

14/95

République Algérienne Démocratique et Populaire
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : Génie Civil

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

*Projet de Fin d'Etude pour l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil*

BETONS DE FIBRES NATURELLES

Etudié par :

*Mr. KACEM Kheïreddine
Mr. MOKHNACHE Mohamed*

Proposé par :

Mr. BALI A.

Dirigé par :

*Mr. BALI A.
Mr. SILHADI K.*

Promotion 1995

République Algérienne Démocratique et Populaire
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département : Génie Civil

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

*Projet de Fin d'Etude pour l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil*

**BETONS DE FIBRES
NATURELLES**

Etudié par :

*Mr. KACEM Kheïreddine
Mr. MOKHNACHE Mohamed*

Proposé par :

Mr. BALI A.

Dirigé par :

*Mr. BALI A.
Mr. SILHADI K.*

Promotion 1995

REMERCIEMENTS



Nous tenons tout d'abord à remercier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nos plus grands remerciements vont à nos promoteurs Mr BALI et Mr SILHADI pour nous avoir guider dans notre travail pour la réalisation de cette étude et pour nous avoir aider à la réalisation de cette thèse.

Qu'il nous soit permis de remercier Mr DAMOU H. pour son aide utile.

Nous exprimons aussi toute notre gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

DEDICACES



- A mes parents à qui je dois énormément
- A mes frères et soeurs
- A tous mes amis

Kheïreddine

- A la mémoire de mes parents,
- A mes deux soeurs et ma petite Souâd
- A mon frère Mourad
- A toute ma famille
- A tous ce qui me sont très chers.

Mohamed

Nous dédions Ce mémoire à nos promoteurs messieurs : BALI et SILHADI

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

SOMMAIRE

1. Bétons de fibres

1.1. Introduction

1.1.1. Généralités

1.1.2. Définition des bétons de fibres

1.1.3. Développement récents des renforts fibreux

1.2. Choix de la fibre

1.3. Composition, ouvrabilité des bétons de fibres et dosage en fibres

1.3.1. Granulométrie et ouvrabilité

1.3.2. Conséquences des difficultés de mise en oeuvre des bétons de fibres sur le dosage en fibres et les performances

1.4. Applications

1.5. Coût

2. Théorie du comportement mécanique des bétons de fibres

2.1. Interaction fibre - matrice

2.2. Efficacité du rôle des fibres dans la matrice

A) Cas des fibres continues et alignées dans la direction de l'effort

B) Cas des fibres courtes dispersées dans la matrice

2.3. Comportement en flexion du béton de fibres courtes dispersées

2.4. Exemples sur le comportement en traction simple

3. béton renforcé par fibres naturelles

Généralités

3.1 Introduction

3.2 les fibres naturelles

3.2.1 fibre de noix de coco

3.2.2 Fibre de Sisal

3.2.3 fibre de la canne à sucre

3.2.4 fibre du Bambou

3.2.5 fibre de jute

3.2.6 fibre de lin

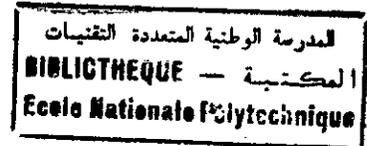
3.2.7 fibre du Bois

3.2.8 Autres fibres vegetales

3.3 Production des B.R.F.N.

3.3.1 Objectif

- 3.3.2 propriétés de la matrice
- 3.3.3 Procédure de production
- 3.4 Propriétés des B.R.F.N.
 - 3.4.1 Facteurs affectant les propriétés
 - 3.4.2 Propriétés des B.R.F.N. à l'état frais
 - 3.4.3 Propriétés des B.R.F.N. à l'état durci
 - 3.4.3.1 Comportement mécanique des B.R.F.N.
 - 3.4.3.2 Arrêt des fissures et absorption d'énergie
- 3.5 Durabilité des B.R.F.N.
- 3.6 Applications pratiques des B.R.F.N.



4. Résultats expérimentaux sur le comportement mécanique

- 4.1 Etude des fibres
 - 4.1.1 Fibres de palmier
 - 4.1.2 Fibres d'alfa
 - 4.1.3 Remarques et discussion des résultats
- 4.2 Etude des B.R.F.N.
 - 4.2.1 Choix des procédés expérimentaux
 - 4.2.2 Détermination de la composition du B.R.F.N.
 - 4.2.3 Sollicitation en flexion
 - 4.2.3.1 Comportement mécanique
 - 4.2.3.2 Résultats obtenus
 - Interprétation des résultats
 - 4.2.4 Remarques et discussion des résultats
 - a) Problème d'adhérence
 - b) Problème de la détermination de la composition adéquate du béton

5. Conclusion

CHAPITRE 1

1. Bétons de fibres :

1.1. Introduction :

1.1.1. Généralités :

« Nombreux sont les matériaux naturels qui, comme le bois ou la paille, présentent des propriétés mécaniques intéressantes par suite de leur structure fibreuse, aussi n'y a-t-il rien d'étonnant à ce que l'homme ait pensé, cela depuis longtemps, à accroître les performances des matériaux qui se présentaient à lui en y incorporant des fibres. C'est ainsi qu'au cours de l'histoire la technologie des matériaux a été jalonnée par l'apparition de composites de texture de plus en plus complexe.

Le renforcement des matrices à base de ciment, que se soit sous forme de pâte pure, de mortier ou de béton, par des fibres d'amiante, d'acier, de verre et maintenant de matériaux de synthèse, a fait quant à lui, depuis le début du siècle, l'objet de nombreuses recherches pour ne citer que quelques dates :

- Processus de fabrication d'éléments composites à base de ciment et d'amiante mis au point par HATSHELC en 1820.
- Brevet portant sur le renforcement des bétons déposé par BERARD en 1874.

- Essais sur le renforcement du béton par des fibres d'acier effectués par PORTER en 1910 et par GRAHAM en 1911.
- Publication en 1920 d'une étude de GRIFFRIH portant sur les bétons renforcés de fibres de verre.

Cependant, bien que l'idée de base d'un tel renforcement soit simple en elle-même, puisqu'il s'agissait au départ de pallier la résistance à la traction relativement faible des matrices à base de ciment par l'adjonction de fibres présentant une résistance à la traction élevée, force est de constater que nombreuses sont les études qui n'ont pas débouché, que le nombre de fibres utilisables est réduit et que, seulement maintenant l'utilisation de ces bétons semble se développer.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ce fait :

- difficulté de trouver une fibre qui convienne, problèmes rencontrés lorsque l'on veut réaliser de tels bétons,
- difficulté d'aboutir à une valeur du rapport performances/coût industriellement acceptable.

Les matériaux composites à base de fibres ont été utilisés dans des travaux de renforcement ou de réparation avant même que l'on ait défini la méthodologie des études préliminaires et les modes opératoires d'essais pour leur contrôle et la maîtrise normalisée de leurs propriétés.

Actuellement on peut dire que les bétons de fibres sont employés dans une série d'applications qui est en réelle expansion. [ref. 2/1]

1.1.2. Définition des bétons de fibres :

On appelle "béton de fibre", un béton dans lequel on a prévu un renfort incorporé par inclusion directe de fibre isolées au moment du gâchage ou de la projection.

Les fibres y sont donc assimilables à un granulat spécial de forme très allongée et de résistance à la traction susceptible d'améliorer légèrement la résistance de la matrice et surtout de créer au travers des fissures des coutures résistantes améliorant le comportement de post fissuration de la matrice avec le maintien prolongé

d'une forte portance ce sous accroissement de la flèche.

Ces améliorations exigent toutefois :

- le pourcentage en volume soit suffisant,
- que la forme offre l'avantage d'un fort rapport surface/volume,
- que les extrémités soient traitées pour permettre un bon ancrage. [ref. 1]

1.1.3. Développement récents des renforts fibreux :

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

- fibres naturelles, végétales ou minérales (sisal, jute, bambou, amiante, ...).
- fibres de verre.
- fibres de polypropylène (fibres syntétiques).
- fibres d'acier (rectilignes, ondulés, crantées à crochets, ..). [ref. 4]

1.2. Choix de la fibre :

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.

Ainsi, si l'on se reporte au tableau 1.1 qui fournit les principales caractéristiques mécaniques des différentes fibres utilisables en tant que matériau de renforcement du béton, on voit, si le but recherché est uniquement d'améliorer la résistance à la traction de la matrice, que les fibres présentant une résistance à la traction importante, un module d'élasticité élevé, un allongement à la rupture satisfaisant et une adhérence avec la matrice (béton) convenable sont utilisables.

On est donc, sur le plan mécanique, conduit à faire la distinction entre les fibres de résistance élevée (fibres d'amiante, de verre, d'acier, de carbone) et les fibres de résistance plus faible (fibres de polyamide (nylon) et de polypropylène). Les premiers seront donc retenus lorsque l'on désirera améliorer la résistance à la traction de la matrice, les seconds lorsque la performance recherchée sera une amélioration de la résistance d'impact par exemple.

Le fait que les propriétés du composite doivent présenter une durée de vie acceptable, compte tenu de sa destination, élimine les fibres dont les propriétés iraient en se dégradant avec le temps par suite de réactions chimiques avec la matrice ou avec le milieu environnant. C'est ainsi que les performances mécaniques des composants à base de ciment et de verre ordinaire chutent progressivement dans le temps par suite de la réaction chimique du ciment sur le verre.

Les fibres d'acier, quant à elles, sont très compatibles avec le ciment dont l'alcalinité les protège contre la corrosion.

Les fibres de polyamide se décomposent dans le temps, elles sont actuellement de plus en plus remplacées par les fibres de polypropylène.

Les fibres d'amiante ont la bonne conservation des éléments de toiture, une bonne tenue dans le temps et confèrent aux éléments composites dans lesquels elles entrent une bonne durabilité.

En général les qualités recherchées pour les fibres sont :

- Bonne adhérence à la matrice.
- Module d'élasticité adapté (il est parfois très supérieur à celui de la matrice).
- Compatibilité avec le liant, elle ne doivent être ni attaquées, ni détruites à terme.
- Etre d'un prix abordable compte tenu des dosages à utiliser.

⊛ Etre assez courtes, fines et flexibles pour permettre un bon malaxage et une mise en forme facile (cas des matériaux mis en forme par extrusion).

⊗ Etre assez longues, non fragiles pour ne pas être cassées lors du malaxage (utilisation pour le béton). [ref. 2/4]

Tableau 1.1 : Caractéristiques mécanique des principales fibres

Nature de la fibre	Diametre (microns)	Masse volumique (kg/l)	Module de Young (Mpa)	Résistance à la traction (Mpa)	Allongement à la rupture (%)
Amiante	0.02 à 20	2.55	165000	3000 à 4500	2.0 à 3.0
Verre	9 à 15	2.60	70000 à 80000	2000 à 4000	2.0 à 3.5
Graphite	8 à 9	1.90	24000 à 415000	1500 à 2100	0.5 à 1.0
Acier	5 à 500	7.84	200000	1000 à 3000	3.0 à 4.0
polypropylène	20 à 200	0.91	5000 à 7000	500 à 750	20.0

[ref. 2]

1.3. Composition, ouvrabilité des bétons de fibres

et dosage en fibres :

La réalisation de mortiers ou de bétons de fibres consiste, du point de vue technologique, à répartir au mieux dans la matrice des fibres de plus ou moins grandes longueurs. Aussi y a t-il lieu, si l'on veut obtenir un mélange aussi homogène que possible, de prendre certaines précautions au moment de la fabrication et de la mise en oeuvre. A la fabrication du composite, la formation de conglomérats de fibres peut être évitée et l'ouvrabilité du composite en être rendue meilleure l'orsqu'on limite la teneur

en fibres (en volume) V_f et l'élanement l/d des fibres mise en place. Sur le plan pratique, la limite de faisabilité est donnée en première approximation par le respect de la relation [ref. 2] :

$$V_f \cdot l/d < 3$$

?

