



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Civil

Thèse

Présentée par

BOURZAM Abdelkrim

Ingénieur d'Etat en Génie Civil
de l'Ecole Nationale Polytechnique

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

en *Génie Civil* option *Matériaux*

المركز الوطني المتعدد التخصصات
المكتبة —
Ecole Nationale Polytechnique

THEME

***EFFET DES FIBRES DE PALMIER ET D'ALFA SUR
LES PERFORMANCES MECANQUES DES BETONS***

Soutenue le 07 Juillet 1999 publiquement devant le jury composé de :

Président	S. BELKACEMI	Maitre de conférences, E.N.P.
Rapporteurs	A. BALI K. SILHADI	Professeur, E.N.P. Maitre de conférences, E.N.P.
Examineurs	S. KENAI R. KETTAB R. BOUTEMEUR	Maitre de conférences, Univ. Blida. Chargée de cours, E.N.P. Chargé de cours, E.N.P.
Invités	O. AKCHICHE S. AIT SAID	Chargé de cours, Univ. Boumerdès Attaché de recherche C.N.E.R.I.B.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Civil

Thèse

Présentée par

BOURZAM Abdelkrim

Ingenieur d'Etat en Génie Civil
de l'Ecole Nationale Polytechnique

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

en *Génie Civil* option *Matériaux*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THEME

***EFFET DES FIBRES DE PALMIER ET D'ALFA SUR
LES PERFORMANCES MECANQUES DES BETONS***

Soutenue le 07 Juillet 1999 publiquement devant le jury composé de :

Président	S. BELKACEMI	Maitre de conférences, E.N.P.
Rapporteurs	A. BALI K. SILHADI	Professeur, E.N.P. Maitre de conférences, E.N.P.
Examineurs	S. KENAI R. KETTAB R. BOUTEMEUR	Maitre de conférences, Univ. Blida. Chargée de cours, E.N.P. Chargé de cours, E.N.P.
Invités	O. AKCHICHE S. AIT SAID	Chargé de cours, Univ. Boumerdès Attaché de recherche C.N.E.R.I.B.

DEDICACES

Je dédie ce travail

*A mes chers parents, en signe de reconnaissance pour
les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard*

A ma sœur et à mes frères

A tous mes proches

ABDELKRIM

تتضمن هذه الدراسة تحليل خواص الخرسانة المسلحة بالألياف الطبيعية و خاصة ألياف الخلفاء والنخيل. تم إضافة نسب حجمية من الألياف و هي 1 و 2 و 2.5 % إلى خرسانة عادية ثم أجريت على العينات اختبارات الضغط و الشد بالانعطاف تحت ظروف حفظ مختلفة:

- حفظ العينات في الماء العذب تحت درجة حرارة 20 ± 2 °م

- حفظ العينات في الجو الداخلي للمختبر تحت رطوبة نسبية 65 ± 2 %

أثبتت النتائج زيادة طفيفة في مقاومة الشد للعينات المحفوظة في الجو الداخلي للمختبر بينما لم يسجل تغير ملحوظ في مقاومة الضغط. لوحظ أيضا أن النسبة المثلى للألياف الواجب إضافتها للخرسانة هي 2 %.

كلمات أساسية : - خرسانة - خرسانة الألياف الطبيعية - النخيل - الخلفاء - قابلية التشغيل - مقاومة الضغط - مقاومة الشد بالانعطاف - اللدونة - السهم.

Résumé:

La présente étude porte sur l'analyse des performances des bétons renforcés de fibres naturelles, notamment les fibres d'alfa et de palmier.

Des fractions volumiques, de fibres, variant entre 1 ; 2 et 2,5 % ont été incorporé dans une composition d'un béton classique, pour lequel des essais d'écrasement par compression et de traction par flexion ont été réalisés pour deux régimes de cure différents:

- Conservation des éprouvettes sous l'eau douce à 20 ± 2 °C
- Conservation des éprouvettes à l'air du laboratoire à H.R = 65 ± 2 %

Les résultats obtenus ont mis en évidence, une légère amélioration de la résistance à la traction pour les éprouvettes conservées à l'air du laboratoire, sans engendrer une variation notable de la résistance à la compression. Il est aussi observé que la fraction optimale de fibres à incorporer dans le béton est de 2%.

Mots clés: - Béton - Béton renforcé de fibres naturelles - Palmier - Alfa - Maniabilité - Résistance à la compression - Résistance à la traction par flexion - Ductilité - Flèche.

Summary:

The present study analyses the performances of natural fibres reinforced concrete and in particular Alfa and Palm fibres.

Fibres volume fractions of 1; 2 and 2,5 % were incorporated in an ordinary concrete mix and tests for compressive and flexural strengths were realised for two curing regimes :

- Conservation of samples in water at 20 ± 2 °C
- Conservation of samples in the air of the laboratory at R.H of 65 ± 2 %

The results show a slight improvement of tensile strength for samples cured in the air of the laboratory and no noticeable effect on compressive strength. It has also been observed that the optimal volume fraction of fibres to be added is 2 %.

Keys words : - Concrete - Natural fibres reinforced concrete - Palm - Alfa - Workability - Compressive strength - Flexural strength - Ductility - Deflection.

REMERCIEMENTS

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — مكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Louanges à DIEU maître de la science et du savoir.

Je remercie le professeur A. BALI et le docteur K. SILHADI de m'avoir investi de leur confiance pour l'élaboration de cette thèse.

J'exprime ma profonde gratitude au docteur S. BELKACEMI d'avoir accepté de présider le jury.

J'apprécie l'honneur qu'ont bien voulu me faire M^{me}. R. KETTAB et MM. S. KENAI et R. BOUTEMEUR en acceptant d'être examinateurs de ce travail.

Je remercie tout le personnel de l'ENP et en particulier son directeur le professeur M.K. BERRAH.

J'adresse également mes vifs remerciements à M^{lles}. M. BENCHOUK et N. KASDI et à M^{me}. KIAS de l'INA, sans oublier M^{me} M. HARCHE de l'URZADA et M^{lle}. BELHADJ de la papeterie de BABA ALLI. Ces remerciements s'adressent également à l'INRA pour sa précieuse collaboration.

J'exprime ma vive reconnaissance à M.O. AKCHICHE de l'INIM de l'Université de Boumerdes, pour m'avoir aidé à caractériser les fibres employées dans le matériau étudié et à toute l'équipe du CNERIB et plus spécialement M. OUMAAZIZ directeur général pour m'avoir ouvert les portes de ses laboratoires et m'avoir prodigué ses conseils avisés.

Je tiens à remercier M. A. REMMAS de m'avoir octroyé le NCPT, ainsi que MM. S. TLAB et M. ZAIDI qui ont collaboré à la rédaction de cette thèse.

Je terminerai en remerciant le personnel du CTC Centre en particulier celui de Blida sous la direction de MM. M.MESSAOUD SAADALLAH directeur régional et H.BENMANSOUR directeur d'agence.

SOMMAIRE

THEME : EFFET DES FIBRES DE PALMIER ET D'ALFA SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES DES BETONS RENFORCES DE FIBRES NATURELLES

PARTIE (I) : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<u>CHAPITRE (1) : DEFINITIONS ET PHYSICO-CHEMIE DES CONSTITUTIFS DU BETON RENFORCE DE FIBRES NATURELLES.....</u>	3
1-1) Définition	3
1-2) Composants fondamentaux du B.R.F.N.....	3
1-2-1) Béton	3
1-2-1-1) Microstructure des bétons classiques.....	3
1-2-2) Fibre.....	5
1-2-2-1) Substances composants la matière première (bois et plantes annuelles).....	5
a)- Cellulose.....	6
b)- Hémicellulose.....	6
c)- Lignines.....	7
1-2-2-2) Anatomie et structure de la fibre cellulosique.....	7
1-2-2-3) Variations de la morphologie des fibres dans un cerne annuel.....	9
1-2-2-4) Préparation de la fibre naturelle (cellulosique).....	10
a)- A partir de la pâte mécanique.....	10
b)- A partir de la pâte chimique.....	11

**CHAPITRE (2) : MODELES ET PRINCIPES DE BASE
DU COMPORTEMENT MECANIQUE
DES BETONS RENFORCES DE FIBRES.....12**

Introduction.....	12
2-1) Etude de la zone interfaciale (Fibre-Matrice).....	12
2-2) Efficacité du rôle des fibres dans la matrice.....	19
2-2-1) Béton de fibres continues et alignées dans la direction de l'effort de traction (cas idéal).....	21
2-2-2) Béton de fibres courtes dispersées dans la matrice.....	23
2-3) Comportement après la première fissuration des bétons renforcés de fibres sous l'essai de flexion.....	25
2-3-1) Modèle de fissure fictive.....	25
2-3-2) Modèle du diagramme des contraintes.....	26
2-3-2-1) Fibres rectilignes alignées dans la direction de l'effort de traction.....	26
2-3-2-2) Fibres courtes dispersées dans la matrice.....	28
2-3-3) Ductilité.....	30

**CHAPITRE (3) : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BETONS
RENFORCES DE FIBRES VEGETALES.....34**

Introduction.....	34
3-1) Béton de fibres frais.....	34
3-1-1) Ouvrabilité.....	34
3-2) Béton de fibres durci.....	37
3-2-1) Retrait et fissurabilité.....	37
3-3) Durabilité.....	38
Conclusion.....	40

PARTIE (II) : ETUDE EXPERIMENTALE

**CHAPITRE (4) : PREPARATION DES B.R.F.N ET IDENTIFICATION
DES MATERIAUX DE BASE QUI LES COMPOSENT.....41**

4-1) Matériaux de base des B.R.F.N.....	41
4-1-1) Fibres naturelles.....	41

4-1-1-1) Composition chimique des végétaux (Palmier et Alfa) préconisés pour l'étude.....	41
4-1-1-2) Préparation des fibres.....	42
a) Fibres d'Alfa.....	42
b) Fibres de Palmier.....	42
4-1-1-3) Biométrie des fibres d'Alfa et de Palmier.....	43
4-1-1-4) Masses volumiques et taux d'absorptions d'eau par les différentes fibres.....	44
a) Masses volumiques absolues des fibres en pâte cellulosiques.....	44
b) Taux d'absorption d'eau.....	45
- Mode opératoire.....	45
- Expression des résultats et discussions.....	46
4-1-2) Granulats.....	47
4-1-3) Liant.....	48
4-1-4) Eau.....	49
4-1-5) Adjuvant.....	49
4-2) Composition des bétons.....	49
4-2-1) Béton témoin.....	49
4-2-2) Bétons renforcés de fibres naturelles (B.R.F.N).....	49
4-3) Essais sur bétons frais.....	52
4-3-1) Ouvrabilité.....	52
4-3-2) Pourcentage d'air occlus.....	52
4-4) Nombre et types d'éprouvettes réservées à l'étude.....	52
CHAPITRE (5) : ESSAIS SUR BETONS DURCIS (METHODES ET ANALYSES).....	54
5-1) Essais mécaniques.....	54
5-1-1) Compression simple.....	54
5-1-2) Traction par flexion.....	54
5-1-3) Interprétations des résultats.....	63
5-1-3-1) Résistance à la compression.....	63
5-1-3-2) Résistance à la traction.....	63
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	65
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXE	

Partie (I)

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION GENERALE :

Les bétons de fibres classiques présentent une bonne résistance à la traction directe et à la fatigue, des effets de retrait et de chocs thermiques limités, une bonne durabilité, un risque de fissuration limité et enfin une rupture qui n'est pas brutale. Malheureusement, ils utilisent des fibres qui, mis à part l'amiante, sont des déchets ou des sous produits abondants et peu coûteux au sein d'un tissu industriel très développé comme en Europe ou en Amérique du Nord. Enfin pour ce qui concerne l'amiante il s'agit d'un minerai non disponible en Algérie et qui de surcroît est à proscrire dans l'habitat. Aussi il semble nécessaire pour des pays comme le notre de s'intéresser à des fibres naturelles.

Le renforcement du béton par les fibres naturelles (végétales) demeure un sujet de recherche important, à cause d'une part de la multitude d'essais élaborés par plusieurs chercheurs dans le domaine, et d'autre part des fibres utilisées qui sont très nombreuses et variées (de Jute, de Noix de coco, de Sisal, de Canne à sucre, ... etc).

Il s'avère donc intéressant de développer des solutions alternatives basées sur des fibres naturelles et des liants disponibles localement. Les fibres naturelles devraient présenter un avantage économique intéressant et pourraient être un matériau de substitution aux autres fibres plus coûteuses pour des pays qui ne disposent pas d'une production industrielle suffisamment abondante. Une étude détaillée devrait permettre de comparer les comportements de ces composites à ceux des bétons de fibres classiques afin de prouver leur intérêt économique et technique. Il s'agit pour nous en particulier d'utiliser des éléments qui sont souvent des déchets de l'industrie locale telles que les fibres d'Alfa rejetées après traitement par les usines de papiers et les chutes de jutes des manufactures de toiles.

L'intérêt d'une telle recherche réside aussi dans le fait que les fibres naturelles sont généralement connues comme matériaux traditionnels tels que les blocs d'argile renforcés de paille. Mais cet usage traditionnel de la fibre naturelle devient de moins en moins fréquent dans les pays du Maghreb à cause de la concurrence des matériaux modernes tels que le béton armé.

L'objectif final de cette recherche sera avant tout d'apporter une réponse au problème de l'utilisation des fibres naturelles dans la construction. Il s'agit pour nous de répondre à ce problème en apportant des solutions concrètes sur certains aspects physiques et mécaniques.

Le travail présenté dans cette thèse porte sur l'effet des fibres de Palmier et d'Alfa sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres naturelles. Ce travail est composé de deux parties : Une étude bibliographique et une application expérimentale.

Dans la partie bibliographique nous avons défini les caractéristiques physico-chimiques des fibres cellulosiques et leur influence sur le béton classique. Nous avons aussi exposé différents modèles de comportement des bétons renforcés de fibres, particulièrement ceux de la zone interfaciale (fibre / matrice). On termine par la définition d'un nouvel instrument de mesure de la maniabilité (NCPT) et de la durabilité des fibres dans le béton.

Pour la partie expérimentale, il s'agit en fait de caractériser les fibres naturelles retenues du point de vue mécanique et physico-chimique. Une fois cette analyse entreprise, l'étude de faisabilité d'incorporation de ces fibres dans la matrice a été examinée. Le travail ainsi conçu a concerné en l'étude des variations volumiques de fibres pour la recherche de la fraction optimale à ajouter à la matrice qui donnerait le composite le plus résistant.

Un programme d'essais a été établi et a concerné les comportements à la compression, et à la traction par flexion pour deux régimes de cure différents : Des éprouvettes de bétons de fibres conservées à l'air humide du laboratoire et d'autres sous l'eau douce. Ce programme d'essais a été réalisé grâce à la collaboration de l'ENP, l'INA, l'INRA, l'URZADA, la papeterie de BABA-ALI et tout particulièrement de l'INIM et du CNERIB.

*Chapitre 1***DEFINITIONS ET PHYSICO-CHIMIE DES CONSTITUTIFS
DU BETON RENFORCE DE FIBRE NATURELLES****1.1 – Définition**

On appelle béton de fibres, un béton classique dans lequel on a prévu une armature incorporée par inclusion directe de fibres isolées au moment du gâchage, les fibres y sont donc assimilables à un granulats spécial de forme allongée et de forte résistance à la traction.

Le béton traditionnel peut être considéré comme un matériau quasi-fragile dont la résistance à la traction est rapidement atteinte. Les fissures s'y propagent sans obstacle et conduisent à une rupture de type fragile. L'adjonction de fibres, qui forment des ponts sur les fissures et permettent la transmission des contraintes de traction au travers des fissures (effet de couture), permet de pallier à cette faiblesse relative du matériau et de mieux contrôler son comportement à la fissuration. Les fibres lui confèrent ainsi un caractère ductile et accroissent sa ténacité.

La fibre utilisée doit être avant tout, mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la matrice (béton), et en particulier avec le ciment. Elle doit conserver ses propriétés dans le temps et être d'un coût acceptable compte tenu des performances qu'elle confère à la matrice.

1.2 – Composants fondamentaux du B.R.F.N**1.2.1 – Béton :**

Le béton est constitué par un mélange intime de matériaux inertes, appelés granulats (Sables, graviers, pierres concassées, ...) avec du ciment et de l'eau. Grâce à l'action du ciment, le mélange ainsi obtenu, appelé "Béton frais", commence à durcir après quelques heures et acquiert progressivement ses caractères de résistance.

1.2.1.1 – Microstructure des bétons classiques [1] :

Dans son état initial, le béton traditionnel peut être considéré comme constitué d'un squelette granulaire inerte (gravillons + sable) enrobé dans une pâte plus ou moins visqueuse formée de ciment et d'eau. Le système ciment-eau est instable. Il est le siège

de phénomènes d'hydrolyse et d'hydratation qui, après une période d'induction plus ou moins longue, vont conduire à la précipitation d'hydrates, à la prise et au durcissement progressif du matériau.

Les deux réactions de base sont celles qui correspondent d'une part à l'hydratation des silicates (silicate bicalcique $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou C_2S et surtout silicate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou C_3S), la plus importante en ce qui concerne l'acquisition des résistances, et d'autre part à l'hydratation de l'aluminate tricalcique $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A . Les deux réactions sont d'ailleurs plus ou moins interdépendantes.

La première réaction est à l'origine de silicates de calcium hydratés, C-S-H qui sont des composés plus ou moins polymérisés formés de courtes chaînes $\text{H}_n\text{Si}_n\text{O}_{3n-1}$. Les C-S-H. de structure variable fibreuse ou réticulée, forment des assemblages plus ou moins denses. Ils sont associés à des cristaux d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ souvent sous forme d'empilements massifs.

La seconde réaction qui a lieu en présence de gypse ajouté comme régulateur de prise, conduit à la formation de sulfo-aluminates de calcium hydratés (trisulfo-aluminate ettringite, monosulfo-aluminate) et éventuellement d'aluminates de calcium hydratés. Les proportions relatives de chacun de ces aluminates évoluent en fonction du temps et en fonction de la teneur initiale en sulfates.

Les hydrates et en particulier les fibres de C-S-H qui se soudent entre elles, précipitent sur les parois environnantes (granulats ou fibres) auxquelles elles sont attachées plus ou moins solidement et remplissent progressivement les espaces intergranulaires.

La rigidité du squelette granulaire est assurée par l'ensemble de ces hydrates qui constituent une matrice plus ou moins poreuse et hétérogène à l'échelle microscopique. La porosité (pores de gel de l'ordre de 10 nm, pores capillaires $> 0,5 \mu\text{m}$) et l'hétérogénéité de la matrice conditionnent ses propriétés mécaniques et notamment son aptitude à la fissuration. Les discontinuités microscopiques qu'elle renferme (pores, joints de grains, clivages, défauts locaux de compacité ...) sont assimilables à des microfissures dont la coalescence, lorsque le béton est soumis à des contraintes d'origine endogène ou exogène, peut conduire à la formation de fissures proprement dites et à une rupture fragile.

Dans cet ordre d'idée, l'un des facteurs déterminant du comportement des bétons traditionnels est la microstructure du liant aux interfaces matrice-granulats.

En raison des phénomènes de sédimentation et de ressuage ainsi que des défauts de remplissage initial des espaces intergranulaires, il existe au contact des granulats une zone de transition plus ou moins large où la porosité est supérieure à celle de la matrice et où la composition minéralogique est différente. Cette zone interfaciale ou

auréole de transition, possède une résistance mécanique et une microdureté inférieures à celles de la matrice. Elle constitue une zone privilégiée d'amorçage et de propagation des fissures.

L'importance qualitative et quantitative des défauts microstructuraux de la matrice, sa compacité, sa composition chimique (rapport molaire CaO/SiO_2 des C-S-H) et minéralogique (teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ainsi que la structure et la composition de la zone de transition dépendent de la formulation du béton (dosage en ciment, présence d'ajouts de cendres volantes, de laitier de haut fourneau, de fumée de silice ...), du rapport eau/liant, des conditions de cure et de la maturité du béton ... C'est ainsi que dans les BHP, formulés avec de faibles rapports eau/liant, des fumées de silice et des superplastifiants, la zone de transition est considérablement réduite et la porosité de la matrice fortement diminuée.

La présence des microdéfauts dans la matrice et en particulier l'existence d'une zone de transition poreuse à l'interface liant-granat explique le comportement fragile du béton traditionnel. La formation d'une fissure à l'interface ne nécessite qu'une faible contrainte et l'absence de plasticité en fond de fissure provoque une rupture de type fragile. C'est cette relative fragilité, qui nécessite que le matériau soit renforcé par des aciers et plus récemment par des fibres.

1.2.2 – Fibre :

Les fibres d'Alfa et de Palmier sont des fibres cellulosiques, elles sont du point de vue de leur morphologie et de leur structure apparentées à la même classe que le bois. Le bois est, parmi tous les végétaux qui possèdent des fibres cellulosiques, la matière première principale de l'industrie papetière.

Ce sont les fibres ou trachéides qu'il contient qui intéressent l'industrie papetière. Les autres éléments du plan ligneux : vaisseaux, rayons ligneux et cellules de parenchyme, doivent être éliminées au cours du procédé d'obtention des fibres.

1.2.2.1 – *Substances composants la matière première (Bois et plantes annuelles)*

Le bois et donc les fibres d'Alfa et de Palmier sont constitués d'holocellulose : cellulose et hémicellulose et des lignines, leur compositions varient selon les genres et les espèces, feuillues, plantes annuelles ou résineuses. Ces constituants se définissent un par un comme suit :

a- Cellulose :

La cellulose est un polymère naturel qui a un rôle structural de premier plans dans la grande majorité des parois végétales. Elément constitutif majeur du bois [2], la cellulose est également rencontrée comme constituant presque unique du coton et des fibres textiles du type lin, chanvre, jute et ramie. A ce titre, elle a toujours joué dans la vie de l'homme sous forme de textiles ou de papiers un rôle important.

La cellulose, biopolymère est linéaire formée de longues chaînes de maillons d'androglycose, est disposée selon le cas en fibrilles ou en domaines partiellement cristallins [3], comme l'indique la Figure (1.1).

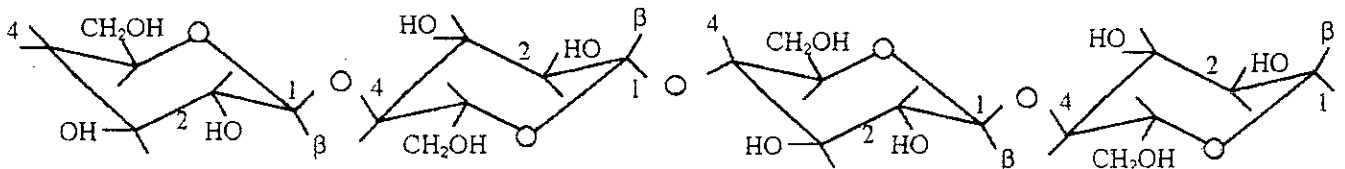


Fig. (1.1) - La représentation chimique de la chaîne cellulosique, [2]

La chaîne de cellulose n'est pas plane et elle offre des possibilités de liaisons hydrogènes intra-chaînes, entre maillons successifs, et inter-chaînes (ou inter-moléculaires) qui renforcent la cohésion des faisceaux de fibrilles et jouent un rôle dans l'établissement de liaisons intra-fibrilles.

b- Hémicelluloses

Les hémicelluloses présentes dans toutes les parois des fibres sont des polysaccharides à chaînes plus courtes, ramifiées et repliées sur elles mêmes (comme une hélice à pas plus ou moins grand). Cette disposition dans l'espace des hémicelluloses assure une élasticité au matériau dont le comportement, lors des essais mécaniques, est appelé "Visco-élastique" et permet aux parois de s'allonger pendant la croissance des fibres.

Les hémicelluloses constituent donc une matrice amorphe autour des faisceaux de fibrilles de cellulose et possèdent aussi des propriétés hydrophiles et des possibilités de gonflement très importantes. Ces propriétés sont à mettre en parallèle avec le retrait ou les variations dimensionnelles du matériau selon la teneur en eau.

c- Lignines :

Il est actuellement admis que les lignines sont des polymères tridimensionnels[2] provenant de la copolymérisation de trois alcools phénylpropénoïques : alcool coumarylique (hydroxy-1-benzène – propenylol-4), alcool caniférylique (méthoxy-2-hydroxy-1-benzène-propenylol-4) et alcool sinapylique (diméthoxy-2,6-hydroxy-1-benzène-propenylol-4). Ces lignines jouent le rôle des résines (colles) qui lient les fibres végétales entre elles ainsi que les différentes parois de la fibre.

1.2.2.2 – Anatomie et structure de la fibre cellulosique

La fibre cellulosique est de la forme d'un fuseau creux à l'intérieur , elle est caractérisée par :

- Sa longueur "L" favorisant la formation du réseau fibreux et son feutrage.
- Sa largeur "l"
- Son épaisseur de paroi "2P" (L'épaisseur de la paroi des fibres individuelles, donne la résistance et la souplesse aux fibres).
- Son lumen "C" donnant la flexibilité à la fibre .

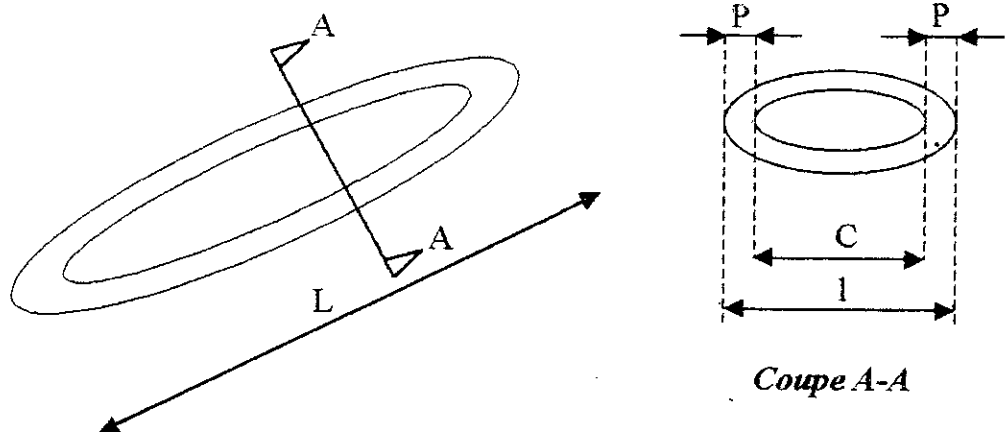


Fig. (1.2) - Caractéristiques morphologiques de la fibre cellulosique, [3]

Le microscope photonique a permis de distinguer plusieurs régions dans la paroi de la fibre telles que la lamelle mitoyenne, la parois primaire et la paroi secondaire. La lamelle mitoyenne est la formation la plus périphérique; dans le tissu, elle est commune aux cellules contigües et forme un ciment appelé lignine qui assure la cohésion intercellulaire (inter-fibres) [2],[3],[4] . Puis on distingue la paroi primaire

(fig.1.3) la première formée des niveaux cellulodiques . Elle est très hydrophile et riche en hémicelluloses . L'eau peut représenter jusqu'à 90 % de son poids.

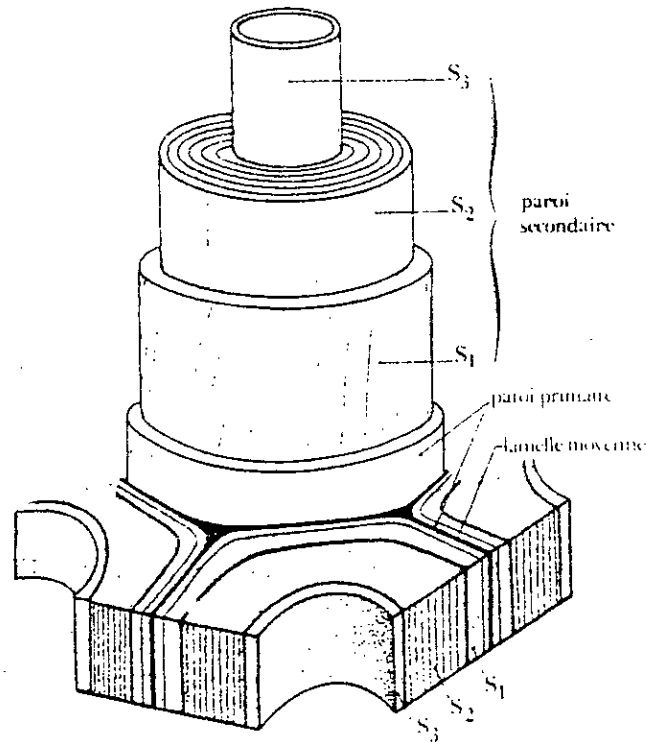


Fig.(1.3) - Vue perspective montre les différentes parois de la fibre cellulosique,[2].

La cellulose présente un faible pourcentage des polysaccharides et la charpente fibrillaire y est relativement lâche. La paroi primaire est la seule enveloppe fibrillaire des cellules jeunes et en croissance. Sa propriété caractéristique est donc la plasticité. Et enfin vient la paroi secondaire composée de trois couches S1, S2 et S3 (fig.1.3), elle est inextensible, et variable d'un tissu à l'autre. D'une façon générale elle est peu hydratée (20 % ou moins d'eau). La charpente fibrillaire y est toujours très compacte. La cellulose y est hautement cristalline.

La répartition des substances dans les fibres comme il est indiqué sur le tableau(1.1) est différente selon les parois constitutives des fibres. Ceci justifie le comportement mécanique différent de chaque paroi.

