LES RENFORTS FIBREUX UTILISES DANS LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Par
Mostefa MIMOUN
Chargé de cours, Institut de Génie Civil, Université de Sétif

Résumé

On présente les différents types de fibres utilisées dans le renforcement des matériaux de construction. Après un bref historique, on examine le mode de fabrication des fibres ainsi que le domaine dans lequel elles sont employées.

Mots clés : composite - fibre - matériau - matrice - renfort.

1 INTRODUCTION

Quelle que soit la nature des matériaux associés, un composite résulte de l'assemblage d'une phase continue, dite matrice, à une phase dispersée, la fibre par exemple, parfois appelée charge. Il est possible de définir des classes de matériaux composites en se référant à la nature des composants et en particulier aux fibres (Tableau 1).

Exemples de matériaux composites	Exemples de constituants	Exemples d'application
1. A Matrice Métallique		
	Fibres de bore, matrice aluminium Fibres de carbone, matrice aluminium, magnésium, ...	Aérobalistique
2. A Matrice Minérale		
Béton	Ciment, gravier, sable	Bâtiment, génie civil
Béton armé	Acier, béton	
Composite carbone / carbone	Fibres de carbone, matrice carbone	Aérobalistique, bio-médical
Composite céramique / céramique	Fibres de céramique, matrice céramique	Pièces thermo-mécaniques
3. A Matrice Organique		
Papier et carton	Fibres cellulosiques, charges, résines	Emballage, imprimerie
Panneaux de particules	Copeaux de bois, résine	Menuiserie, ébénisterie, bâtiments
Panneaux de fibres	Fibres de bois, résine	
Contreplaqués	Feuillets de bois, colle	
Composites de glissement	Téflon, carbone, sulfure de molybène, tissu	Pièces mécaniques (paliers coussinets)
Toiles enduites	Tissus, résines souples	Bâtiment, sport, plein air
Non tissés	Fibres de synthèse, latex	Lingerie, travaux publics
Composites d'étanchéité	Armatures textiles, bitume, élastomères Amiante, tissu, carton, caoutchouc	Toitures, revêtement de terrasse Joint étanchéité hydraulique
Pneumatiques	Acier, toile, caoutchouc	Automobile
Stratifiés	Fibres de cellulose, de verre, de carbone, d'aramide, résine...	Transports, électrotechnique, électronique, bâtiment
Sandwiches	Peau : métaux, stratifiés... Autres : mousses, nids d'abeille, balsa, contreplaqués, plastiques, ...	Transports, bâtiment

Tableau 1 : Constitution générale des principaux matériaux composites.

Le choix de tel ou tel type de fibre dépend d'une part de la matrice dans laquelle seront noyées les fibres et de la destination du matériau d'autre part.

Dans cet article, nous présentons les différentes fibres utilisées pour le renforcement des matériaux de construction ainsi que leur mode de fabrication.

2 HISTORIQUE

Les brevets sur les bétons renforcés par des fibres ont été établis pour la première fois en 1874 par A. Berard de Californie (USA). Il a suggéré l'ajout, dans un mélange de béton, de granulats en fer recuit pour créer une pierre artificielle.

R. Weakly (Missouri, USA) déposa un brevet en 1912 pour l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec pour intermédiaire un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton (Figure 1).

En 1918, le français H. Alfsen propose de mélanger au béton de petits éléments longitudinaux en fer (fibres), en bois ou en autres matériaux dans le but d'améliorer sa résistance à la traction. Il a suggéré également l'amélioration de l'état de surface des renforts. En effet, les renforts doivent être rugueux et arrondis aux extrémités afin de leur procurer une bonne adhérence à la matrice en béton.

En 1920, l'allemand A. Kleinlogel, proposa d'ajouter un volume relativement important de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier.

Quelques années après, en 1927 en Californie, deux autres brevets ont été établis par G. Martin et W. Meische - Smith. Le procédé Martin recommande le malaxage de plaquettes d'acier emboutiés ou de fils d'acier avec le béton qui sert à la fabrication de tuyaux (Figure 2).