1.3.1. Granulométrie et ouvrabilité :

De même, la granulométrie de la matrice doit être limitée en dimension, l'ouvrabilité des bétons déclinant lorsque la teneur en granulats de diamètre supérieur à 5 mm augmente. De ce fait les matrices doivent donc être soit des mortiers, soit des bétons contenant une forte proportion de sable (une valeur du rapport gravillon/(gravillon+sable) inférieure à 0.50 semble être l'ordre de grandeur à respecter en pratique).

On peut dire que les fibres s'accrochent mieux de bétons relativement fins dont le diamètre maximal des grains est de l'ordre du quart de la longueur de la fibre (soit environ un diamètre maximal de l'ordre de 8 à 15 mm pour les fibres habituelles), les bétons de sable par exemple se prêtent particulièrement bien à l'inclusion de fibres.

En ce qui concerne la mesure de l'ouvrabilité, elle est à prévoir de préférence avec un appareil provoquant un écoulement dynamique (ouvrabilimètre vibrant ou à chocs) en évitant particulièrement la mesure de l'affaissement au cône qui ne

donne qu'un affaissement statique traduisant de façon très pessimiste l'ouvrabilité du béton de fibres dont on a vu qu'il était doté, au repos, d'une cohésion artificielle apportée par le réseau frottant des fibres.

Ces recommandations granulométriques doivent être associées à des impératifs dictés par les performances de la matrice. Ainsi toute modification du rapport S/G devra être obligatoirement associée à :

- une conservation du rapport ciment/sable assurant une compacité optimale (donc accroissement du dosage en ciment lorsque le rapport S/G augmente),
- un contrôle du rapport E/C qui est déterminant pour les performances mécaniques de la matrice.

L'opération de malaxage des bétons de fibres est une opération délicate qui doit respecter certaines règles. Ainsi il est généralement préférable de disperser au péalable les fibres dans le mélange sec.

Dans le cas où la composition obtenue doit subir un traitement particulier, tel qu'un traitement thermique. Il y a lieu, bien entendu, de s'assurer de la compatibilité de ce traitement avec la nature des fibres. [ref. 1/2]

1.3.2. Conséquences des difficultés de mise en oeuvre des bétons

de fibres sur le dosage en fibres et les performances :

Les nécessités de la possibilité de mise en oeuvre des bétons de fibres font donc que le dosage en fibres ne peut, en réalité, dépasser certaines limites au-delà desquelles le gâchage et la mise en oeuvre deviennent impossibles.

Compte tenu alors des rôles radicalement opposés que peuvent avoir les paramètres fondamentaux de dosage en volume, de forme et de rapport l/d =longueur/diamètre des fibres, d'une part sur l'ouvrabilité, la mise en oeuvre, et d'autre part sur l'efficacité mécanique après durcissement, on se trouve contraint de se limiter à une gamme de pourcentages qui ne donnent qu'une efficacité mécanique réduite mais qui permettent une mise en oeuvre acceptable.

On peut même affirmer que les pourcentages maximaux, aux limites d'ouvrabilité se situent presque au niveau du pourcentage minimal pour le seuil d'efficacité.

Aux dosages faibles on ne peut donc s'attendre qu'à une efficacité relativement médiocre et aux forts dosages, l'efficacité devrait être meilleure mais cette amélioration de l'efficacité pourra, notamment, être très affectée par la baisse des performances de la matrice résultant des difficultés de mise en oeuvre et des corrections de composition à dosage en ciment constant, d'où l'importance à accorder à un rétablissement des performances de la matrice par des corrections judicieuses intéressant aussi

le dosage en ciment et le rapport C/E, d'où, aussi, l'importance à attribuer à une recherche de forme particulière de fibre, ou à une recherche d'adjuvant

permettant d'accroître le dosage en fibres en maintenant de bonnes conditions de mise en oeuvre. [ref. 1]

1.4. Applications :

Les bétons de fibres trouvent de nombreuses applications, aussi bien dans le domaine du béton manufacturé que dans celui du béton coulé en place, pour la fabrication de produits ou d'ouvrages exigeants de la part du béton, certaines propriétés, que seule peut leur confère l'adjonction de fibres. C'est ainsi que l'amélioration de la résistance aux chocs apportée par les fibres de polypropylène est mise à profit pour la réalisation de têtes de pieux battus, que les bétons de fibres de verre sont utilisés pour

des pièces minces de formes compliquées telles que celles exigées pour certains éléments d'habillage de façades que les fibres d'acier le sont avec du béton projeté pour stabiliser les talus ou réaliser des enduits, ou bien encore, dans le cas des dalles manufacturées, pour en accroître la résistance à l'usure.

De même, les fibres métalliques peuvent trouver des applications dans le domaine des revêtements des routes ou d'aérodromes. [ref. 2]

1.5. Coût :

Le coût des bétons de fibres doit, comme c'est le cas pour tout les matériaux élaborés, être examiné en fonction des performances apportées et du champ d'application possible. Aussi son estimation ne doit elle pas resulter de la simple addition du coût de la matrice et de la plus-value apportée par les fibres. Elle doit être l'aboutissement d'une étude économique complexe effectuée sur le produit fini dans laquelle doivent intervenir les possibilités offertes, les conditions d'approvisionnement actuelles et futures en fibres et les investissements nécessaires à leur fabrication et à leur mise en place. [ref. 2]

CHAPITRE 2

2. Théorie du comportement mécanique

des bétons de fibres :

2.1. Interaction fibre - matrice :

L'efficacité des fibres doit être envisagée de deux points de vue :

- 1) le transfert des efforts entre matrice et fibres avant toute fissuration et en restant dans le domaine élastique,
- 2) pour des sollicitations plus élevées, le transfert des efforts aux fibres au travers des fissurations de la matrice rompue en traction (effet de couture).

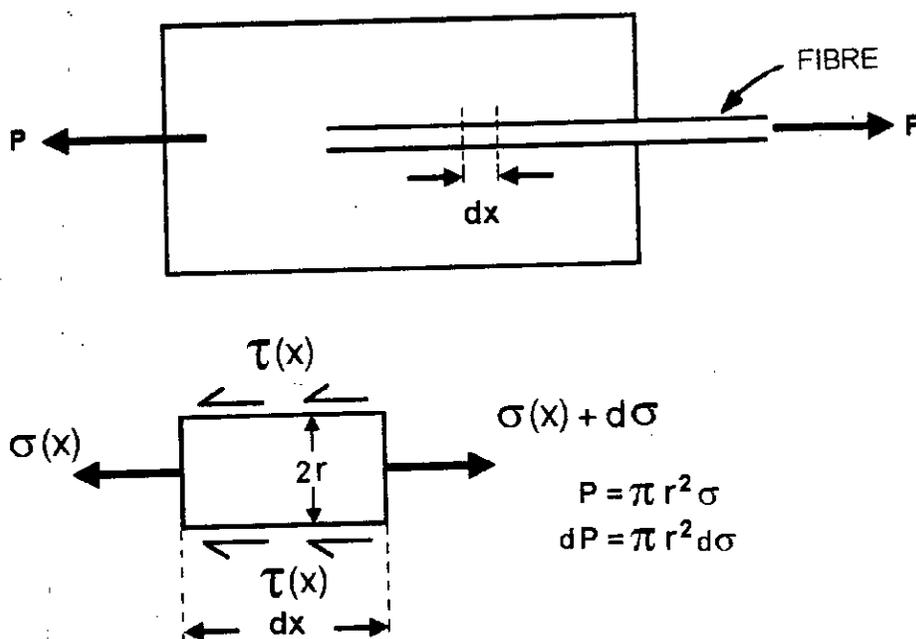


Figure 2.1 Transfert des efforts entre la fibre et la matrice¹

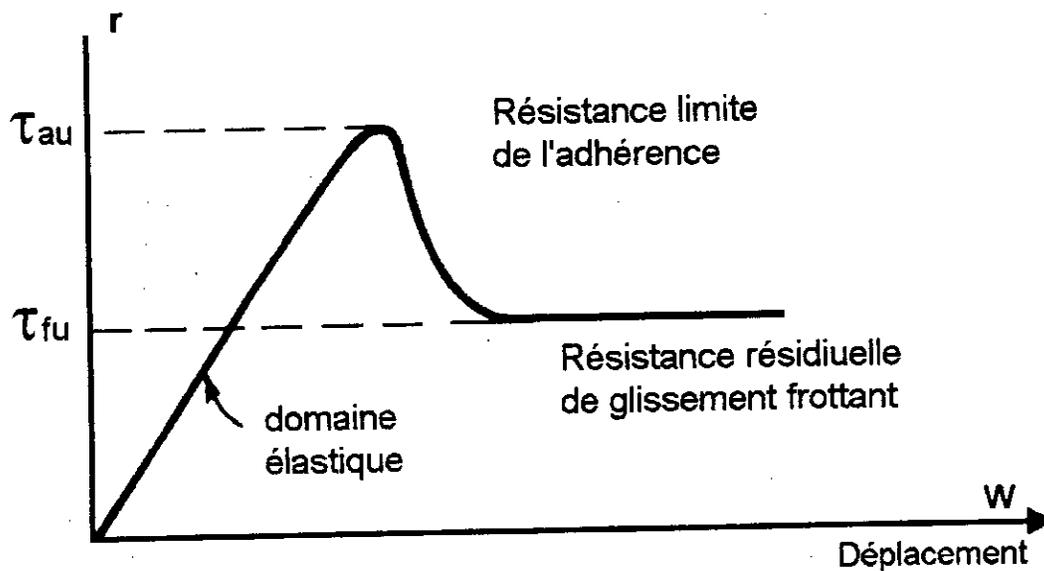


Figure 2.2 Modèle du comportement de l'adhérence de la fibre, relation effort - déplacement¹

Le transfert des efforts fibre-matrice est supposé conforme au modèle des figures 2.1 et 2.2 schématisant un effort d'arrachement (pull out) de la fibre :

$$2 \pi r \tau(x) dx = \pi r^2 d\sigma$$

$$d\sigma/dx = 2 \tau(x)/r$$

Si $W(x)$ est la courbe des allongements de la fibre et $\tau(x)$ la contrainte d'adhérence, la contrainte $\sigma_f(x)$ dans la fibre est donnée en un point $M(x)$ quelconque par :

$$\sigma_f(x) = E_f dW/dx = E_f W'$$

et conformément au modèle initial du domaine élastique on a :

$$\pi r^2 d\sigma/dx = \pi r^2 E_f W'' = 2 \pi r \tau$$

si l'on admet que τ mobilisable est proportionnelle à l'allongement W soit $\tau = K W$ on obtient :

$$\pi r^2 E_f W'' = 2 \pi r K W$$

$$\text{soit : } W'' = 2 K W / (r E_f)$$

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

$$\tau = \tau_{fu}$$

$$\text{On obtient : } W'' = 2 \tau / (r E_f)$$

En rappelant que, si la mobilisation de l'adhérence limite τ_{fu} correspond à la résistance propre de la fibre, on a :

$$2 \pi r \tau_{fu} l/2 = \pi r^2 \sigma_{fu}$$

$$\text{soit : } \tau_{fu} = r/l \sigma_{fu}$$

suyant la longueur d'ancrage dont le maximum est $l_a = l/2$, on pourra avoir à l'état limite [ref. 1] :

- soit la rupture de la fibre si $\tau_{fu} > \sigma_{fu} r/l$ (ce sera notamment le cas pour les fibres longues et fines aux valeurs r/l faibles),
- soit le glissement frottant de la fibre si $\tau_{fu} < \sigma_{fu} r/l$ (cas des fibres courtes).