<i>Parois</i>	<i>Lignines</i>	<i>Hémicellulose</i>	<i>Cellulose</i>
Lamelle mitoyenne	+++	++	+
Paroi primaire	++	++	++
Parois secondaires			
S ₁	+	+++	+++
S ₂	+	++	+++
S ₃	+	++	+++

Tableau (1.1) La répartition des substances dans la fibre,[3]

1.2.2.3 – Variations de la morphologie des fibres dans un cerne annuel

L'assise génératrice des arbres produit dans la même année, des fibres initiales (de printemps) et des fibres finales (d'automne) pour les résineux comme pour les feuillus, [3]. Le Palmier est d'ailleurs classé comme un feuillu, quant à l'Alfa elle est de toute manière considérée comme une plante annuelle.

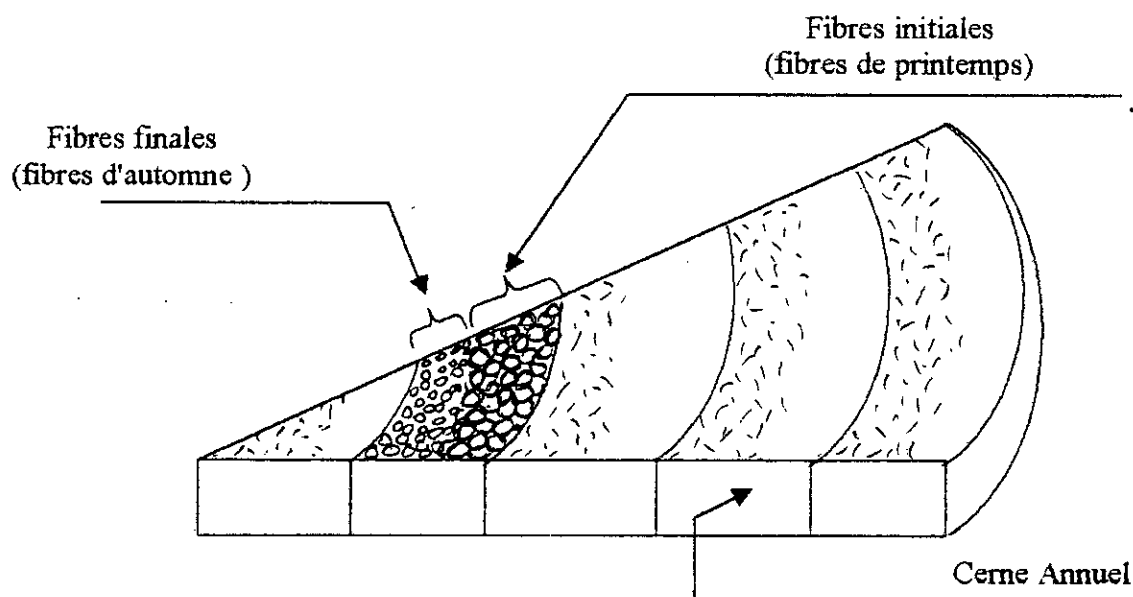


Fig. (1.4) - Coupe tridimensionnelle d'un tronc d'arbre

Le tableau (1.2) montre les variations de la morphologie des fibres dans un cerne annuel.

<i>Caractéristiques morphologiques</i>	<i>Fibres initiales</i>	<i>Fibres finales</i>
Longueur	Plus faible ou égale	Plus grande(4 ÷ 5 %) ou égale
Largeur tangentielle	Egale	Egale
Largeur radiale	Plus grande	Plus petite
Epaisseur de la paroi	Plus petite	Plus grosse
Cavité ou lumen	Plus grand	Très petit (voir inexistant)

Tableau (1.2) Variations de la morphologie des fibres dans un cerne annuel,[3]

1.2.2.4 – Préparation de la fibre naturelle (Cellulosique)

Afin d'obtenir des fibres entières individuelles à partir de la matière première (Bois ou plantes annuelles), il faut donc dissoudre ou éliminer les lignines de la lamelle mitoyenne qui servent de liant entre les fibres. Pour cela il faut préparer ce qu'on appelle la pâte cellulosique par l'un des deux procédés mécanique ou chimique.

Le terme pâte désigne, soit une suspension épaisse de concentration variable de fibres dans l'eau, soit des feuilles épaisses de fibres pressées, séchées et conditionnées en balles pour le transport. Ces pâtes sont obtenues par voie mécanique ou chimique.

a – A partir de la pâte mécanique :

On appelle pâtes mécaniques le mélange de fibres et des fines particules de bois obtenu en râpant le bois par usure ou arrachage à l'aide de meules de pierre ou de métal.

Les techniques ont beaucoup évolué depuis 1975 et ont donné naissance à des sortes de pâtes aux propriétés mécaniques plus élevées. Ces pâtes se distinguent par des résistances mécaniques de plus en plus élevées qui justifient leur fabrication et nécessitent des matériels de raffinage différents par les systèmes de mise en pression, de chauffage par la vapeur avec sa récupération, et d'imprégnation chimique. Ce sont des investissements très lourds en matériels.

Les avantages des pâtes les unes par rapport aux autres qui sont mesurés et contrôlés en fabrication : longueur de rupture, résistance à la déchirure, opacité et blancheur sont mis en balance avec la consommation d'énergie par tonne de pâte, la demande biologique en oxygène (D.B.O) dans les effluents et le rendement en pâte par rapport au végétal initial.

Il faut rappeler que le bois par exemple avec sa structure fibreuse visco-élastique est composé de trois (03) constituants majeurs dont les résistances contribuent aux liaisons inter-fibres et qui peuvent être modifiés dans leur comportement par la température. Ainsi pour chaque constituant on note les températures de ramollissements suivantes :

- Hémicelluloses (polyoses à chaînes courtes) : $50^{\circ} \div 60^{\circ} \text{C}$
- Lignines polymère tridimensionnel : $90^{\circ} \div 100^{\circ}\text{C}$ à 130°C
- cellulose haut polymère de l'anhydroglucose d'orientation linéaire : $>$ à 230°C

b – A partir de la pâte chimique :

L'exposé complet de la chimie des pâtes nécessiterait d'autres développements que ceux présentés ici : on propose de montrer comment on transforme le végétal pour obtenir les fibres séparément à l'état écu.

Le traitement du végétal est appelé cuisson, parcequ'il est pratiqué dans les conditions de température, de temps, de concentration de produits actifs définis : Alcalins ou acides .

Les cuissons alcalines se font :

- A la soude NaOH pure.
- KRAFT NaOH + Na₂S (Sulfure de Sodium)
- Soude NaOH + Na₂ CO₃
- Monosulfite Na₂SO₃ + Na₂ CO₃.

Les cuissons acides se font principalement au bisulfite de magnésium :



*Chapitre 2***MODELES ET PRINCIPES DE BASE****DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS RENFORCES DE FIBRES****Introduction :**

Le béton classique est un matériau fragile. L'addition de fibres permet d'accroître sa ductilité et sa ténacité. Suivant la forme et la nature des fibres, la microstructure de la zone interfaciale fibre-matrice joue un rôle plus ou moins important dans le processus d'arrachement des fibres. D'autre part le pourcentage de fibres et leur arrangement influent aussi sur l'efficacité du renforcement par les fibres. Ce dernier influe surtout sur le comportement mécanique après la première fissuration du béton.

2.1 – Etude de la zone Interfaciale (Fibre-Matrice)

La zone interfaciale (fibre / matrice) est formée d'un film duplex plus ou moins continu de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de C-S-H (Silicates de calcium hydratés) séparé de la matrice par une zone de transition microporeuse plus ou moins épaisse. C'est au niveau des interfaces fibres-matrice et par l'intermédiaire des contraintes de cisaillement qui s'y manifestent que s'effectue le transfert des efforts de la matrice vers la fibre et inversement. Ce transfert est conditionné en grande partie par la microstructure du matériau au niveau des interfaces et par les liaisons qui s'y développent au cours du processus d'hydratation.

Toutefois l'importance relative des interfaces dans les processus d'arrachement des fibres dépend également de la forme des fibres (qualité de surface, nature de son ancrage dans la matrice ...).

Le comportement mécanique des bétons renforcés de fibres dépend donc principalement :

- Des propriétés des fibres elles-mêmes (composition, élancement, forme, texture superficielle, propriétés mécaniques intrinsèques , ...).
- Des propriétés de la matrice.
- Des propriétés des interfaces (fibres-matrice).

La figure (2.1) schématise une courbe effort-déplacement d'un béton renforcé de fibre. Cette courbe comprend deux domaines principaux :

Le premier correspond au domaine élastique où les déformations de la fibre et celle de la matrice sont compatibles. Son étendue dépend de la nature et de la résistance propre des liaisons hydrates-fibres.

Le second domaine correspond à la nature progressive de l'adhérence au cours de laquelle sont mobilisées des forces de frottement entre la fibre et son empreinte dans la matrice. La résistance au frottement dépend également de la nature et de la quantité d'hydrates résiduels sur la fibre ainsi que de la microstructure de l'empreinte dans laquelle s'effectue le glissement.

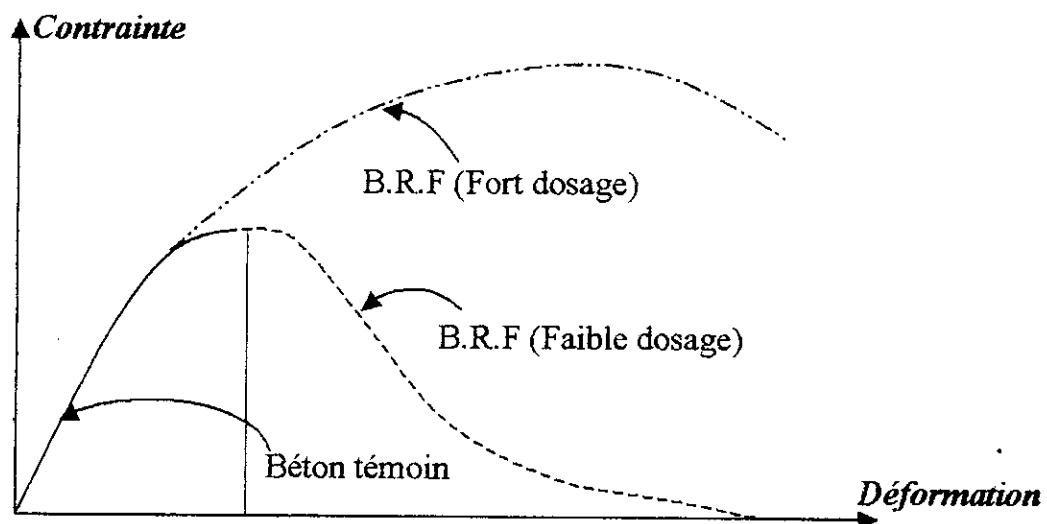


Fig. (2.1) - Comparaison des courbes contrainte-déformation d'un béton classique et d'un béton renforcé de fibres.[1]

Afin de quantifier le comportement des interfaces fibres-matrice analytiquement en se rapprochant de la réalité, le modèle représenté par la figure (2-2) a été proposé sous les deux hypothèses suivantes :

- La matrice est homogène jusqu'au contact de la fibre.
- La fibre cellulosique est un cylindre creux de longueur "l" et de diamètre extérieur et intérieur successivement "D" et "d".

Pour un élément infinitésimal (dx) du composite, le transfert des efforts entre la fibre et la matrice se traduit par le schéma décrivant les contraintes $\sigma(x)$ et $\tau(x)$ selon la fig.(2.2).

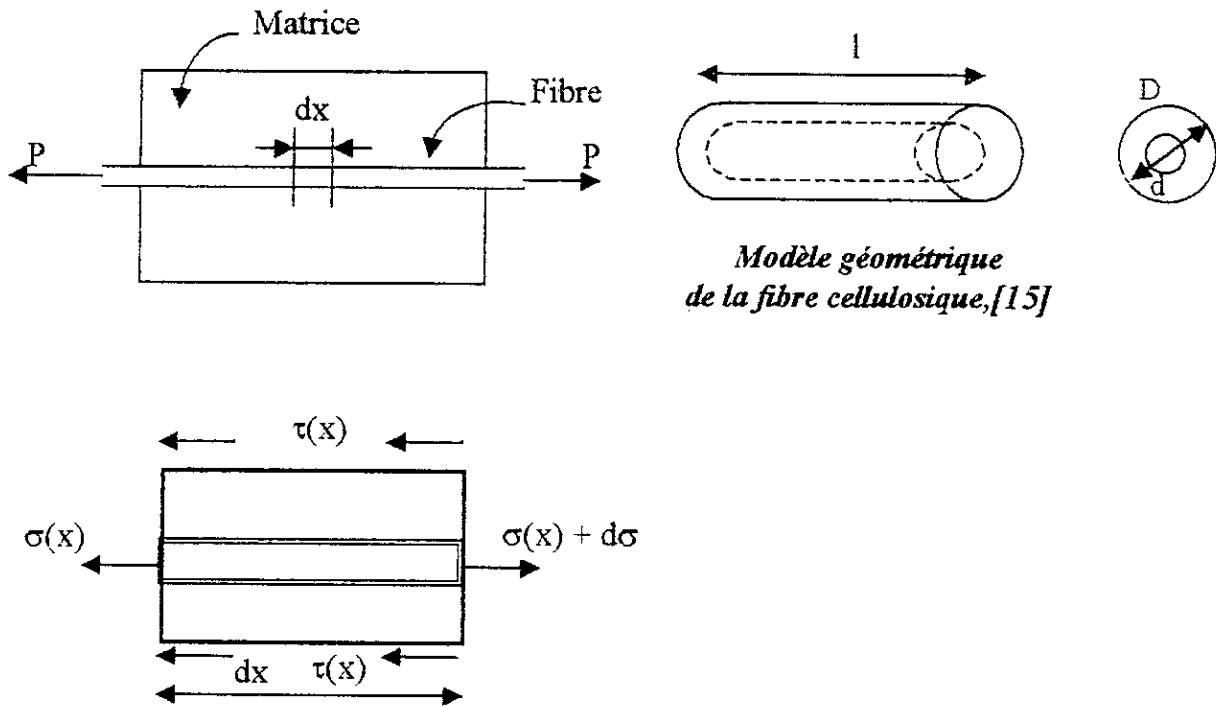


Fig (2-2) Modèle proposé pour le problème interfaciale fibres-Matrice

D'après le schéma de la fig.(2.2), la charge axiale (P) peut s'écrire :

$$P = S \cdot \sigma \quad \text{Avec } S : \text{La section droite pleine de la fibre}$$

d'où :

$$P = \left(\frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \right) \cdot \sigma$$

Si l'on différencie on obtient pour un élément infinitésimal de longueur (dx) :

$$dP = \left(\frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \right) \cdot d\sigma$$

En phase élastique (à l'équilibre statique)

$$\Sigma F = 0$$

Ceci nous permet d'écrire :

$$\sigma(x) \cdot S + \tau(x) \cdot S_l = (\sigma(x) + d\sigma) \cdot S$$

Où S_l : Surface latérale extérieur de la fibre

D'où :

$$\tau(x) \cdot (\pi \cdot D) \cdot dx = \left(\frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \right) \cdot d\sigma$$

Et donc :

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{4 D}{(D^2 - d^2)} \cdot \tau(x) \dots\dots\dots (1)$$

Soit :

$W(x)$: l'allongement au point d'abscisse (x).

$\tau(x)$: la contrainte d'adhérence

$\sigma_f(x)$: la contrainte dans la fibre en un point M(x) quelconque

Dans le domaine élastique :

$$\sigma_f(x) = E_f \cdot \varepsilon = E_f \cdot \frac{dW}{dx} = E_f \cdot W'$$

Si on dérive par rapport à "x" on obtient :

$$\frac{d\sigma_f(x)}{dx} = E_f \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} = E_f \cdot W'' \dots\dots\dots (2)$$

D'après les équations (1) et (2) on peut écrire :

$$\frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot \left(\frac{4 \cdot D}{D^2 - d^2} \right) \cdot \tau(x) = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot E_f \cdot w''$$

$$\text{Donc : } \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \cdot \frac{d\sigma_f}{dx} = \pi D \cdot \tau(x) = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \cdot E_f \cdot w'' \dots\dots\dots(3)$$

Si on suppose que (τ) mobilisable est proportionnelle à l'allongement (w) soit :
 $\tau(x) = k \cdot w(x)$

Alors l'équation (3) devient :

$$\pi D \cdot K \cdot w = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot E_f \cdot w''$$

$$\text{Donc : } w'' = \frac{4 \cdot D \cdot K}{(D^2 - d^2) \cdot E_f} \cdot w$$

Si l'on admet, comme dans le cas de la résistance résiduelle de frottement, que τ est constante suivant (x):

$$\tau(x) = \tau_{fu} \quad \text{Où } \tau_{fu} : \text{Résistance limite de frottement}$$

$$\text{On aura donc : } w'' = \frac{4 \cdot D \cdot \tau_{fu}}{(D^2 - d^2) \cdot E_f}$$

Comme la prise en compte précise de la répartition réelle des contraintes d'adhérence ou de frottement conduit à une analyse très complexe qui ne peut d'ailleurs être appuyée sur des données expérimentales fiables qui exigent des mesures délicates, dans la suite de l'étude du comportement du béton de fibre on considérera la résistance limite de frottement $\tau_{fu} = \tau_{aU}$ où τ_{aU} représente la résistance ultime d'adhérence.

Si la mobilisation de l'adhérence limite τ_{fu} correspond à la résistance propre de la fibre (Cas d'une fissure centrale d'une fibre de longueur "l" représentée par la fig.2.3) on aura :

$$\pi \cdot D \cdot \tau_{fu} \cdot \frac{l}{2} = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \cdot \sigma_{fu}$$

$$\text{donc : } \tau_{fu} = \left[\frac{(D^2 - d^2)}{2 D l} \right] \cdot \sigma_{fu}$$

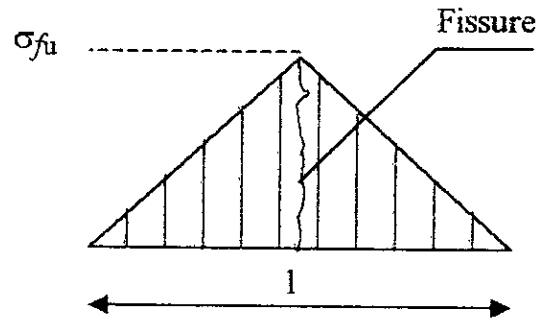


Fig. (2-3) Répartition des efforts de traction de part et d'autre d'une fissure centrale d'une fibre de longueur " l " ,[5]

$$\tau_{fu} = \frac{\alpha}{l} \cdot \sigma_{fu} \dots\dots\dots (4)$$

avec $\alpha = \frac{(D^2 - d^2)}{2 D}$ dépend de la section creuse de la fibre

Suivant la longueur d'ancrage dont le maximum est : $l_a = \frac{l}{2}$ on peut avoir:

- Soit la rupture de la fibre par fracture si : $\tau_{fu} > \frac{\alpha}{l} \cdot \sigma_{fu}$

(Ce sera notamment le cas des fibres longues "fibres des résineux " aux valeurs $\frac{\alpha}{l}$ faibles)

- Soit le glissement frottant (rupture par déchaussement) de la fibre si :

$$\tau_{fu} < \frac{\alpha}{l} \cdot \sigma_{fu}$$

(Cas des fibres courtes "fibres des feuillus").

Il sera donc nécessaire de faire une étude biométrique afin de pouvoir situer nos fibres du point de vue de la longueur et donc de déterminer le mode de rupture.

Il s'agit alors de définir la loi régissant la contrainte d'adhérence ou de frottement $\tau(x)$ en fonction du déplacement des fibres. Dans une matrice de béton on peut admettre que la loi régissant $\tau(x)$ en fonction du déplacement se traduit par la forme de la courbe de la figure (2.4) sur laquelle on voit apparaître :

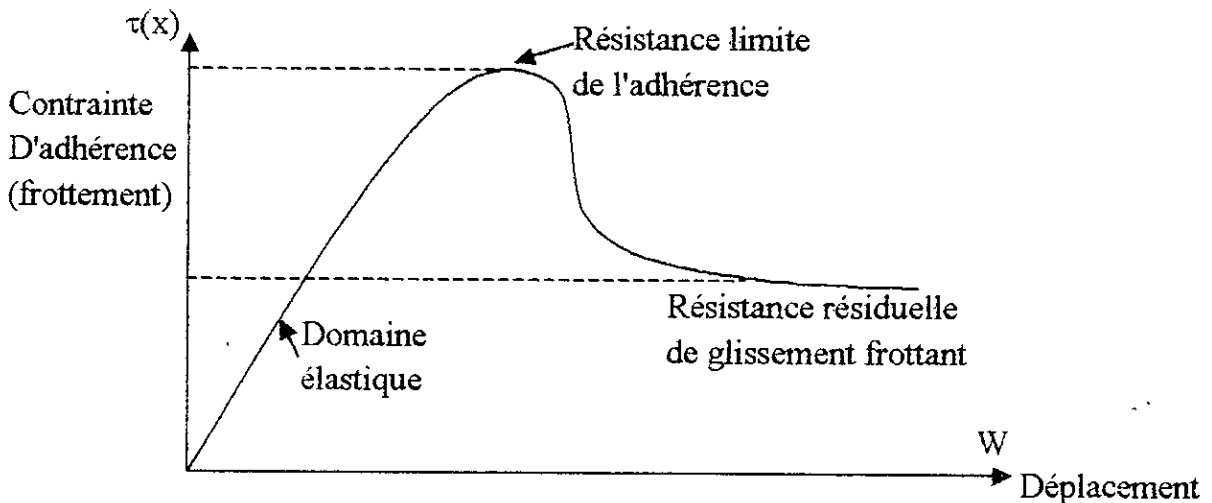


Fig. (2-4) - Modèle du comportement de l'adhérence de la fibre sur la matrice du béton (relation effort - déplacement), [5]

- Une première portion du domaine élastique qui correspond à une mobilisation d'adhérence jusqu'à une contrainte limite τ_{au} de rupture d'adhérence.
- Une deuxième portion en palier pour laquelle est mobilisée une résistance résiduelle de frottement τ_{fu}

En supposant que $\tau_{fu} < \tau_{au}$ (fig.2.5), la courbe de la force d'arrachement (pull-Out) d'une fibre en fonction du déplacement devrait donc comprendre au cours de la mobilisation successive des résistances au cisaillement :

- Une première portion linéaire OE de charges pour lesquelles l'interface fibre-matrice reste intacte et dans le domaine élastique.

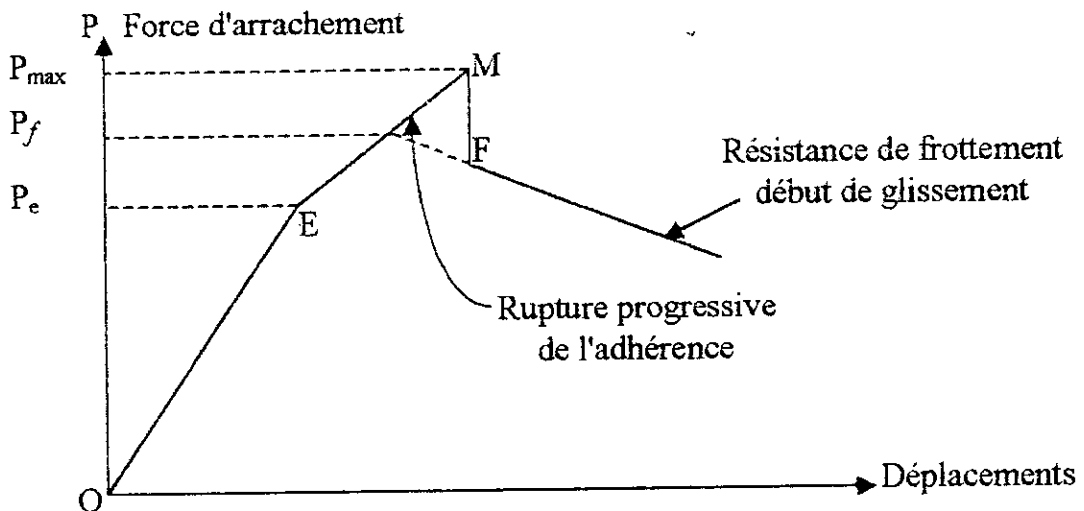


Fig. (2-5) - Aspect de la courbe de la force d'arrachement (P) en fonction de la déformation suivie de glissement pour $\tau_{fu} < \tau_{au}$, [5]

- Une deuxième portion (EM) au cours de laquelle la charge continue de croître mais en s'accompagnant d'une rupture progressive d'adhérence se terminant au point (M) de charge maximale pour laquelle toute la résistance d'adhérence τ_{au} a été épuisée, cette portion est suivie (puisque l'on a supposé ($\tau_{fu} < \tau_{au}$) par une décroissance brutale de charge (MF).

- Une dernière portion correspondant à une charge progressivement décroissante et à la résistance résiduelle de frottement de la fibre τ_{fu} dont la partie enrobée glisse progressivement hors de la matrice.
Bien entendu la réalité de ce modèle de courbe suppose qu'à aucun moment la force d'arrachement (P) ne dépasse la résistance à la rupture de la fibre soit :

$$S \cdot \sigma_{fu} > P \quad \text{avec } S : \text{ la section droite pleine de la fibre.}$$

Cela suppose aussi que la longueur d'ancrage dépasse une certaine longueur minimale " l_m " au dessous de laquelle il y aurait un arrachement brutal entre E et M.

2.2 – Efficacité du rôle des fibres dans la matrice

L'efficacité du rôle des fibres, dans l'état réel où elles se trouvent dans la matrice, intervient dans le cadre de deux effets :

- L'accroissement de la résistance à la traction de la matrice.

- L'accroissement de l'énergie de rupture ou de ductilité comparée à celle de la matrice.

Ces effets dépendent de l'efficacité des fibres comparativement aux conditions idéales de la continuité des fibres et de leur orientation parallèlement à l'effort [5],[6].

Cette efficacité dépend alors elle-même :

- Du pourcentage de fibres " V_f "
- De la longueur des fibres " l " ou du rapport $\left(\frac{\alpha}{l}\right)$
- De leur orientation " θ "
- De la résistance d'adhérence ou de frottement entre fibre et matrice τ_{au} ou τ_{fi}

Rappelons que ces paramètres ne sont pas indépendants et, par ailleurs, les conditions qui améliorent la résistance à la traction n'améliorent pas forcément la ductilité.

En effet, pour des fibres données caractérisées par une excellente résistance d'adhérence τ_{au} , on aura une majorité de fibres pour lesquelles $\tau_{au} > \sigma_{fu} \cdot \frac{\alpha}{l}$ et, ainsi, on aura en majorité la rupture des fibres avec une faible ductilité.

L'efficacité des fibres s'évalue par un coefficient compris entre 0 et 1 qui exprime le rapport entre l'effet obtenu par les conditions réelles de fibres dispersées en position et orientation et l'effet idéal obtenu par des fibres continues alignées parallèlement à l'effort.

Une autre façon d'envisager l'efficacité globale des fibres vis-à-vis de la résistance de la matrice se fait par un essai de traction simple, pour évaluer la capacité de reprise des efforts après fissuration. Ainsi la capacité de la reprise totale de l'effort après la fissuration de la matrice correspond alors à une efficacité de 100 %.

Ceci nous amène à dire que l'approche microstructurale est utile aux mécaniciens pour expliquer certaines particularités de comportement des B.R.F. Certains chercheurs se sont penché sur ce problème et ils ont montré que la présence de fibres pouvait modifier les caractéristiques intrinsèques de la matrice telles que sa porosité, la surface spécifique des hydrates, sa teneur en eau, le faciès et la distribution des hydrates. C'est pourquoi la règle des mélanges souvent utilisée pour prédire le comportement des composites et qui fait l'hypothèse que les propriétés de la matrice ne changent pas en présence des fibres, peut être prise en défaut.

2.2.1 – Béton de fibres continues et alignées dans la direction de l'effort de traction (Cas idéal)

La loi de mélange pour ce type de matériau (B.R.F.N) proposé par ANDONIAN et al [7], s'écrit sous la forme suivante :

$$E_C = E_m (1 - V_0) (1 - V_f) + E_f \cdot V_f$$

Où E_C , E_m et E_f sont respectivement les modules de Young du composite, de la matrice et de la fibre, V_f et V_0 sont respectivement les fractions volumiques des fibres et du vide dans le béton (V_0 se détermine par le porosimètre à mercure).

Pour une déformation relative " ε " du composite en supposant une adhérence parfaite, fibre-matrice, la contrainte dans le composite est donnée par :

$$\sigma_C = \varepsilon \cdot E_C = \varepsilon \cdot E_m (1 - V_0) (1 - V_f) + \varepsilon \cdot E_f \cdot V_f$$

Soit encore :

$$\sigma_C = \sigma_m (1 - V_0) (1 - V_f) + \sigma_f \cdot V_f$$

A l'état limite de la première fissuration de la matrice on a :

- Pour le composite :

$$\sigma_C = \sigma_{Cu}$$

- Pour la matrice :

$$\sigma_m = \sigma_{mu}$$

- Pour la fibre :

$$\sigma_f = (E_f / E_m) \cdot \sigma_{mu}$$

On obtient donc :

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} (1 - v_0) (1 - v_f) + \left(\frac{E_f}{E_m} \right) \cdot \sigma_{mu} \cdot V_f$$

Où encore :

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} \left[(1 - v_0) + V_f \left(\left(\frac{E_f}{E_m} \right) + v_0 - 1 \right) \right]$$

Pour qu'il y ait maintien de la capacité de charge après la fissuration de la matrice, donc après annulation de σ_{mu} , il faut que la charge de la première fissuration puisse être supportée seulement par les fibres supposées à leur contrainte limite σ_{fu} .

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} \left[(1 - v_0) + V_{f_{critique}} \left(\left(\frac{E_f}{E_m} \right) + v_0 - 1 \right) \right] = \sigma_{fu} \cdot v_{f_{critique}}$$

d'où le pourcentage critique des fibres sera :

$$V_{f_{crit}} = \frac{\sigma_{mu} (1 - v_0)}{\sigma_{fu} - \sigma_{mu} \left(\left(\frac{E_f}{E_m} \right) + v_0 - 1 \right)}$$

Si on considère un essai de traction pour différents pourcentages de fibres, les courbes (contrainte-déformation) ont l'allure que représente la figure (2.6).