L'idée d'améliorer la forme des fibres afin d'augmenter leur contribution est assez ancienne. H. Etheridge (New Jersey) proposa, en 1933, d'ajouter au béton des fibres en

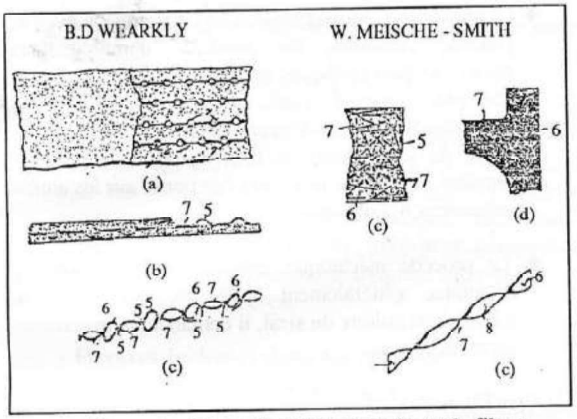


Figure 1 : Brevet établi sur les bétons de fibres R. Weakly, Meishke - Smith, 1920.

forme d'anneau de différentes dimensions et de différents diamètres (Figure 2), pour améliorer la résistance à la fissuration et à la fatigue de béton utilisé dans la construction des voies ferrées.

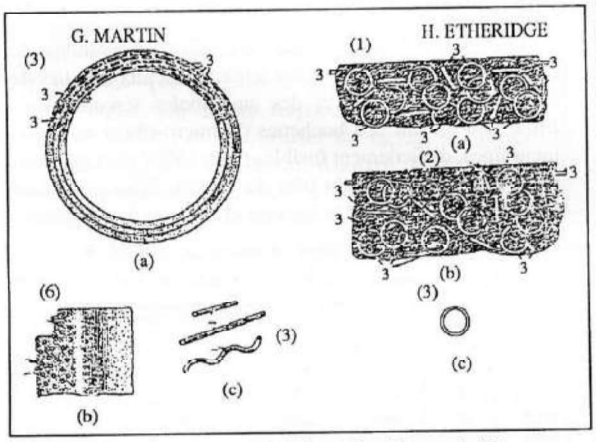


Figure 2 : Brevet établi sur les bétons de fibres G. Martin, H. Etheridge 1933.

Plusieurs procédés ont apparu dans différents pays dans les années suivantes. Celui de G. Constantinesco, Angleterre 1943, USA en 1954, mérite une attention particulière. Les paramètres de renforcement qu'il a recommandé à l'époque sont similaires à ceux d'aujourd'hui pour le béton armé de fibres (Figure 3). Son procédé recommande également l'emploi de fibres permettant l'augmentation de la résistance à la fissuration et à l'absorption de l'énergie par la masse du béton. Il a suggéré l'utilisation du béton armé de fibres dans la construction des pistes d'aéroports, fondations de machines et ouvrages similaires.

3 DEVELOPPEMENTS RECENTS DES RENFORTS FIBREUX

Les derniers développements dans le domaine des fibres, ont commencé au début des années soixante. Une multitude de types de fibres ont été introduites dans le commerce comme étant de nouvelles applications parmi lesquelles on distingue :