2.2. Efficacité du rôle des fibres dans la matrice :

l'efficacité du rôle des fibres dépend :

- du pourcentage de fibre en volume,
- du rapport (l/r) des fibres, et leur longueur (l),
- de leur orientation (θ),
- de la résistance d'adhérence au frottement entre fibre et matrice τ_{fu} ou τ_{fv} .

Cette efficacité 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 est, dans un essai de traction simple, la capacité de reprendre l'effort après la fissuration de la matrice, une reprise totale de cet effort de fissuration de la matrice correspond alors à une efficacité de 100% . [ref 1]

A) Cas des fibres continues et alignées dans la direction de l'effort :

Notations :

	Matrice	Fibres	Composite
Contrainte	σ'_m	σ'_f	σ_c
Resistance	σ'_{mu}	σ'_{fu}	-
Module d'élasticité	E_m	E_f	-
Pourcentage en volume	V_m	$V_f=1-V_m$	-

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

$$\sigma_c = \varepsilon E_c = \varepsilon E_m V_m + \varepsilon E_f V_f$$

$$\sigma_c = \sigma'_m (1-V_f) + V_f \sigma'_f$$

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

$$\sigma'_m = \sigma'_{mu}$$

$$\sigma'_f = E_f/E_m \sigma'_{mu}$$

et on obtient :

$$\sigma_{cu} = \sigma'_m [1 + V_f (E_f/E_m - 1)]$$

pour qu'il ait maintient 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

$$\sigma_{cu} = \sigma'_m [1 + V_f (E_f/E_m - 1)] = \sigma'_{fu} V_f$$

d'où le pourcentage critique des fibres :

$$V_{fc} = \frac{\sigma'_{mu}}{\sigma'_{fu} - \sigma'_{mu} (E_f/E_m - 1)}$$

Exemple :

Soient :

$$\sigma'_{mu} = 4 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_m = 30000 \text{ Mpa}$$

$$E_f = 210000 \text{ Mpa}$$

$$E'_{fu} = 1000 \text{ Mpa}$$

on a :

$$V_{fc} \approx 0.4 \%$$

$$\sigma'_f = 28 \text{ Mpa}$$

Si on considère un essai de traction pour différents pourcentages de fibres, les courbes contrainte-déformation ont l'allure suivante :

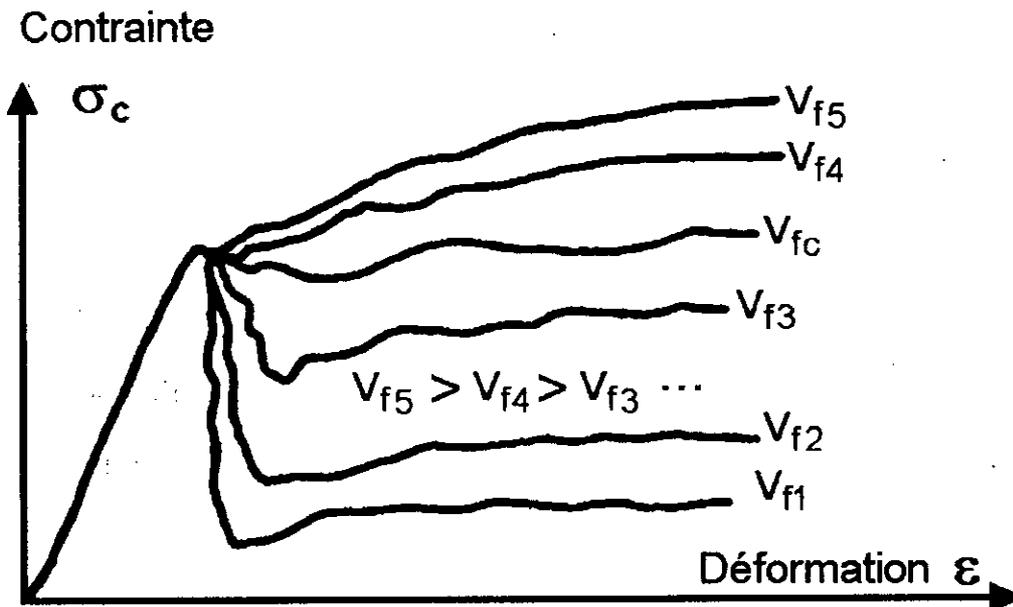


Figure 2.3 Allure des courbes d'essais de traction en fonction du pourcentage des fibres¹

- Lorsque $V_f > V_{fc}$: (la courbe) la contrainte σ_c augmente à partir de la contrainte de la première fissuration de la matrice.
- Lorsque $V_f < V_{fc}$: la contrainte σ_c tend à chuter brutalement pour rejoindre la capacité de charge des fibres. [ref. 1]

B) Cas des fibres courtes dispersées dans la matrice :

La contrainte dans le composite est donnée par la formule :

$$\sigma_c = \sigma'_m (1 - V_f) + n V_f \sigma'_f$$

où n : coefficient d'efficacité dépendant :

- de l'orientation des fibres,
- du rapport (l/r) ,
- de la longueur des fibres (l) .

Pour les fibres courtes σ'_f la contrainte de traction peut être remplacée par la résistance de frottement $\tau_{fu} l/r$:

$$\sigma'_f = \tau_{fu} l/r$$

$$\sigma_c = \sigma'_m (1 - V_f) + n V_f \tau_{fu} l/r$$

En reprenant la définition du pourcentage critique des fibres V_{fc} permettant la reprise de la charge de la première fissuration de la matrice on obtient [ref 1] :

$$V_{fc} = \frac{\sigma'_m \mu}{n (\tau_{fu} l/r - \sigma'_m \mu E_f/E_m) + \sigma'_m \mu}$$

2.3. Comportement en flexion du béton de fibres courtes

dispersées :

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,

$$\sigma_t = \sigma_c = 6 M_u / bh^2$$

M_u étant le moment de flexion à la rupture.

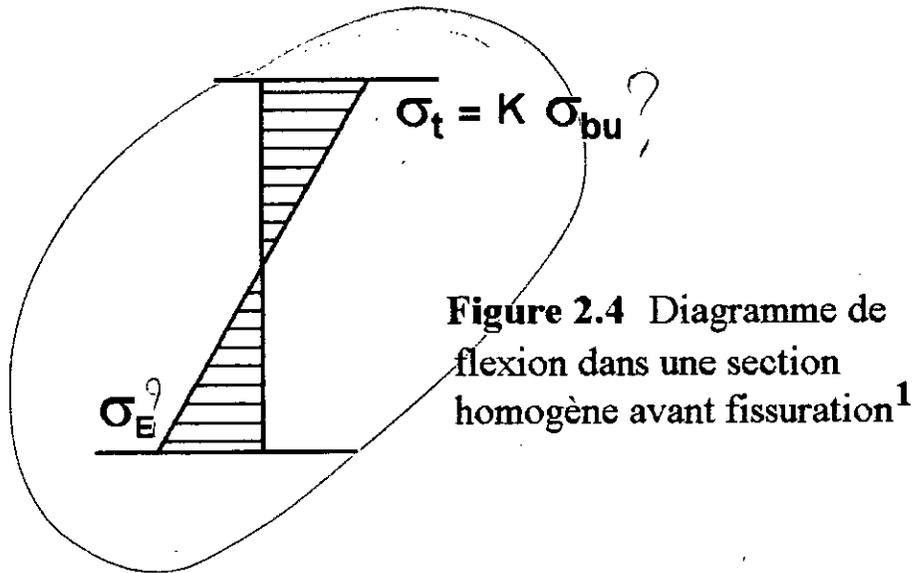
Cependant, à la rupture, on admet souvent pour le béton que la contrainte de traction-flexion donnée par cette formule est reliée à la résistance du béton à la traction simple σ_{tu} par :

$$\sigma_{tu} = 0.6 \sigma_c \quad \text{si bien que l'on peut exprimer } \sigma_{tu} \text{ par :}$$

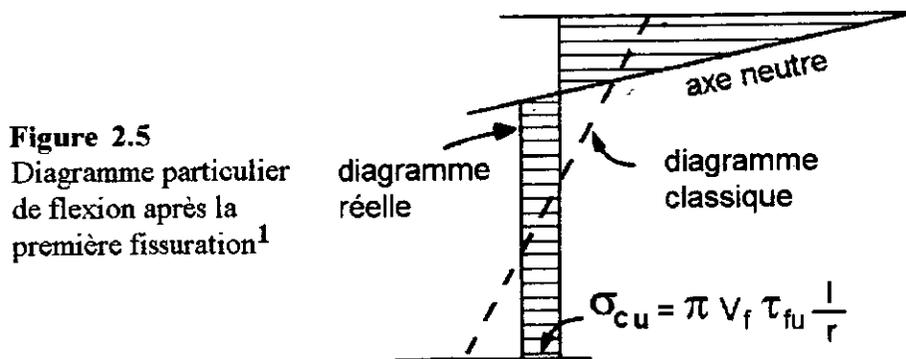
$$\sigma_{tu} = 3.6 M_u / bh^2$$

$$\text{ou : } M_u = 0.278 \sigma_{tu} bh^2$$

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 $K \sigma_{bu}$ (voir figure 2.4).



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 2.5 :



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 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. [ref 1]

Le diagramme de flexion proposé par HANNANT est donné par la figure 2.6 :

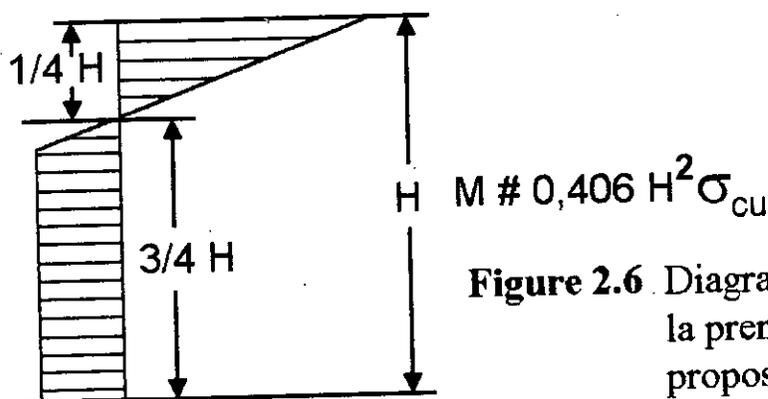


Figure 2.6 Diagramme de flexion après la première fissuration proposé par HANNANT¹

2.4. Exemples sur le comportement en traction simple et la traction par flexion :

Pour fixer les idées, on adopte les hypothèses arbitraires suivantes :

σ'_{mu} = résistance traction (simple matrice) = 4 MPa

E_m = module élastique (matrice) = 30 000 MPa

Pour les fibres (en acier)

V_f = pourcentage en volume,

l = longueur = 40 mm,

r = rayon = 0.4 mm, soit $l/r = 100$,

σ_{fu} = résistance à la traction = 1 000 MPa,

τ_{fu} = résistance d'adhérence = 6 MPa,

E_f = module élastique = 210 000 MPa,

n = coefficient réducteur de dispersion des fibres = 0.15

(ce qui suppose un béton de matrice ayant une grosseur maximale du granulat de 10 mm).

