance. Notons qu'un excès d'eau peut être aussi un facteur d'allègement puisque c'est une eau non consommée par l'hydratation qui, en s'évaporant, laisse une microporosité dans la matrice ; afin de remédier à cela, la confection de notre mortier à été établie avec des rapports E/C optimisés pour chaque concentration en fibre.

Pour voir l'effet de la teneur en fibres sur l'ouvrabilité du mortier, différents pourcentages en fibres ont été envisagés (0 %, 4 % et 16 %). Pour chaque composition nous avons mesuré l'étalement à la table à secousses. Les résultats obtenus sont représentés par la figure 4.1 :

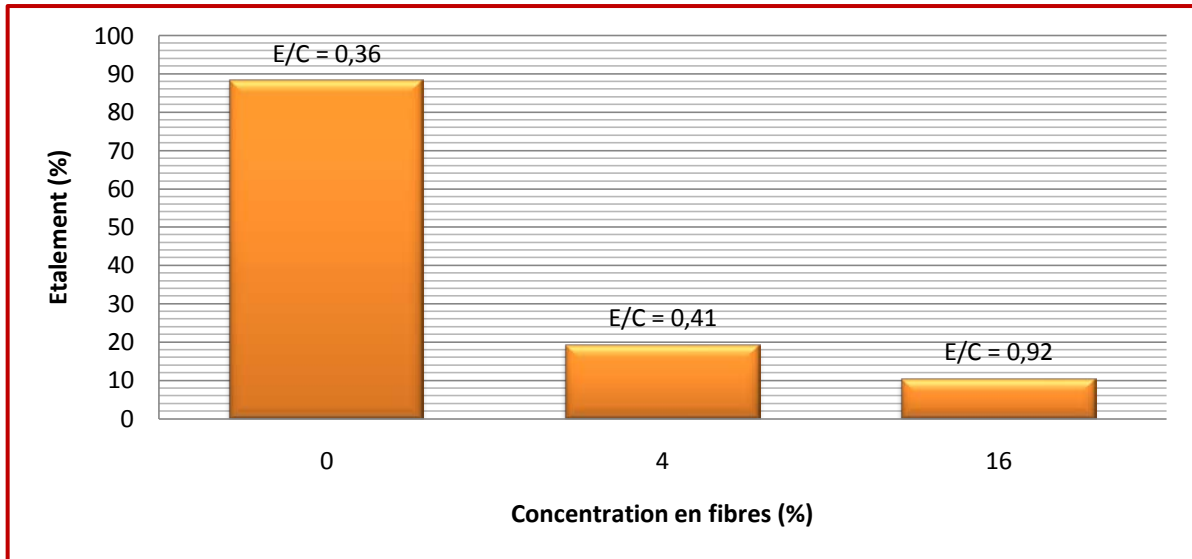


Fig. 4.1. Etalement à la table à choc en fonction de la concentration en fibres

Nous constatons que l'incorporation des fibres dans la pâte de ciment, à des pourcentages de 4 % et 16 % diminue nettement l'étalement du mortier (de l'ordre de 78 % et 88 % respectivement), et donc l'ouvrabilité de celui-ci. Ceci est sûrement dû au fait que les fibres augmentent la cohésion entre grains de ciment du fait du réseau frottant des fibres ; malgré l'augmentation du dosage en eau.

IV.3- ETUDE DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE :

Les masses volumiques apparentes du composite ont été déterminées par pesée à 0,1 gramme près. Quant au volume, il a été déterminé par la méthode de la poussée d'Archimède et ce après 28 jours de cure et passage à l'étuve à 70°C.

Pour les différentes compositions, les valeurs sont regroupées avec les résultats obtenus par M. BENTCHIKOU [12] dans le tableau 4.1 :

Concentration en fibres (%)	0	4	16
Masse volumique ρ (kg/m ³) (nos travaux)	1830	1767	1248
Masse volumique ρ (kg/m ³) (travaux de BENTCHIKOU [12])	1950	1720	1030

Tableau 4.1. Masse volumique apparente sèche du composite

La variation de la masse volumique en fonction de la concentration en fibres X est linéaire et à comme équation de la courbe de tendance $\rho = -37.96 X + 1868$ avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,979$

Le graphe de cette fonction est représenté en figure 4.2, il permet en outre de constater que la masse volumique du matériau diminue lorsque le pourcentage en fibres augmente. Les fibres apportent donc bien un allègement du matériau.

Les valeurs ainsi obtenues sont comparables à celles obtenues pour le mortier à fibres cellulosiques de M. BENTCHIKOU et al. (2007) [12], et pour le même composite binaire réaliser par M. BENTCHIKOU (2008) [12].

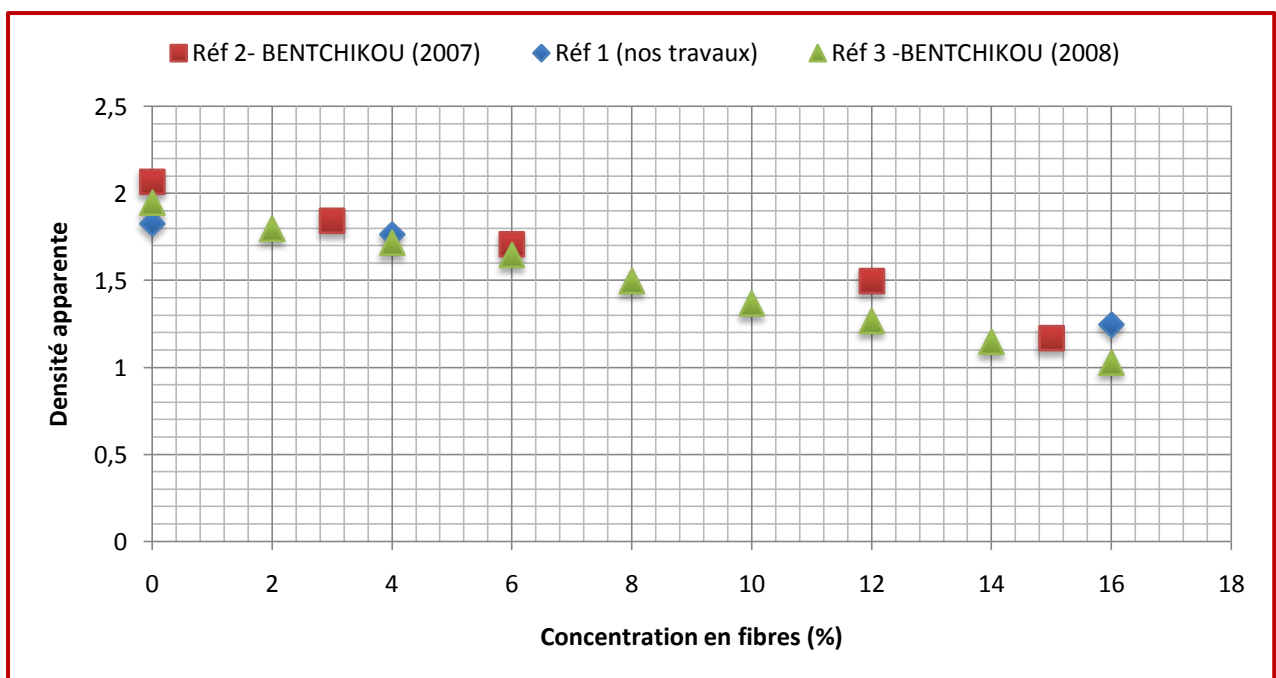


Fig. 4.2. Variation de la densité apparente en fonction de la concentration en fibres pour différents composites