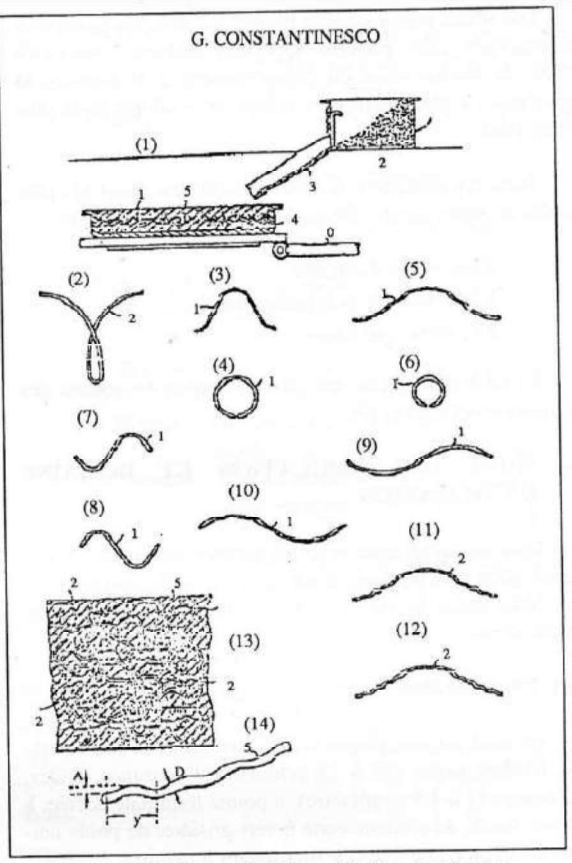


Figure 3 : Brevet établi par G. Constantinesco.

- Fibres naturelles, végétales ou minérales (Sisal, Jute, Bambou, Amiante).
- Fibres de verre résistances ou non aux alcalis.
- Fibres de polypropylène.
- Fibres d'acier (rectilignes, ondulées, crantées à crochets).
- Fibres de carbone.
- Autres Fibres (céramique, nylon, Polyestèr).

Ces divers types de fibres se présentent sous différentes formes : coupées ou continues.

Les qualités recherchées pour ces fibres sont les suivantes :

- ✔ Bonne adhérence à la matrice.
- ✔ Module d'élasticité adapté (il est parfois très supérieu à celui de la matrice).
- ✔ Compatibilité avec le liant, elles ne doivent être n attaquées, ni détruites à terme.
- ✔ Etre d'un prix abordable compte tenu des dosages utiliser.
- ✔ Etre assez courtes, fines et flexibles pour permettre u bon malaxage et une mise en forme facile (cas de matériaux mis en forme par extrusion).
- ✔ Etre assez longues, non fragiles pour ne pas être cas sées lors du malaxage (utilisation pour le béton).

Les fibres jouent un rôle primordial dans les matériaux composites, elles peuvent apportées certaines propriétés dont, la modification du comportement à la rupture, le matériau est plus ductil et se rompt après allongement plus important.

Dans les matériaux de construction, les fibres les plus utilisées autres que les fibres d'acier sont actuellement :

- O Les fibres d'amiante
- O Les fibres de polypropylène
- O Les fibres de verre

Le tableau 2 donne les caractéristiques moyennes des différentes fibres [1] [2].

4 MODE DE FABRICATION ET DOMAINE D'UTILISATION

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les modes de fabrication et le domaine d'utilisation de quelques fibres.

Nous insistons surtout sur les fibres qui sont couramment utilisées.

4.1 Fibres de sisal

Le sisal est une plante vivace, constituée d'une rosette de feuilles larges (10 à 15 centimètre), charnues, raides, allongées (1 à 1.5 centimètre), à pointe terminale acérée, à bords lisses, de couleur verte à vert grisâtre, de poids unitaire moyen égale à 700 g fournissant à maturité 3.5 à 4% de fibres sèches.

La préparation des fibres s'effectue par défibrage directe des feuilles avant séchage. Les méthodes varient suivant l'importance des plantations et le coût de la main d'oeuvre. Le défibrage à la main se fait par raclage au couteau des feuilles préalablement brisées, par contre le défibrage mécanique est effectué au moyen de couteaux tranchants montés sur des tambours (batteurs) tournant rapidement devant un contre batteur sur des défibreuses simples ou sur des grosses défibreuses à travail continu et à marche automatique, un jet d'eau facilite l'élimination de la pulpe.