A titre de comparaison, les deux tableaux relatifs respectivement à la traction simple et à la flexion ont été également donnés pour les fibres dans les conditions idéales de continuité et de parallélisme à l'effort (voir les tableaux 1A , 1B , 2A , 2B) [ref 1]

Dosage en fibres (en volume) V_f en %	Contraintes limites réelles avant 1ère fissuration de la matrice		Contraintes après 1ère fissuration de la matrice $\sigma_{cu} = \sigma_f$ (MPa)	Efficacité en % de reprise de l'effort de rupture en traction de la matrice
	Composite			
	σ_{cu} (en MPa)	σ_f (MPa)		
0.2	4	0.008	0.18	5
0.4	4	-	0.36	9
0.8	4	0.033	0.72	18
1.2	4	-	1.08	27
2.4	4	0.100	2.16	54
4.4	4	0.185	4.00	100% V_f critique
4.8	4	0.200	4.32	108
6.0	4	0.242	5.40	135

[ref 1]

Dosage en fibres (en volume) Vf en %	Contraintes limites réelles avant lère fissuration de la matrice		Contraintes après lère fissuration de la matrice $\sigma_{cu} = \sigma_f$ (MPa)	Efficacité en % de reprise de l'effort de rupture en traction de la matrice
	Composite σ_{cu} (en MPa)	Fibres σ_f (MPa)		
0.2	4.05	0.06	2	50
0.4	4.10	0.11	4	100% Vf critique
0.8	4.20	0.22	8	200
1.2	4.30	0.34	12	300
2.4	4.60	0.67	24	600

[ref 1]

Dosage en fibres (en volume) Vf en %	Contraintes de traction limite mobilisable (voir 1A) en MPa	Moment classique de rupture de la matrice $M_0 = 0.278 \sigma_{mu} H^2$ $\sigma'_{mu} = 4 \text{ MPa}$ $M_0 = 1.112 H^2$	Moment résistant de la composite Modèle fig. 2.6	
			$M_1 = 0.406 \sigma_{cu} H^2$	M1/M0
0.2	0.18		$M_1 = 0.07 H^2$	0.06
0.4	0.36		0.15	0.13
0.8	0.72		0.29	0.26
1.2	1.08		0.44	0.39
2.4	2.16		0.88	0.79
2.5	2.25		0.91	--
3.0	2.70		1.10	0.99
4.8	4.32		1.75	1.58
6.0	5.40		2.19	1.97

[ref 1]

Dosage en fibres (en volume) Vf en %	Contraintes de traction limite mobilisable (voir 1B) en MPa	Moment classique de rupture de la matrice $M_0 = 0.278 \sigma_{mu} H^2$ $\sigma'_{mu} = 4 \text{ MPa}$ $M_0 = 1.112 H^2$	Moment résistant de la composite Modèle fig. 2.6	
			$M_1 = 0.406 \sigma_{cu} H^2$	M1/M0
0.20	2.00		$M_1 = 0.81 H^2$	0.73
0.23	2.30		0.93 H ²	0.84
0.27	2.70		1.10 H ²	0.99
0.40	4.00		1.62 H ²	1.46
0.80	8.00		3.24 H ²	2.91
1.20	12.00		4.87 H ²	4.38

[ref 1]

CHAPITRE 3

3. béton renforcé par fibres naturelles:

Généralités :

Recentement un grand intérêt a été accordé mondialement aux applications du béton renforcé par fibres naturelles. Des recherches ont été apparues dans beaucoup de pays sur les propriétés mécaniques, physiques, performances et durabilité du béton renforcé par fibres de noix de coco, du sisal, de la canne à sucre, du jute, du bois ainsi que d'autres fibres végétales. Ces recherches ont montré des perspectives encourageantes pour ce nouveau groupe distinct de matériaux pour les applications dans plusieurs types de constructions.

Ce chapitre expose les développements chronologiques, la position présente et les futures perspectives des bétons renforcés par les fibres naturelles dans la construction.

Il contient l'exposition des différentes fibres et leurs caractéristiques, technologie de production, les facteurs affectant les propriétés, les propriétés dans l'état frais et l'état durci, performances et durabilité des B.R.F.N.

Il illustre aussi les procédures de production, techniques de la construction et les applications pratiques des B.R.F.N.

Le renforcement du béton par les fibres naturelles est essentiellement un but spécial qui consiste à distribuer aléatoirement les fibres naturelles de différentes origines dans une matrice à base de ciment.

La dispersion uniforme des fibres dans une matrice à base de ciment distribue les contraintes et augmente la résistance à la fissuration, et aux chocs, et améliore aussi la ductilité pour une meilleure absorption d'énergie.

Le béton renforcé par fibres naturelles peut être utilisé dans les conventionnelles applications aussi bien que dans les applications où l'énergie doit être absorbée ou où les dégâts de l'impact est probablement rencontré. [ref 3]

3.1 Introduction :

Les fibres naturelles de différents types sont abondamment disponibles dans beaucoup de pays du monde. Il y a eu un intérêt croissant dans les années récentes sur l'utilisation des fibres naturelles pour le renforcement du béton.

Bien que l'emploi de courtes et discrètes fibres de renforcement dans le béton, autres que les fibres naturelles a eu un large intérêt dans le monde, l'emploi de fibres naturelles dans le béton est relativement récent malgré le fait que le concept de renforcement par la fibre a été reconnu il y a plus de cinquante années. Plusieurs exemples de renforcement par fibres existent dans la nature aussi bien que dans l'histoire de l'homme. La nature a fourni à l'homme des matières renforcées de fibres sous la forme

de bois, bambou etc... L'emploi de la paille dans la brique de boue séchée au soleil, et les cheveux du cheval dans du mortier précède l'emploi des conventionnels bétons armés.

Les fibres naturelles sont des matériaux futurs de renforcement et leur emploi a été jusqu'à maintenant plus traditionnel que technique. Ils ont servi longtemps dans beaucoup d'utiles buts mais l'application de la technologie des matériaux pour l'utilisation de fibres naturelles comme renfort dans le béton a pris sa place seulement dans les années relativement récentes. Dans les années 1960 et les années 1970, des recherches ont commencé sur la possibilité d'utiliser des fibres organiques d'origines

différentes comme renfort dans les plaques de béton minces et dans d'autres composites à base de ciment.

Ces recherches ont indiqué bientôt la possibilité de la fabrication des produits de B.R.F.N. dont les propriétés sont comparable aux produits d'amiante-ciment. Des méthodes appropriées de fabrication des toitures industrielles et des panneaux murs et d'autres produits des bétons de fibres naturelles ont commencé rapidement dans quelques pays dans l'Amérique Centrale, l'Afrique, l'Asie, l'Australie et l'Europe. Les produits du B.R.F.N. utilisent des fibres tel que le noix de coco, sisal, canne à sucre,

bambou, jute, et le bois ont été testés dans plus de 40 pays .

Ces tests ont montré des résultats encourageants. L'économie et d'autres facteurs dans beaucoup de pays en voie de développement où les fibres naturelles de

différentes origines sont abondamment disponibles, demande que les ingénieurs de construction et les entrepreneurs appliquent une technologie appropriée pour utiliser ces fibres naturelles efficacement et économiquement que possible pour produire un B.R.F.N de bonne qualité pour logement et autres besoins.

Les fibres naturelles sont disponibles dans la plupart des pays en voie de développement et exigent seulement une petite industrialisation pour leur traitement. En comparaison avec un volume ou poids équivalent des fibres synthétiques de renforcement, l'énergie exigée pour leur production est plus petite d'où le coût de fabrication de ces composites est aussi bas. Dans l'addition, l'emploi d'un mélange aléatoire de fibres naturelles conduit à une technique qui exige seulement un petit nombre de personnel compétent dans l'industrie de la construction. L'emploi de telles fibres dans le béton est par conséquent particulièrement attirant pour les pays en voie de développement qui manquent la main-d'oeuvre spécialisée et les fonds d'investissement, avec leur besoin de produire localement une bonne qualité des matériaux de construction à bas coût. [ref. 3]

3.2 les fibres naturelles :

Les exigences de base sur les fibres naturelles pour leur utilisation comme renforcement dans le béton sont :

- effort de traction et module d'élasticité élevés,
- raisonnable adhérence à l'interface avec la matrice,
- bonne stabilité chimique et géométrique
- et durabilité.

Les types de fibres naturelles recherchés comme futurs matériaux de renfort incluent la fibre de noix de coco, fibre de sisal, fibre de la canne à sucre, fibre de bambou, fibre de palmier, fibre de jute, fibre de lin, fibre de bois et d'autres fibres végétales.

Les propriétés de la plupart des fibres naturelles sont constatées moyennement bonnes. [ref 3]

3.2.1 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 3.1.

La figure 3.1 montre la relation typique contrainte de traction - déformation de la fibre de noix de coco. [ref 3]

Table 3.1 propriétés typiques des fibres de noix de coco [ref 3]

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

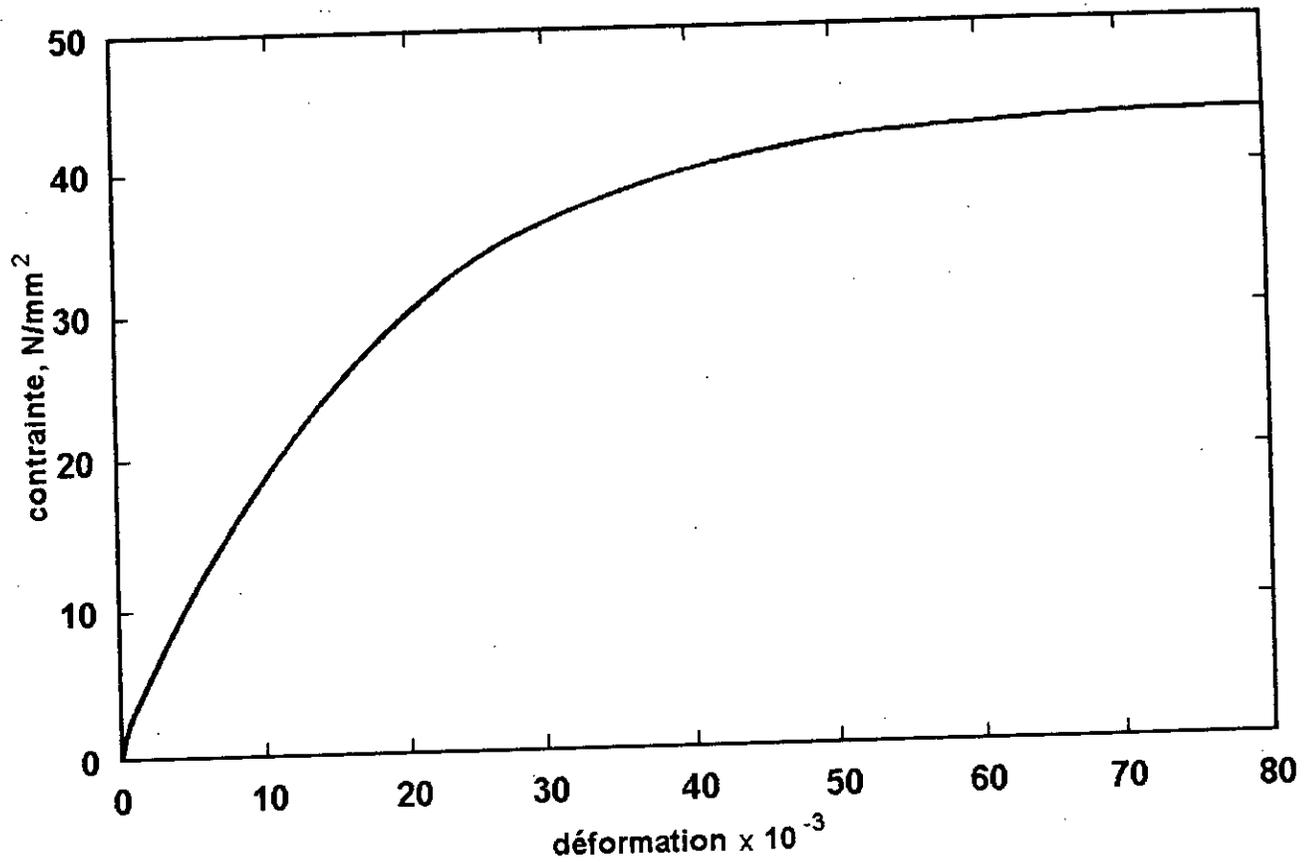


Figure 3.1 Relation typique $\sigma - \varepsilon$ des fibres de noix de coco³

3.2.2 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

3.2 . [ref 3]