Ceci peut être aisément expliqué dans la mesure où on a introduit des fibres cellulosiques de structure poreuse dans une matrice cimentaire plus dense et plus lourde. On conclut donc que l'ajout des fibres allège considérablement le mortier et ce aussi bien en introduisant sa propre porosité qu'en introduisant une porosité supplémentaire causé par la faible ouvrabilité de la pâte obtenu.

IV.4- CARACTERISTIQUES MECANIQUES :

Comme pour la plupart des autres matériaux, la résistance du composite est fondamentalement dépendante des vides qu'il comporte. Elle est très influencée par le volume des vides : air occlus, pores capillaires, pores de gel et air entraîné. Dans notre cas, l'ajout des fibres confère au composite une certaine porosité. Cette porosité est d'autant plus élevée que la teneur en fibres est plus grande. C'est pour cette raison que nous nous sommes basés, dans l'étude de la résistance mécanique de nos composites, sur l'effet de trois teneurs différentes en fibres cellulosiques. Les résistances mesurées sont la résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion à trois points. Elles sont déterminées, à 28 jours, selon les techniques présentées au paragraphe III.3.1.3.

IV.4.1- Résistance à la Flexion :

Nous avons fait varier la teneur en fibres en pourcentage massique par rapport au ciment de 0 % à 4 % puis 16 %, et pour un composite dont les éprouvettes après démoulage ont été conservées 28 jours dans une eau à température ambiante; la résistance à la flexion à trois points est illustrée par la courbe donnée par la figure 4.3 ci-dessous.

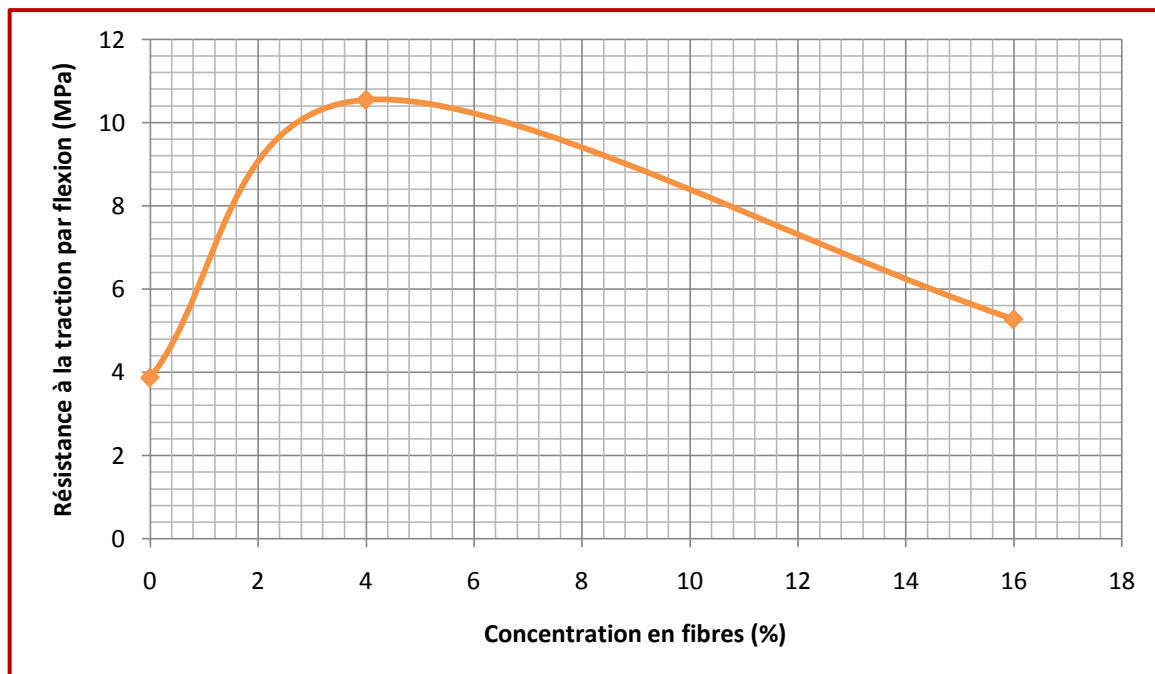
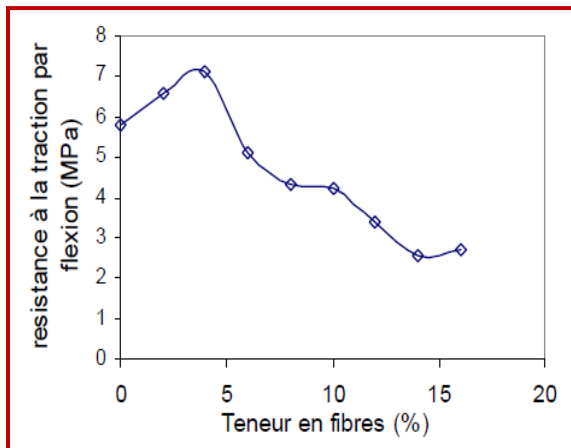


Fig. 4.3. Résistance à la traction par flexion en fonction de la concentration en fibres

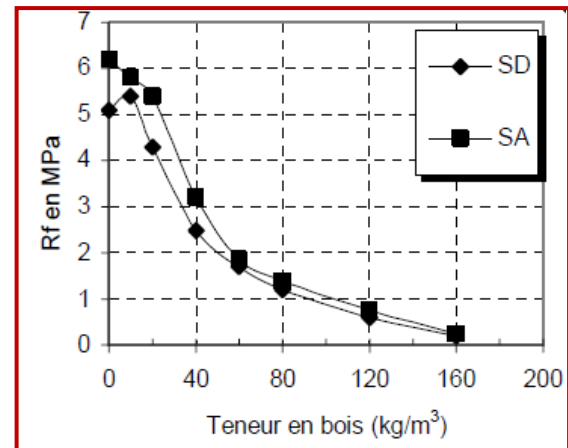
La courbe obtenue montre clairement que la présence des fibres en faible quantité (**4%**) améliore la résistance à la traction par flexion. Au-delà de **4%** elle diminue pour atteindre à **16 %** une valeur de **5,27 MPa**.