Le problème de l'assouplissage du sisal a déjà été abordé avant la deuxième guerre mondiale ; les procédés chimiques et d'imprégnation déjà préconisés à l'époque restent valable aujourd'hui encore. Parallèlement, des procédés mécaniques ont fait leur apparition. Les principaux procédés de traitement des fibres de sisal sont [3] :

- ◆ Le procédé chimique ; nécéssite souvent des installations importantes, des coûts élévés, ce qui n'est pas à la portée de tous les producteurs de sisal. Le procédé consiste à tremper les fibres dans un bain contenant des produits mouillants chimiques.
- ◆ Le procédé par imprégnation ; en comparaison avec le procédé chimique, les procédés d'imprégnation paraissent plus pratiques et plus économiques. Parmi les plus souvent cités, figurent les procédés d'imprégnation à l'acide naphtalène-sulfonique en présence de sels marins ou bien aux huiles végétales ionisées. La glycérine semble l'emporter sur les autres substances hygroscopiques.
- ◆ Le procédé mécanique, consiste en un traitement mécanique généralement applicable sur les lieux même de la culture du sisal, il demande un investissement important.

Les fibres de sisal ont été utilisées pour le renforcement des mortiers de ciment et les bétons dans plusieurs pays [4], [5], [6]. Les études indiquent que ces fibres naturelles mélangées au béton peuvent améliorer ses qualités et même donner de très bonnes résistances dans des conditions normales d'utilisation [4].

4.2 Fibres d'amiante

Les fibres d'amiante sont des silicates hydratés de magnésium extraites de roches appartenant aux familles de serpentine (chrysotile) et des amphiboles (crocidolites). Elles sont en fait des buchettes de micro-fibres extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500 °c) et parfaitement compatible avec la pâte de ciment. Elles possèdent une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé (Tableau 2).

Fibres	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse Volumique kg / dm³	Résistance en traction MPa	Module E MPa	Allongement (%)	Coefficient de dilatation micron / m	Rau Feu (*) °C
Amiante (chrysotile)	0.0002 à 0.002	5	2.6 à 3	300 à 1 000	80 000 à 150 000	2 à 3		1 500
Polypropylène	0.01 à 0.1	25 à 75	0.9	400 à 600	4 600 à 8 000	15 à 20	90	150
verre (au zirconium)	0.005 à 0.020	40 - 70	2.6	1 500 à 3 000	80 000	2 à 3	9	800
acier	0.2 à 0.5	20 - 50	7.8	1 000 à 3 000	200 000	3 à 4	11	1 500
carbone	0.005 à 0.01	variable	2	2 000	400 000		1	400 à 1 500
sisal	0.1 0.5		1.5	800		2		150

Tableau 2 : Caractéristiques moyennes des différentes fibres.

Il est difficile actuellement de trouver des fibres assez bon marché que les fibres d'amiante ; on essaye de les remplacer par d'autres fibres dans certains pays compte tenu de la législation de la santé. Les fibres d'amiante ne conviennent pas pour armer des mortiers ou des bétons, parce qu'il est difficile de les bien répartir et qu'elles nécessitent beaucoup d'eau de gâchage.

Les produits en fibres-ciment se caractérisent par un très grand nombre de qualités spécifiques qu'ils sont seuls à réunir [1]. Ces matériaux contiennent en moyenne :

- 10% de fibres
- 80% de ciment
- 10% d'eau de constitution

Leur production fait appel à une technologie proche de la cartonnerie.

4.3 Fibres de polypropylène

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines. Découvert en 1954, ce matériau de synthèse a connu une extension croissante dans l'industrie de textile où il apporte les avantages suivants :

- ○ Bonne résistance
- ○ Déformabilité élevée
- ○ Imputrescibilité

Les fibres de polypropylène sont obtenues suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées.

Le polypropylène est sensible aux ultra-violets, son exposition prolongée au rayonnement solaire provoque une oxydation se traduisant par :

- ○ Une transformation au niveau des molécules
- ○ Une diminution de la masse moléculaire
- ○ Une augmentation de la plasticité

Cependant, noyées dans la matrice, ces fibres sont protégées de l'oxydation due aux ultra-violets.