Table 3.2 propriétés Typiques des fibres de sisal [ref 3]

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

3.2.3 fibre de la canne à sucre :

Les fibres de la canne à sucre sont obtenues du residu 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 cultivation. le diamètre de la canne peut aller jusqu'à 6 centimètres. La cultivation 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 moisson. Les propriétés typiques des fibres de la canne à sucre sont données dans la table 3.3 et la relation contrainte - déformation dans la figure 3.2 . [ref 3]

Table 3.3 propriétés Typiques des fibres de la canne à sucre [ref 3]

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

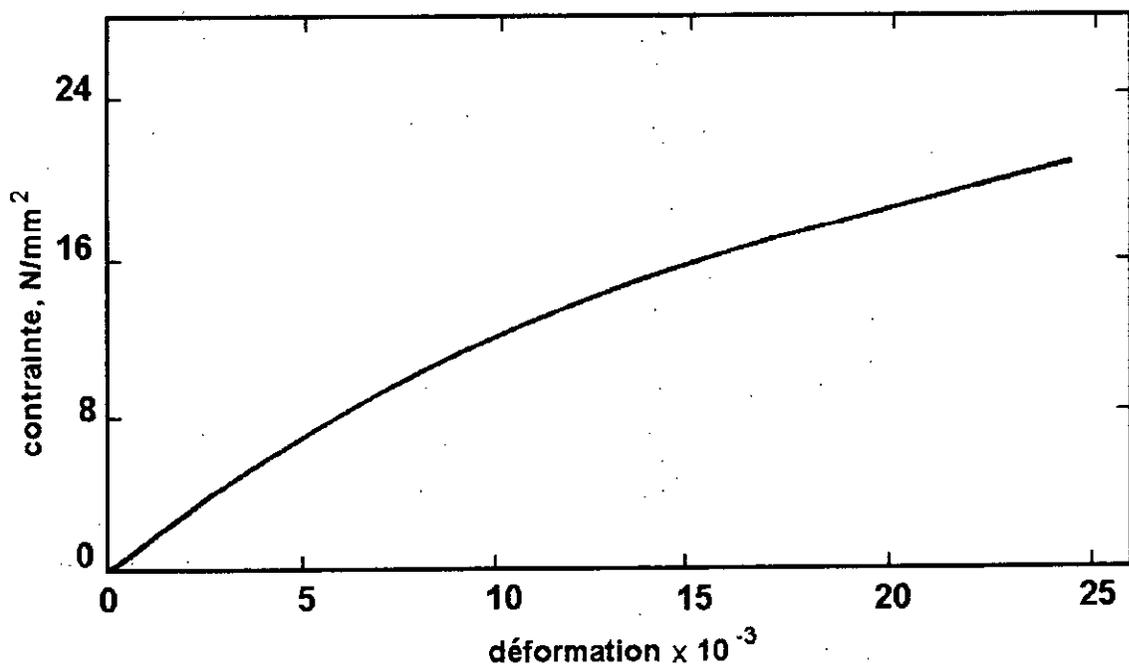


Figure 3.2 Relation typique $\sigma - \varepsilon$ des fibres de la canne à sucre³

3.2.4 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 figue. 3.3, et leurs propriétés typiques sont données dans la table 3.4 .

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. [ref 3]

Table 3.4 Propriétés des fibres du bambou [ref 3]

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

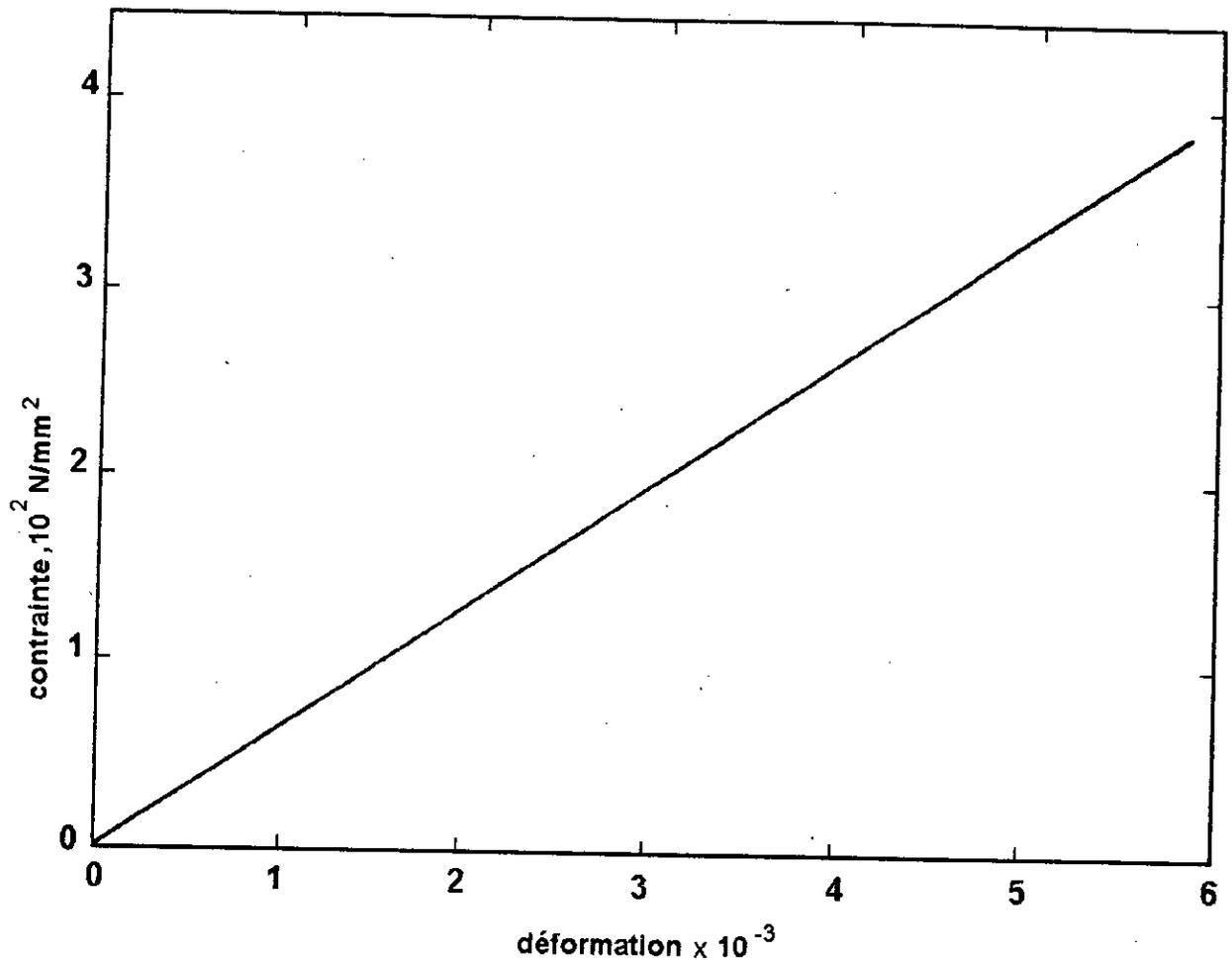


Figure 3.3 Relation typique $\sigma - \varepsilon$ des fibres du bambou³

3.2.5 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 submergé 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 3.4 et les propriétés typiques sont données dans la table 3.5. [ref 3].

Table 3.5 Propriétés des fibres de jute [ref 3]

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

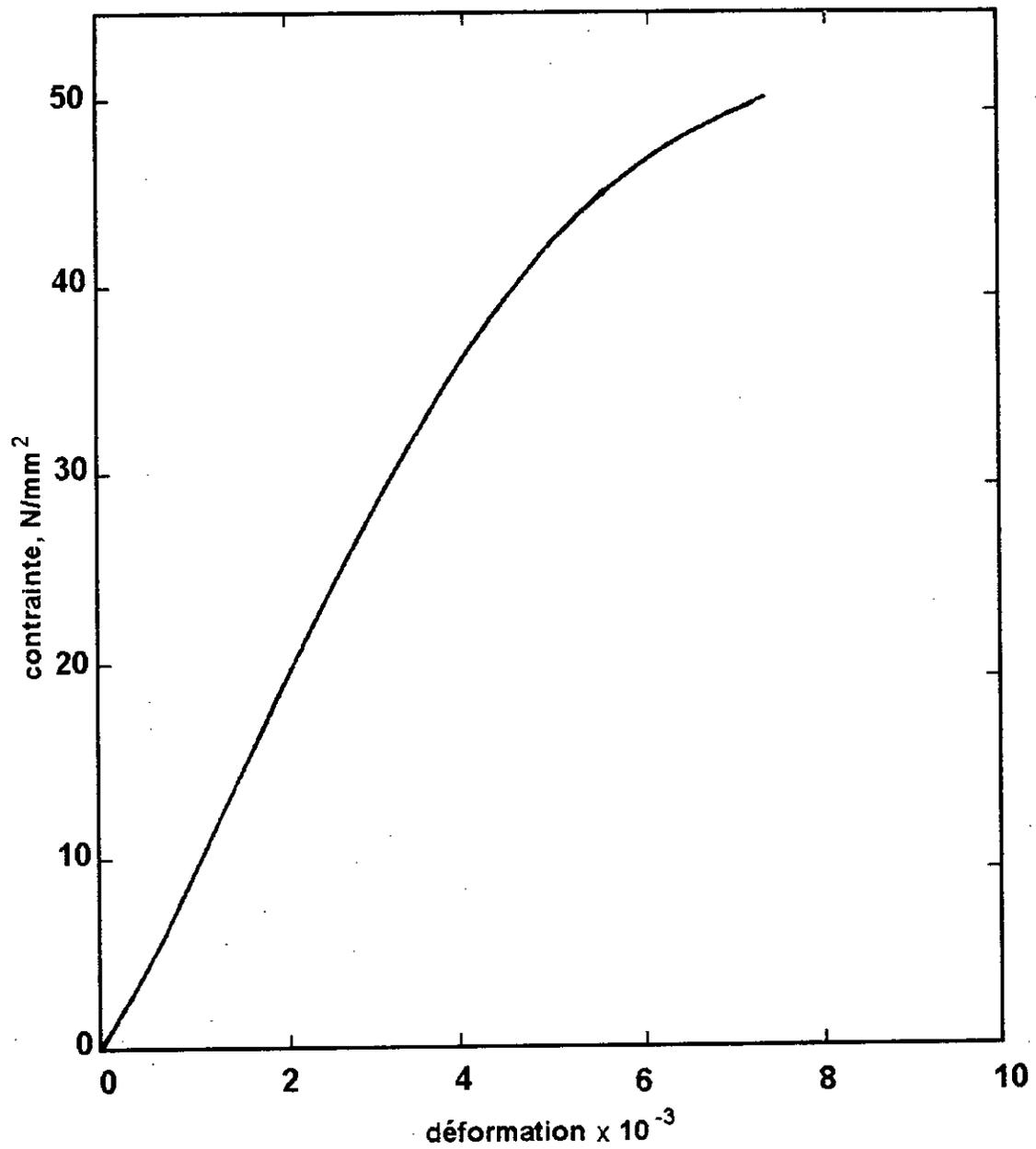


Figure 3.4 Relation typique $\sigma - \varepsilon$ des fibres de jute³

3.2.6 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 3.6). [ref 3]

Table 3.6 Propriétés des fibres de lin [ref 3]

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

3.2.7 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 ^{les} copeaux sont placés alors dans un défibrateur et laissés sous pression pendant un certain temps. Le défibrateur 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. [ref 3]

3.2.8 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 tranchant^{es} et par conséquent l'extraction manuelle est difficile. Les propriétés de l'herbe d'éléphant sont données dans la table 3.7 qui illustre que la fibre de l'herbe de l'elephant 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 3.7 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 3.7).