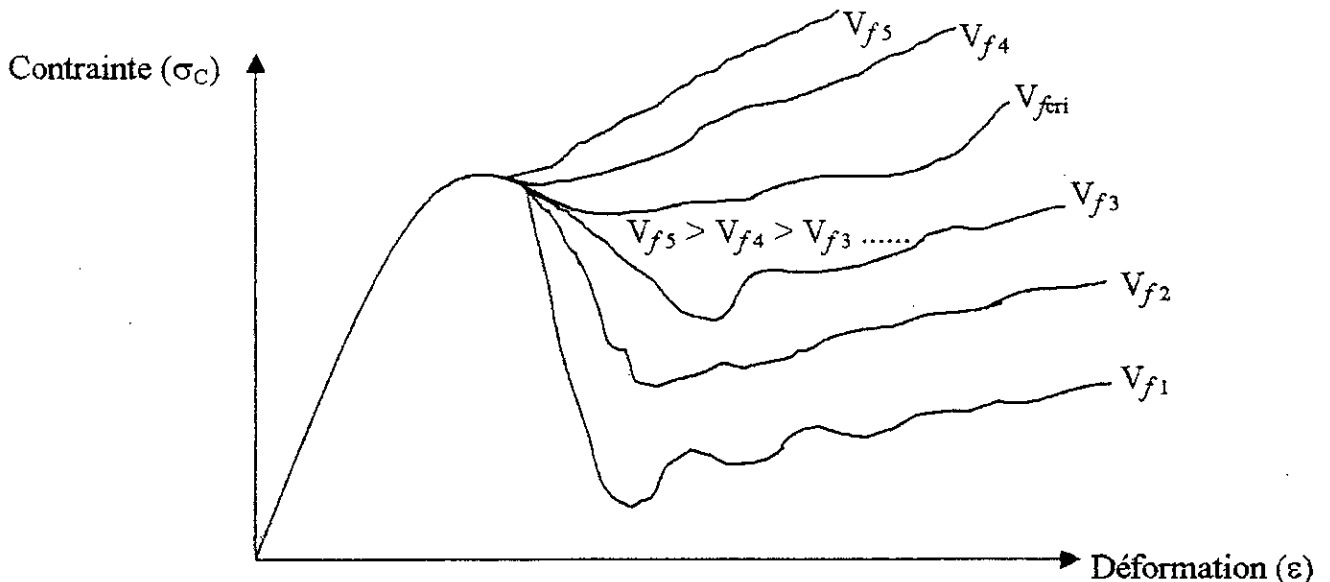


Fig. (2-6) - Allure des courbes d'essais de traction en fonction du pourcentage de fibres, [5].

- Lorsque $V_f > V_{fcri}$: la contrainte (σ_C) augmente à partir de la contrainte de la première fissuration de la matrice.
- Lorsque $V_f < V_{fcri}$: la contrainte (σ_C) tend à chuter brutalement pour rejoindre la capacité de charge des fibres.

Rappelons que, dans cette première étape, nous avons supposé les fibres continues et dotées d'une adhérence parfaite; mais le cas réel (fibres dispersées dans la matrice) nous conduit à définir un coefficient d'efficacité.

2.2.2 – Béton de fibres courtes dispersées dans la matrice

Comme il a été signalé, le coefficient d'efficacité dépend de la longueur des fibres "l" et plus précisément du rapport " α/l ", de leur orientation et de la résistance d'adhérence fibres-matrice et évidemment de la fraction de fibres.

A partir de l'équation (4) :

$$L = l_{cri} = l_a = \frac{\sigma_{f_u}}{\tau_{f_u}} \cdot \alpha$$

avec : l_{cri} : longueur critique
 l_a : longueur d'ancrage

En supposant que, par rapport à une fissure perpendiculaire à l'effort, les fibres sont parallèles à ce dernier et ont une longueur d'ancrage répartie de façon uniforme de 0 à $l/2$. Dans ce cas l'efficacité des fibres sera appréciée pour $l = l_{cri}$.

Cependant l'interdépendance des paramètres intervenant dans l'efficacité des fibres (par exemple l'effet de la résistance de frottement dynamique τ_d de glissement par rapport à la résistance de frottement statique τ_{fu}) a conduit à considérer que l'on ne pouvait pas multiplier simplement les coefficients relatifs à chaque paramètre. Cela a amené les chercheurs à proposer des coefficients d'efficacité globaux.

En ce qui concerne l'orientation des fibres dans la matrice du béton, ATTAR et al.[6] ont montré qu'après fissuration, les coefficients d'efficacité sont respectivement 1, $2/\pi$ et $1/2$ suivant qu'il s'agit d'un problème unidimensionnel, plan ou à trois dimensions, tandis que Rumualdi et Mandell [8] suggèrent une valeur du coefficient d'efficacité $\eta = 0,41$ pour une distribution isotrope des fibres dans la matrice du béton.

La contrainte du BRFN sollicité en traction est alors donnée par :

$$\sigma_c = \sigma_m (1 - V_0) (1 - V_f) + \eta \cdot \sigma_f \cdot V_f$$

A l'état limite de la première fissuration de la matrice :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_c = \sigma_{cu} \\ \sigma_m = \sigma_{mu} \\ \sigma_f = \left(\frac{E_f}{E_m} \right) \cdot \sigma_{mu} \end{array} \right.$$

ce qui conduit à :

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} \left[(1 - v_0) + v_f \left(\eta \left(\frac{E_f}{E_m} \right) + v_0 - 1 \right) \right]$$

En reprenant la définition du pourcentage critique des fibres $V_{f_{cri}}$ permettant la reprise de la charge de la première fissuration de la matrice :

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu} \left[(1 - v_0) + v_{f_{critique}} \left(\eta \left(\frac{E_f}{E_m} \right) + v_0 - 1 \right) \right] = \eta \cdot \sigma_{fu} \cdot V_{f_{cri}}$$

Puisque les fibres courtes ayant tendance à glisser hors de la matrice, il est donc préférable de remplacer σ_{fu} à la limite par la résistance de frottement $\tau_{fu} \cdot \frac{1}{\alpha}$ (cf. équation (4)). Ce qui nous amène à écrire :

$$V_{f_{cri}} = \frac{\sigma_{mu} (1 - v_0)}{\eta \left(\tau_{fu} \cdot \frac{1}{\alpha} - \sigma_{mu} \left(\frac{E_f}{E_m} \right) \right) + \sigma_{mu} (1 - v_0)}$$

2.3 – Comportement après la première fissuration des bétons renforcés de fibres sous l'essai de flexion

Quand le béton armé est soumis à la flexion, il présente un comportement fissurant. Par contre, le béton renforcé de fibres est plus ductile. Cela signifie qu'après la première fissuration, le béton renforcé de fibres peut encore supporter des charges. C'est pour cette raison, que plusieurs chercheurs ont mis en évidence différents modèles de calcul pouvant quantifier cette résistance supplémentaire.

2.3.1 – Modèle de fissure fictive [9]

Ce modèle est d'usage courant en mécanique de la rupture pour les matériaux quasifragiles, la figure (2.7) en montre le principe.

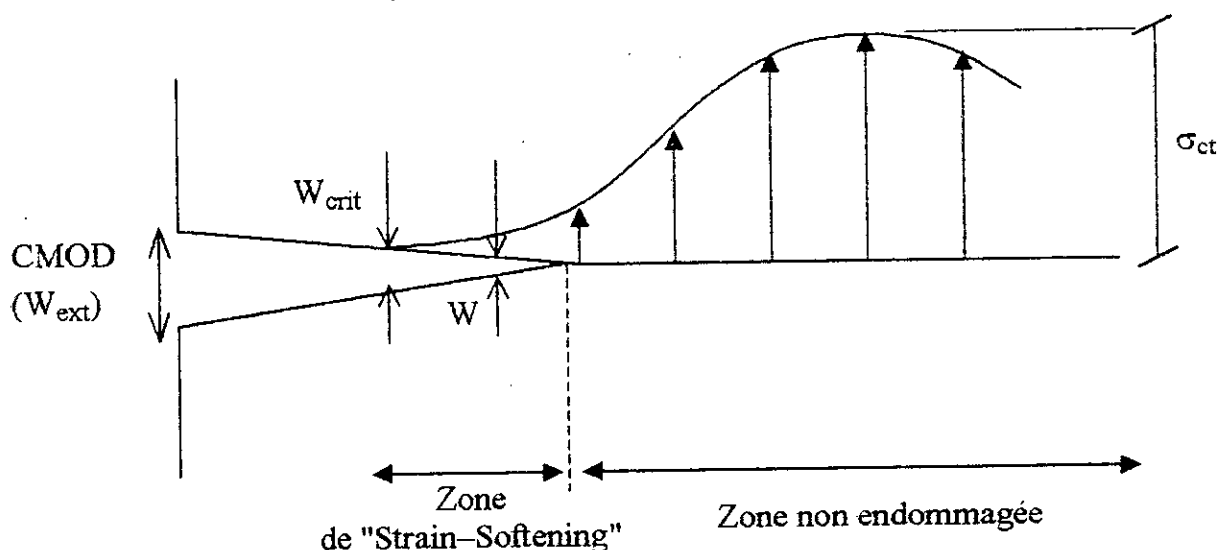


Fig. (2-7) - Ouverture de la fissure et diagramme des contraintes de traction dues à la flexion dans la matrice au voisinage de la fissure, [9].

La croissance de la fissure est supposée se produire quand la contrainte de traction " σ_{ct} " du béton est atteinte à l'emplacement de la fissure. Quand l'ouverture de la fissure augmente, la contrainte ne tombe pas immédiatement à zéro mais diminue progressivement (comportement dit "Strain-Softening").

Lorsque l'ouverture atteint une valeur critique " W_{crit} " il n'y a plus de transfert de contrainte à travers la fissure. La zone de "Strain –Softening" est caractérisée par une relation bien déterminée entre la contrainte et l'ouverture de fissure, relation qui peut être considérée comme une caractéristique intrinsèque du béton. La figure (2-8) donne une approximation simple mais efficace de la relation "contrainte-ouverture de fissure".

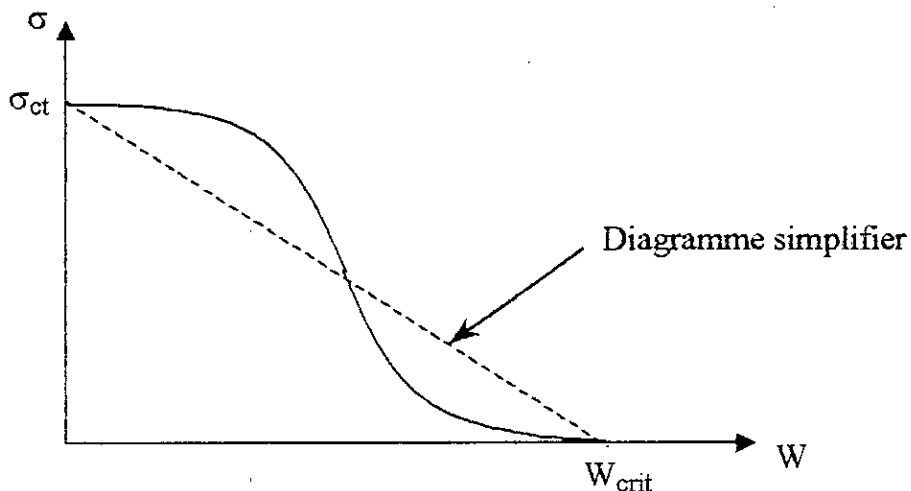


Fig. (2-8) - Diagramme (contrainte – ouverture de fissure),[9].

2.3.2 – Modèles du diagramme des contraintes

2.3.2.1 – *Fibres rectilignes alignées dans la direction de l'effort de traction [9]*

Sur la base du modèle de fissure fictive, un modèle du diagramme des contraintes peut être proposé pour le béton renforcé de fibres soumis à la flexion [9]. La figure (2-9) montre une section fissurée de béton renforcé de fibres, ainsi que la répartition des contraintes normales. Elle précise également la signification des symboles utilisés. Deux cas peuvent se présenter : soit l'ouverture de la fissure $CMOD \leq w_{crit}$ (cas a), soit $CMOD > w_{crit}$ (cas b).

3. Les contraintes normales de traction agissant sur la fissure fictive suivent une relation (σ - w) linéaire (Cf. fig.2-8).
4. Sur une zone horizontale de largeur "2 a", les contraintes de traction induites par la flexion dans le béton situé dans le bas de la poutre sont prises égales à la contrainte de traction à la fibre extrême de la fissure.
5. Le béton non fissuré présente un comportement élastique linéaire
6. Les fibres sont parallèles et perpendiculaires à la fissure . Leur répartition dans la section transversale correspond à un maillage carré. La longueur moyenne de scellement est de $l/4$.
7. La charge supportée par une fibre suit la relation "force-déplacement" présentée au chap.2 fig (2-5).

Finalement les variables inconnues σ , t , s , a et F seront déterminées grâce aux hypothèses citées ci-dessus.

Ce modèle représente malheureusement le cas idéal, par contre, en réalité, les fibres sont courtes et dispersées d'une manière aléatoire dans la matrice du béton; ce qui nous impose un modèle adéquat pour ce type de problème.

2.3.2.2 – Fibres courtes dispersées dans la matrice [9]

Dans l'étude du comportement en flexion d'un matériau homogène et élastique, on applique habituellement à des essais sur prismes de section rectangulaire, la formule classique de flexion bien connue donnant la contrainte de traction ou de compression.

$$\sigma_t = \sigma_c = 6 \frac{Mu}{bh^2}$$

"Mu" étant le moment de flexion à la rupture.

Cependant , à la rupture , on admet souvent pour le béton que la contrainte de traction en flexion donnée par cette formule est liée à la résistance du béton à la traction simple σ_{tu} par :

$\sigma_{tu} = \sigma_c$ si bien que l'on peut exprimer σ_{tu} par :

$$\sigma_{tu} = 3,6 \frac{Mu}{bh^2}$$

$$\text{Où : } Mu = 0,278 \sigma_{tu} \cdot bh^2$$

Dans l'essai d'un prisme de béton, la rupture fragile a lieu pour une contrainte de traction σ_t , qui ne conduit à mobiliser qu'une faible fraction de la résistance à la compression $K \cdot \sigma_{bu}$ (voir figure 2-10).

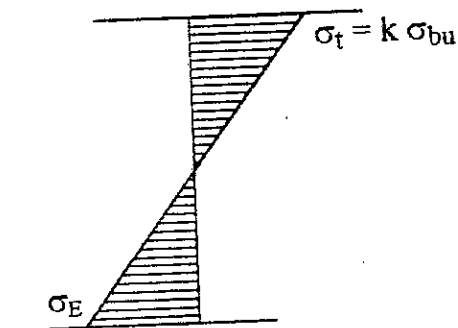


Fig. (2-10) - Diagramme de flexion dans une section homogène avant fissuration, [5]

Lorsque la résistance à la traction se maintient au prix de déformations à croissance supérieure au delà de la première fissuration de la matrice, on assiste à une mobilisation supplémentaire de la réserve de résistance à la compression avec une remontée de l'axe neutre qui prend la forme indiquée sur la figure (2-11).

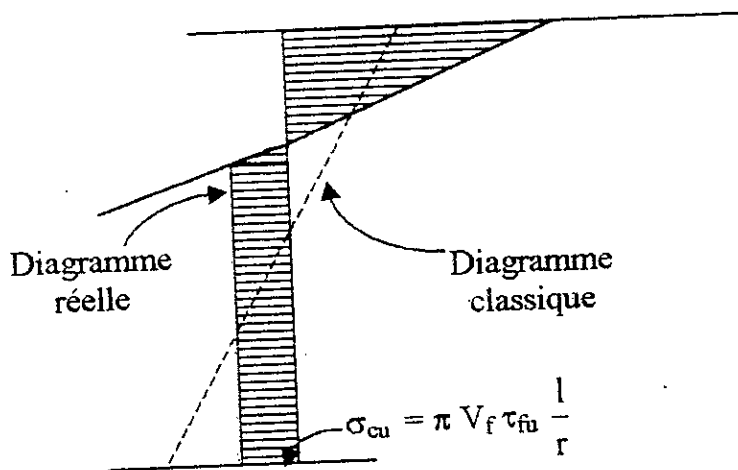


Fig. (2-11) Diagramme particulier de flexion après la première fissuration, [5].

La contrainte σ_{cu} de traction correspond à la résistance réelle à la traction du composite alors que le calcul à partir de la formule classique du solide élastique et isotrope donnerait une contrainte σ_t beaucoup plus élevée.

La contrainte σ_t calculée n'a donc, en fait, aucune signification physique et ne peut donner qu'un indice de portance difficilement fiable aux résistances réelles du composite.

En fait l'axe neutre peut, suivant le pourcentage de fibres, atteindre un niveau situé au-dessus de la base à au moins 0,8 fois la hauteur du prisme, [5].

Un diagramme de flexion proposé par HANNANT est donné par la figure (2-12).

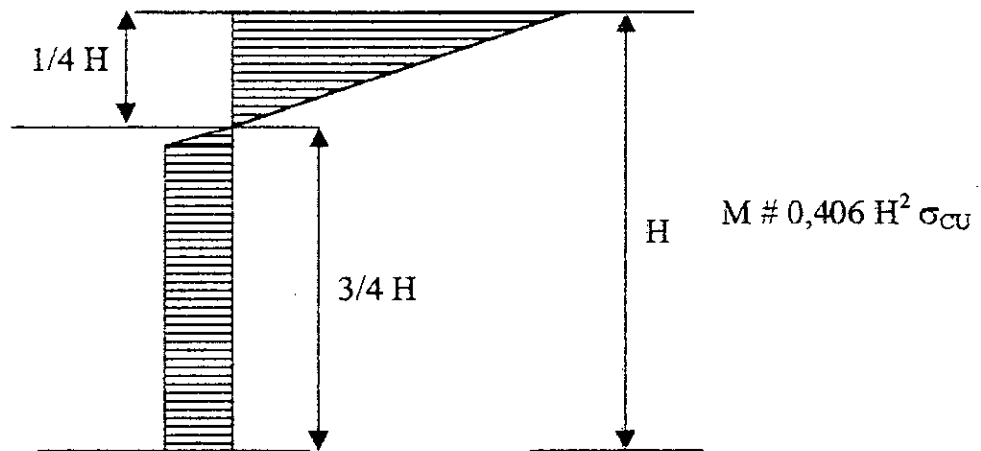


Fig. (2.12) - Diagramme de flexion après la première fissuration proposé par HANNANT, [5]

2.3.3 – Ductilité

L'incorporation de petites fibres dans le béton a permis d'apporter d'importantes améliorations à la nature fragile du béton. En effet, et comme représenté schématiquement sur la figure (2-13), on a constaté une importante augmentation de l'allongement à la rupture est une amélioration de la résistance à la rupture. Cependant, la différence entre les deux comportements n'est appréciable qu'au delà de la première fissuration ou limite de proportionnalité.

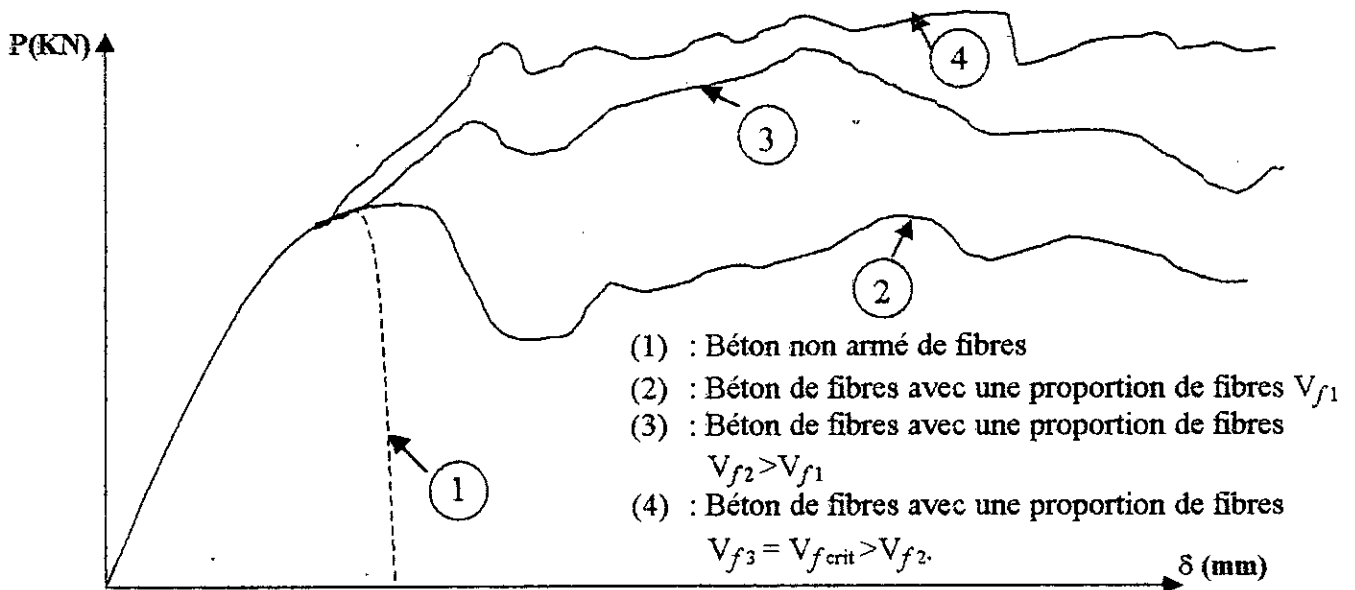


Fig. (2-13) - Diagramme (charge-flèche) après essais de flexion, [10].

Beaucoup d'essais ont démontré que jusqu'à cette limite, l'addition de fibres n'augmente que très légèrement la charge correspondant à la première fissuration. C'est à dire que le mécanisme de renforcement de la matrice par les fibres n'est déclenché qu'après la fissuration de la matrice.

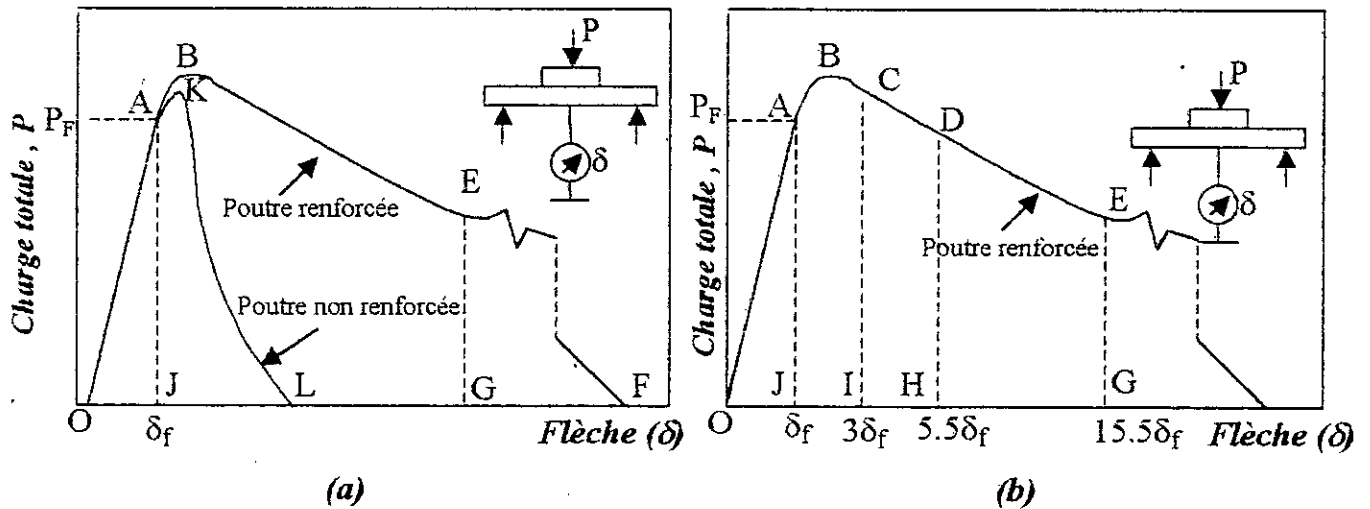
Pour caractériser la capacité des bétons renforcés de fibres à résister à la rupture quand ils sont soumis à des charges statiques, dynamiques ou d'impact, on introduit la notion de ductilité, cette dernière correspond à la capacité d'absorption de l'énergie. La question qui se pose alors est comment mesurer, interpréter et utiliser cette ductilité.

L'Américain Society for Testing Materials (ASTM) l'Américain Concrete Institute (ACI), le Japan Concrete Institute (JCI) et le Japan Society of Civil Engineers (JSCE) ont défini des tests standards (ASTM-C1018 : ACI-544; JCI-SF4; JSCE-SF4) pour mesurer des indices de ductilité. Toutes ces méthodes assimilent l'énergie absorbée par l'échantillon à la surface limitée par la courbe effort-flèche. Cette courbe est obtenue à partir d'un essai de flexion. [10].

On sait que cette courbe est influencée par la taille de l'échantillon, le type de chargement et de contrôle, et le taux de chargement. Il aurait été préférable d'obtenir la ductilité comme une propriété du matériau indépendamment de l'échantillon et des variables de l'essai.

La méthode ASTM-C 1018 propose de déterminer l'énergie nécessaire pour l'obtention de déformations spécifiques correspondant à 3, 5.5 et 15.5 fois la flèche à la première fissuration δ_F (fig.2-14). Les rapports de ces énergies à l'énergie

correspondant à la première fissuration fournissent, respectivement, les indices de ductilités I_5 , I_{10} , I_{30} (fig.2-14-b). Les chiffres 5, 10 et 30 correspondent aux valeurs qu'auraient les indices de ductilité dans le cas d'un comportement élastique parfaitement plastique du matériau.



$$I_t = \frac{\text{Aire OABF}}{\text{Aire OAKL}}$$

$$I_{(ACN)} = \frac{\text{Aire OABEG}}{\text{Aire OAJ}}$$

$$I_5 = \frac{\text{Aire OABCI}}{\text{Aire OAJ}}$$

$$I_{10} = \frac{\text{Aire OABDH}}{\text{Aire OAJ}}$$

$$I_{30} = \frac{\text{Aire OABEG}}{\text{Aire OAJ}}$$

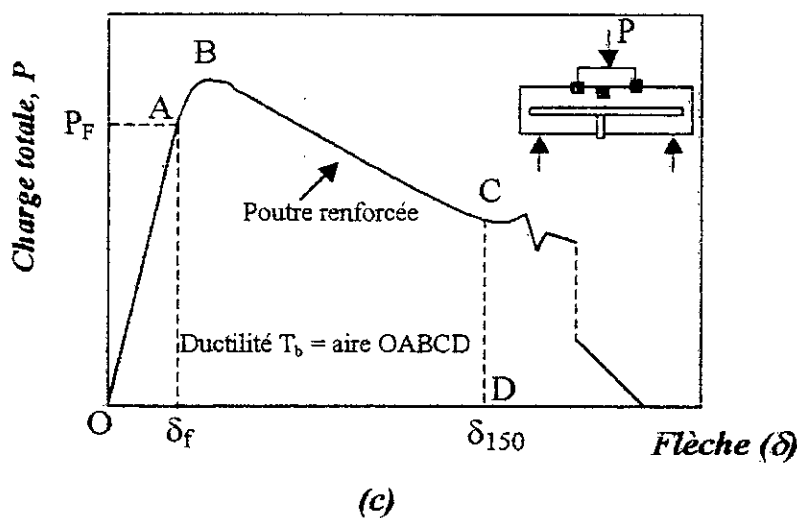


Fig. (2-14) Les différentes mesures de ductilités et la définition de leurs indices, [10] (a): ACI - 544 , (b): ASTM-C 1018, (c): JCI-SF4

Les méthodes Japonaises JCI-SF4 et JSCE -SF4 définissent la ductilité T_{JCI} comme étant l'énergie nécessaire pour obtenir une déformation centrale (δ_{150}) égale à $\left(\frac{1}{150}\right)$ fois la portée de la poutre. L'essai prévoit deux tailles différentes pour les poutres et ces méthodes définissent la contrainte moyenne de flexion comme suit :

$$\sigma_f = \frac{T_{JCI} \cdot L}{\delta_{150} \cdot b \cdot h^2}$$

Expression dans laquelle L, b et h représentent respectivement la portée, la largeur et la hauteur de la poutre.

*Chapitre 3***CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BETONS
RENFORCES DE FIBRES VEGETALES****Introduction**

Après avoir étudié les constituants séparément, on s'intéresse ici au béton renforcé de fibres végétales. On envisagera dans ce chapitre une synthèse bibliographique sur les caractéristiques du béton de fibres frais, puis du béton de fibres durci. On terminera par la présentation de la durabilité.

3.1 – Béton de fibres frais**3.1.1 – Ouvrabilité**

L'ouvrabilité des gâchées contenant un pourcentage considérable de fibres naturelles (végétales), exige une instrumentation spéciale pour qu'elle soit bien appréciée.

Le slump-test et le maniabilimètre LCPC, sont utilisés pour apprécier l'ouvrabilité des bétons classiques, mais généralement, ils ne sont pas convenables pour le cas des bétons de fibres. L'existence des fibres dans le béton lui confère une certaine cohésion artificielle au repos apportée par le réseau frottant des fibres, ce qui fait que l'affaissement au slump test par exemple, soit nul dans la plus part du temps.