Les résultats obtenus confirment la tendance au gain de résistance pour un pourcentage en fibre de **4 %**, obtenu pour le même composite étudié par M. BENTCHIKOU [12] (figure 4.4). M. BEDERINA [13] a obtenu aussi un maximum de résistance en traction pour une faible teneur en bois correspondant à **0,47 %** en pourcentage massique et ce, pour un béton de sable dunaire. Zhijian Li et al. [6] retrouvent aussi un pic de résistance pour des teneurs massiques en fibres de chanvre variant selon la fraction granulaire utilisée dans le béton, de **0,18 %** à **0,36 %** correspondant à un facteur fibre de **1,57** et **3,13** respectivement.

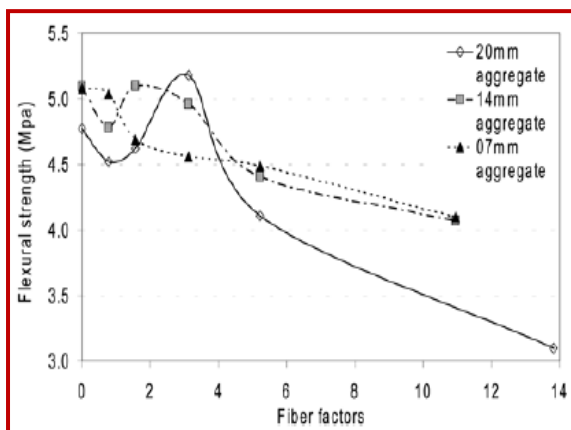
On peut donc considérer que jusqu'à **4 %**, les fibres cellulosiques du matériau composite, ont un effet de couture sur les microfissures. Par ailleurs, on observe que la résistance à la traction par flexion de la pâte de ciment pure (**0 %** en fibres) est assez faible avec seulement **3,87 MPa**, alors qu'elle aurait dû être de l'ordre de **6 à 7 MPa**, ceci peut être dû à une malfaçon lors de la confection des éprouvettes ou à une erreur de mesure due à la machine.



(a)



(b)



(c)

(a) M. BENTCHIKOU [12]

(b) M. BEDERINA [13]

(c) ZHIJIAN LI et al. [6]

Fig. 4.4. Résistance à la traction par flexion de certains matériaux composites

IV.4.2- Résistance à la Compression :

La résistance à la compression à été mesurée sur les chutes des éprouvettes prismatiques issues de l'essai de flexion ; le mode opératoire est décrit au paragraphe III.3.1.3.

Tout comme pour la résistance à la flexion, les essais ce déroulent sur 3 teneurs différentes en fibres. Les résultats obtenus sont illustrées par la courbe donnée par la figure 4.5 :

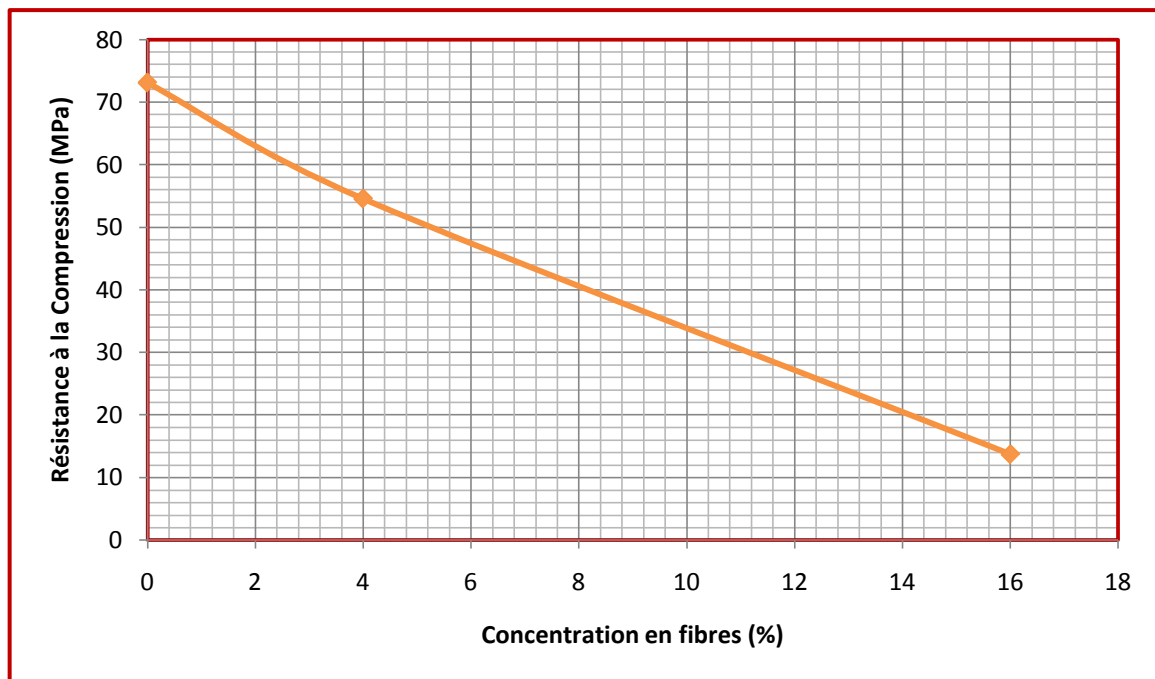
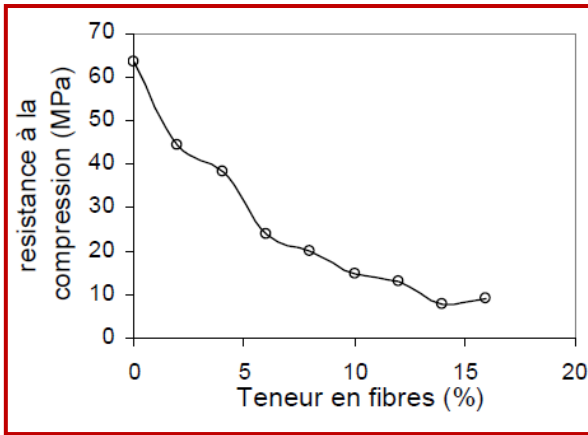