Les fibres de polypropylène sont utilisées surtout dans le bâtiment pour l'élaboration de panneaux décoratifs et de revêtement de façades, elles sont également utilisées dans la réalisation de tuyaux et de pieux [7]. Les études menées avec ce type de fibres [8] ont montré que ce matériau présentait des propriétés mécaniques comparables à celles d'un béton renforcé par des fibres de verre.

4.4 Fibres de verre

Les fibres de verre sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 microns. La section de l'ensemble des fils est elliptique et a environ 0.6 mm de large et 0.08 mm d'épaisseur (Figure 4).

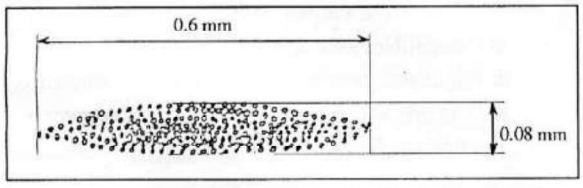


Figure 4 : Coupe sur un ensemble de fils de verre de 10 à 12 microns de diamètre unitaire.

Ces fibres sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12 et 50 mm de long. Il existe principalement trois sortes de fibres :

- ▲ La fibre de verre classique (silice, soude, chaux)
- ▲ La fibre de verre au borosilicate
- ▲ La fibre de verre au zirconium

Les compositions moyennes de ces fibres sont données dans le tableau 3 : leurs principales propriétés sont les suivantes :

- ▼ Rapport performance mécanique / prix très intéressant.
- ▼ Possibilité de bonne adhérence avec la matrice.
- ▼ Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues, ...).
- ▼ Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion.
- ▼ Conductivité thermique relativement faible.

Type de Verre / Constituants	Verre alumino borosilicaté (Type E)	Verre Cem. fil	Verre sodo Calcique (Verre à vitre)
$Si\ O_2$	55	70	70 - 72
Al_2O_3	15	0.2	1
$B_2\ O_2$	8	8	---
r O	0	16	---
Ca O	21	0	10
Mg O	---	0	---
Na_2O	1	12	14

Figure 3 : Composition des fibres de verre.

Le renforcement par ce type de fibres semble être le plus développé dans le domaine des matériaux de construction. Ce développement a nécessité un travail important au niveau de la compatibilité de ces fibres avec les liants hydrauliques (ciment) les fibres de verre E étant attaquées en milieux alcalins et fortement dégradées [9], [10], bien que d'autres travaux effectués aient montré le contraire [11].

Des recherches ont été entreprises pour empêcher l'attaque chimique du verre, en fabricant des fibres de verre E revêtues par imprégnation d'une résine thermoplastique [10] puis un verre résistant aux alcalins a été développé en Angleterre par la B.R.E (Buildig Research Establishment). Ce verre se différencie du verre à vitre sodo-calcique et du verre E par son enrichissement en Zircone (Tableau 3).

Les études effectives ont montré que ce verre était très résistant aux alcalins et qu'il convenait parfaitement pour renforcer le béton [12] [13] [14] [15]. Actuellement, les fibres de verre à haute résistance alcaline sont développées et commercialisées par la société anglaise Pilkington. A notre connaissance, ces fibres sont les seules sur le marché, cette société commercialise également un ciment renforcé par ces fibres appelé GRC-Cemfil [16] [17] [18].

4.5 Fibres métalliques

Ce type de fibre a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. Les fibres d'acier sont sans doute les plus utilisées ; il existe une très grande variété de différentes géométrie (Figure 5). Parmi ces fibres, il faut en signaler deux :

- ✔ Des fibres obtenues à partir d'un bain liquide (Figure 6) breveté en 1974 par la société Battelle corporation de l'Ohio "Melt Extract Fibres". La surface des fibres est irrégulière, ce qui facilite l'accrochage et l'adhérence de celles-ci. Le diamètre peut avoir 0.1 mm et la longueur peut atteindre 50 mm. La nature de l'acier peut être variée.