Il est certain que l'incorporation de fibres végétales dans une gâchée de béton diminue considérablement son ouvrabilité et augmente le volume des vides. Ceci est dû essentiellement à l'absorption de l'eau par les fibres d'une part (eau liée) et sa stagnation d'une façon inévitable entre les fibres (eau libre) d'une autre part. Mais cela ne veut pas dire que pour remédier à ce problème on doit augmenter la quantité d'eau de gâchage. Il est plutôt recommandé d'introduire dans la gâchée un adjuvant à caractère fluidifiant afin que ce paramètre ne soit pas amélioré au détriment de la résistance de ce composite.

Du fait que le maniabilimètre et le slump –test (affaissement au cône d'Abrams) ont montré leurs limites d'application dans le cas des bétons renforcés de fibres, A.K.Sachan et C.V.S Kameswara Rao [11], ont élaboré le "New Cone Penetration Test" (NCPT) dans le but d'estimer au mieux l'ouvrabilité (plasticité) de ce type de composite. Après plusieurs études faites sur la taille et le poids de ce cône, les deux chercheurs ont opté pour un cône métallique creux avec un angle de 30° au sommet

équilibré avec une masse de plomb afin d'atteindre un poids final de 4 Kg (Cf. Annexe, Photo). Ainsi si la pénétration du NCPT sous son propre poids sur le béton de fibres frais est comprise entre 60 et 200 mm ce béton sera classé comme étant un béton plastique.

Dans le cas où le NCPT possède respectivement un poids et un angle au sommet entre 1 à 10 Kg et 30° à 60° , Sachan et Kameswara [11], proposent la formule empirique ci-dessous qui nous donne la profondeur de la pénétration (d_0) du cône en fonction de son poids (w), son angle au sommet (θ), du rapport $\frac{E}{C}$ et de la proportion en fibres (V_f). (Cf. figures (3-1), (3-2) et (3-3)).

$$d_0 = \frac{k \cdot W^n}{\theta} \quad \text{avec} \quad d_0 : \text{pénétration du NCPT sur son propre poids en (mm)}$$

w : poids du NCPT en (Kg)

k, n : paramètres dépendant du rapport E/C et de la fraction en fibres V_f (Cf. figures (3-2) et (3-3)).

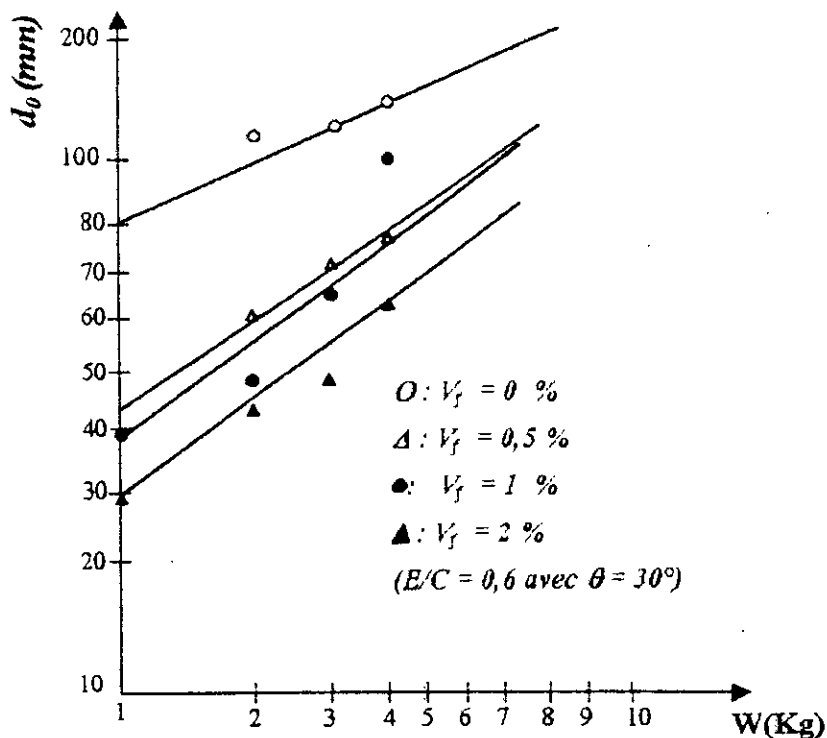


Fig. (3-1) Variation de la pénétration " d_0 " en fonction du poids " W " du N.C.P.T pour un béton de fibres métallique, [11].

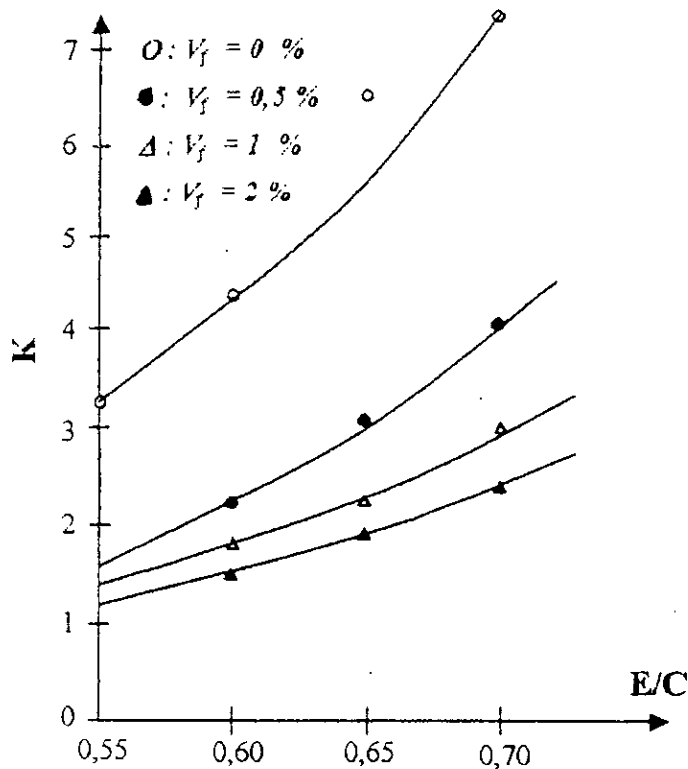


Fig. (3-2) Variation de "K" avec le rapport (E/C) pour un béton de fibres métallique, [11].

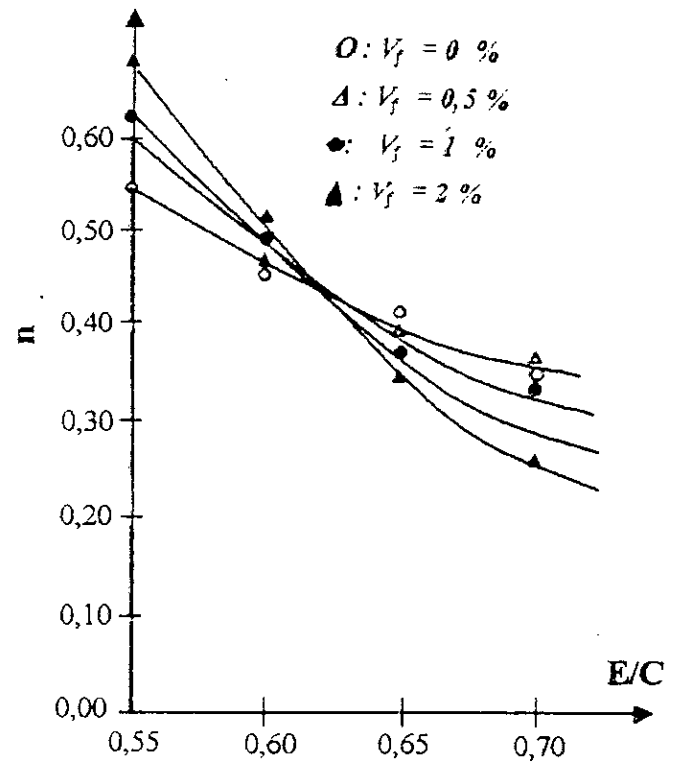


Fig. (3-3) Variation de "n" avec le rapport (E/C) pour un béton de fibres métallique, [11].

Pour nous familiariser avec ce nouvel instrument de mesure d'affaissement, les deux chercheurs nous donnent à titre comparatif, l'équivalence entre l'affaissement mesuré au slump-test et celui mesuré par le N.C.P.T sous forme de courbe (fig.3-4) pour le cas précis du béton de fibres métalliques avec un rapport $E/C = 0,55$.

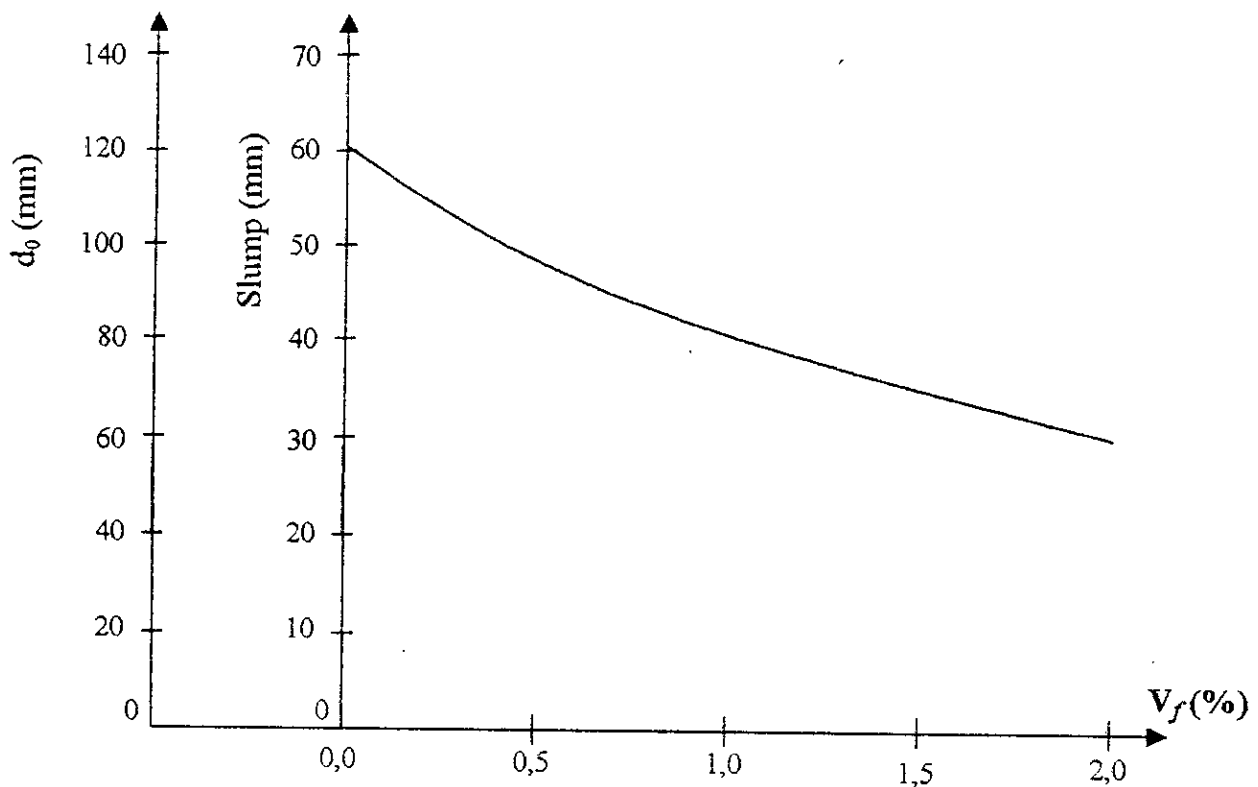


Fig. (3-4) Courbe d'équivalence entre l'affaissement mesuré au slump test et au N.C.P.T pour un béton renforcé de fibres métalliques ($E/C = 0,55$), [11].

L'ouvrabilité des bétons diminue lorsque la teneur en granulats de diamètre supérieur à 5 mm augmente [5],[12]. De ce fait les matrices doivent donc être soit des mortiers, soit des bétons contenant une forte proportion de sable. Ainsi, une valeur du

Rapport $\frac{\text{Gravillon}}{\text{Gravillon} + \text{sable}}$ inférieur à 0,50 semble être l'ordre de grandeur à respecter en pratique.

3.2– Béton de fibres durci

3.2.1 – Retrait et fissurabilité

D'une façon générale le retrait d'un béton de fibres, est plus faible que celui du béton sans fibres.

Des essais effectués par de nombreux chercheurs [5], ont montré que le premier retrait d'hydratation, (à la fin de prise et au début du durcissement du béton) d'un béton

renforcé de fibres est moins important que celui d'un béton témoin de même composition sans fibres. Cette diminution du retrait, en présence de fibres, est d'autant plus remarquable que le départ d'eau du béton est accéléré par la présence de fibres. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que la présence de fibres dispersées augmente la grosseur des pores dans le matériau ainsi que leur volume, en diminuant ainsi l'intensité des étreintes capillaires, tout en facilitant l'évaporation de l'eau libre.

Une étude du comportement du béton de fibres soumis à la dessiccation, et dont le retrait est empêché par l'action d'une contrainte de traction [5], a montré que cette dernière est plus faible, pour un béton de fibres que pour un béton témoin (sans fibres) de même composition; ce qui conduit à une augmentation de la résistance à la fissuration du composite.

Donc , la présence de fibres dans le béton diminue notablement le risque de fissuration due au retrait de dessiccation.

3.3 – Durabilité

Comme les propriétés du composite doivent présenter une durée de vie acceptable, compte tenu de sa destination, la fibre utilisée dans le béton, doit être avant tout mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la matrice (Béton ou mortier), et en particulier avec le ciment. Elle doit conserver ses propriétés dans le temps et être d'un coût acceptable compte tenu des performances qu'elle confère à la matrice.

Etant donné que certaines fibres hydrophobes se décomposent dans le temps, plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce problème et ont fini par mettre en évidence un remède qui consiste en l'utilisation de certains additifs organiques (la colophane, le tannin et les huiles végétales) dans le but d'imperméabiliser ces fibres pour les protéger contre l'attaque de l'eau.

Par ailleurs, l'utilisation d'additifs chimiques à caractères acide dans le béton, a pour objectif de produire une réaction avec les composants alcalins du ciment portland et de réduire leurs concentrations. Par conséquent, une augmentation de la résistance à la flexion d'un mortier classique avec ces additifs, sans qu'il subisse un traitement thermique, a été observée dans les résultats d'essais menés par M.F CANOVAS et al [19].

Ainsi, la colophane, de même que le tannin, contient des acides organiques qui réagissent avec les alcalins du ciment hydraté lors de leurs malaxage. Cela est observé par la formation de mousse qui rend le mortier (béton) plastique du fait de la formation

de savons résiniques. De plus, à travers plusieurs tests, il a été prouvé que la colophane réduit le pH d'une solution alcaline, à titre d'exemple, l'utilisation d'une solution de colophane de molarité 4M réduit le pH des solutions de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et NaOH de 12 à 6,5 et 9 respectivement.

Toutes ces observations coïncident avec d'autres études qui indiquent que la colophane est un excellent agent extracteur de cations métalliques des solutions aqueuses, formant des savons résiniques insolubles.

Une bonne connaissance de la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans un mortier (béton), nous informe sur le pourcentage d'additifs à ajouter, pour réduire suffisamment son alcalinité, sachant toujours que cette réduction est liée directement à sa résistance mécanique.

Les fibres végétales ont des caractéristiques variables qui dépendent du type, de l'origine, de l'âge et de l'espèce et cela influence leurs structures et donc leurs compositions chimiques. Les méthodes utilisées pour l'extraction des fibres cellulosiques les détériorent quelque peu (perte de leurs polymères cimentique ou destruction de leurs cristallinité). Les bétons (ou mortiers) de fibres sont aussi affectés par les radiations solaires, la chaleur, les solutions alcalines et par la vapeur d'eau si leur celluloses et hémicelluloses sont sensibles à l'eau. Les bétons de fibres végétales peuvent également être affectés par la friction fibre-matrice, par la fatigue due à l'expansion et à la contraction de la matrice et en outre par la pression exercée par la matrice lors de son durcissement. Ces facteurs peuvent causer des dommages physiques et mécaniques aux fibres tels que : écaillage de leurs surfaces, relaxation de leurs liaisons et destruction de leurs cristallinité. A partir de telles considérations, les imprégnants (additifs) doivent être agglutinés, insolubles dans l'eau et non extractibles par l'eau ni par la vapeur d'eau.

Sachant que les atomes de carbone ont la capacité de former des macromolécules par des liaisons covalentes avec d'autres atomes de carbone, et/ou d'autres hétéro-atomes (l'oxygène, le soufre, l'azote, ...), on utilise pour cela les imprégnants (la colaphane, le tannin et les huiles végétales) dissouts dans des solvants organiques.

Tous ces imprégnants sont extraits du bois, et ne sont pas extractable par l'eau ou par la vapeur d'eau, ils ont de plus, les caractéristiques d'être agglutiné et hydrophobes, et capable de renforcer les liaisons faibles des agents hydrophobes des fibres, remplissant ainsi les lumens de ces dernières et les recouvrant .

Les tannins forment des composants insolubles avec la majorité des sels métalliques, ils sont pratiquement non décomposés et imperméables. Ils ont la capacité

de s'unir avec les carbo-hydrates et de remplir les régions amorphes, protégeant, alors, les fibres des pénétrations d'eau. Le tannin avait divers utilisations tels que la protection des filets de pêche, des plastiques et du cuir et d'autres utilisations dans l'industrie des adhésifs .

La Colaphane est la fraction non volatile de la résine de pin, elle est insoluble dans l'eau mais soluble dans la majorité des solvants organiques et des graisses, elle est composée de plus de 90 % d'acides résiniques, et jusqu'à aujourd'hui, elle a été utilisée principalement dans les industries de papiers, des savons, des peintures, des vernis, des lubrifiants et des colles. Récemment, elle a été utilisée dissoute dans le toluène, avec un grand succès, dans l'extraction de multiples cations métalliques de leurs solutions alcalines, en formant des sels qui sont totalement insolubles dans l'eau.

Les huiles végétales sont des composants insolubles dans l'eau, ayant comme principale caractéristique leurs propriétés de former une couche mince qui fini par se polymériser. La présence de graisses acides dans les huiles engendrent la formation de savons métalliques insolubles dans l'eau et cela en contact avec les solutions aqueuses contenant ces cations métalliques. Ces savons métalliques agissent comme de lubrifiants entre l'interface fibre-matrice. D'un autre côté les graisses sont de mauvais conducteurs de chaleur, ce qui a pour conséquence l'augmentation de la température de ramollissement des fibres ce qui peut être considéré comme un avantage.

L'utilisation de ces imprégnants donne de bons résultats dans la réduction de l'absorption d'eau par les fibres (plus de 50 %), du fait de l'augmentation de la cristallinité. Cette dernière peut être observé par la diffraction aux rayons (X).

Conclusion

A travers ce chapitre on peut retenir qu'il est nécessaire de mesurer l'ouvrabilité par la méthode du NCPT. D'autre part, l'adjonction de fibres améliore le comportement au retrait et à la fissuration. Néanmoins, l'utilisation de produits d'imprégnations semble nécessaire pour améliorer la durabilité.

Partie (II)

ETUDE

EXPERIMENTALE

Chapitre 4

**PRÉPARATION DES B.R.F.N ET IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX
DE BASE QUI LES COMPOSENT**

4.1 – Matériaux de Base des B.R.F.N**4.1.1 – Fibres naturelles****4.1.1.1 – *Composition chimique des végétaux (Palmier et Alfa) préconisés pour l'étude***

La composition chimique du végétal est très importante pour le choix de la nature de la cuisson chimique à adopter pour un végétal pour la préparation de la pâte cellulosique et cela en connaissant le taux des lignines que renferme la plante. Elle nous sert aussi à connaître les proportions des holocelluloses qui définissent à leurs tours les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres à savoir, le pouvoir d'absorption d'eau, la rigidité, la flexibilité et la souplesse de ces dernières.

Les végétaux sont constitués d'holocellulose (Cellulose et hémicelluloses) et des lignines, sa composition varie selon les genres et les espèces (feuillues ou résineuses), le complément est constitué par des cendres et des substances extractibles aux solvants, la répartition de ces substances dans les fibres est différente selon les parois constitutives des fibres (Cf. paragraphe 1.2.2.2).

• Les différents pourcentages des substances chimiques composant les végétaux des pédoncules de palmier et des tiges d'Alfa obtenus au laboratoire de l'INIM de Boumerdes sont regroupés sur le tableau.(4.1)

Composants	Proportions en (%)	
	Alfa	Palmier
Cellulose	42,00	44,40
Hémicelluloses	28,00	19,00
Lignines	19,50	28,60
Humidité	10,00	10,05
Cendres	04,50	07,40
Substances extractibles à l'eau	02,50	06,74
Substances extractibles à l'alcool benzène	01,90	02,30

Tableau (4.1) *Compositions chimiques des végétaux préconisés pour l'étude*

En comparant les taux de lignines que renferment les deux plantes on peut déjà décider sur la nature de la cuisson chimique (élimination des lignines) qui convient le mieux à chaque végétal de telle façon que le taux de délignification (séparation des fibres) soit maximum.

Selon les pourcentages de lignines obtenues expérimentalement, la cuisson à la soude pure conviendrait pour la préparation de la pâte cellulosique d'Alfa tandis que pour les pédoncules de palmier, le procédé KRAFT est plus adéquat.

Le tableau (4.1) montre aussi que la proportion des hémicelluloses contenue dans l'Alfa est sensiblement supérieur à celle du palmier ce qui nous permet de dire que, sous une sollicitation de traction, la fibre d'Alfa peut avoir un domaine visco-élastique plus large que celui de la fibre de palmier [2],[13].

4.1.1.2 – Préparation des fibres

Pour obtenir des fibres entières individuelles, il faudra donc dissoudre les lignines de la lamelle mitoyenne qui servent de liant entre les fibres. Les fibres ayant fait l'objet de notre expérimentation sont à base de pâtes cellulosiques obtenues à la suite de cuissons chimiques alcalines (KRAFT et à la soude pure).

a – Fibres d'Alfa:

Ce sont les fibres obtenues après cuisson à la soude pure (NaOH) des tiges d'Alfa et notamment après assèchement au rayons du soleil de la pâte cellulosique blanchie non raffinée, qui est le produit de la papeterie de BABA-ALI.

b – Fibres de Palmier:

Ce sont les fibres obtenues après cuisson KRAFT des pédoncules de palmier sous forme de pâte cellulosique écrue et non raffinée asséchée au rayons du soleil.

Le régime de cuisson est le suivant :

- Alcali actif 20 % par rapport au volume initial du végétal.
- Sulfité 15 %
- température de cuisson 140°C
- Durée de cuisson 60 minutes

4.1.1.3 – Biométrie des fibres d'Alfa et de Palmier

La biométrie est l'étude de la mesure des dimensions et de la croissance des êtres vivants .

Cette étude s'effectue en se servant d'un microscope équipé d'un micromètre oculaire.

Les dimensions géométriques (fig.4.1) mesurées des deux types de fibres sont consignées dans le tableau (4.2).

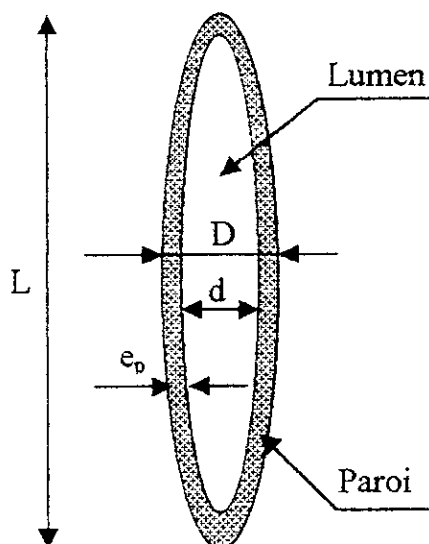


Fig. (4.1) – Coupe longitudinale d'une fibre cellulosique

Dimensions géométriques en (mm)	Fibre d'Alfa	Fibre de Palmier
Longueur moyenne "L"	1,5000	0,9500
Diamètre extérieur moyen "D"	0,0095	0,0125
Diamètre intérieur moyen "d"	0,0055	0,0075
Epaisseur de la paroi " $e_p = \frac{(D-d)}{2}$ "	0,0020	0,0025

Tableau (4.2) Dimensions géométriques des fibres cellulosiques d'Alfa et de Palmier

D'après A.Ramirez-Coretti [15] , les fibres cellulosiques sont classées suivant leurs longueurs de la manière suivante :

Fibres courtes : $0,1 \text{ mm} \leq L \leq 0,9 \text{ mm}$

Fibres moyennes : $0,9 \text{ mm} \leq L \leq 1,2 \text{ mm}$

Fibres longues : $1,2 \text{ mm} \leq L \leq 1,6 \text{ mm}$

Fibres très longues : $L \geq 1,6 \text{ mm}$

Ce classement nous permet de placer les fibres d'Alfa parmi les fibres longues et les fibres des pédoncules de palmier parmi les fibres de longueurs moyennes.

4.1.1.4 – *Masses volumiques et taux d'absorptions d'eau par les différentes fibres*

a – Masses volumiques absolues des fibres en pâtes cellulosiques:

La valeur de la masse volumique absolue des fibres est obtenue par le rapport entre la masse de l'échantillon de fibres sèches et son volume comprimé dans l'état le plus dense possible.

Afin d'obtenir cette densité maximale, des petits échantillons secs de fibres (d'Alfa et de Palmier) ont été pesés sur une balance électronique de précision égale à 1/10000 grs. Puis ils ont été mouillés et comprimés au maximum par la force des doigts à l'aide d'une seringue pharmaceutique de précision égale à 1/10 ml . Les masses volumiques absolues mesurées par cette méthode expérimentale sont portées sur le tableau (4.3).

	<i>M</i> : masse de fibres sèche en (grs)	<i>V</i> : Volume noté sur la seringue en (ml)		$\rho_{\text{abs(moy)}} = M/V$ masse volumique absolue moyenne en (Kg/m^3)	
		Compression par voie sèche	Compression par voie humide	Compression par voie sèche	Compression par voie humide
Pâte cellulosique d'Alfa	1,8390	3,9		462,18	-
	1,8825	4,1	-		
	1,8923	4,1			
	1,7347	3,8			
	1,9546		3,3	-	593,19
	1,9474	-	3,3		
	1,8878		3,2		
	2,0414		3,4		
Pâte cellulosique de Palmier	1,9413	4,0		486,32	-
	1,9940	4,1	-		
	2,0581	4,2			
	1,9386	4,0			
	2,0698		3,2	-	644,87
	1,9973	-	3,1		
	2,0842		3,2		
	1,9112		3,0		

Tableau (4.3) Masses volumiques absolues des fibres

b – Taux d'absorption d'eau:

– Mode Opératoire:

- Peser un échantillon de fibre sec, soit P_1 le poids ainsi mesuré en grammes.
- Bien étaler l'échantillon sur un tamis de 0,08 mm.
- Immerger partiellement le tamis dans un récipient d'eau potable jusqu'à ce que l'échantillon se sature.
- Retirer le tamis de l'eau et laisser l'échantillon s'égoutter pendant quelques minutes en étalant à nouveau l'échantillon sur le même tamis.
- Une fois que l'échantillon est bien égoutté il on le pese à nouveau, soit P_2 le poids trouvé en grammes.

- Expression des résultats et discussions:

On calcule la capacité d'absorption d'eau par un amas de fibres en divisant le poids d'eau absorbée par l'échantillon sec ($W = P_2 - P_1$) par le poids sec de l'échantillon c'est à dire :

$$H = \frac{P_2 - P_1}{P_1}$$

D'après l'étude biométrique que nous avons menée sous microscope (Cf. annexe photo) et on s'appuyant sur le modèle géométrique de la fibre proposé par MORLIER (Cf. fig.4.2), nous avons pu calculer un volume de la fibre que nous appellerons théorique et donc un taux d'absorption "théorique" de nos fibres.

Le tableau (4.4) regroupe les valeurs "expérimentales" (à partir du mode opératoire utilisant la seringue) et "théoriques" (à partir du modèle de MORLIER) du taux d'absorption d'eau pour les fibres de Palmier et d'Alfa.

	$H_{\text{expérimental}}$	$H_{\text{théorique}}$
Fibres d'Alfa	3,10	0,66
Fibres de palmier	2,95	0,68

Tableau (4.4) Taux d'absorption d'eau par les fibres cellulosiques de Palmier et d'Alfa

Ces valeurs voudraient dire que les échantillons secs d'Alfa et de palmier pourraient absorber respectivement des quantités d'eau qui valent 3,10 et 2,95 fois leurs poids. On relève dans la littérature [15], que les valeurs théoriques respectives des taux d'absorptions d'eau seraient de 0,66 et 0,68 celles-ci sont calculées selon l'hypothèse que l'eau absorbée par les fibres occupe uniquement les lumens de ces dernières, (Voir figure 4.2). Mais en réalité la fibre se gonfle une fois qu'elle absorbe de

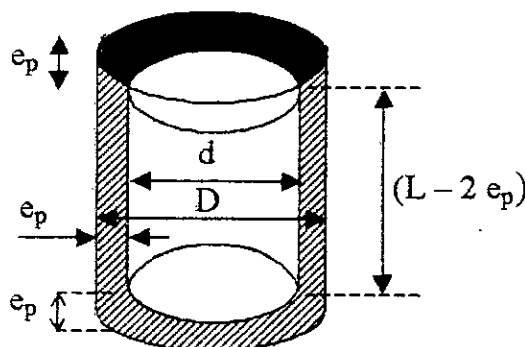


Fig. (4.2) Modèle géométrique de la fibre cellulosique d'après MORLIER . P, [15].

l'eau, de plus l'eau s'intègre facilement dans le tissu de la paroi (eau liée) et stagne d'une façon inévitable entre les fibres (eau libre). Ceci explique donc l'écart relevé.

4.1.2 – Granulats

Le choix des granulats s'est porté sur les matériaux disponibles en fonction de la classe du béton souhaité; leurs caractéristiques physiques sont portées sur le tableau (4.5).