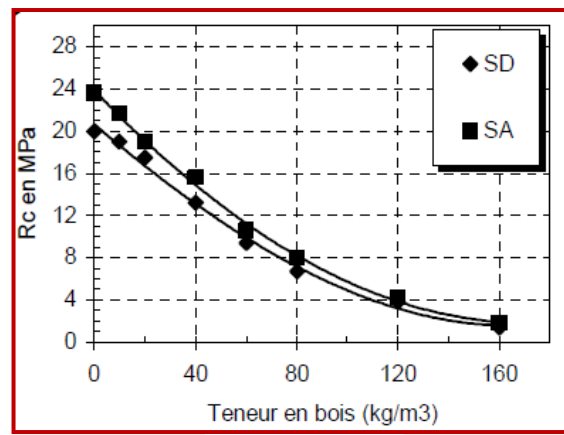
Fig. 4.5. Résistance à la compression en fonction de la concentration en fibres

Nous constatons à travers la figure 4.5 que la résistance à la compression de notre composite diminue linéairement d'une façon assez prononcée en fonction de la concentration en fibres, et ce même pour de faibles teneurs dans la mesure où nous notons une chute de **25 %** de la résistance pour le composite à **4%**, une chute qui atteint **81%** à **16%** de fibres. Ceci peut être expliquer par le caractère antagoniste de résistance des matériaux de base à savoir le ciment connu pour sa grande résistance et les fibres dont la résistance en compression est presque négligeable devant celle du ciment. De plus, la porosité induite par l'incorporation des fibres diminue la compacité du composite.

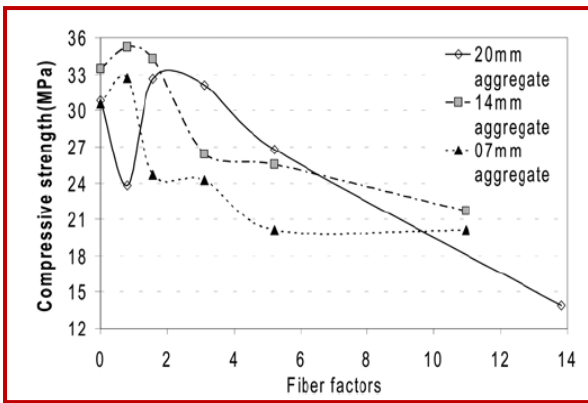
Ces résultats comme pour la résistance à la traction par flexion rejoignent ceux trouvés par les travaux cités précédemment ; les courbes respectives de la résistance à la compression sont données par la figure 4.6 :



(a)



(b)



(c)

(a) M. BENTCHIKOU [12]

(b) M. BEDERINA [13]

(c) ZHIJIAN LI et al. [6]

Fig. 4.6. Résistance à la compression de certains matériaux composites

IV.5- ETUDE DES PARAMETRES THERMIQUES A L'ETAT SEC :

Les caractéristiques thermiques sont mesurées, pour chaque composition à partir de deux éprouvettes de dimension $2 \times 8,5 \times 16 \text{ cm}^3$, et entre lesquelles on dispose la sonde monotige du *CT mètre*.

L'essai s'effectue dans une salle à température ambiante. L'influence de la teneur en fibres sur la conductivité thermique sera en outre déterminée au cours de cet essai. Les résultats obtenus sont portés dans le tableau 4.2 auxquels on a adjoint les densités apparentes.

Fibres (%)	Densité apparente	$\lambda \text{ (W/ m k)}$
0	1,83	0,9529
4	1,77	0,7077
16	1,25	0,5545

Tableau 4.2. Paramètres thermiques et densité apparente en fonction de la concentration en fibres

En traçant la courbe de la conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres (figure 4.7), il apparaît clairement que l'apport en fibres diminue considérablement la conductivité thermique du composite. Cette tendance se retrouve aussi dans les travaux de M. BENTCHIKOU [12] et ceux de M. BEDERINA [13] illustrés par les figures (4.8.a) et (4.8.b) respectivement. Néanmoins, les valeurs de λ obtenues par M. BENTCHIKOU sont plus faibles que celles mesurées sur notre composite. Ceci est probablement dû d'une part à l'utilisation d'une méthode différente pour mesurer λ . D'autre part à 16 % en fibres, la masse volumique de notre composite est beaucoup plus élevée que celle obtenue par M. BENTCHIKOU [12].

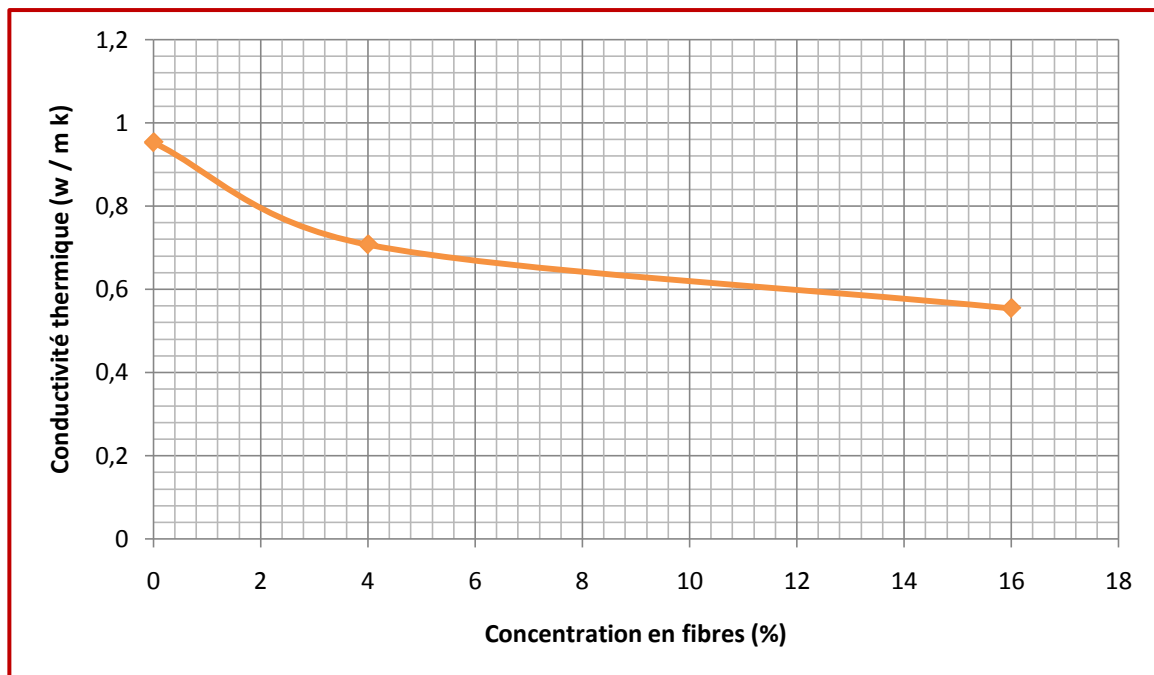


Fig. 4.7. Variation de la conductivité thermique en fonction de la concentration en fibres