- ✔ Des fibres, en acier doux écroui, munies de crochets et encollées en paquets de 10 à 30 fibres élémentaires (Fibres Dramix de la société Bekaert). Elles évitent la formation "d'oursins" et peuvent être introduites directement dans le malaxeur, elles s'individualisent lors du malaxage ; leur diamètre varie de 0.4 à 0.8 mm et leur longueur de 25 à 60 mm.

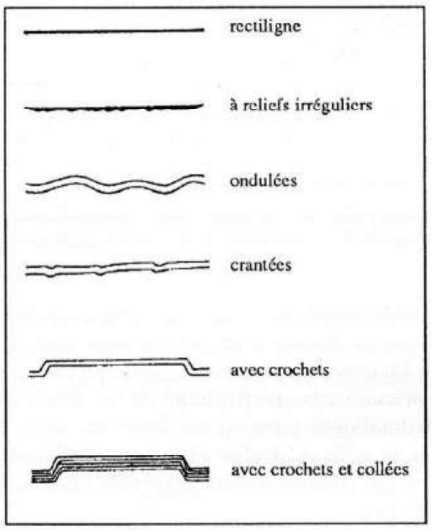


Figure 5 : Exemple de formes de fibres d'acier.

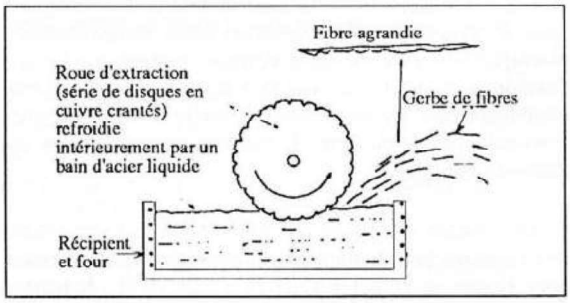


Figure 6 : Procédé de production de fibres métalliques par extraction d'un bain liquide.

Des études en Belgique ont montré que certaines fibres présentant des crochets avaient une très grande adhérence et permettaient d'accroître davantage les résistances (Figure 7).

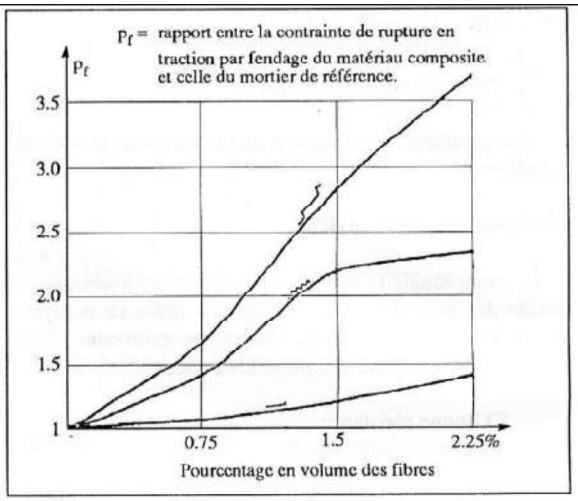


Figure 7 : Essai de traction par fendage.

La recherche permanente de performances techniques, alliée aux besoins économiques, a motivé l'utilisation de matériaux de toute nature puis le développement de fibres spécifiques. En effet, des fibres métalliques spéciales, fabriquées et commercialisées sous le nom de Beki-shield, présentent des caractéristiques intéressantes. Elles sont très minces et moins abrasives, moins irritantes au toucher que les fibres de verre [19]. Ces fibres sont fabriquées à partir d'un acier inoxydable Bekinox 316 L [20] qui offre de très grandes résistances à la corrosion.

4.6 Autres fibres

Un grand nombre de fibres peuvent être employées dans le renforcement des matériaux de construction, qu'elles soient animales, végétales ou minérales. Plusieurs études ont été réalisées avec des fibres naturelles végétales telles que la jute [21] et le bambou [22].

Durant les 10 dernières années, les fibres céramiques ont connues beaucoup d'applications industrielles sous différentes formes. Elles ont trouvé un très grand succès surtout dans le domaine de la construction des fours et équipements auxillaires [23].