Type de granulat	Sable		Gravillon
	Sable (S ₁)	Sable (S ₂)	
Provenance et nature	Sable roulé d'oued (Tazmalt)	Sable siliceux de dune (Boussaada)	Gravillon concassé (Jobert)
Classe	0 / 5	0 / 0,5	3 / 8
Diamètre maximal D _{max} (mm)	6,3	0,4	10
Module de finesse M _f	2,85	0,72	----
Equivalent de sable ES	86,3 % (lavé)	Propre	----
Masse volumique apparente (t/m ³)	1,59	1,49	1,29
Masse volumique absolue (t/m ³)	2,58	2,67	2,66
Impuretés	4 % (Argile)	----	6,46 % (Fillers calcaire)

Tableau (4.5) caractéristiques physiques des granulats

Dans le but d'avoir une bonne compacité du béton, le sable utilisé dans les différentes gâchées est un sable reconstitué par les deux sables (S₁) et (S₂) d'après l'interpolation d'Abrams [16]. Il est caractérisé par :

83,6 % du sable (S₁) et 16,4 % du sable (S₂), sa courbe granulométrique est représentée par la figure (4.3).

- Sa masse volumique absolue : $\rho = 2,6 \text{ t/m}^3$
- Son équivalent de sable : ES = 88,4 %
- Son module de finesse : M_f = 2,5

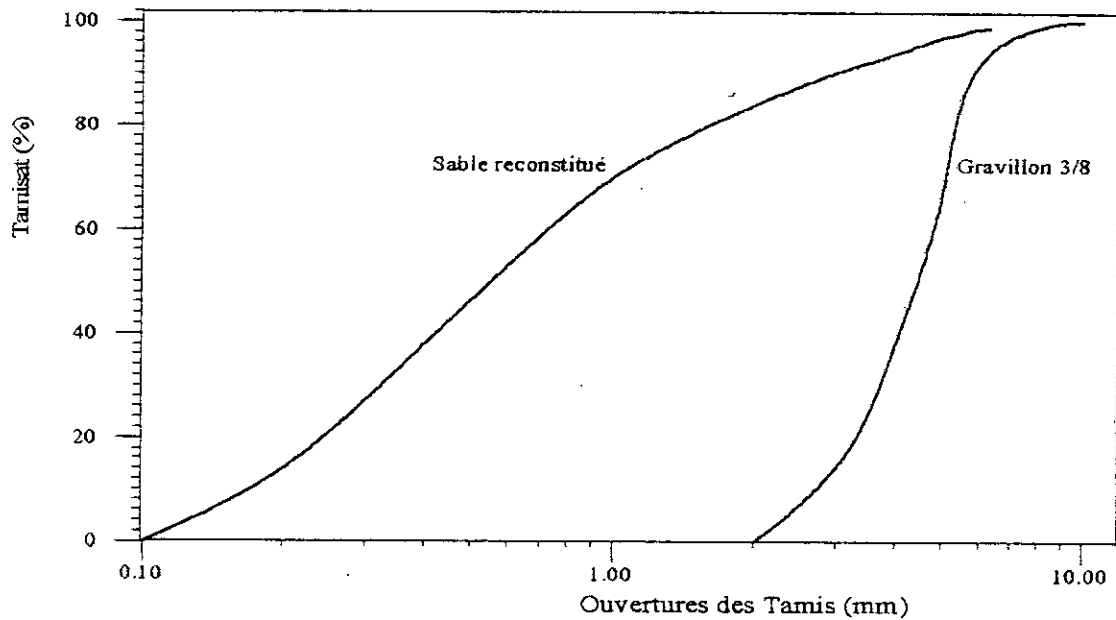


Fig.(4-3) Courbes granulométriques des granulats utilisés

4.1.3 – Liant

Le liant utilisé c'est un CPJ 45 fourni par la cimenterie de MEFTAH avec les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques portées sur le tableau (4.6).

<i>Analyses Chimiques</i>		<i>Essais Physico-mécaniques</i>		
SiO ₂	21,05 %	Masse volumique absolue (t/m ³)	3,02	
CaO	62,98 %	Masse volumique apparente (t/m ³)	1,06	
MgO	1,09 %	Surface spécifique "BLAINE" (cm ² /grs)	3053	
Fe ₂ O ₃	2,83 %	<i>Temps de prise</i>	Début	2 h 20
Al ₂ O ₃	5,47 %		Fin	4 h 02
SO ₃	2,37 %	<i>Expansion (mm)</i>		0,77
Na ₂ O	/	<i>Résistance à la flexion (MPa)</i>	02 jours	4,48
K ₂ O	/		07 jours	6,42
<i>Composition potentielle</i>			28 jours	7,54
C ₃ S	59,14 %	<i>Résistance à la Compression (MPa)</i>	02 jours	17,64
C ₂ S	12,14 %		07 jours	34,14
C ₃ A	9,70 %		28 jours	46,48
C ₄ AF	8,60 %	<i>Consistance Normale</i>		25,25 %

Tableau (4.6) Fiche technique du ciment utilisé (source: laboratoire ERCC Meftah)

4.1.4 – Eau

Dans toutes les gâchées seule l'eau potable du robinet a été utilisée. Sa température est de l'ordre de 20°C.

4.1.5 – Adjuvant

Un adjuvant superplastifiant appelé super-contact a été utilisé. Il présente un caractère fluidifiant et accélérateur de prise. (Cf. en annexe fiche de présentation).

4.2 – Composition des bétons

4.2.1 – Béton témoin

La composition du béton peut être déterminée par différentes méthode (de Bolomey, d'Abrams , de faury de Vallette, de Joisel, de Dreux- Gorisse, de Baron-Lesage, ...).

Dans le programme expérimental, la méthode de Dreux-Gorisse [16] a été utilisée pour déterminer la composition du béton témoin, (béton non renforcé).

Les pourcentages des différents constituants (granulats, liant et eau) dans 1 m³ de béton sont consignés dans le tableau (4.7).

4.2.2 – Bétons renforcés de fibres naturelles (B.R.F.N)

La même composition du béton témoin , a été utilisée pour la confection de la matrice des bétons renforcés de fibres (fibres d'Alfa et de Palmier). On y a incorporé différents pourcentages de fibres en volume, notamment 1, 2 et 2,5 %

La préparation de la gâchée se fait en plusieurs étapes simultanées [17], [18] qui se présentent comme suit :

- Etape n° 01 : On met la pâte de fibres sèche représentée sous forme de petits grumeaux de fibres dans un agitateur à vitesse rapide pendant 10 à 15 minutes avec la quantité d'eau nécessaire pour pouvoir séparer les fibres entre elles.
- Etape n° 02 : Avec un malaxeur à béton on mélange pendant une (01) minute les granulats (Sable et gravillon) avec la moitié de l'eau de gâchage restante.

- Etape n° 03 : On ajoute au mélange précédent la totalité du ciment, et on malaxe le tout pendant une (01) minute en versant la moitié de l'adjuvant.

- Etape n° 04 : Les fibres mouillées récupérées de l'agitateur seront cumulées avec l'autre moitié de l'adjuvant et le reste de l'eau de gâchage dans un seau, pour verser ce dernier dans le malaxeur qui sera arrêté au bout de quatre (04) minutes.

<i>Composition</i>	<i>C : Ciment CPJ45 (Kg/m³)</i>	<i>S : sable (Kg/m³)</i>	<i>G : Gravillon (Kg/m³)</i>	<i>E : Eau (Kg/m³)</i>	<i>J : Adjuvant (% ciment)</i>	<i>E / C</i>	<i>A : affaissement au NCPT (cm)</i>	<i>% air Occlus</i>
BT $V_f = 0\%$	400	618,7	1125,3	228	0,0	0,570	14 (6 cm)*	3,2
BFA $V_f = 1\%$	400	618,7	1125,3	230	1,0	0,575	13,0	3,8
BFA $V_f = 2\%$	400	618,7	1125,3	233	1,4	0,582	15,0	4,2
BFA $V_f = 2,5\%$	400	618,7	1125,3	235	1,5	0,587	15,7	4,5
BFP $V_f = 1\%$	400	618,7	1125,3	228	1,0	0,570	13,7	3,5
BFP $V_f = 2\%$	400	618,7	1125,3	230	1,3	0,575	14,2	4,1
BFP $V_f = 2,5\%$	400	618,7	1125,3	232	1,5	0,580	15,4	4,5
Les dosages C, S, G et E sont donnés dans 1 m ³ de béton frais								

BT : Béton témoin

BFA : Béton de fibres d'Alfa

BFP : Béton de fibres de palmier

V_f : pourcentage de fibres (en volume).

* : Affaissement équivalent au slump-test

Tableau (4.7) Composition des bétons utilisés

4.3 – Essais sur bétons frais

4.3.1 – Ouvrabilité

Afin de pouvoir comparer la variation des caractéristiques mécaniques et physiques des différents bétons (témoin et renforcés de fibres), le maintien d'une ouvrabilité relativement constante s'avère nécessaire . Pour cela on essaye de garder le rapport E/C constant et faire varier la quantité de fluidifiant de telle sorte que la pénétration du N.C.P.T (Voir paragraphe 3.1.1) dans les différents bétons frais soit sensiblement la même, (Cf. tableau 4.7).

4.3.2 – Pourcentage d'air Occlus

Cette mesure se fait à l'aide d'un aréomètre sur une quantité de béton de 6 litres pour les bétons courants (NBN 748-02, 03 et 20).

L'appareil est constitué d'un réservoir de forme évasé dans lequel est compacté le béton. Le couvercle, muni d'un tube gradué et d'un manomètre, est fixé hermétiquement sur le réservoir. De l'eau est introduite dans le tube jusqu'à un repère zéro. Une pression est ensuite appliquée à l'aide d'une petite pompe manuelle. Le pourcentage d'air total est lu directement sur le tube gradué.

Les résultats de cet essai sont portés sur le tableau (4.7).

– Commentaire:

Il est remarqué que le pourcentage d'air occlus croît avec l'augmentation de la fraction en fibres dans le béton. Ceci peut s'expliquer par le fait que les fibres se compriment sous l'action de la pression envoyée par la pompe de l'aréomètre et laissent par conséquent des vides.

4.4 – Nombre et types d'éprouvettes réservées à l'étude

Afin d'examiner les différents bétons, suivant la nature et le type d'essai, on a confectionné des éprouvettes cylindriques 16/32 Cm et d'autres prismatiques 7x7x28 cm. Le nombre d'éprouvettes et leurs répartitions selon les essais correspondants sont regroupées sur le tableau (4.8).

Toutes les éprouvettes ont subi à leurs états frais une vibration pendant 30 à 40 secondes sur une table vibrante à vibrations verticales.

<i>Nature de l'essai</i>	<i>Type de béton</i>	<i>Type d'éprouvette</i>	<i>Nombre d'éprouvettes par type de béton</i>	<i>Observations</i>
Compression simple	B.T BFA et BFP Avec $V_f = 1\%$ $V_f = 2\%$ $V_f = 2,5\%$	16/32 Cm	24	<ul style="list-style-type: none"> • Ecrasement à 7 et à 28 jours • Conservation (Cure) <ul style="list-style-type: none"> - A l'air du laboratoire HR = $65 \pm 2\%$ - Sous l'eau douce à $20 \pm 2^\circ\text{C}$
Traction par flexion	B.T BFA et BFP Avec : $V_f = 1\%$ $V_f = 2\%$ $V_f = 2,5\%$	7 x 7 x 28 Cm	24	Mêmes observations faites pour l'essai de compression simple

Tableau (4.8) Eprouvettes et essais correspondants

*Chapitre 5*ESSAIS SUR BETONS DURCIS(METHODES ET ANALYSES)**5.1 – Essais Mécaniques****5.1.1 – Compression simple**

Afin d'examiner la résistance à la compression des bétons renforcés de fibres d'Alfa et de Palmier, selon la fraction de fibres à incorporer dans le béton et le régime de cure que peut subir ce composite, l'essai de compression a été réalisé à 7 et à 28 jours sur des éprouvettes cylindriques (16/32) sous une presse hydraulique avec une charge continue jusqu'à la rupture, à une vitesse de 9 KN/sec pour les deux régimes de cure (Cf. tableau 4-8).

Les résultats obtenus par cet essai sont représentés par le tableau (5.1) et les courbes des figures (5.1) et (5.2).

5.1.2 – Traction par flexion

La résistance à la traction de ce type de composite est obtenue par l'essai de flexion en quatre (04) points réalisé sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28$ cm âgées de 7 et 28 jours (Cf. tableau 4.8) sous charge contrôlée à une vitesse de 0,14KN/Sec (0,5 bars/Sec); la flèche est mesurée au milieu de l'éprouvette à l'aide d'un capteur inductif de précision (1/100) mm. Des jauges de déformations ont été collées sur les parties tendues des milieux des éprouvettes et reliées à un extensomètre par des fils électriques de faibles résistivité. (Voir Annexe Photos).La lecture des déformations s'est faite pour plusieurs paliers de chargement jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Les résultats des essais sont interprétés par le tableau (5.1) et les courbes représentées par les figures (5.3) à (5.14).

	Type de béton	Résistance à la compression en (MPa)		Résistance à la traction par flexion en quatre points en MPa		F_{128} en (mm)	ϵ_{t28} ($\times 10^6$)
		à 7 jours	à 28 jours	à 7 jours	à 28 jours		
Conservation des éprouvettes sous l'eau douce à $20 \pm 2^\circ\text{C}$	BT	28,00	38,00	2,40	2,94	1,78	56
	BFP 1%	26,00	37,95	1,75	1,90	2,03	98
	BFA 1%	26,00	37,00	1,70	1,84	2,10	100
	BFP 2%	27,50	37,80	1,85	2,00	2,60	130
	BFA 2%	30,00	37,60	1,77	1,98	2,65	120
	BFP 2,5%	29,00	37,60	1,69	1,93	2,70	115
	BFA 2,5%	25,00	37,30	1,36	1,44	2,77	125
Conservation des éprouvettes à l'air du laboratoire $HR = 65 \pm 2\%$	BT	25,00	34,00	2,45	2,71	1,80	69
	BFP 1%	25,00	33,00	2,58	2,80	1,83	95
	BFA 1%	24,00	33,20	2,42	2,71	1,95	95
	BFP 2%	26,00	32,50	2,50	2,90	2,10	113
	BFA 2%	24,00	33,00	2,33	2,87	2,15	89
	BFP 2,5%	24,50	32,00	2,55	2,74	1,92	111
	BFA 2,5%	23,00	32,50	2,30	2,68	1,98	120

BT : Béton témoin

BFP : Béton de fibres de Palmier

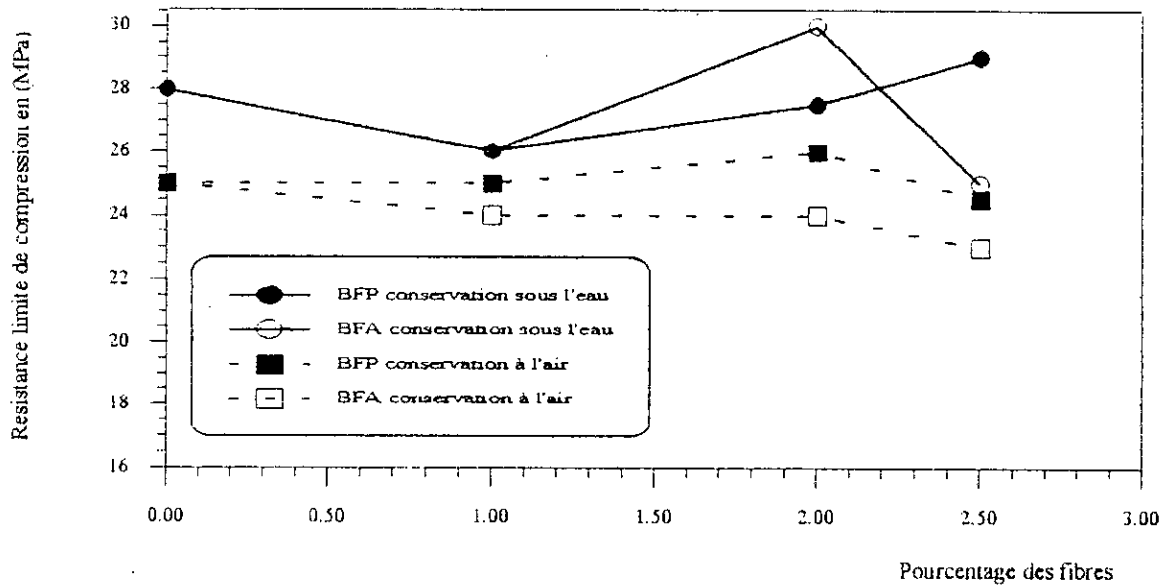
BFA : Béton de fibres d'Alfa

V_f : Pourcentage de fibres (en volume)

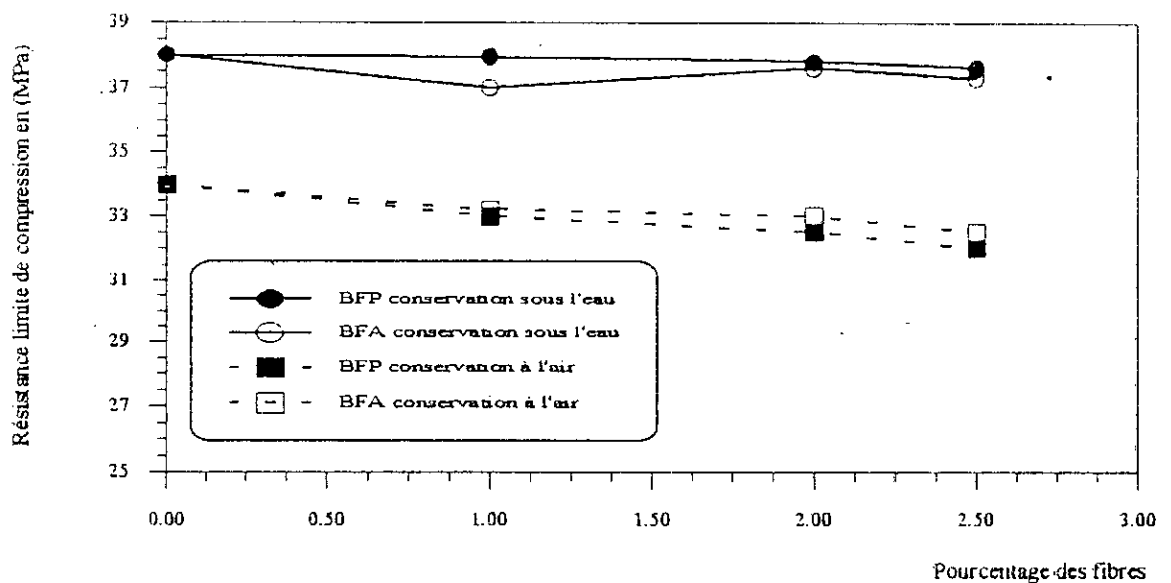
F_{128} : Flèche centrale limite obtenue par l'essai de flexion à 28 jours.

ϵ_{t28} : Déformation de traction à la rupture des éprouvettes soumises à l'essai de flexion à 28 jours.

Tableau (5.1) : Résultats des essais mécaniques réalisés sur les différents composites



Fig(5-1) Influence du pourcentage des fibres sur la résistance à la compression à 7 jours



Fig(5-2) Influence du pourcentage des fibres sur la résistance à la compression à 28 jours

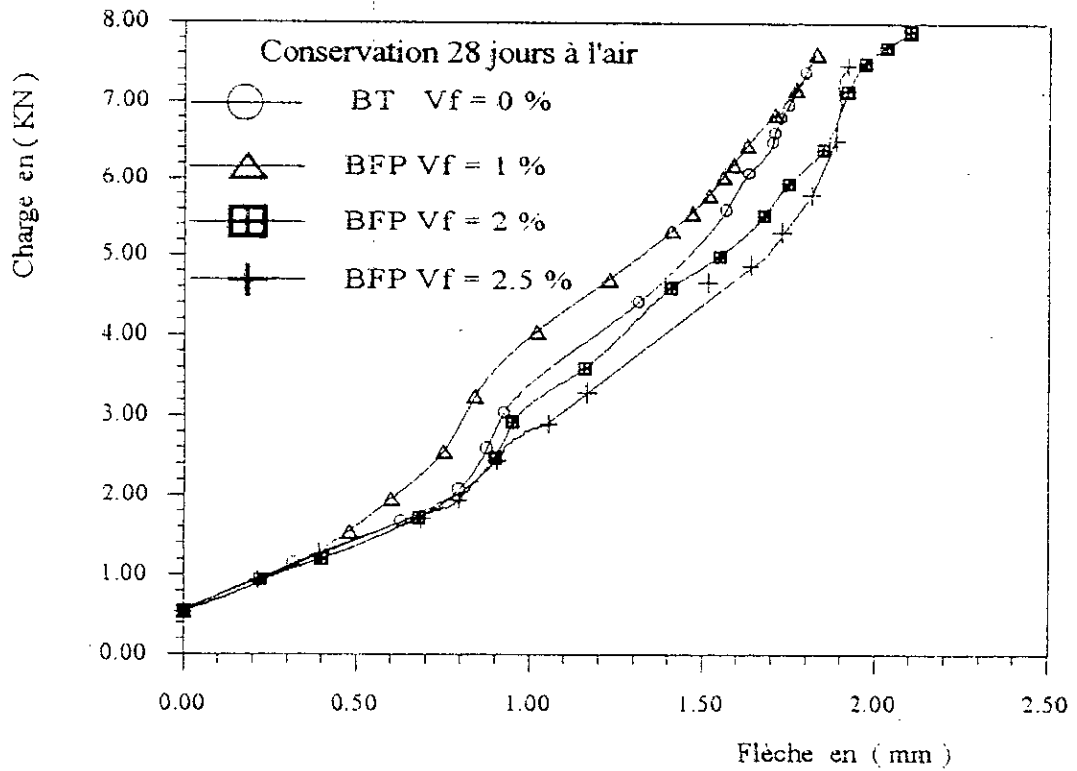


Fig.(5-3) Courbes (charge - flèche) obtenues par les essais de flexion en quatre points sur les éprouvettes de béton de fibres de Palmier conservées à l'air

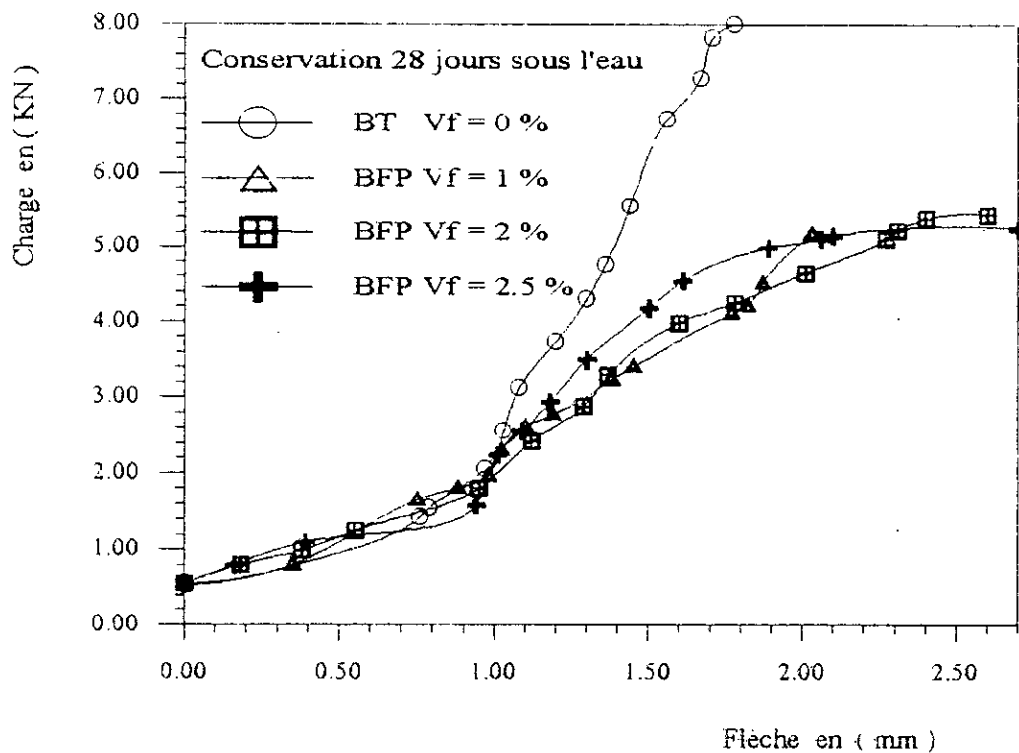


Fig.(5-4) Courbes (charge - flèche) obtenues par les essais de flexion en quatre points sur les éprouvettes de béton de fibres de Palmier conservées sous l'eau

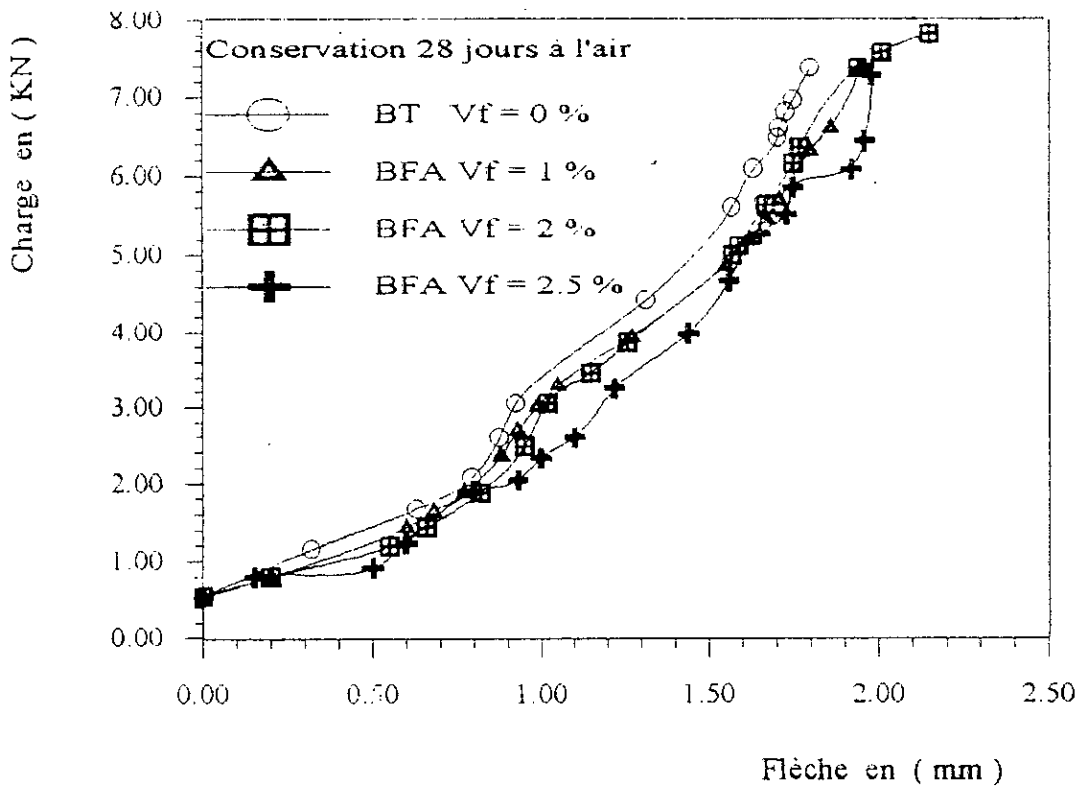


Fig.(5-5) Courbes (charge - flèche) obtenues par les essais de flexion en quatre points sur les éprouvettes de béton de fibres d'Alfa conservées à l'air

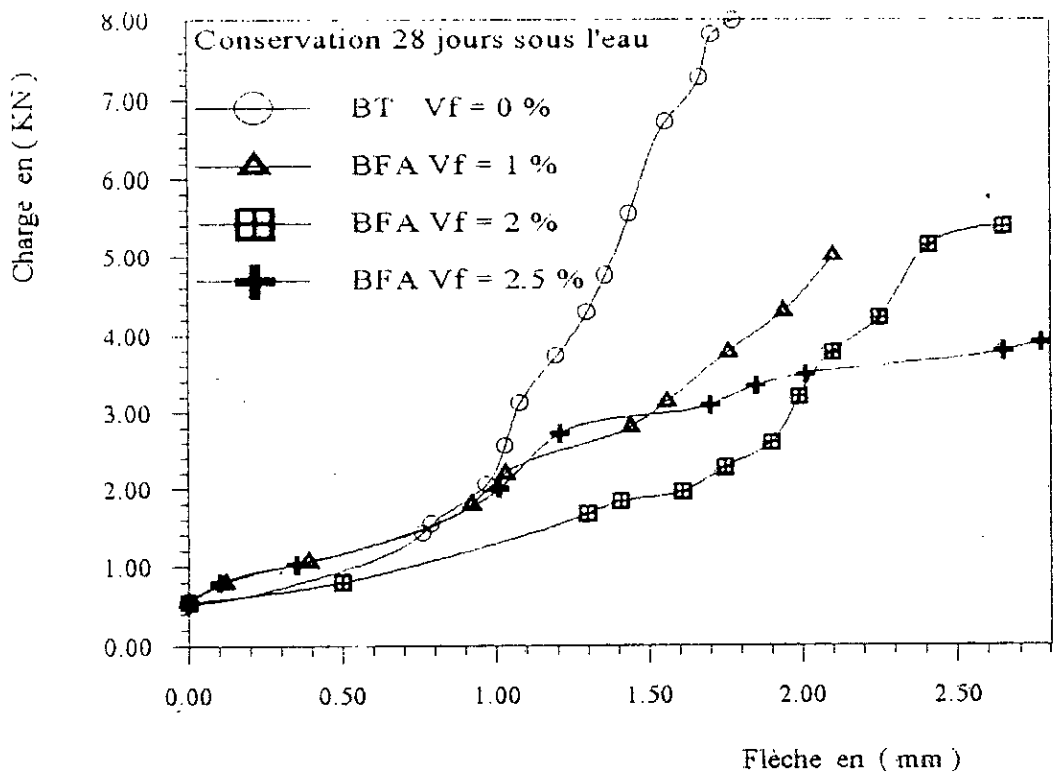


Fig.(5-6) Courbes (charge - flèche) obtenues par les essais de flexion en quatre points sur les éprouvettes de béton de fibres d'Alfa conservées sous l'eau