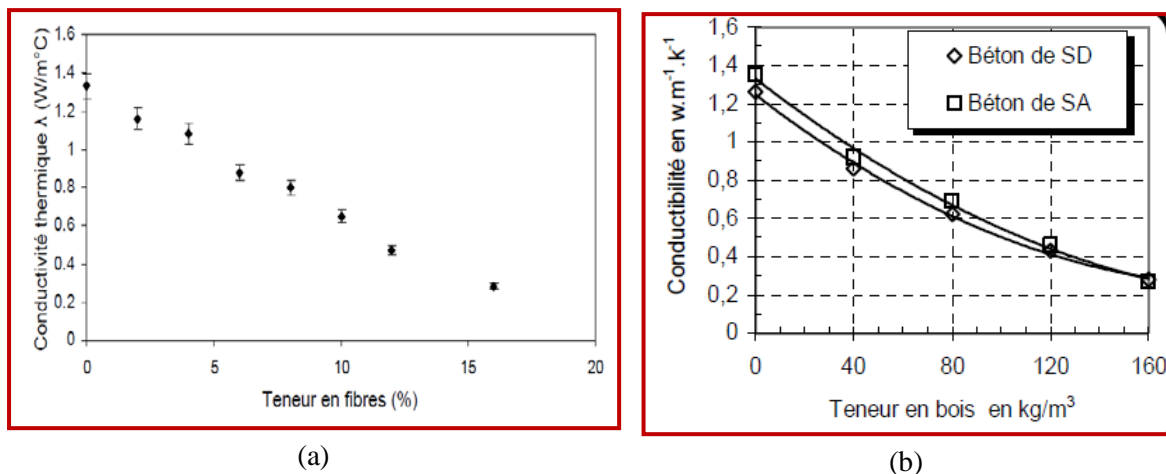


Fig. 4.8. Variation de la conductivité thermique pour différents composite
(a) M. BENTCHIKOU [12] (b) M. BEDERINA [13]

Ceci peut s'expliquer par le fait que les fibres, elles mêmes, ont une conductivité plus faible que celle du ciment, ce qui permet donc de constituer une barrière thermique qui améliore les performances d'isolation du mortier ; ajouter à cela la génération par l'apport de fibres d'une structure poreuse, amplifier par la faible maniabilité de la pâte obtenue.

Il peut être aussi intéressant d'étudier la variation de la conductivité thermique en fonction de la densité du matériau.

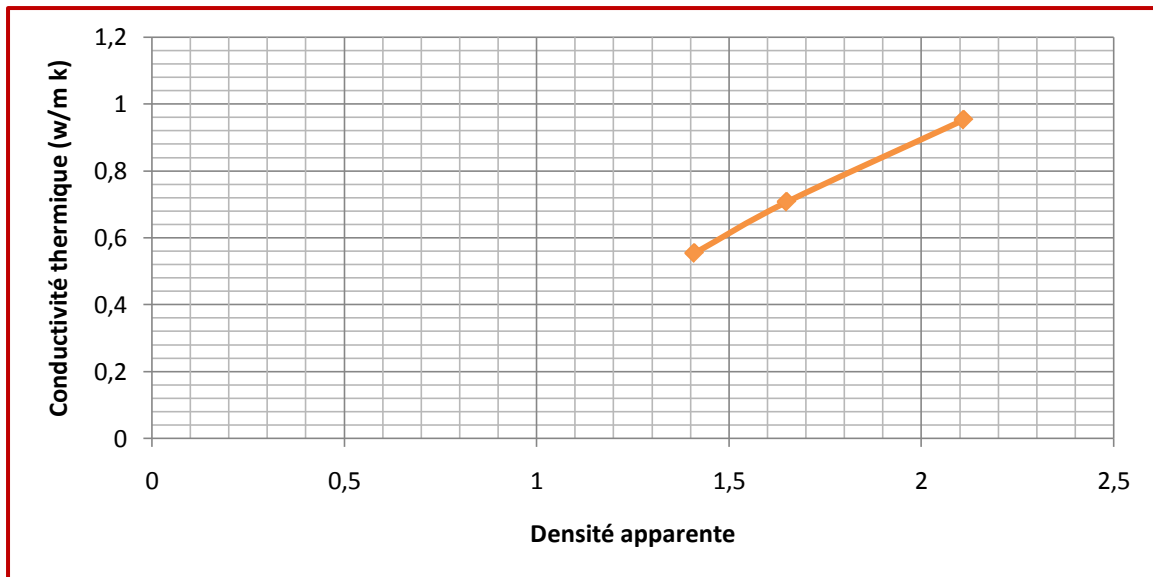


Fig. 4.9. Variation de la conductivité thermique en fonction de la densité du composite

La variation de la conductivité thermique en fonction de la densité apparente, donnée par la figure 4.9 illustre bien la relation de proportionnalité qui existe entre ces deux grandeurs.

IV.6- ETUDE DE LA DURABILITE DU COMPOSITE BINAIRE :

Cet essai a été fait selon la procédure décrite dans le paragraphe III.3.3. afin d'examiner l'effet de cet essai sur le comportement des matériaux étudiés, nous avons déterminé la résistance à la compression, avant et après cycles mouillage-séchage.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 4.3 et schématisés sur la figure 4.10.

Fibres (%)	0	4	16
Résistance à la compression (MPa) (avant mouillage-séchage)	73,125	54,58	13,75
Résistance à la compression (MPa) (après mouillage-séchage)	55,36	39,65	9,41
Perte en Résistance (%)	24,29	27,35	31,56

Tableau 4.3. Pertes en résistance à la compression due aux effets des cycles mouillage-séchage