5 CONCLUSION

L'idée de renforcer les matériaux de construction pour augmenter leurs propriétés mécaniques ne date pas d'aujourd'hui. Après un siècle d'études, les chercheurs s'accordent à dire que les fibres doivent être :

- Compatibles avec la matrice.
- Rugueuses, pour permettre une bonne adhérence.
- D'un prix abordable, compte tenu des dosages à employer

BIBLIOGRAPHIE

[1] M. Venuat : "*Adjuvants et traitements techniques modèrnes d'amélioration des ouvrages en bétons,*

applications aux bâtiments et travaux publics". 1ère édition 1984.

[2] P. Martineau : "*Matériaux composites, les nouveaux matériaux composites dans le Génie Civil*". n°2, IMC 1985.

[3] Bui - Xuan - Nhuan : "*Procédés d'assouplissage de sisal*". IRCT, fiche technique n°39 / S. 71, Sept 1971.

[4] L. Nilson : "*Reinforcement of concrete with sisal and other végétable fibre*". Doc. D14 :1975, Royal Institute of Technology, Stokhlom

[5] J. Castro & A.E Naaman : "*Cement mortar reinforced with natural fibers*". ACI J, January / February 1981, V8.

[6] G. Lewis & P. Mirihagamia : "*Natural vegetable fibres as reinforcement in cement sheets*". Magazine of concrete research vol 31, n°107, june 1979.

[7] N.J Dave & D. J Ellis : "*Polypropylène fibre reinforced cement*". Int. J. Cement Comp. Vol 1, n°1, May 1979.

[8] H. Krenchel & S. Shah : "*Applications of polypropylène fibers in scandinavia*". Concrete international, March 1985.

[9] J. Bijen : "*Durability of glass fiber reinforced cement composites*". ACI J, Julluy / August 1983, n°4 proceeding V80.

[10] M. W Fordyce & R. G Wodehouse : "*Glass fiber reinforced cement Butterworth an co*". Publisher Ltd 1983.

[11] F. Goeman : "*Performance of E glass fibers as reinforcement for portland cement mortar*". ASTM, SP 44 - 16.

[12] D.J Hannant : "*Concrete*". February 1984.

[13] B.A Proctor : "*Int. Conf. on composite structure*". Z. A Marshall edt., applied science publishers, 1981.

[14] A.J Madjumdar & A. G Tallentir, ASTM, SP 44 - 20.

[15] S.P Shah, A.E Naaman, ACI J, January 1976.

[16] B.A Proctor : " *Properties and performances of GRC, fibrous concrete*". Ci 80 construction press. Lancaster, 1980.

[17] GRC Documentation technique Trouillard S. A.

[18] Cemfil News n°35, 1985 et n°36, 1986.

[19] Bekaert : "*Doc an innovative revolutionary concept for EMI and conductive plastics*". Bekishield métal fibers.

[20] Bekaert, Doc département Bekishield, 1986.

[21] M.A Mansur & M.A Aziz : "*A study of jute fiber reinforced cement composite*". Int J. Cem. Comp. and leigtweight concrete volume 4, n°2, May 1982.

[22] B. Pakotoprapha, R.P Pama & S.L Lee : "*Developpement of bamboo pulp boards of low*". Cost houssing, proc, Int. sym. on lowwer costhousing problems, South Carolina, 1976.

[23] P. Jecic & F. Zanghelini : "*Mortiers et ciments armés de fibres, étude bibliographique*". Annales de l'ITBTP, n°347 Fevrier 1977.

[24] M. Venuat : "*La pratique des ciments et des bétons*". Moniteur des travaux publics, 1976.

[25] C. Bord : "*Evolution et perspectives*". Revue mécanique et matériau, éléctricité, n°405, Mai 1984.

DANS UN PROCHAIN NUMERO :

"ETUDE EXPERIMENTALE SUR LES BETONS A BASE DE RESIDUS DE BOIS"

Par :

F.Z AOUADJA MIMOUN

M. MIMOUNE

M. LAQUERBE