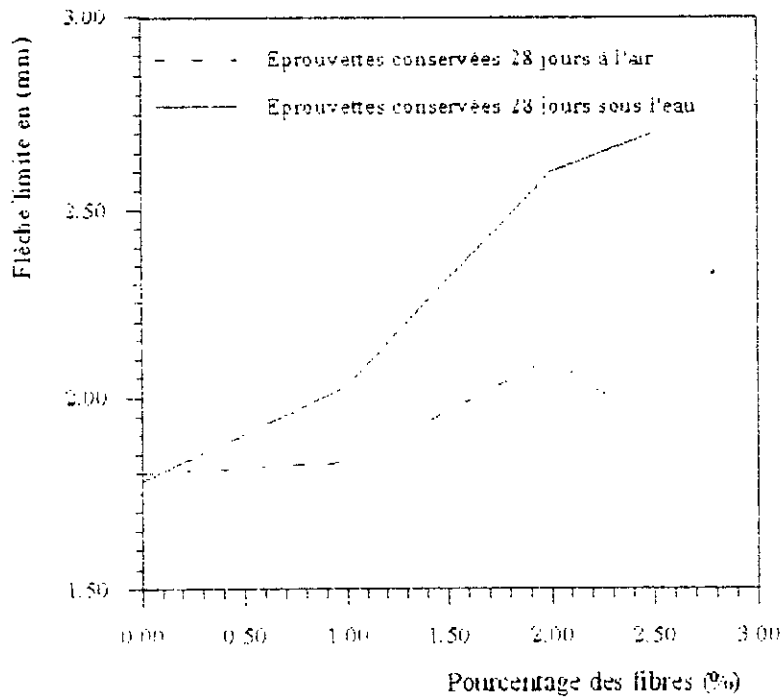


Fig.(5-7) Influence du pourcentage de fibres de Palmier sur la flèche limite du béton renforcé de fibres (essai de flexion en quatre points)

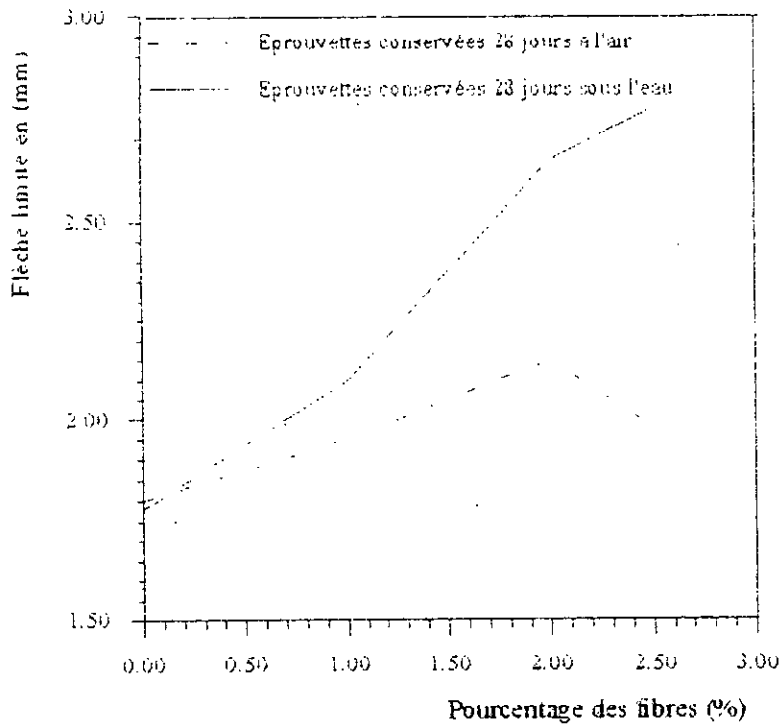


Fig.(5-8) Influence du pourcentage des fibres d'Alfa sur la flèche limite du béton renforcé de fibres (essai de flexion en quatre points)

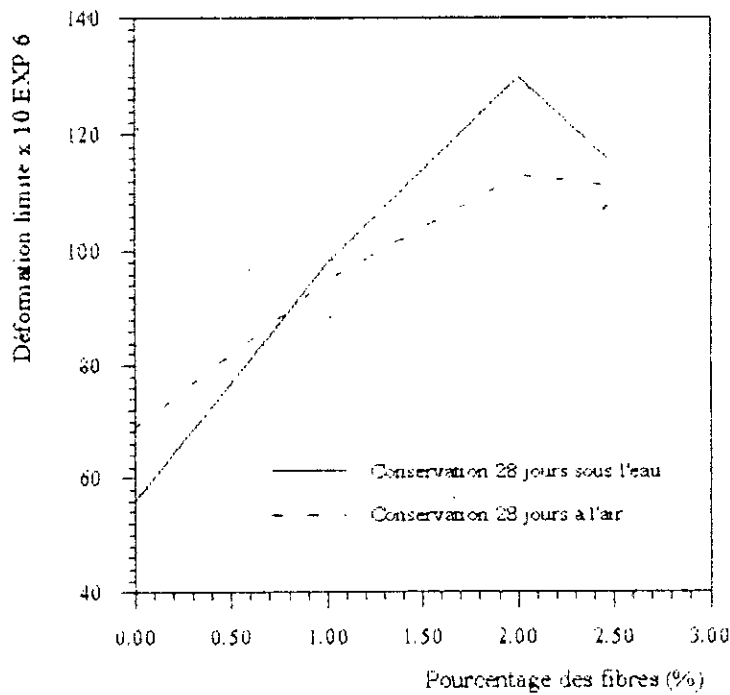


Fig.(5-13) Influence du pourcentage des fibres de Palmier sur la déformation à la traction limite du béton renforcé de fibres (essai de flexion en quatre points)

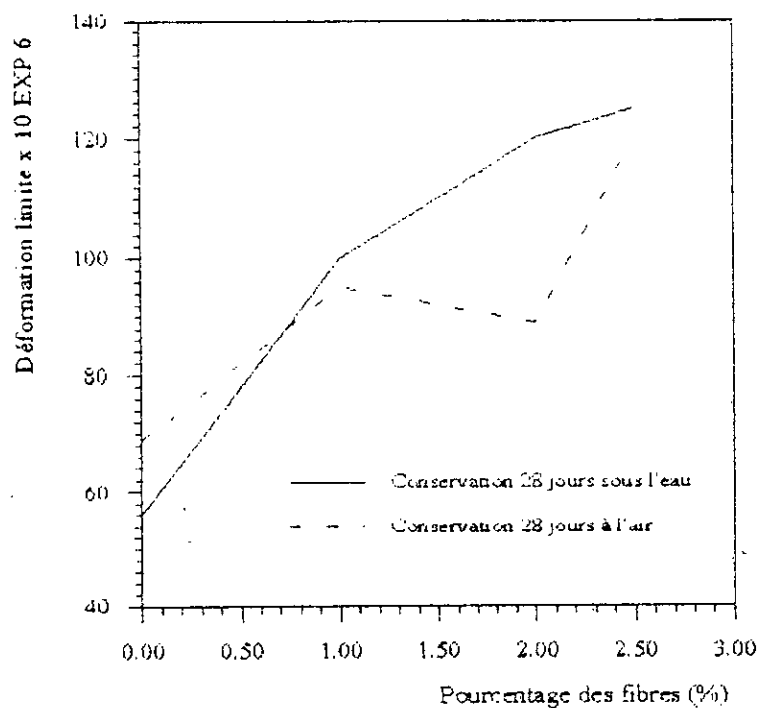


Fig.(5-14) Influence du pourcentage des fibres d'Alfa sur la déformation à la traction limite du béton renforcé de fibres (essai de flexion en quatre points)

5.1.3 – *Interprétations des résultats*

5.1.3.1 – *Résistance à la compression*

On remarque sur la figure(5.2) que l'ajout de fibres dans le béton n'apporte pas une amélioration dans la résistance à la compression, mais il provoque plutôt une très légère diminution de cette dernière ($\approx 1\%$). Ce phénomène pourrait être expliqué par le fait que la présence des fibres dans la matrice perturbe quelque peu celle-ci en y introduisant des vides (effet de voûtes), [20].

5.1.3.2 – *Résistance à la traction par flexion*

Les résultats d'essais, représentés sur les figures(5.9) et (5.10), montrent que les éprouvettes conservées à l'air du laboratoire donnent des résistances à la traction relativement plus élevées que celles, conservées sous l'eau. Ils mettent en évidence, un pourcentage optimal d'ajout de fibres qui serait de 2 %.

Rigoureusement, la résistance à la traction du béton témoin conservé sous l'eau reste meilleure. L'amélioration apportée par les bétons de fibres s'avère relativement négligeable, mais ce n'est pas le cas pour les éprouvettes conservées à l'air du laboratoire.

Explicitement, dans le cas des éprouvettes de béton de fibres conservées à l'air, on assiste à deux mécanismes associés : des fibres déchaussées (mécanisme prépondérant) et des fibres fracturées [15], par contre pour les éprouvettes conservées sous l'eau, l'arrachement (pull-out) des fibres par glissement de ces dernières dans leurs gaines, est le phénomène le plus dominant [15].

Il faut savoir que la fibre cellulosique dans son état sec ou mouillé possède relativement la même résistance à la traction, tandis que la raideur de cette fibre sèche peut atteindre 10 fois la raideur de la fibre mouillée d'après Soroushian P. et al. [18], [21]. Ce qui confirme que les conditions améliorant la résistance à la traction n'améliorent pas forcément la ductilité, voir figures (5.7), (5.8), (5.13) et (5.14).

Et plus précisément, dans un ciment de $\text{pH} > 12,5$ les liaisons C-OH, Si-OH et Ca-OH sont présentes dans le composite, ce qui contribue aux liaisons d'hydrogène qui

font lien entre les fibres cellulosiques et la matrice et entre les fibres elles mêmes. Ces liaisons améliorent bien l'adhérence entre fibres et entre fibre et matrice, lorsque les éprouvettes du composite sont conservées à l'air . Par contre la conservation de ces dernières sous l'eau permet aux molécules d'eau de briser les liaisons d'hydrogènes, ce qui conduit à une chute d'adhérence [18], [21].

CONCLUSIONS

&

RECOMMENDATIONS

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'étude réalisée sur le comportement mécanique du béton renforcé par des fibres de palmier et d'Alfa a montré qu'avec les différents dosages de fibres, la résistance à la compression n'a pas tellement varié, par contre la résistance à la traction a subi une légère amélioration, principalement pour les éprouvettes conservées à l'air du laboratoire. Le pourcentage optimal d'ajout de fibres est estimé à 2% pour les deux types de composites.

La résistance supplémentaire à la traction d'un béton classique apportée par les deux types de fibres est relativement identique; mais, pratiquement, nous optons pour les fibres d'Alfa, compte tenu de leur préparation qui semblerait plus économique.

D'une manière générale, et en vue de définir une méthodologie pour la formulation d'un béton renforcé de fibres naturelles quelconques, une analyse chimique du végétal s'avère nécessaire pour le choix de la nature de la cuisson chimique à adopter au végétal pour la préparation de la pâte cellulosique, et cela en connaissant le taux des lignines que renferme la plante. Elle nous sert aussi à connaître les proportions des holocelluloses (cellulose et hémicelluloses) qui définissent à leurs tours les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres à savoir : le pouvoir d'absorption d'eau, la rigidité, la flexibilité et la souplesse de ces dernières.

Pour la mesure de l'ouvrabilité de ce type de composite (Béton de fibres naturelles), la substitution pour la première fois du cône d'Abrams et du maniabilimètre LCPC par le (New cone penetration test) NCPT nous a facilité l'estimation de la plasticité des bétons de fibres naturelles.

La chronologie des étapes de préparation des gâchées de béton de fibres a fait preuve de ses applications en donnant des composites bien compacts avec les résultats escomptés

Les fibres d'Alfa absorbant plus d'eau que les fibres de palmiers, il est nécessaire de prendre des précautions lors de leur utilisation, du fait de l'éventualité d'avoir un grand retrait du composite (à vérifier par des essais)

Il est certain que l'incorporation de fibres végétales dans une gâchée de béton diminue considérablement son ouvrabilité et augmente le volume des vides. Ceci est dû essentiellement à l'absorption de l'eau par les fibres d'une part (eau liée) et sa stagnation d'une façon inévitable entre les fibres (eau libre) d'une autre part. Mais cela ne veut pas dire que pour remédier à ce problème on doit augmenter la quantité d'eau de gâchage; il est plutôt recommandé d'introduire dans la gâchée un adjuvant (fluidifiant), afin que ce paramètre ne soit pas amélioré au détriment de la résistance du composite.

Du fait que les fibres sont en général, de faibles longueurs et qu'elles n'offrent à l'interface que de très modestes résistances d'adhérence, et afin de compenser ces défauts, un traitement spécial de leurs surfaces est recommandé, par exemple, un raffinage mécanique.

Les méthodes proposées dans le paragraphe (2.3.3) qui servent à quantifier la ductilité du matériau ne peuvent être appliquées que si les essais de flexion à déformation contrôlée sont réalisées. Mais faute d'absence d'équipement adéquat, on s'est trouvé devant l'obligation de réaliser nos essais de flexion sous charge contrôlée.

Pour pouvoir, mieux, estimer les performances de ce type de béton il est nécessaire d'étudier d'autres caractéristiques physiques et mécaniques telles que le retrait, la durabilité, la résistance au choc, voire même faire une étude similaire sur les mortiers de fibres végétales.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] HORNAIN H. -Aspects microstructuraux des bétons renforcés de fibres métalliques - Colloque Francophone. Bethune (Pas-de-Calais) 4 et 5 Juill. 1994, pp. 9-12.
- [2] MONTIES B. - Les polymères végétaux - Gauthier. Villars Bordas, Paris 1980.
- [3] JANIN M. - Structure, composition et formation du bois - A. R. BO. LOR, école d'hiver sur le bois, Jan. 24-29 1983.
- [4] LOUNES M. - Structure de la fibre et l'identification de la pâte - INIL Boumerdes 1980.
- [5] ABSI E. - Béton de fibres (Synthèse des études et recherches réalisées au CEBTP - Annales de ITBTP N°. 520, Jan. 1994, pp. 85-120.
- [6] ATTAR A , SOULIER B. , BREYSSE D. - Application des plans d'expériences à l'essai de traction directe sur béton renforcé de fibres métalliques - Colloque Francophone. Bethune (Pas-de-Calais) 4 et 5 Juill. 1994, pp. 47-56.
- [7] ANDONIAN R. , MAI Y.W. , COTTEL B. - Strength and fracture properties of cellulose fibre reinforced cement composites - Int. Jour. Cement Comps. 1 (3) (1979) 151.
- [8] RUMUALDI J. P , MANDEL J. A. - Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement - J. Amer. Concrete Inst. 61 (6) (1964) 657-670.
- [9] VAN GYSEL A , TAERWE L. - Principes de base d'une méthode pour calculer le comportement après fissuration des bétons renforcés de fibres métalliques soumis à la flexion - Colloque Francophone. Bethune (Pas-de-Calais) 4 et 5 Juill. 1994, pp. 155-161.
- [10] BARA K. , MESKINI A. - Bétons renforcés de fibres (Etude bibliographique) - Rev. Mar. G. Civil n° 39 Juin 1992.
- [11] SACHAN A.K. , KAMESWARA RAO C.V.S. - A cone penetration test for workability of fibre reinforced concrete - RILEM, Nov. 1988, vol. 21 n°. 126, pp. 448 - 452.

[12] - Technique de l'ingénieur - pp. C 2210. 12 - C2210. 16.

[13] RAHIM S. , ZAKARIA M. A. - Carbohydrate content in oil palm trunk and its influence on some characteristics of cement-bonded particle board - 4^o. int. sump. RILEM. Sheffield univ. July 20-23 1992, pp. 1128 - 1139.

[14] RMIREZ-CORETTI A. - Physical_Mechanical properties of fibre cement elements made of rice straw, sugar cane bagasse, banana racquis and coconut husk fibres - 4^o. int. sump. RILEM. Sheffield univ. July 20-23 1992, pp. 1203 - 1213.

[15] MORLIER P. , KHENFER M. - Effet de la longueur des fibres sur les propriétés mécaniques des ciments renforcés de fibres cellulosiques - RILEM, May 1991, vol. 24 n^o. 141, pp. 185 - 190.

[16] DREUX G.- Nouveau guide du béton - Collection UTI _ ITBTP 3^o. ed. 1981.

[17] SARIGAPHUTI M. , SHAH S.P. , VINSON K.D. - Shrinkage cracking and durability characteristics of cellulose fiber reinforced concrete - ACI Materials Journal, July_August 1993, pp. 309 - 318.

[18] SOROUSHIAN P., MARIKUNTE S., WONG J-P. - Statistical evaluation of mechanical and physical properties of cellulose fiber reinforced cement composites - ACI Materials Journal, March_April 1995, pp. 172 - 180.

[19] CANOVAS M. F. , SELVA N. H. , KAWICHE G. M. - New economical solutions for improvement of durability of portland cement mortars reinforced with sisal fibres - RILEM , 1992 , vol. 25 , pp. 414-422.

[20] BARA K. , NACHIR A. - Etude du comportement mécanique des bétons de fibres métalliques - Rev. Mar. G. Civil n^o 46, Août/Sept. 1993.

[21] SOROUSHIAN P., MARIKUNTE S. - Long term durability and moisture sensitivity of cellulose fiber reinforced cement composites.- 4^o. int. sump. RILEM. Sheffield univ. July 20-23 1992, pp. 1166 - 1184.

[22] SWAMY R. N. - New reinforced concretes.- Concrete technology and design, vol. n^o. 2, 1984.

- [23] HERNANDEZ OLIVARES F. , OTEIZA I. - Experimental analysis of toughness and modulus of rupture increase of sisal short fiber reinforced hemihydrated gypsum - Composite structures, vol. 22, n° 3 1992, pp. 123-137.
- [24] ABD-EL-NABY S. F. M. , HOLLAWAY L. , GUNN M. - A simple material model for unidirectionally aligned fibre reinforced composites - Composite Structures, vol. 24 n° 4 1993, pp. 323-331.
- [25] AL-ORAIMI S. M. , SEIBI A. C. - Mechanical characterisation and impact behaviour of concrete reinforced with natural fibres - Composite Structures, vol. 32 Nos. 1-4 1995, pp.165-171.
- [26] MIMOUN M. , GHARBI A. , DOUTENS A. - Mise au point d'un nouveau matériau armé de fibres de verre - Alg. équ. , n° 13, Mai 1994, pp. 13-22.
- [27] MIMOUN M. - Les renforts fibreux utiliser dans les matériaux de construction - Alg. équ. , n° 15, Sept. 1994, pp. 2-7.
- [28] AOUDJ F. Z. , MIMOUN M. , LAQUERBE M. - Etude expérimentale sur les bétons à base de résidus de bois - Alg. équ. , n° 18, Mars/Avril 1995, pp. 24-27.
- [29] CHERAIT Y. - Etude du comportement du béton renforcé de fibres souples soumis à l'effort tranchant - Alg. équ. , n° 22, Nov./Déc. 1995, pp. 2-6.
- [30] AOUDJ F. Z. , MIMOUN M. - Elaboration de matériau composite argile-ciment-bois mis en forme par compression - Alg. équ. , n° 25, Sept. 1996, pp. 20-23.
- [31] SWAMY R. N. , NAAMAN A. E. - Cement and concrete composites - Vol. 12, n° 3 1990.
- [32] SURENDRA P. , FRANCIS YOUNG J. et al. - Advanced cement based materials- Vol. 1, n° 3, March 1994.
- [33] BARA K. , EL KORTBI M. , HADOUDI A. - Composite béton de bois (faisabilité technique et caractérisation des panneaux bois-ciment) - Rev. Mar. G. Civil n° 54, Nov. 1994, pp. 4-18.
- [34] GLADIUS L. , MIRIHAGALIA P. - Natural vegetable fibres as reinforcement in cement sheets - Magazine of concrete research, vol. 31 n° 107, June 1979, pp. 104-108.

- [35] RAMASWAMY H. S. , AHUJA B. M. - Behaviour of concrete reinforced with Jute, Coir, and Bambou fibres - Inter. J. of Cement Composites, vol. 5 n°. 1, Febr. 1983, pp. 3-13.
- [36] MEYER Ch. , GRZYBOWSKI - Damage accumulation in concrete with and without fiber reinforcement - ACI Materials Journal, Nov./Dec. 1993, pp. 594 - 604.
- [37] KANKAM C. K. -The influence of Palm stalk fiber-reinforcement on the shrinkage stresses in concrete - Journal of ferrocement, vol. 24, n°. 3, July 1994, pp. 249-255.
- [38] ABDEL-RAHMAN H. H., AL-JURUFT R. , AHMAD F. - Physical, mechanical and durability characteristics of date palm frond stalks as reinforcement in structural concrete - Int. Journal of cement comp. vol. 10 n°. 3, August 1988, pp. 175-181.
- [39] KALAPRASAD G. , JOSEPH K. , THOMAS S. - Theoretical modelling of tensile properties of short sisal fibre-reinforced low-density polyethylene composites - Journal of materials science n°. 32, 1997, pp. 4261-4267.
- [40] TJIPTOBROTO P. , HANSEN W. - Model for predicting the elastic strain of fiber reinforced composites containing high volume fractions of discontinuous fibers - ACI Materials Journal, Mar./Apr. 1993, pp. 134 - 142.
- [41] DEBICKI G. , SHEKARCHI M. , HOUARI H. - Contribution à la caractérisation du béton armé de fibres métalliques-résultats d'étude rhéologique - Colloque Francophone. Bethune (Pas-de-Calais) 4 et 5 Juill. 1994, pp. 23-36.
- [42] ATTAR A. , SOULIER B. , BREYSSE D. - Application des plans d'expériences à l'essai de traction directe sur béton renforcé de fibres métalliques - Colloque Francophone. Bethune (Pas-de-Calais) 4 et 5 Juill. 1994, pp. 47-55.
- [43] ARMINJON M. , BOTTERO A. , GUESSAB B. - Résistance limite d'un micro-béton renforcé par un réseau de fibres orientées - Colloque Francophone. Bethune (Pas-de-Calais) 4 et 5 Juill. 1994, pp. 117-137.
- [44] DJEBRI B. - Le comportement des bétons (bétons hydrauliques et de fibres métalliques) et leur modélisation sous sollicitations multiaxiales - Thèse d'état présentée à l'inst. nat. des Sc. app. de Lyon en 1992.

[45] SWAMY R. N. - Fibre reinforced cement concrete - 4^o. int. sump. RILEM, Sheffield univ. July 20-23 1992.

Normes

[1] NF P 18-400 : Moules pour éprouvettes cylindrique et prismatiques.

[2] NF P 18-404 : Essais d'étude de convenance et contrôle.

[3] NF P 18-405 : Confection et conservation des éprouvettes.

[4] NF P 18-406 : Essai de compression.

[5] NF P 18-407 : Essais de flexion.

[6] NF P 18-421 : Mise en place par microtable vibrante.

[7] NF P 18-452 : Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres.



ANNEXE

1-fibre de noix de coco:

La cultivation du noix de coco est concentrée dans les régions tropicales d'Asie et d'Afrique de l'est. L'externe couverture du noix de coco mûr est une matière fibreuse.

Les fibres ont normalement une longueur de 150 à 350 mm et constituées principalement de cellulose, d'autres substances solubles dans l'eau. Les fibres sont extraites habituellement par un processus connu par "retting" dont la plupart d'autres substances que la cellulose sont décomposées. Les fibres sont séparées aussi de la cosse par un processus mécanique. Les propriétés physiques des fibres de noix de coco varient légèrement d'une région à une autre. Les propriétés typiques d'une variété commerciale sont

données dans la table (1)

La figure (1) montre la relation typique contrainte de traction - déformation de la fibre de noix de coco. [22]

Table, (1), propriétés typiques des fibres de noix de coco . [22]

1. Poids spécifique	1.12-1.15
2. Densité apparente, kg/m ³	145-280
3. Longueur de la fibre, mm	50-350
4. Diamètre de la fibre, mm	0,10-0,40
5. Effort de traction ultime, N/ mm ²	120-200
6. Module d'élasticité, kN/ mm ²	19-26
7. Allongement à la rupture, pourcent	10-25
8. Absorption de l'eau, pourcent	130-180

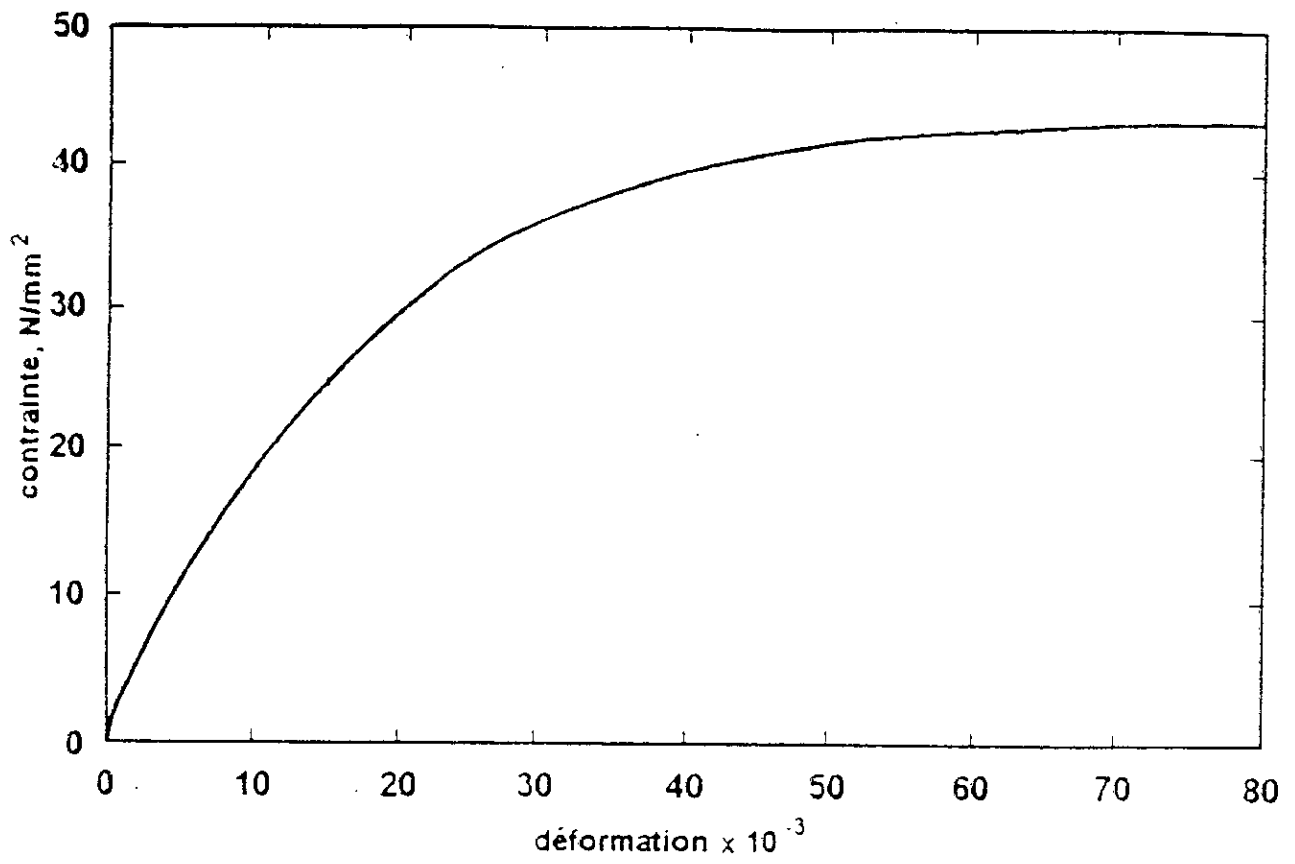
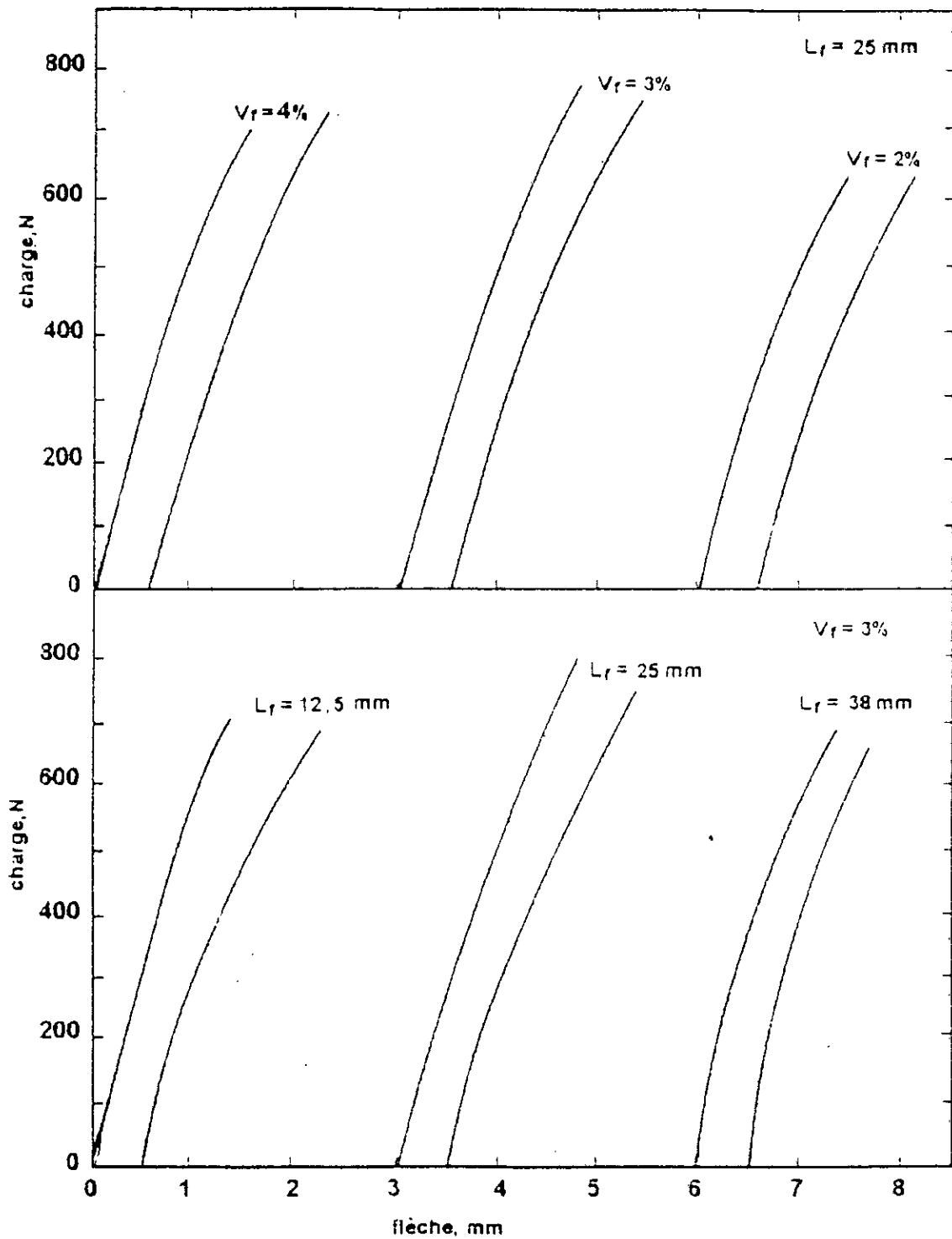


Figure (1) -Relation typique $\sigma - \varepsilon$ des fibres de noix de coco¹²



Fig(1. bis) - Courbes charge - flèche des dalles renforcées de fibres de noix de coco .[22]

2-Fibre de Sisal :

Le sisal est l'une des fibres naturelles les plus fortes. Sa traditionnelle utilisation comme renfort pour les panneaux de plâtre au gypse dans l'industrie du bâtiment australienne qui a créé un intérêt pour quelques groupes de recherche et firmes de construction surtout en Suède pendant les quelques dernières années sur l'utilisation de ces fibres pour produire un B.R.F.N. de bonne qualité.