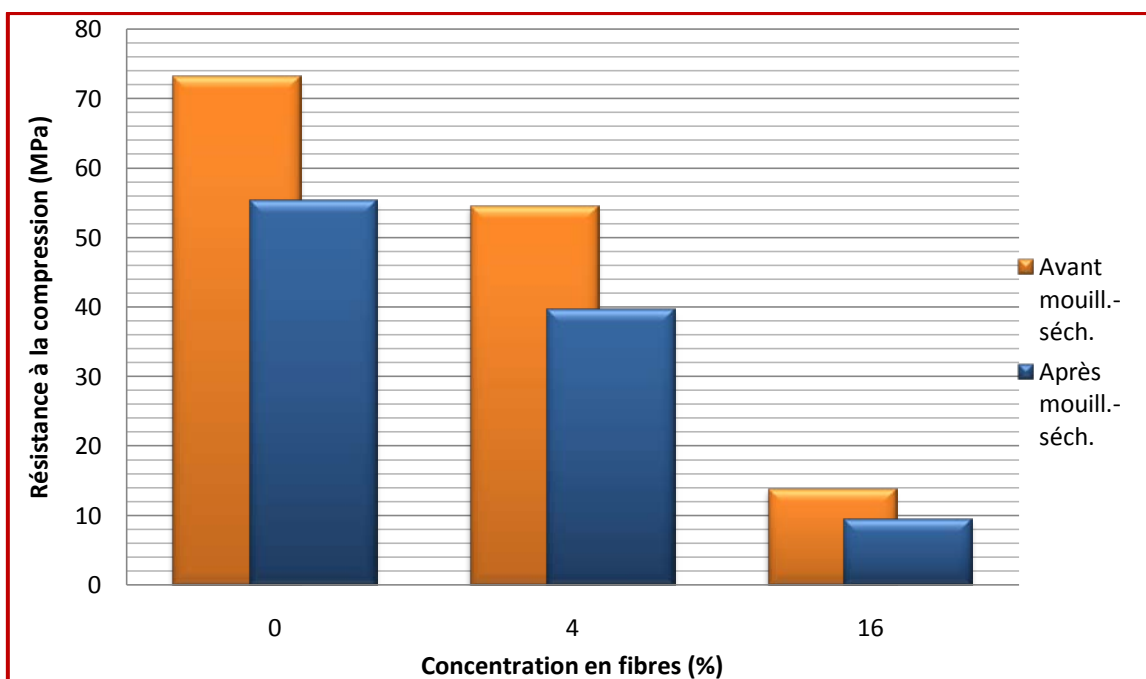


Fig. 4.10. Evolution de la résistance à la compression avant et après cycles mouillage-séchage

D'une manière générale, on remarque une nette diminution dans la résistance à la compression suite aux cycles mouillage-séchage, et ceci pour les trois compositions envisagées. Cette chute de résistance se situe entre **24** et **32** %.

Des essais de flexion ont aussi été réalisés ; cela dit, seul les essais réalisés sur les éprouvettes à **16** % nous permettent d'avoir des résultats exploitables. Nous constatons après vieillissement accéléré par mouillage-séchage, une chute de l'ordre de **50** % de la résistance à la traction par flexion.

Cette même tendance a été observée par R.D. Tolêdo Filho et al. [10] ; concernant la résistance d'un composite à matrice cimentaire et renforcé par des fibres de Sisal ou de Noix de Coco, les essais de flexion à quatre points ont été réalisés sur des éprouvettes $400 \times 100 \times 15 \text{ mm}^3$, les résultats obtenus relèvent aussi une chute de résistance de l'ordre de **50** % mais après 25 cycles de mouillage-séchage contre 12 cycles pour cette présente étude.

IV.7- CONCLUSION :

Au cours de ce chapitre, on a pu déterminer les différentes caractéristiques de notre composite et ce, avant et après des cycles de vieillissement accéléré.

On a pu en outre observer que la chute de résistance en compression augmente légèrement avec la variation de la concentration en fibres. Il apparaît alors que l'adjonction de fibres ne semble pas améliorer le comportement mécanique après vieillissement.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était d'étudier le vieillissement accéléré d'un composite binaire associant des fibres cellulosiques issues du recyclage du papier-carton à une matrice cimentaire.

Cette étude se situe dans la continuité des travaux menés par M. BENTCHIKOU. La première partie a consisté à reprendre les essais de caractérisations physiques, mécaniques et thermiques pour le même composite à différentes teneurs massiques en fibres à savoir **0 %**, **4%** et **16 %**. Une similitude des résultats a pu être relevée entre les deux travaux, excepté pour les valeurs de la conductivité thermique. Ces écarts sont probablement dûs à la différence des méthodes utilisées pour la mesure de cette conductivité, ainsi qu'à un écart assez important entre les masses volumiques des composites à 16 % en fibres.

La comparaison avec les résultats de la littérature concernant les composites à matrice cimentaire et fibres végétales, met en évidence des tendances assez similaires dans le comportement de ces matériaux.

La deuxième partie a été dédiée à l'étude de la durabilité de notre composite à travers des cycles de vieillissement accéléré, et ce, aux mêmes teneurs en fibres que citées précédemment. Pour ce faire, notre composite a été soumis à **12** cycles de mouillage-séchage conformément à la norme **ASTM D 559**. Des mesures des résistances mécaniques réalisées après ce vieillissement ont révélé que l'adjonction des fibres ne change en rien la durabilité de notre composite.

PERSPECTIVES

La littérature portant sur les matériaux composites à fibres végétales fait mention d'altérations des fibres par les alcalis présents dans le ciment. Dans la perspective d'améliorer la durabilité de notre composite, une étude des phénomènes physico-chimiques de surface agissant à l'interface fibre/matrice pourra être menée.

On pourra aussi préconiser l'incorporation d'adjuvants et en particulier les superplastifiants afin d'améliorer l'ouvrabilité de notre matériau, ainsi que sa compacité et donc sa résistance.

D'autres essais de durabilité pourront éventuellement être entrepris afin de confirmer la tendance observée au cours de notre étude

- [1] OLLIVIER, J.P, VICHOT, A. “La Durabilité des Béton”; Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées ; 840 p ;
- [2] “Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton”, Association Béton Québec, Janvier 2005, 36 p ;
- [3] Heidi CUYPERS et al. “Durability aspects of AR-glass-reinforcement in textile reinforced concrete, Part 1: Material behaviour”, pp. 381-388, Belgium;
- [4] REGUANT, J, RINAUDO, M, “Etude bibliographique sur les matériaux issus de la biomasse végétale”, Centre National de la Recherche Scientifique, Grenoble, France, 1999.
- [5] SEDAN, D, “Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite”; Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, Novembre 2007 ;
- [6] Zhijian Li, Lijing Wang, and Xungai Wang, “Compressive and Flexural Properties of Hemp Fiber Reinforced Concrete”, *Fibers and Polymers* 2004, Vol.5, No.3, pp. 187-197, 2004;
- [7] KRIKER, A, “Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2005
- [8] COOK, D.J., “Concrete and Cement Composites Reinforced with Natural Fibres”, Proc. Symp. On Fibrous Concrete. Construction Press Ltd., Lancaster, pp. 99-114, April. 1980.
- [9] SACHAN A.K., KAMESWARA RAO C.V.S. “A cone penetration test for workability of reinforced concrete”, RILEM, Vol. 21, N° 126, pp. 448-452, November 1988.
- [10] TOLÈDO FILHO, R.D., SCRIVENER, K., ENGLAND, G.L., and GHAVAMI, K., “Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites”, *Cement and Concrete, composites*, 22, pp.127-143, 2000.
- [11] TOLÈDO FILHO, R.D., GHAVAMI, K., ENGLAND, G.L. and SCRIVENER, K., “Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability”, (Article in Press), *Cement and Concrete, composites*, 25, 2003.