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 3.7). L'extraction des fibres est assez difficile. [ref 3]

Table 3.7 propriétés Physiques et mécaniques de quelques fibres vegetales [ref 3]

Type de la fibre	Force de traction (Mpa)	Deformation max (%)	Module d'élasticité (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	941

[ref 3]

3.3 Production des B.R.F.N. :

3.3.1 Objectif :

La dispersion uniforme des fibres naturelles dans le béton distribue les contraintes et empêche la formation des microfissures. L'objectif principal dans la production des B.R.F.N. est de distribuer les fibres d'une façon qui permet aux fibres de jouer leur rôle et assurer une bonne interaction entre elles et la matrice (béton).

Dans la préparation des B.R.F.N. on doit s'assurer que les fibres soient bien liées à la matrice.

En conséquence de la nature du béton, il n'est habituellement pas possible d'incorporer qu'un petit volume de fibres dans la matrice, et en tout cas, l'économie et d'autres considérations exigent que l'emploi des fibres soit optimisé. [ref 3]

3.3.2 propriétés de la matrice:

Dans les B.R.F.N la matrice lie les fibres, les protège et participe dans le transfert des contraintes vers les fibres et contrairement. En général la matrice diffère du béton conventionnel par un dosage en ciment plus élevé, et un pourcentage plus faible de granulats avec des dimensions plus petites. [ref 3]

3.3.3 Procédure de production :

Les trois grande étapes dans la production des B.R.F.N. sont :

la préparation de la fibre, le malaxage des constituants, et la mise en place.

La construction avec les B.R.F.N. exige un minimum de qualification de la main-d'oeuvre et utilise les matériaux locaux disponibles.

Une attention particulière doit être faite pendant le contrôle de qualité des constructions en B.R.F.N. [ref 3]

3.4 Propriétés des B.R.F.N. :

Les performances de tous les types de B.R.F.N. sont trop influencées par le processus de production, le contrôle de qualité et la manière de la mise en place.

Les B.R.F.N. constituent un nouveau groupe distinct de matériaux de construction qui a un comportement semblable à celui des bétons renforcés par les fibres d'acier et d'autres fibres inorganiques ou synthétiques.

Comme dans les autres B.R.F., les fibres naturelles coussent les fissures et empêchent leur élargissement et leur propagation dans la matrice.

La dispersion des fibres dans la matrice fragile est un moyen commode et pratique pour améliorer ses propriétés telles que l'effort ultime de traction et de flexion, la résistance à la fatigue et la résistance à l'impact. [ref 3]

3.4.1 Facteurs affectant les propriétés :

Les propriétés des B.R.F.N. sont affectées par plusieurs facteurs. Quelques facteurs importants sont listés dans la table 3.8.

Cette liste, n'est pas exhaustive, et montre la complexité de la production d'un B.R.F. de bonne qualité.

Le type des fibres, leur longueur et leur pourcentage en volume ont des effets considérables sur ces propriétés.

La longueur des fibres et le pourcentage en volume optimums pour la plupart des types de fibres sont autour de 25 mm et 3 % respectivement. [ref 3]

Table 3.8 Facteurs affectants les propriétés [ref 3]

Facteurs	Variables
Type de la fibre	noix de coco, bambou, jute, sisal,...
Géométrie de la fibre	longueur, diamètre, section,...
Surface de la fibre	lisse, rugueuse
Propriétés de la matrice	type du ciment, agrégats,
Conception de la gachée	pourcentages des constituants, ouvrabilité,
Méthode de malaxage	type du malaxeur, méthode d'addition des fibres, durée et vitesse du malaxage
Mise en place	vibration, projection, ...

3.4.2 Propriétés des B.R.F.N. à l'état frais :

le B.R.F.N. peut être malaxé dans les malaxeurs ordinaires du béton. Le ciment et les agrégats sont malaxés premièrement puis une quantité prédéterminée de fibres d'une longueur bien définie est ajoutée progressivement à travers un distributeur de fibres attaché au malaxeur.

Les opérations telles que : le transport, la mise en place, le compactage et les finitions sur le béton frais peuvent affecter considérablement les propriétés du béton durci.

Il est par conséquent important que les fibres restent uniformément distribuées et en bon état dans le béton durant les différents stades de sa production.

Quand l'une de ces conditions n'est pas satisfaite, les propriétés du béton résultant seront affectées d'une façon défavorable.

L'ouvrabilité des gâchées contenant un pourcentage élevé de fibres naturelles, exige une conception très prudente.

Le 'slump test' est utilisé pour apprécier l'ouvrabilité des bétons conventionnels, mais généralement, il n'est pas convenable pour les B.R.F.N., parce que l'existence des fibres dans le béton lui confère une certaine résistance vis-à-vis les vibrations, ce qui fait que l'affaissement soit nul.

L'incorporation de fibres naturelles dans une gâchée diminue considérablement son ouvrabilité et augmente les vides. La diminution de l'ouvrabilité est due

essentiellement à l'absorption de l'eau par les fibres, à la surface spécifique et surtout à la forme et aux dimensions des fibres par rapport aux autres constituants de cette gâchée.

L'augmentation des vides est dû à l'inadéquat compactage des gâchées fermes.

Pour augmenter l'ouvrabilité, il est coutumier d'augmenter le rapport E/C sur le compte de la résistance du béton durci qui diminue ou d'utiliser des adjuvants qui peuvent améliorer l'ouvrabilité et les propriétés mécaniques du béton durci ou de les maintenir dans le pire des cas.

La distribution non uniforme des fibres dans le béton fait que les résultats donnés par des éprouvettes d'une même gâchée soient dispersés.

la faible ouvrabilité des B.R.F. est très utile dans la projection des bétons où les fibres aident à tenir le béton en un seul bloc (par exemple : le revêtement des tunnels où le béton doit être projeté vers le haut) et pour la production des plaques minces en béton (par exemple : plaque d'amiante-ciment).

Ces deux applications indiquent quelques applications possibles des B.R.F.N. à l'état frais qui peuvent être exploitées économiquement. [ref 3]

3.4.3 Propriétés des B.R.F.N. à l'état durci :

Les trois propriétés les plus importantes des B.R.F.N. durci sont :

- la résistance,
- la déformabilité,
- l'arrêt des fissures,

En général, la résistance est considérée comme la propriété la plus importante par laquelle la qualité des B.R.F.N. est jugée. [ref 3]

3.4.3.1 Comportement mécanique des B.R.F.N. :

Le comportement mécanique des B.R.F.N. dépend essentiellement :

- du type de la fibre utilisée,
- de la longueur et le pourcentage en volume des fibres,
- et aussi des propriétés et des proportions des autres constituants.

Les figures 3.5 - 3.6 montrent que les éprouvettes sans fibres se rompent brutalement et se cassent d'une manière fragile en deux parties.

Les éprouvettes avec fibres restent en un seul bloc, même après avoir atteint la charge ultime et la fissuration du béton elles continuent à porter une charge considérable. [ref 3]

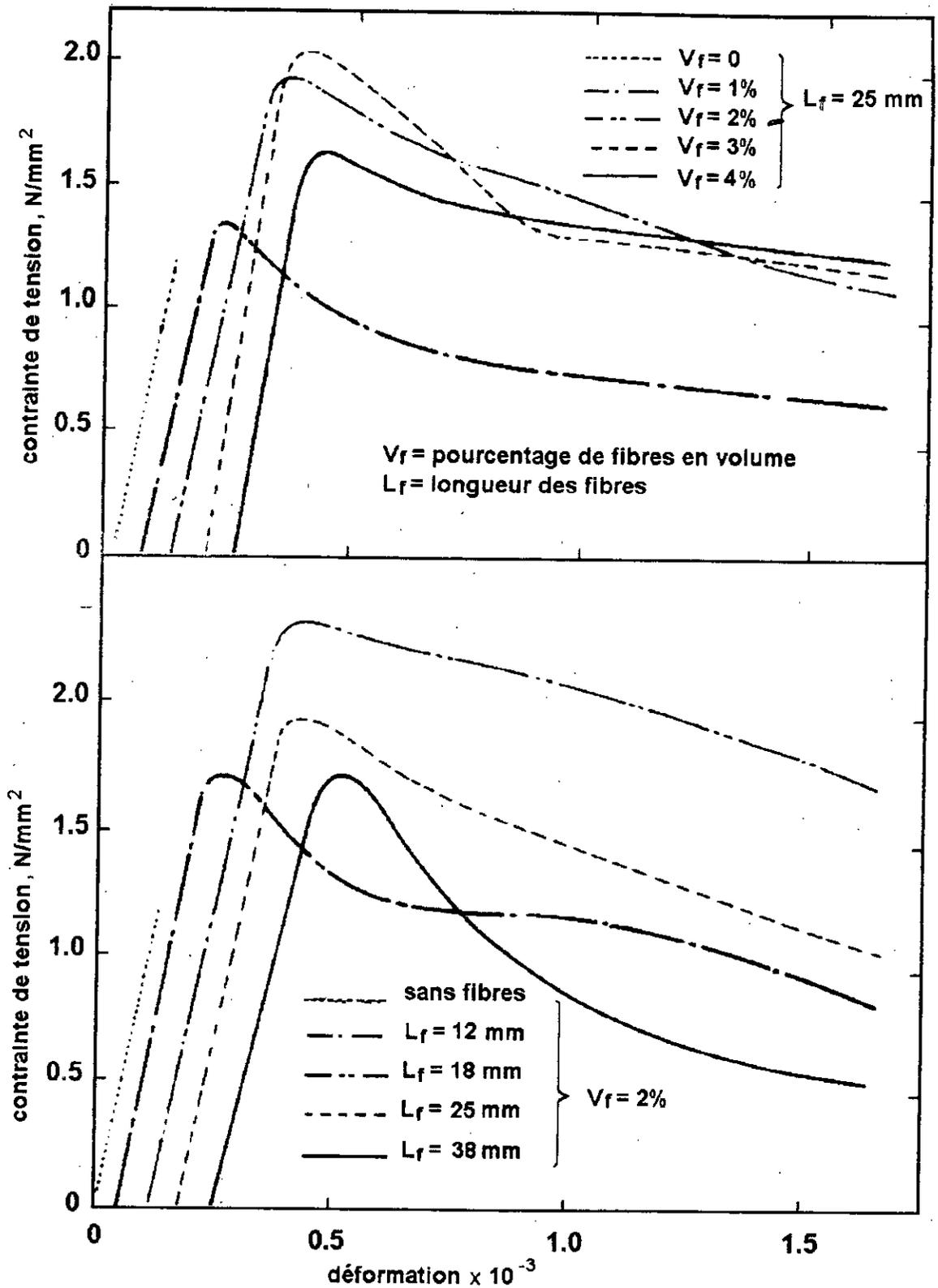


Figure 3.5 Comportement mécanique des composites de ciment renforcés de fibres de jute³