Il y a plusieurs classes de fibres commerciales de sisal qui diffèrent par leurs propriétés. Les propriétés typiques des fibres de sisal sont données dans la table (2), [22]

Table (.2) propriétés Typiques des fibres de sisal, [22]

1. Densité apparente, kg/ m ³	700-800
2. Effort de traction ultime, N/ mm ²	280-568
3. Module d'élasticité, kN/ mm ²	13-26
4. Allongement à la rupture, pourcent	3-5
5. Absorption de l'eau, pourcent	60-70

3.fibre de la canne à sucre :

Les fibres de la canne à sucre sont obtenues du résidu fibreux de la production du sucre de la canne après extraction du jus des tiges de la canne. La canne à sucre peut dépasser les 6 m de hauteur selon l'espèce et la région de la culture. Le diamètre de la canne peut aller jusqu'à 6 centimètres. La culture de la canne à sucre est concentrée dans les régions tropicales où l'humidité est suffisante.

Le résidu de la production du sucre de la canne contient essentiellement des fibres (50 à 55%). Sa composition varie selon la variété de la canne, sa maturité, et la méthode de récolte. Les propriétés typiques des fibres de la canne à sucre sont données dans la table (3) et la relation contrainte - déformation dans la figure (3). [22].

Table(3.) propriétés Typiques des fibres de la canne à sucre, [22]

1. Poids spécifique	1,20-1,30
2. Longueur de la Fibre, mm	50-300
3. Diamètre de la Fibre, mm	0,2-0,4
4. Teneur en eau, pourcent	15-20
5. Absorption de l'eau, pourcent	70-75
6. Effort de traction ultime, N/mm ²	170-290
7. Module d'élasticité, kN/mm ²	15-19

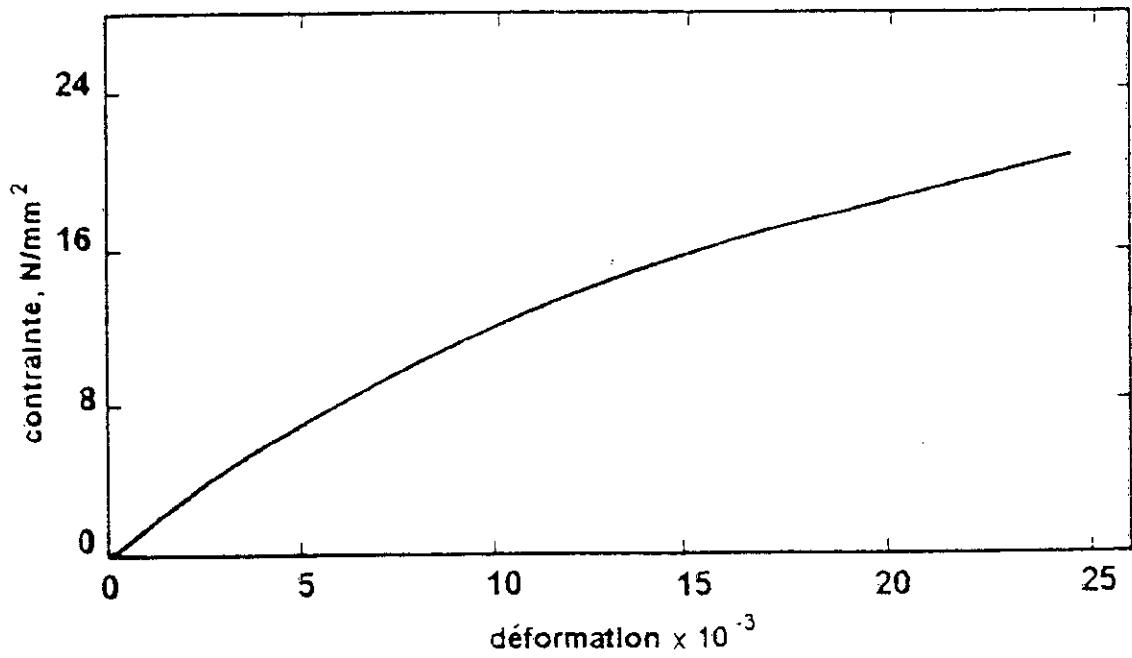


Figure 2. - Relation typique $\sigma - \varepsilon$ des fibres de la canne à sucre, [22]

4. fibre du Bambou

Comme une végétation naturelle, le bambou pousse en abondance dans les régions tropicales. Le bambou peut dépasser 15 m de hauteur, avec un diamètre de 25 à 100 mm. Les fibres du bambou sont extraites par un appareil spécial.

Les fibres du bambou sont remarquablement fortes en tension mais ils ont un module d'élasticité faible et une haute capacité d'absorption de l'eau. La relation contrainte - déformation des fibres du bambou est montrée dans la figure 3 . et leurs propriétés typiques sont données dans la table (.4)

Les valeurs de l'absorption d'eau, l'effort de traction ultime, et le module d'élasticité sont de 40 à 45 %, 350 à 500 N/mm² et 33 à 40 kN/mm² respectivement. [22]

Table (.4) Propriétés des fibres du bambou, [22]

1. Poids spécifique	1,52
2. Périphérie moyenne, mm	1,24
3. Section moyenne, mm ²	0,10
4. Effort de traction ultime.	442,00
5. Module d'élasticité, kN/ mm ²	37,00
6. Contrainte d'adhérence (pull out test), N/mm ²	1,96

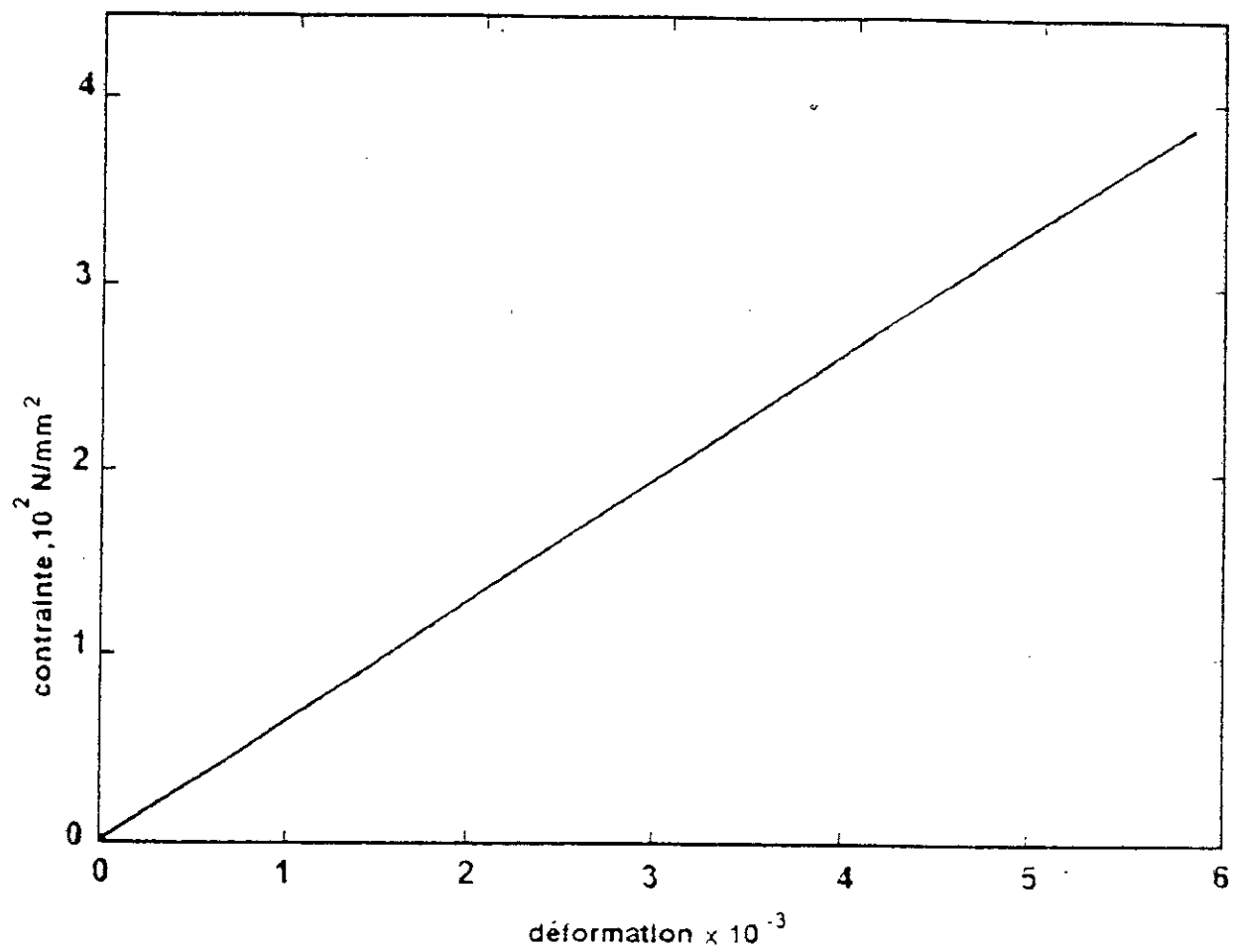


Figure 3. - Relation typique $\sigma - \varepsilon$ des fibres du bambou, [22]

5. fibre de jute

Le jute pousse abondamment dans le Bangladesh, l'Inde, la Chine et la Thaïlande. Les fibres de jute sont extraites de l'aboiement fibreux de la plante de jute qui peut atteindre 2,5 m de hauteur avec un diamètre de la tige à la base d'environ 25 mm. La méthode de l'extraction de la fibres des plantes de jute est simple. Les plantes mûres sont coupées en bas, et attachées en paquets et submergés dans l'eau environ quatre semaines, pendant lesquelles l'aboiement se décompose complètement ce qui fait que

les fibres apparaissent. Les fibres seront alors extraites manuellement des tiges, lavées et séchées au soleil.

Il existe des différentes variétés de fibres de jute dont les propriétés sont variables. La relation typique contrainte - déformation de la fibre de jute est montrée par la Figure (4) et les propriétés typiques sont données dans la table (5), [22].

Table (.5) Propriétés des fibres de jute ,

1. Longueur de la Fibre, m	1,8-3,0
2. Diamètre de la Fibre, mm	0,1-0,2
3. Poids spécifique	1,02-1,04
4. Effort de traction ultime, N/mm ²	250-350
5. Module d'élasticité, kN/mm ²	26-32
6. Allongement à la rupture, %	1,5-1,9

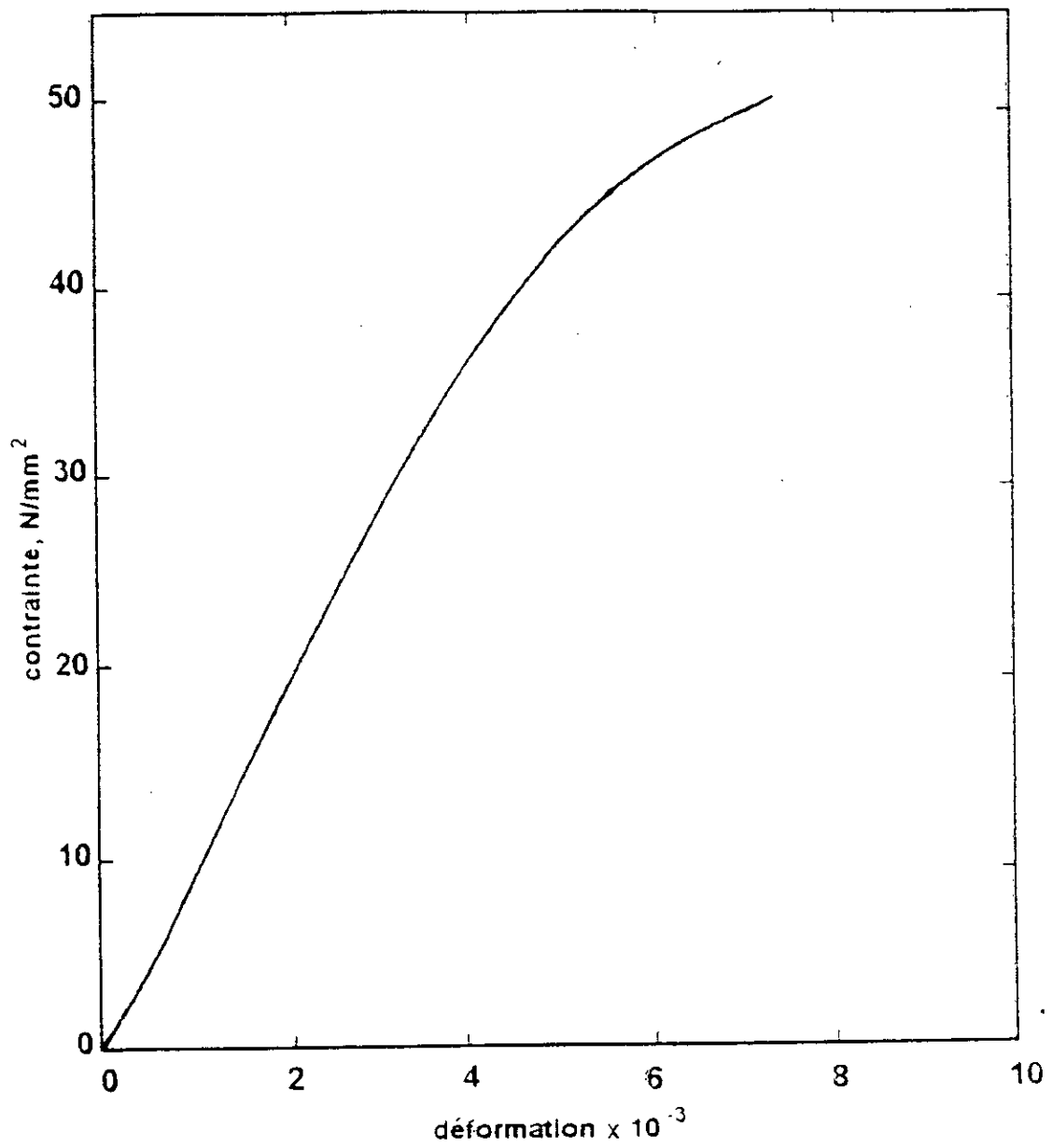


Figure (.4)-Relation typique $\sigma - \varepsilon$ des fibres de jute,[22]

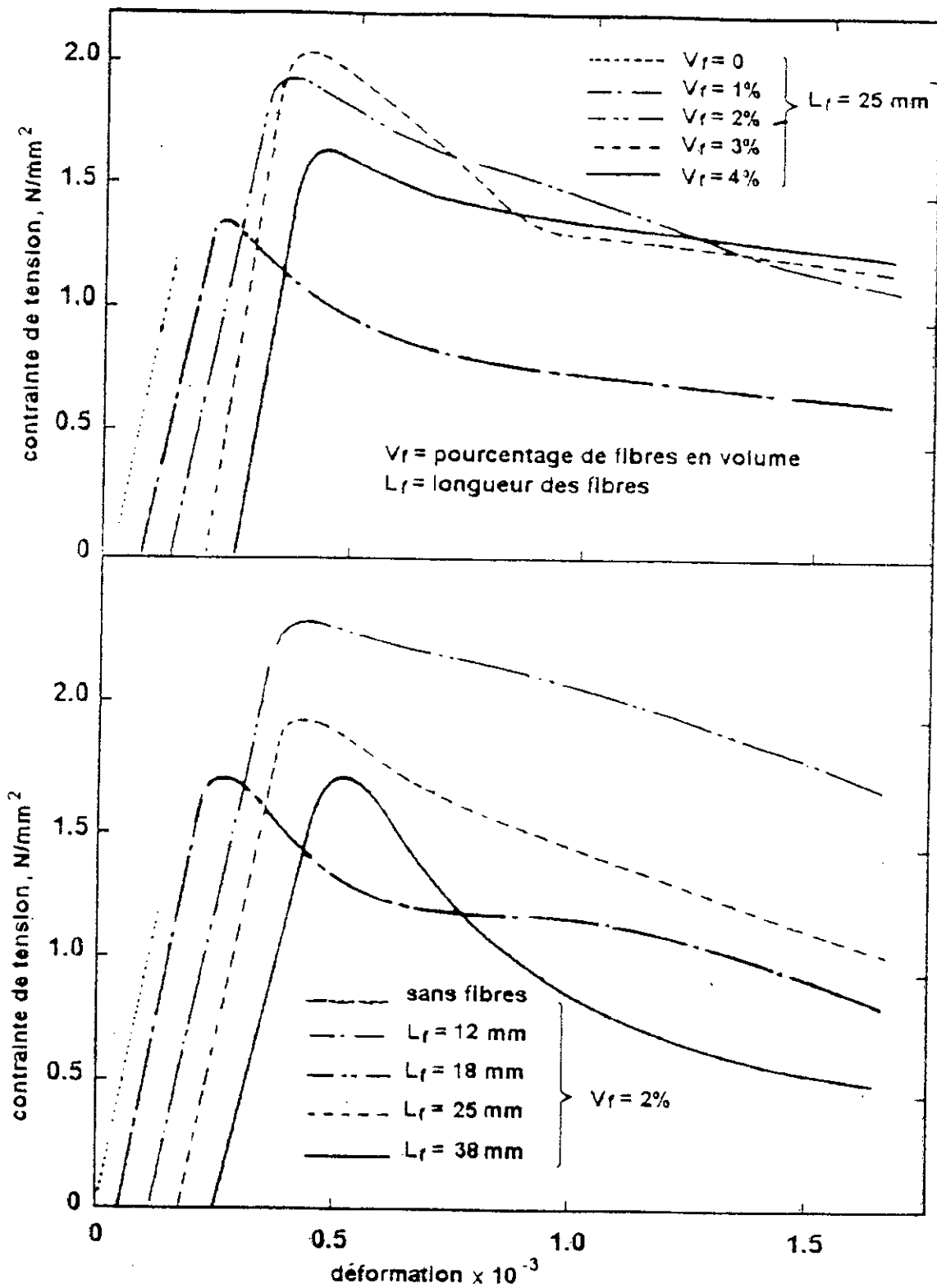


Figure .(5)-Comportement mécanique des composites de ciment renforcés de fibres de jute, [22]

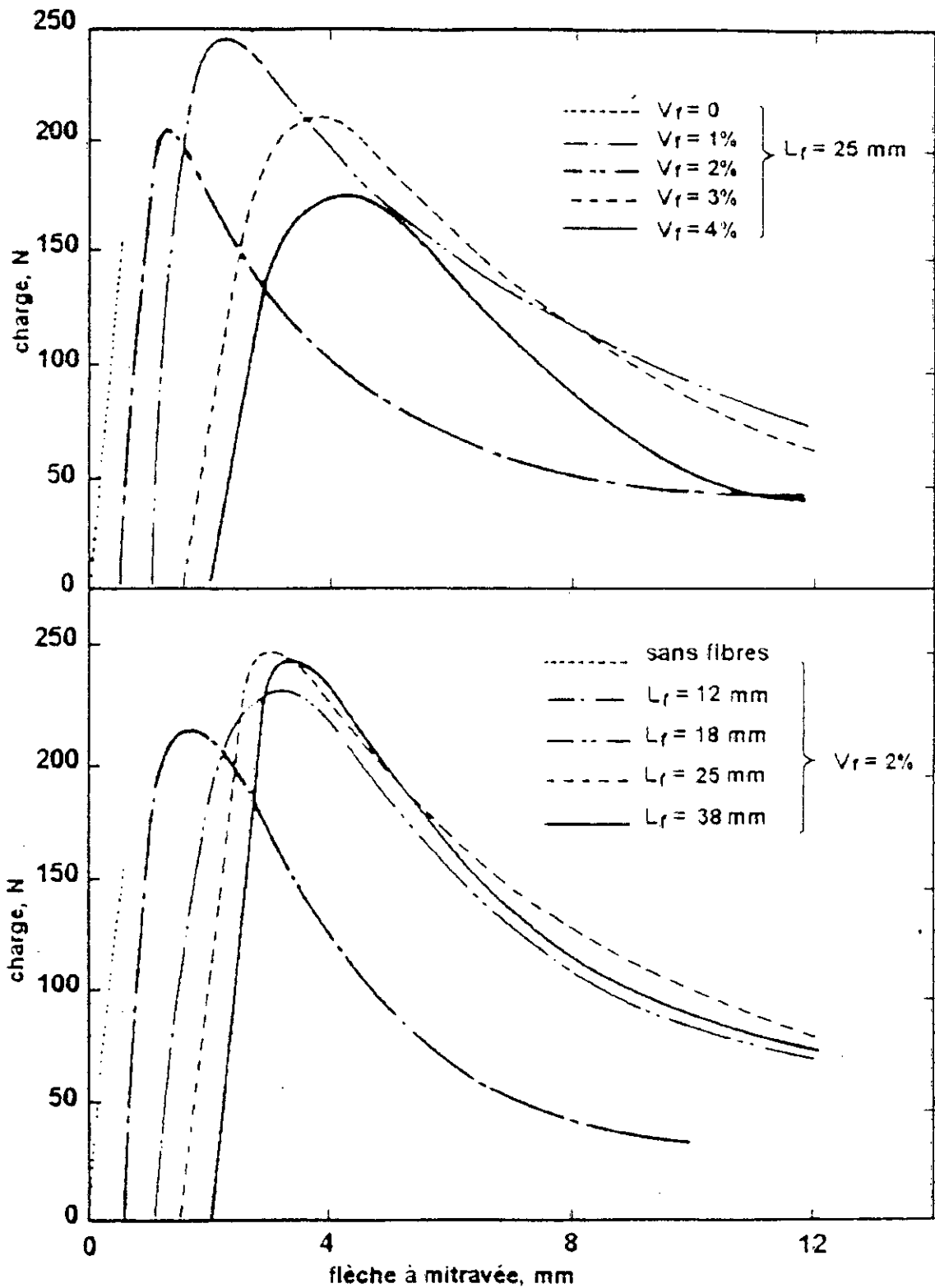


Figure (.6)-Courbes charge - flèche des composites de ciment renforcés de fibres de jute .[22]

6, fibre de lin :

Le lin est une grande plante, semée dans beaucoup de pays du monde pour ses fibres. Les fibres de lin sont fortes et solides (Table . 6). [22]

Table (.6) Propriétés des fibres de lin .[22]

1. Longueur de la fibre, m	0,5
2. Effort de traction ultime, N/mm ²	100
3. Module d'élasticité, kN/mm ²	100
4. Allongement à la rupture, pourcent	1,8-2,2

7. fibre du Bois

Les fibres du bois sont obtenues généralement d'arbres de bois tendre (conifères) comme le pin, le sapin et le mélèze. Les copeaux du bois sont trempés dans l'eau contenant le sulfate de sodium et seront placés par la suite dans un défibreur sous une pression pendant un certain temps. Le défibreur tourne alors avec un certain nombre de tours par minute pendant un certain temps bien définies. La pulpe résultante est alors lavée et ensuite séchée à l'air. Les fibres du bois sont fortes et solides.[22].

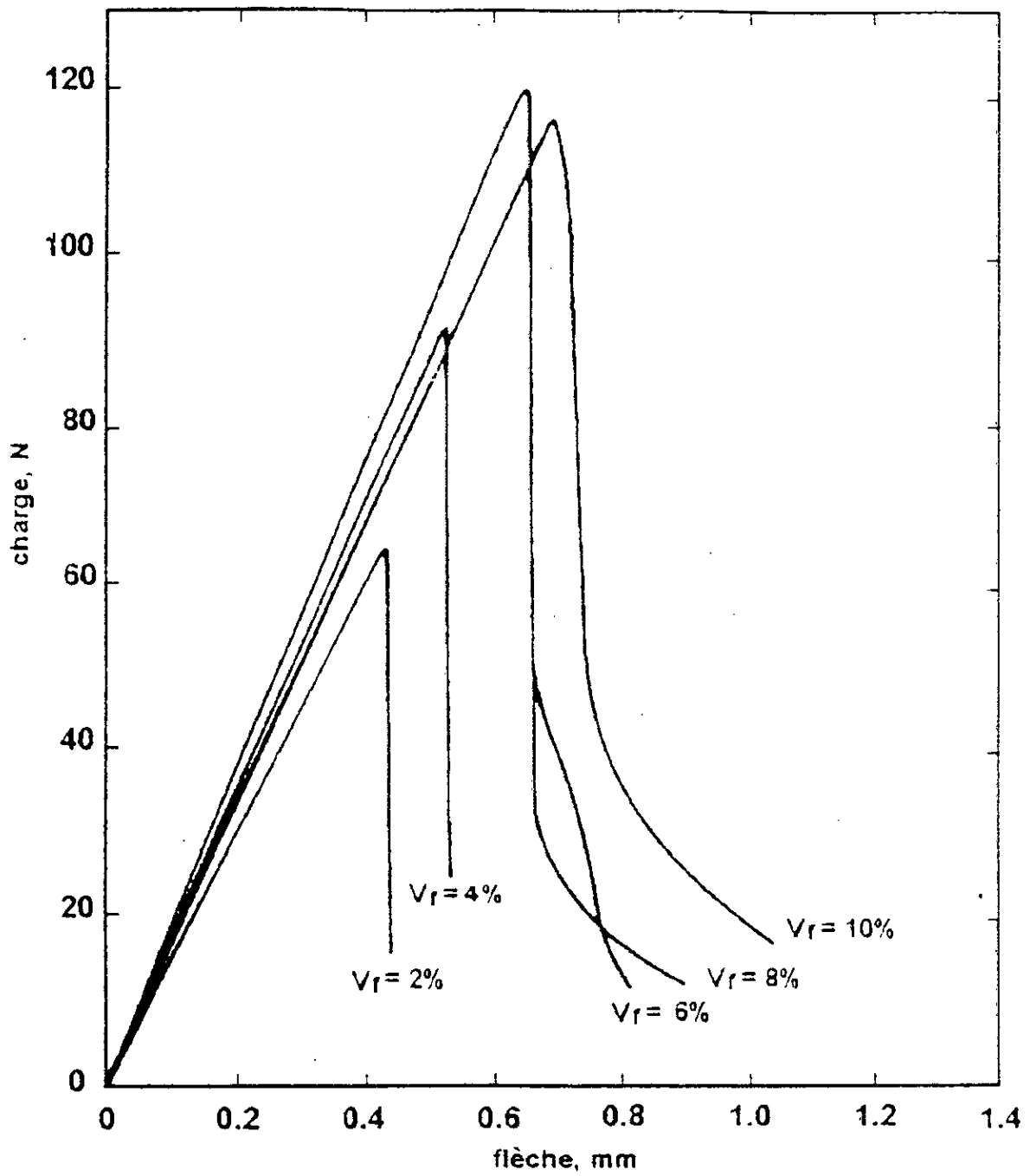


Figure (7) - Courbes charge - flèche des composites renforcés de fibres de bois. [22]

8. Autres fibres végétales :

Différents types de fibres végétales sont disponibles dans la plupart des pays en voie de développement. Seulement cinq fibres :

akwara, herbe de l'éléphant, roseau de l'eau, plantain et musamba, sont donc prêtes à être des matériaux de renfort.

Akwara est disponible au Nigeria et quelques autres pays du monde, il est constitué d'une gaine de fibres.