- [12] BENTCHKOU, M. “Contribution à l’étude et à l’élaboration de matériaux composites pour l’isolation thermique”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2008.
- [13] BEDERINA, M. “Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2007.
- [14] CHANVILLARD, G. “Caractérisation des performances d’un béton renforcé de fibres à partir d’un essai de flexion. Partie 1 : de la subjectivité des indices de ténacité”, Ecole Nationale des Travaux Publics, France, vol 32, juillet 1999, pp 418-426.
- [15] CHANVILLARD, G. “Caractérisation des performances d’un béton renforcé de fibres à partir d’un essai de flexion. Partie 2 : Identification d’une loi de comportement intrinsèque en traction”, Ecole Nationale des Travaux Publics, France, vol 32, Octobre 1999, pp 601-605.
- [16] CHIBOUT, M. “Techniques d’isolation et calcul thermique des ouvrages”, Mini-projet, Ecole Nationale Polytechnique ; Algérie.
- [17] Web (Info vitrail, 2009 – Wikipédia, 2008 etc.).
- [18] Articles Presses (**a**-L’Algérie en grand 12 2006 – **b**- El Annabi 24 01 2007 – **c**- Algérie-dz.com 15 01 2005 et 06 04 2006 – **d**- cerig.efpg.inpg.fr 02 03 2004) ;
- [19] TOLEDO FILHO, R.D ; de ANDRADE SILVA, F ; FAIRBAIRN, E.M.R ; de ALMEIDA MELO FILHO, J. “Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates”, Construction and Building Materials 23, pp. 2409-2420, 2009;
- [20] C.LIMA Jr, H; L. WILLRICH, F; P. BARBOSA, N; A. ROSA, M; S. CUNHA, B. “Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement”, Materials and structures 41:981-989, 2008.

ANNEXE

1.1- NORMES :

Canadienne

- NQ 2621-900 *Bétons de masse volumique normale et constituants.*
Bureau de normalisation du Québec, Québec, 37 p. 2002.
- CSA A23.1/.2 *Béton : constituants et exécution des travaux/Essais concernant le béton.*
Association canadienne de normalisation, Canada, 453 p. 2004.
- *Appendice H : Béton de fibres;*
 - *A23.2-16C : Détermination du contenu en fibres métalliques dans le béton plastique.*

Américaines (American Society for Testing and Materials, ASTM) :

- ASTM A 820 *Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete;*
- ASTM C 418 *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting*
- ASTM C 779 *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces*
- ASTM C 995 *Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone;*
- ASTM C 1018 *Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading);*
- ASTM C 1116 *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete;*
- ASTM C 1399 *Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete;*
- ASTM C 1550 *Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete*
(Using Centrally Loaded Round Panel).

ASTM D 559

Japonaises :

- JCI-SF4 *Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete.*
Japan Concrete Institute, Toyko, 1984.



1.2- REFERENCES TECHNIQUES :

American Concrete Institute (ACI)

- ACI 302.1R *Guide for Concrete Floor and Slab Construction;*
- ACI 360R *Design of Slabs on Grade;*
- ACI 506.1R *State-of-the-Art Report on Fiber-Reinforced*
- ACI 544-1R *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete;*
- ACI 544-2R *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete;*
- ACI 544.3R *Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing and Finishing*
Steel
Fiber-Reinforced Concrete;
- ACI 544-4R *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete;*



CONSISTOMETRE VEBE :

Appareil servant à déterminer la maniabilité du béton frais par la mesure du temps nécessaire pour qu'une masse de béton démoulée épouse la forme d'un autre moule, un procédé de compactage donné étant employé (essai de moulage).

DENIER :

Mesure de masse linéique utilisée pour tout matériau linéaire. Numériquement, il correspond à la masse en grammes, d'une longueur de 9000 mètres de fils ou de fibres. La diminution de la valeur du denier signifie que le diamètre de la fibre diminue.

FACTEUR DE RESISTANCE RESIDUELLE (RM,N) (RESIDUAL STRENGTH FACTOR) :

Nombre obtenu en soustrayant les valeurs des indices de ténacité I_m et I_n . Par exemple $R_{20,50} = I_{50} - I_{20}$. La méthode de calcul de ce paramètre est décrit en détail dans l'essai C 1018 de l'ASTM.

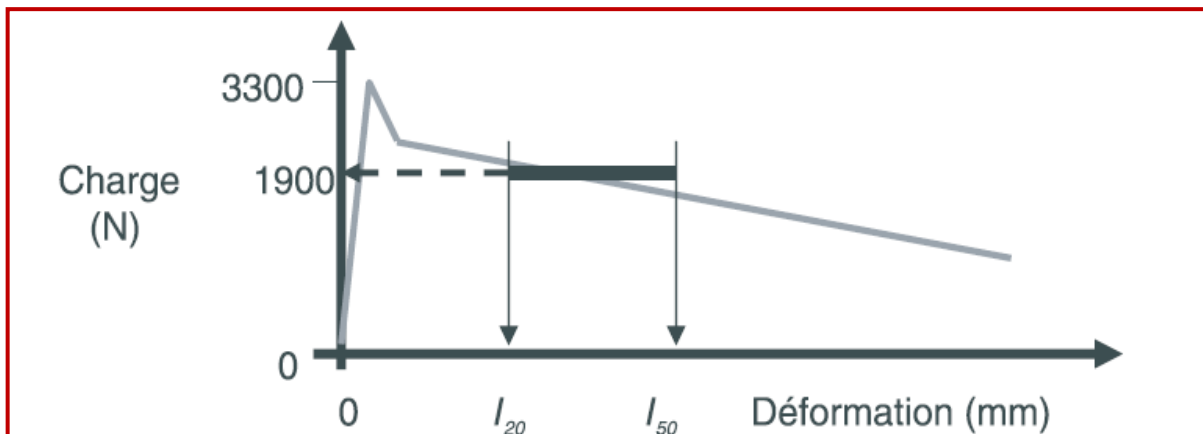


Fig. 1 : Courbe de déformation d'une charge

TENACITE (Tb) :

Représente la capacité d'absorption d'énergie d'une poutre en flexion. La détermination de la ténacité s'effectue par l'aire de la courbe de la charge en fonction des points de déformations finaux spécifiques

La nouvelle version 2004 de l'ASTM C 1018 élimine l'indice de ténacité et change le facteur de résistance résiduelle $R_{m,n}$ à une valeur de résistance résiduelle déterminée à des déformations de 600 (R600) et de 150 (R150)..