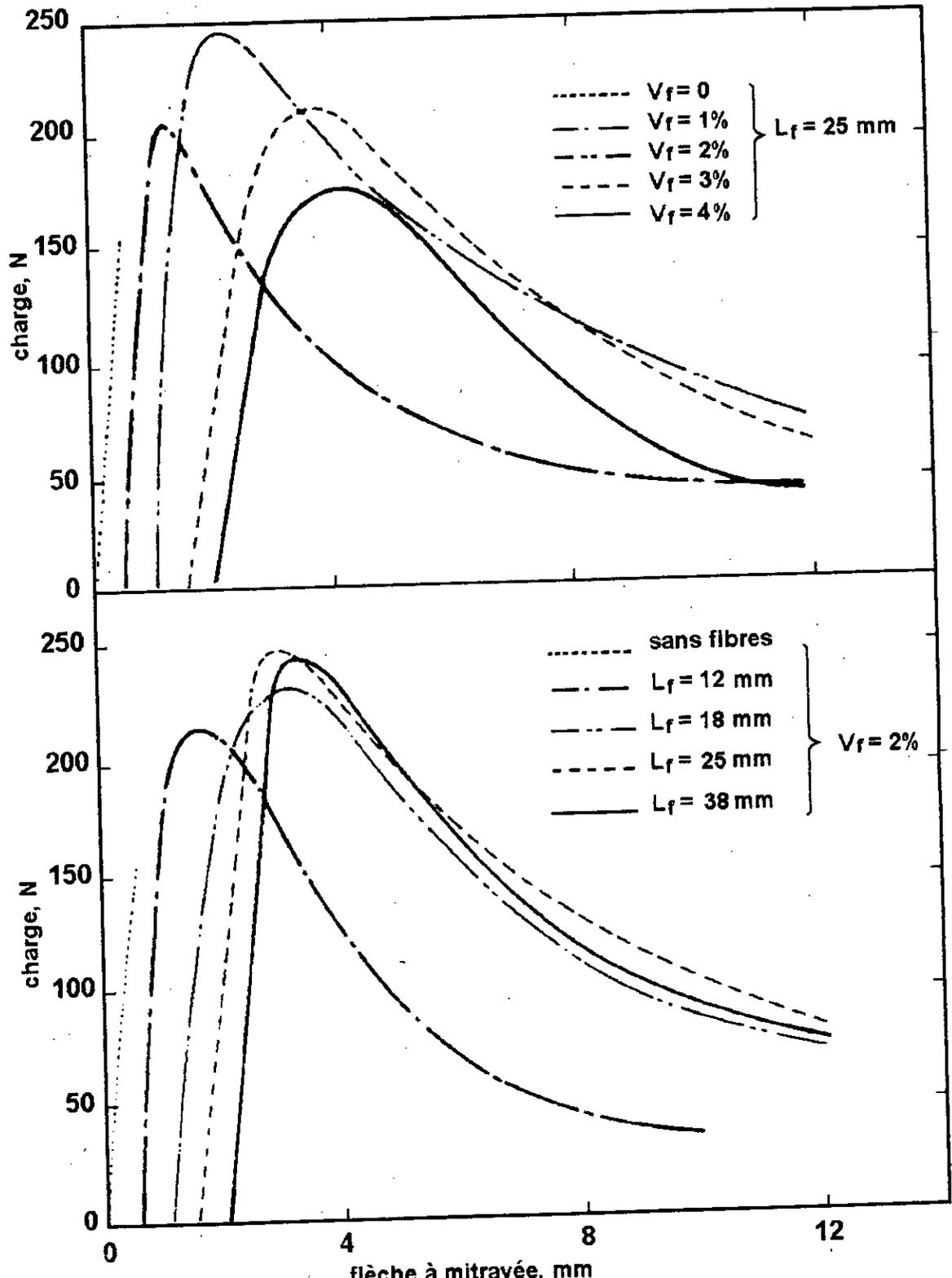


Figure 3.6 Courbes charge - flèche des composites de ciment renforcés de fibres de jute³

En plus, les améliorations de l'effort ultime en traction et en flexion, une augmentation considérable de la dureté est donnée par l'inclusion des fibres dans le béton (table 3.9). [ref 3]

Table 3.9 Effet de lf et du Vf sur un B.R.F. de jute [ref 3]

C/S?	Vf (mm)	lf (mm)	contrainte de comp. (Mpa)	contrainte de traction (Mpa)	Module d'élasticité (kN/mm ²)	
					compression	traction
1:1	2	12	37.43	2.51	14.30	18.00
	2	18	32.44	2.18	14.30	13.43
	2	25	32.76	2.16	12.50	14.57
	2	38	32.97	2.12	8.50	17.70
1:2	2	12	27.97	2.33	10.00	22.86
	2	18	28.72	2.48	13.41	22.56
	2	35	32.46	2.03	14.22	16.00
	2	38	24.97	1.63	15.25	16.66

Les propriétés distinctives de B.R.F.N. sont donc :

- l'amélioration de la résistance à la traction et à la flexion,
- la ductilité,
- la résistance à la fissuration,
- l'amélioration de la résistance à l'impact qui peut aller jusqu'à 400%,

Le comportement charge - flèche des B.R.F. de noix de coco, sisal, de la canne à sucre, de jute, de bois et d'autres est étudié, Quelques résultats de ces études sont montrés par les figures 3.7 - 3.8 . [ref 3]

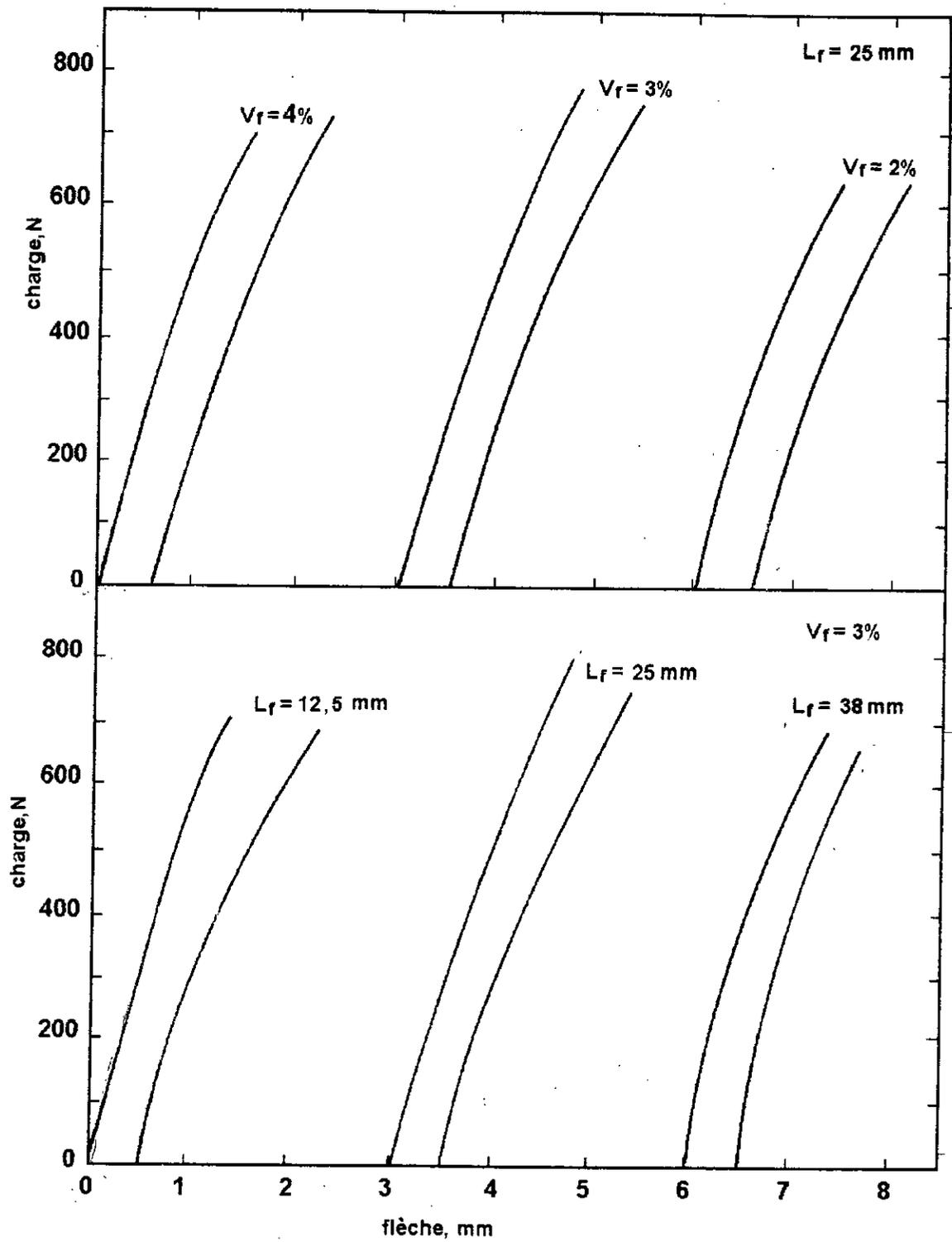


Figure 3.7 Courbes charge - flèche des dalles renforcées de fibres de noix de coco³

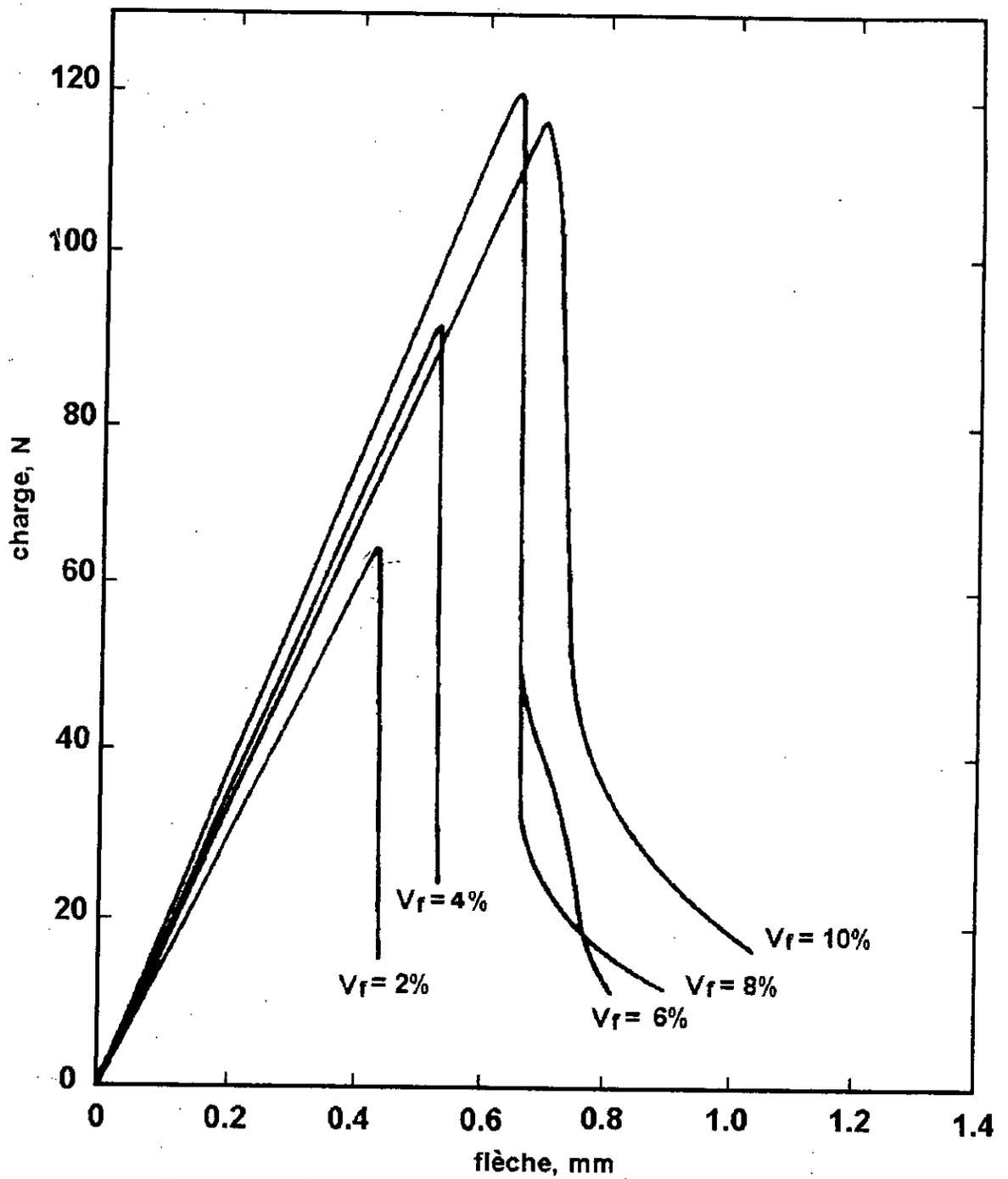


Figure 3.8 Courbes charge - flèche des composites renforcés de fibres de bois³

En tout cas, l'observation de la surface de rupture des éprouvettes confirme que les éprouvettes se rompent généralement par glissement des fibres plutôt que par rupture de celles-ci.