La gaine est constituée de cellules de nombreuses fibres, et les fibres d'akwara sont obtenues de ces cellules. La géométrie d'une fibre est variable, sa section peut être circulaire, rectangulaire, ou elliptique sur le long de la fibre. L'équivalent diamètre varie entre 1 et 4 mm. Les fibres sont habituellement de 1,5 m de longueur, et de poids spécifique d'environ 0,96 .

L'herbe de l'éléphant est une plante qui se trouve près des cours d'eau, des rivières et des ruisseaux. Il peut atteindre 3 m de hauteur, mais la hauteur moyenne est de 2,2 m et le diamètre moyen est de 20 mm. La croûte de sa tige est mince et fibreuse et les fibres sont extraites principalement de la croûte. Les fibres sont dures et tranchantes et par conséquent l'extraction manuelle est difficile. Les propriétés de l'herbe d'éléphant sont données dans la table 7 qui illustre que la fibre de l'herbe de l'éléphant a le plus grand effort de traction.

Le roseau de l'eau est une plante qui se trouve abondamment sur les banques de rivières, ruisseaux, et lacs dans beaucoup de pays. Sa hauteur est de 2 à 3 m. Le diamètre de la tige mûre peut dépasser 20 mm. La tige est constituée d'un vide interne et une forte croûte fibreuse d'environ 5 mm d'épaisseur. Les fibres sont

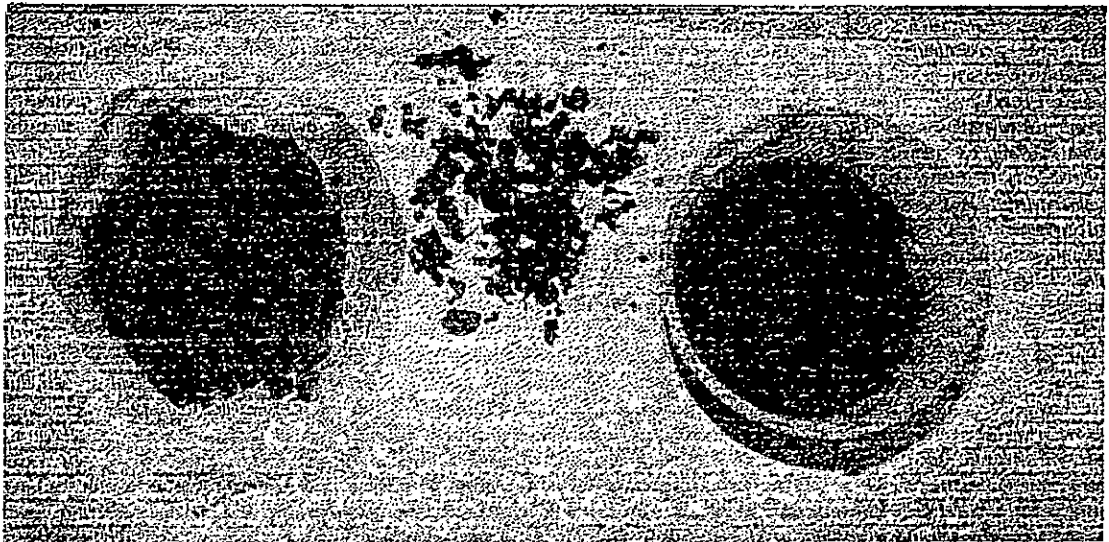
extraites de la croûte. Les propriétés de la fibre sont données dans la table .7 qui montre la supériorité des fibre du roseau de l'eau en ce qui concerne le module d'élasticité.

Plantain est une plante tropicale, appartient à la famille de la banane. Le tronc est fibreux et les fibres sont extraites facilement par la main. Les fibres sont modérément fortes et flexibles (Table .7).

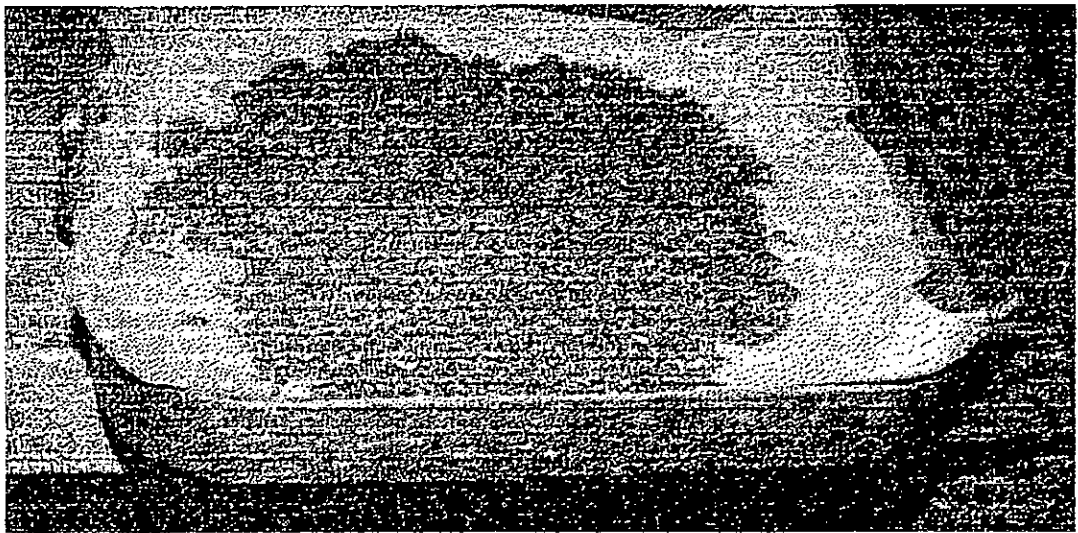
Musamba est un arbre de bois dur qui pousse abondamment dans beaucoup de pays. Le tronc de l'arbre est fibreux. Les fibres sont dures et modérément fortes (Table .7). L'extraction des fibres est assez difficile. [22]

Table (.7) Propriétés physiques et mécaniques de quelques fibres végétales.[22].

Type de la fibre	Force de traction en Mpa	Déformation max. (%)	Module d'élasticité en Mpa
Herbe d'éléphant	178	3,60	4936
Roseau de l'eau	70	1,19	5193
Plantain	92	5,90	1436
Musamba	83	9,70	0941



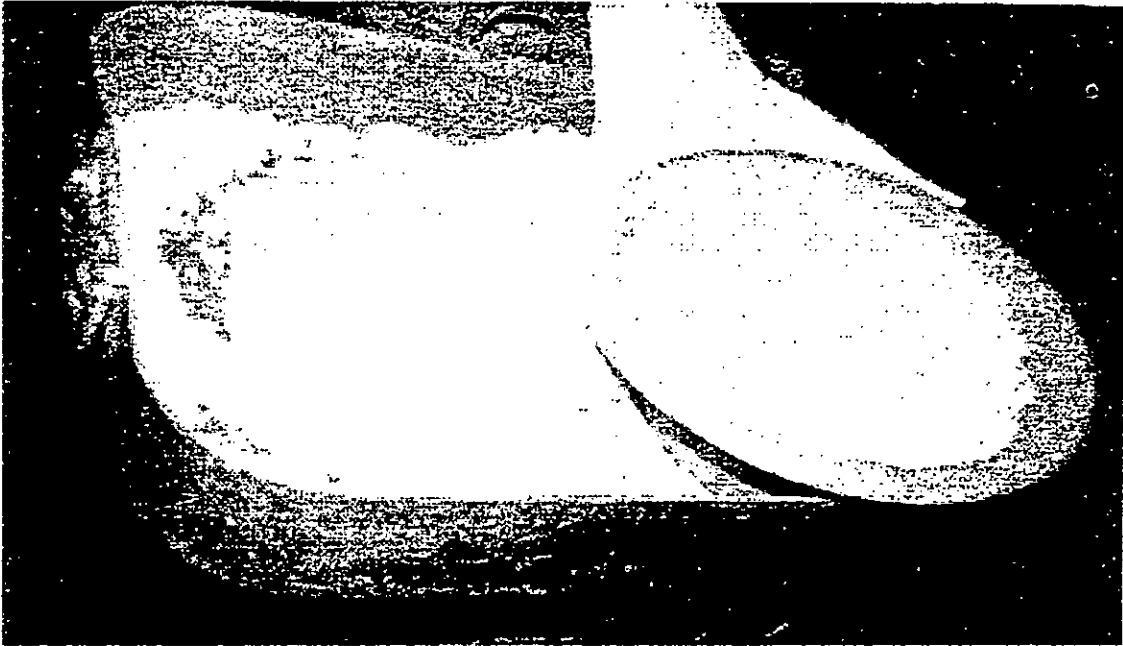
(a)



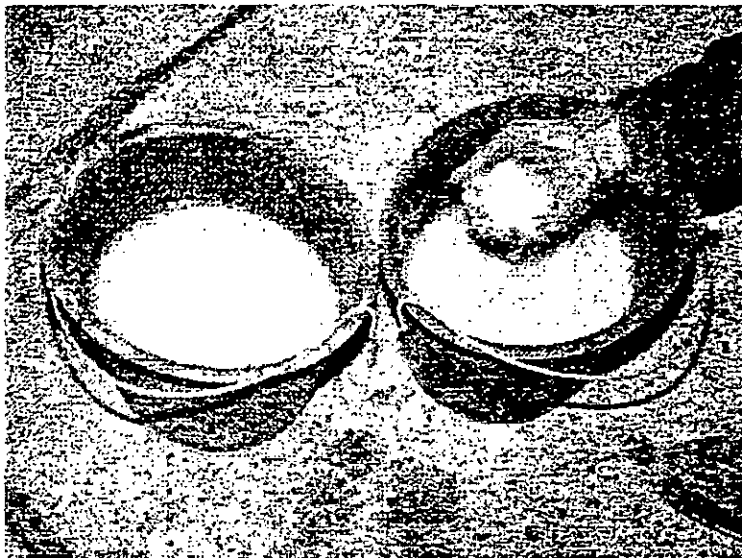
(b)

a - Elimination de la liqueur noire de la pâte cellulosique de Palmier après cuisson chimique.

b - Pâte cellulosique asséchée .



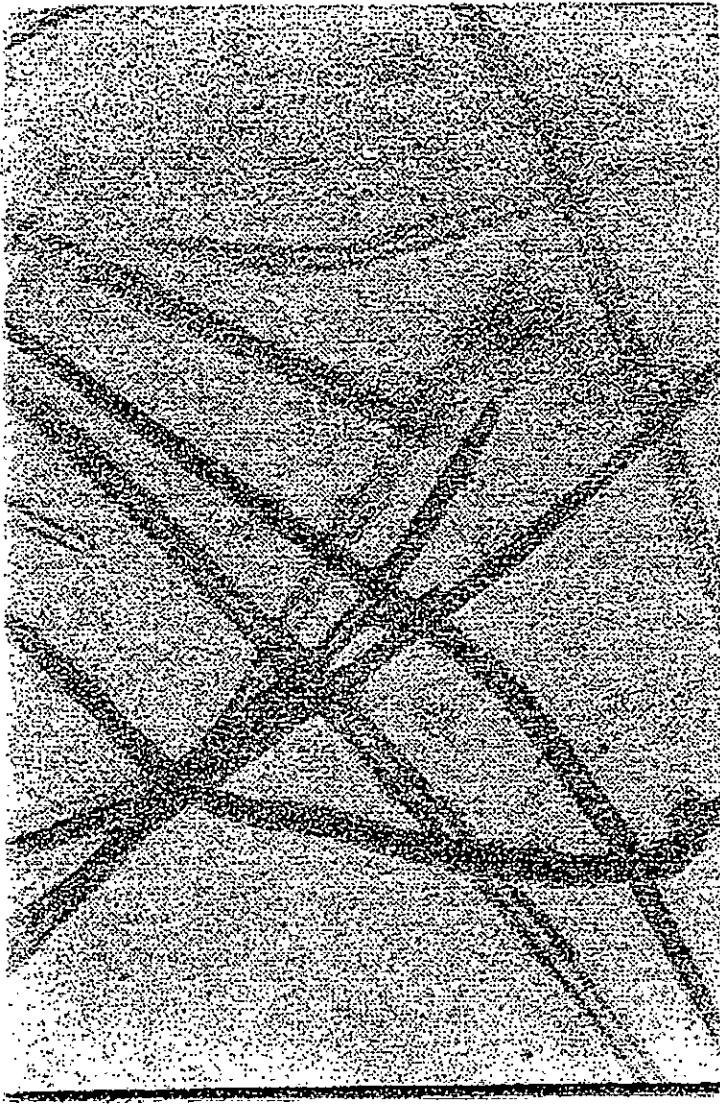
(a)



(b)

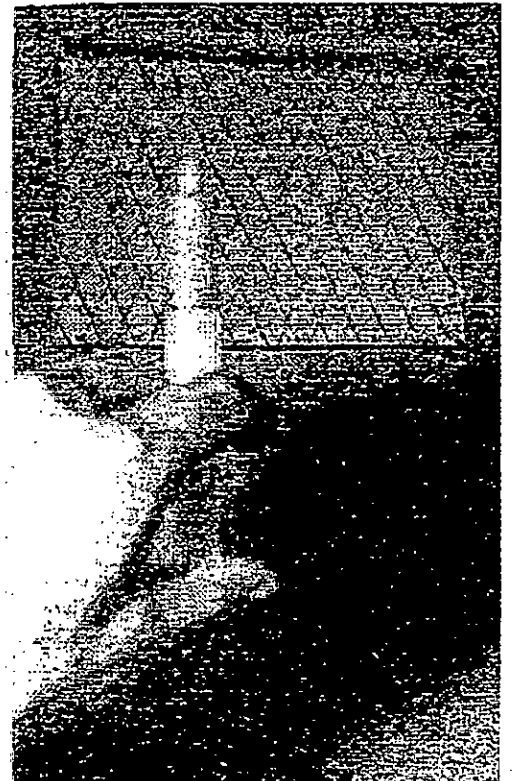
a – Pâte cellulosique d'Alfa asséchée

b – Fibres d'Alfa prêtes à être employées dans une gâchée de béton

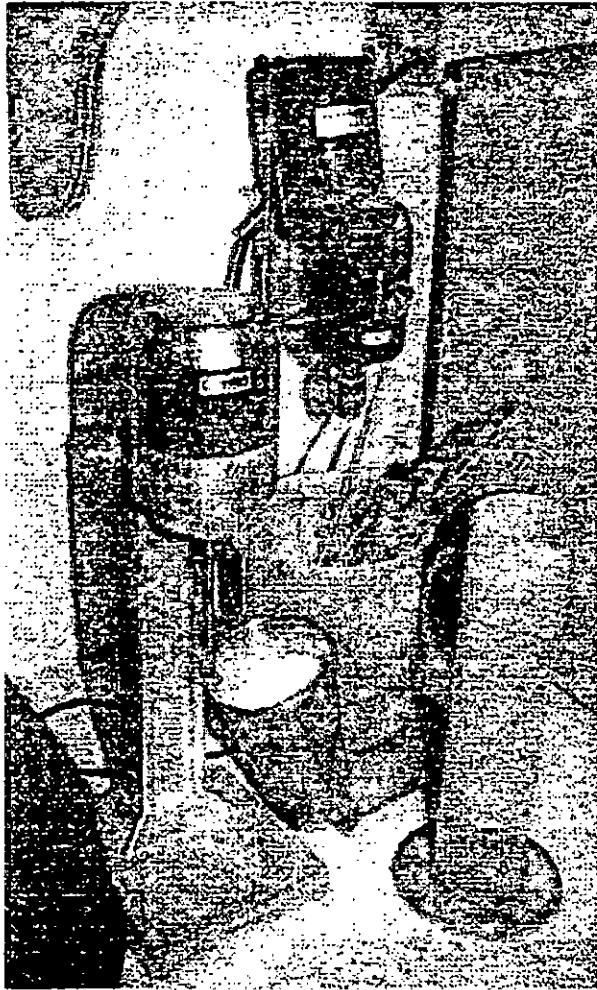


(a)

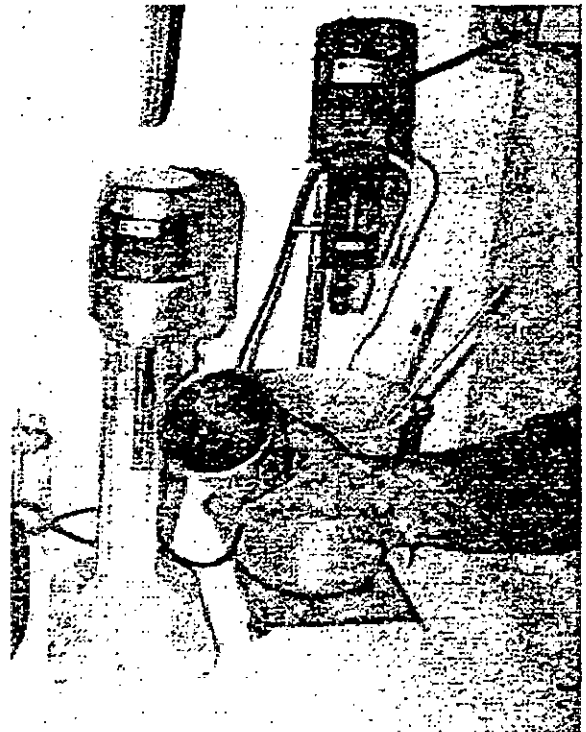
*a – Fibres de Palmier sous microscope agrandies 63 fois.
b – Mesure de la masse volumique absolue des fibres
(en pâte) à l'aide d'une seringue pharmaceutique*



(b)



(a)

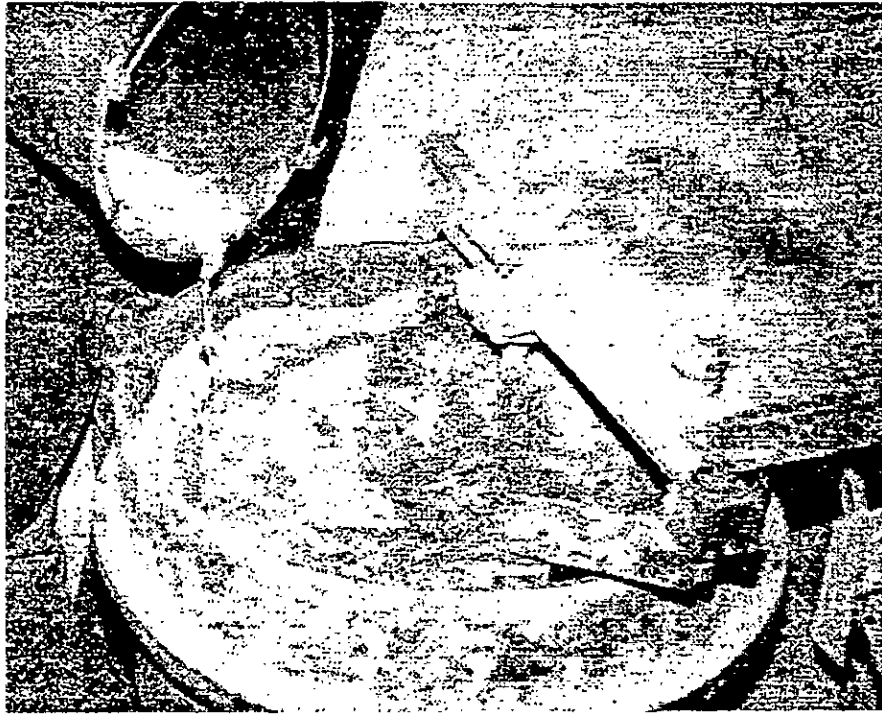


(b)

Séparation des fibres de la pâte cellulosique

a - Alfa

b - Palmier



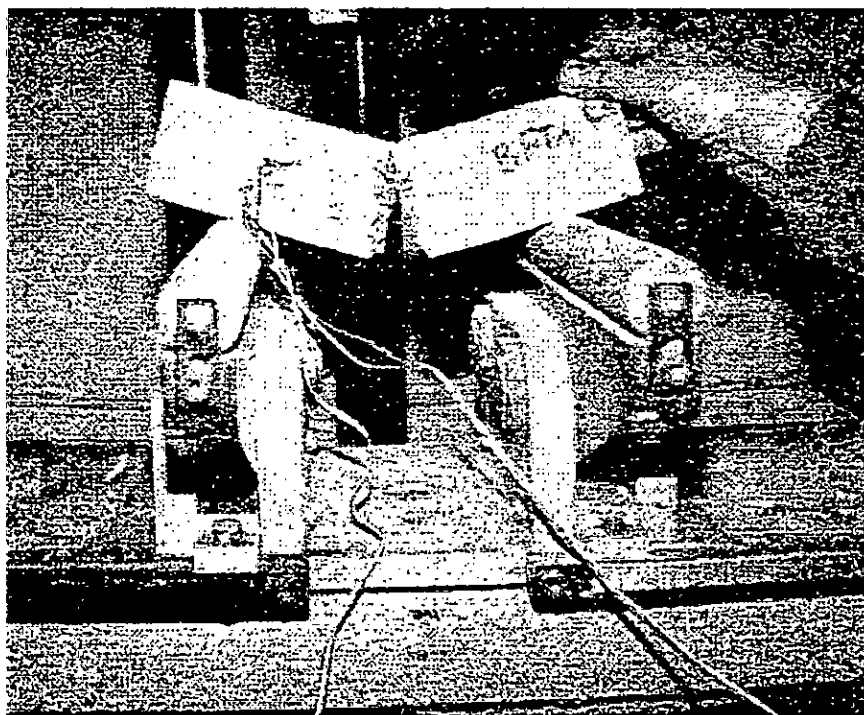
(a)



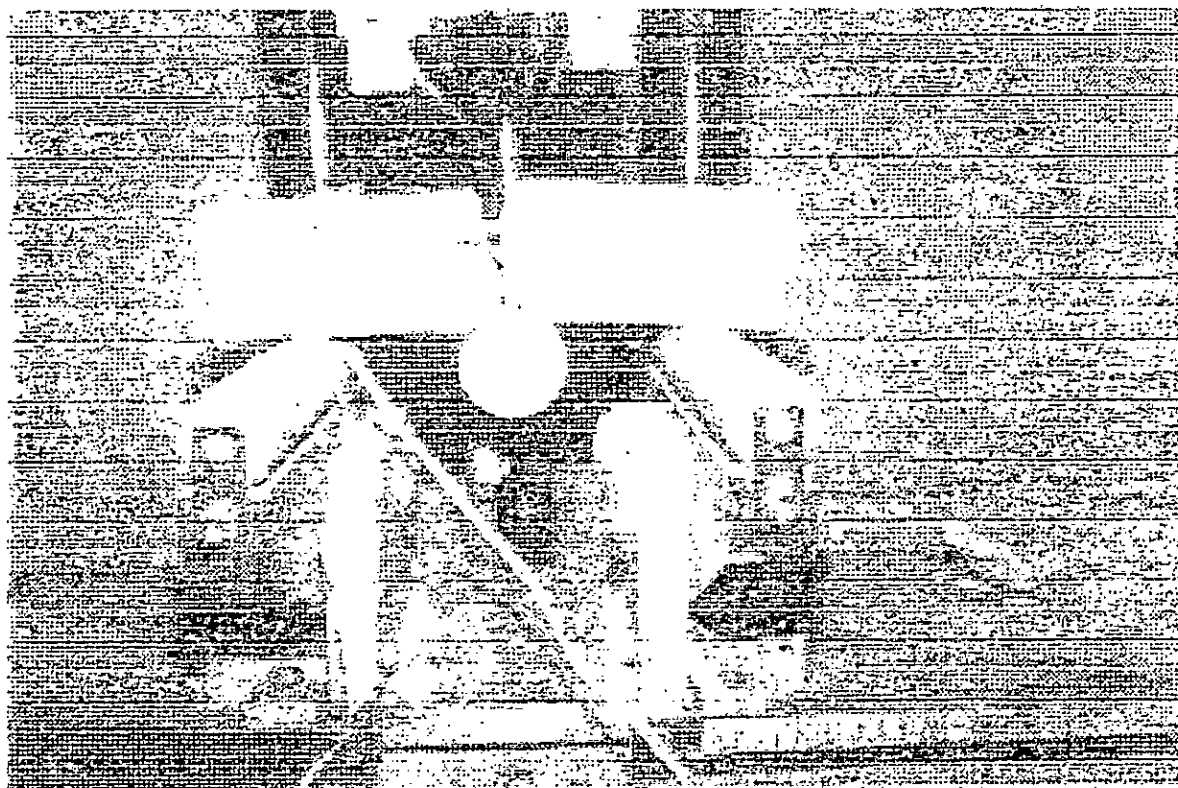
(b)

a – Introduction des fibres d'Alfa dans une gâchée de béton

b – Mesure de la maniabilité à l'aide du NCPT



(a)

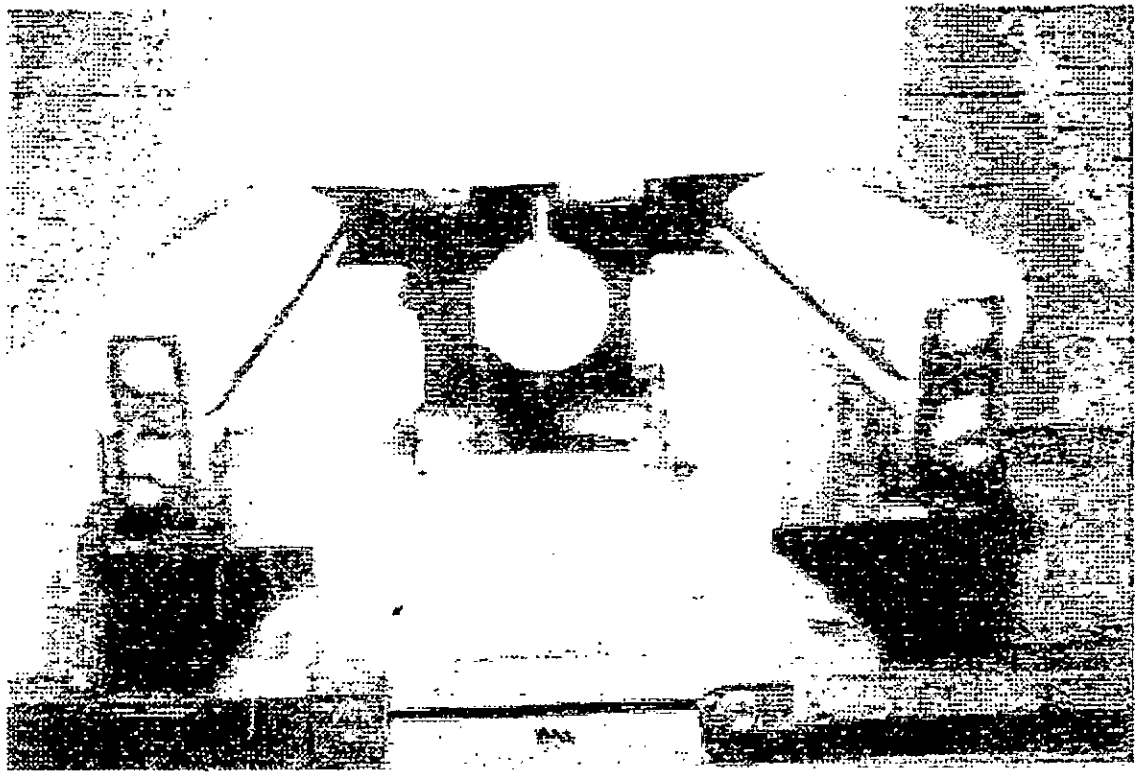


(b)

Essais de flexion en quatre points sur éprouvettes 7 × 7 × 28 cm

a - Béton Témoin

b - Béton de fibres d'Alfa à ($V_f = 1\%$)



Essais de flexion en quatre points d'un béton de fibres de palmier à ($V_f = 2,5\%$)

CONTACT SUPER

Super plastifiant pour mortiers et bétons

DEFINITION DU PRODUIT

CONTACT SUPER est la synthèse de l'expérience et d'études menées dans le domaine des super-plastifiants, du point de vue économique ce produit est la solution optimale pour améliorer dans des proportions importantes les qualités des bétons et mortiers.

CONTACT SUPER réduit de 40 % le temps de mise en oeuvre des bétons
CONTACT SUPER est conforme aux normes ASTM C 494 type F et NFP 18333.

DOMAINES D'APPLICATION

Tous les bétons, colifordaux, étuvés, hautes résistances, les coulis, plâtres, enduits ciment, et enduits étanches.

CONTACT SUPER est un enduit défloculent, dispersant, stabilisant, il apporte une forte adhésion aux différents constituants des mélanges.

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

- Augmentation des résistances de 30 à 40 % (compression, traction, flexion)
- Permet d'économiser jusqu'à 15 % de ciment sans diminuer les résistances
- Diminue de 40 % le temps de mise en place
- Économise jusqu'à 50 % d'énergie, de fuel, ou de chauffage des bétons.
- Réduction de l'eau de gâchage de 10 à 30 %.
- Forte étanchéité, forte adhérence aux aciers, très faible retrait.
- Diminution de la capillarité, de la fissuration, amélioration de la tenue au gel, à l'érosion et au vieillissement.
- Homogénéité conservée en bétons fluides, pas de ségrégation, effet fluidifiant prolongé de 50 minutes, à une heure par forte chaleur.

MISE EN OEUVRE

CONTACT SUPER s'incorpore dans l'eau de gâchage, ou directement dans les canions toupies juste avant la mise en place du béton, faire tourner la toupie en vitesse accélérée durant 1 minute 30.
Le temps de malaxage dans les malaxeurs à béton dépend du type d'appareil utilisé.

CONTACT SUPER

CONSOMMATION

Dans les bétons: 0,6 % à 2 % du ciment

Pour les coulis ciment le dosage est à déterminer suivant l'utilisation et le type de ciment utilisé

CONDITIONNEMENT

Bidons de 30 kgs, fûts de 256 kgs

STORAGE

En cas de gel réhomogénéiser après réchauffement.

Produit non toxique et non inflammable.