INDICE DE TENACITE I_m :

Ratio de l'aire sous la courbe de la charge en fonction de la déformation sur l'aire de cette même courbe jusqu'à la déformation causée par la première fissure. La méthode de calcul de l'indice de ténacité est décrit en détail dans l'essai C 1018 de l'ASTM.

MODULE DE RUPTURE (MOR) :

Correspond à la résistance ultime en flexion.

RESISTANCE A LA FATIGUE :

Généralement, signifie l'endurance d'un béton à la flexion. La résistance à la fatigue représente le nombre de cycles de charges et de relaxation qu'une structure de béton peut supporter avant d'atteindre la rupture. La limite de la résistance à la fatigue est habituellement déterminée par un essai non normalisé impliquant une poutre en flexion, tel que dans l'essai C 78 ou C 1018 de l'ASTM. La méthode consiste à appliquer une charge variant de 10 % à 50 % jusqu'à une valeur de 95 % de sa résistance ultime à la flexion (MOR).

RESISTANCE RESIDUELLE :

Charge emmagasinée dans la poutre après la fissuration et qui se convertit en résistance grâce à la formule de résistance à la flexion. Généralement, une valeur résiduelle est associée à une déformation de la poutre.

RESISTANCE RESIDUELLE EQUIVALENTE ($R_{e,I}$) :

Paramètre déterminé par l'essai SF-4 du Japan Concrete Institute. La mise au point et les procédures d'essais sont identiques à l'ASTM C 1018. Par contre, l'essai japonais détermine la charge moyenne supportée pour une déformation entre 0 et 150. Par exemple, pour une poutre de 150 mm x 150 mm x 500 mm, le point final est à $450/150 = 3$ mm. Dans ce cas, la résistance résiduelle équivalente est typiquement dénotée par :

$$\sigma = \text{charge de 0 à 3 mm} \times [l / (bh^2)]$$

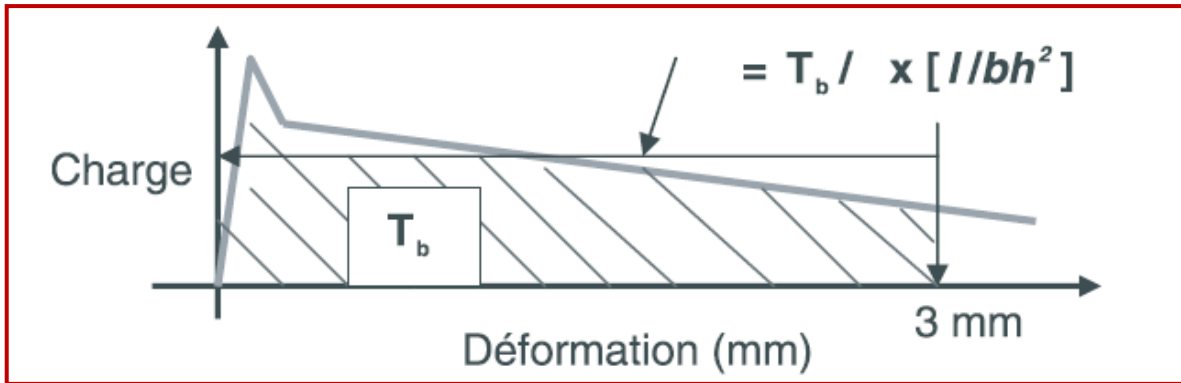


Fig. 2 : Méthode d'essai des paramètres pour la valeur de la résistance résiduelle (JCI SF-4)

Cette méthode d'essai provenant de la norme japonaise détermine aussi la ténacité pour l'intervalle de déformation entre 0 et 150. La ténacité (T_b) est démontrée par la partie hachurée sous la courbe de la charge en fonction de la déformation.

TRANSFERT DE CHARGE :

Propriété de transférer une charge à travers une fissure ou un joint. Cette propriété devient importante pour les applications de dalles sur sol ou de support de sol (pavés, planchers, etc.). Dans un béton fibré, le transfert de charge est amélioré de deux façons :

- par la capacité des fibres de maintenir les fissures plus serrées;
- par la propriété de certains types de fibres d'effectuer une partie du transfert de charge aux
- fissures et aux joints de contrôle.

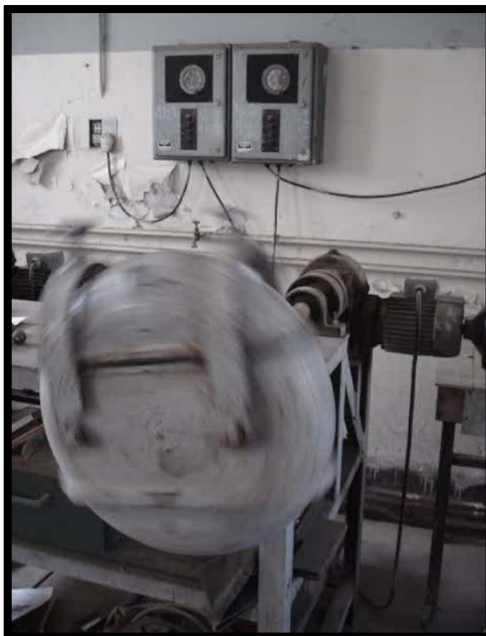


Fig. 1 : Broyeur à boulets (capacité 200 gr de fibres/8h)



Fig. 2 : Tamiseuse (capacité 50 gr de fibres/h)



Fig. 3 : Malaxeur



Fig. 4 : Moules prismatiques 4x4x16 cm³

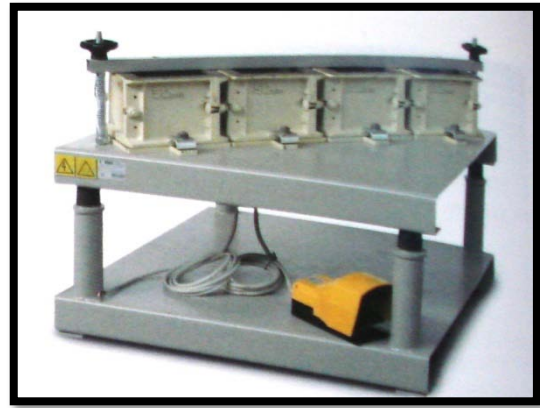


Fig. 5 : Table Vibrante



Fig. 6 : Etuve



Fig. 7 : Balance électronique



Fig. 8 : CT mètre



Fig. 9 : Machine pour essais mécaniques (compression)