La faible adhérence fibre-matrice est souvent dûe au gonflement de la fibre dans le béton frais et son rétrécissement pendant le séchage. [ref 3]

3.4.3.2 Arrêt des fissures et absorption d'énergie :

La distribution aléatoire et uniforme des fibres (2% à 4% par volume) dans le béton améliore le mécanisme d'arrêt des fissures, Une fois la fissure commence, les fibres agissent comme couture de celle-ci, absorbent ainsi une grande partie de l'énergie.

Ces deux propriétés font que les B.R.F.N. trouvent leurs applications dans les éléments qui résistent à l'impact. [ref 3]

3.5 Durabilité des B.R.F.N. :

La raison qui fait que les fibres dans le béton deviennent fragile après un certain âge et l'alcalinité de l'eau des pores dans le béton qui dissout les éléments de la fibre, Cette fibre se décompose donc, et perd sa capacité de renforcement.

Pour éviter ce problème, plusieurs études sont menées sur la réduction de l'alcalinité du ciment, et ils ont donné de meilleurs résultats.

L'imprégnation des fibres par la cire ou la résine ou par autres agents imprégnants réduit aussi cette perte de capacité d'une façon satisfaisante. [ref 3]

3.6 Applications pratiques des B.R.F.N. :

Les applications à grande échelle des B.R.F.N. pour des objectifs structurels sont limitées, Seulement dans quelques applications spéciales, sont pratiquement et économiquement justifiées. L'un des domaines les plus promettant de leurs application est celui de la construction dont le B.R.F.N. forme une couche de base pour le béton ordinaire.

La couche fibreuse de base sert à augmenter la résistance à la traction de la partie tendue du béton et à réduire la largeur des fissures si elles surviennent.

Les produits des B.R.F.N. comme les plaques (planes et ondulées) et les panneaux légers sont idéals pour la toiture, les plafonds et les murs des maisons à

faible coût. Les tuiles en B.R.F. de sisal, les plaques ondulées de toiture, les tuyaux, les réservoirs de gaz et d'eau, et les silos sont en extensive utilisation dans quelques pays de l'Afrique. Les panneaux en B.R.F. de bois et de sisal sont utilisés en Australie. En Zambie, les plaques en mortier renforcé par fibres d'herbe d'éléphant sont utilisées pour la construction des maisons à faible coût. Leur spécial usage inclut les applications où l'énergie doit être absorbée ou où les dégâts d'impact sont importants comme dans les constructions résistantes au séisme, les fondations des machines dans les usines où l'impact accidentel, chocs et charges vibrantes sont présents. [ref 3]

CHAPITRE 4

4. Résultats expérimentaux sur le comportement mécanique :

4.1 Etude des fibres :

4.1.1 Fibres de palmier :

Les résultats obtenus après une étude expérimentale faites sur des feuilles fibreuses vertes et sèches de palmier sont résumés dans les tableaux suivants :

Fibres vertes de palmier			Fibres sèches de palmier (25 jours)		
S (mm ²)	P (N)	σ_n (N/mm ²)	S (mm ²)	P (N)	σ_n (N/mm ²)
14.81 x 0.31	170	37.03	7.44 x 0.31	520	73.71
15.26 x 0.26	210	52.93	7.66 x 0.28	500	69.94
11.20 x 0.24	200	74.40	5.66 x 0.32	500	82.82
12.11 x 0.24	170	58.49	5.81 x 0.33	520	88.67
6.45 x 0.28	100	55.37	6.04 x 0.34	640	141.22
10.79 x 0.31	200	59.79	5.49 x 0.34	560	112.50
11.74 x 0.26	195	63.88	7.67 x 0.30	600	108.65
7.08 x 0.24	80	47.08	5.16 x 0.33	500	88.09
7.44 x 0.23	070	40.91	5.36 x 0.31	470	72.22
9.05 x 0.23	80	38.43			
9.69 x 0.23	100	44.87			
7.79 x 0.24	80	42.79			
9.13 x 0.25	100	43.81			

S : section rectangulaire (e x b),

P : la charge nécessaire pour la rupture de la fibre.

4.1.2 Fibres d'alfa :

Les résultats obtenus pour les fibres d'alfa sont donnés dans le tableau suivant :

Fibres sèches d'alfa		
Mv = 0.83 Kg/l		
absorption d'eau # 70%		
D (mm)	P (N)	σ_n (N/mm ²)
0.96	100	138.22
1.04	100	117.78
0.92	130	195.68
0.90	140	220.20
0.79	50	102.07
1.01	120	149.87
0.87	70	117.82
0.92	120	180.62
1.04	150	176.68
1.20	150	132.71
1.02	120	146.94
1.01	120	149.87

D : diamètre de la fibre,

P : la charge nécessaire pour la rupture de la fibre.

4.1.3 Remarques et discussion des résultats :

Nous pensons que les résultats obtenus ne sont pas représentatifs, ceci revient à l'utilisation d'appareil de traction pour essai sur acier.

Cependant, il existe des appareils de mesures, de précisions spéciales pour ce genre d'essai sur les fibres.

Il nous était pas possibles d'avoir une précision pour des fibres allant de 10 à 15 Kg alors que l'appareil présentait une graduation de 5 Kg, cela veut dire une erreur de précision pouvant atteindre les 50% .

Nous avons, également, remarquer une défaillance au niveau des mors qui presentaient un grand jeu entre les deux plaques de serrage.

Cependant, nous étions obligés de régler ce problème par l'utilisation du papier à verre entreposé entre les deux plaquettes.

Ce procédé a donné de bons résultats, nous avons empêcher le glissement des fibres par rapport aux mors.

4.2 Etude des B.R.F.N. :

4.2.1 Choix des procédés expérimentaux :

En ce qui concerne le choix du mode opératoire des essais mécaniques permettant l'étude du comportement du béton de fibres. Le choix le plus simple consiste à effectuer les essais suivant le mode défini pour le béton sans fibres , habituellement, deux modes d'essais sont réalisés sur le béton :

- des essais à vitesse de déformation contrôlée, permettant de caractériser les différentes phases du comportement mécanique (élastique, plastique) et le mode de rupture,
- des essais à vitesse de charge contrôlée, permettant de déterminer les valeurs maximales de l'effort supporté par le corps d'épreuve.

En raison du caractère fragile du béton les résistances obtenues par ces deux modes d'essai sont comparables. Mais, dans le cas où les fibres sont ajoutées dans le béton, l'atténuation de la fragilité qui en résulte conduit à des résultats divergents, dépendant du mode d'essai, ce qui empêche une détermination univoque des performances mécaniques du matériau.

Quant aux dimensions et forme des éprouvettes, il n'existe aucune norme qui les fixe, donc on était conduits à utiliser les moules disponibles pour le béton courant.

On note qu'une discussion, au niveau international, est actuellement en cours, afin de déterminer les procédures expérimentales adaptées à la caractérisation mécanique du béton de fibres. [ref 1]

4.2.2 Détermination de la composition du B.R.F.N. :

Pour raison de la chute considérable de l'ouvrabilité du béton que la présence des fibres provoque, on a testé plusieurs compositions en tenant compte des recommandations données par les auteurs :

- $g/(g+s) < 0.5$ [ref 2]
- $D_{max} \text{ des granulats} < l_f/4$ [ref 1]
- $l_f \# 25 \text{ mm}$ [ref 3]
- dosage en ciment plus élevé, [ref 3]

La composition la plus adéquate qu'on a obtenu pour une longueur de fibre $l_f \# 30$ mm est la suivante : $C/S = 1/1.2$ (en volume) avec un sable de calibre 0/8 .

4.2.3 Sollicitation en flexion :

4.2.3.1 Comportement mécanique :

La faible résistance en traction du béton (en comparaison avec sa résistance en compression), conditionne le comportement mécanique du béton en flexion, par la fissuration de la partie tendue du matériau. Ainsi, le diagramme effort-déformation du béton sans fibres, en flexion, se rapproche de celui de la traction pure, avec une phase montante avant fissuration, pratiquement linéaire, et une chute rapide après fissuration de la partie tendue (rupture fragile).

Dans le cas du béton de fibres, la première partie du diagramme jusqu'à la fissuration, est pratiquement identique à celle du béton témoin sans fibres parce que la participation des fibres dans la résistance du matériaux est négligeable avant fissuration du béton.

Après fissuration de la partie tendue du béton, les fibres interviennent à la reprise des efforts, en retenant le matériau de part et d'autre de la fissure comme dans le cas de la traction pure. L'augmentation du moment résistant qui en résulte, met en valeur l'importante résistance du béton à la compression dans la partie comprimée.

Cette modification de la répartition des contraintes dans la section fissurée, se traduit par un comportement ductile du matériau après fissuration, dont les caractéristiques dépendent essentiellement de la capacité de reprise des charges par les fibres.

En conclusion, les fibres dans un béton sollicité en flexion, jouent un rôle beaucoup plus efficace que dans le cas de la traction pure. Même pour de faibles volumes de fibres l'effort supporté par le béton de fibres fissuré, peut être supérieur à celui observé lors de la première fissuration.

Comme dans le cas de la traction pure, la capacité d'accrochage des fibres dans le béton et la section qu'elles présentent sur le plan de la fissure, sont les facteurs déterminants de cette amélioration du comportement mécanique dans la phase plastique du béton de fibres en flexion. [ref 1]

4.2.3.2 Résultats obtenus :

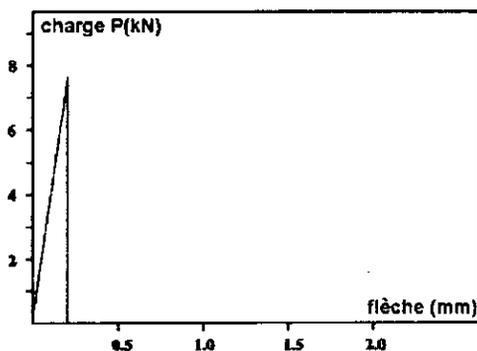
Les tests sont effectués sur des éprouvettes prismatique :

- dimensions : 7 x 7 x 28
- âge : 7 jours
- conservés dans l'eau à la température ambiante.

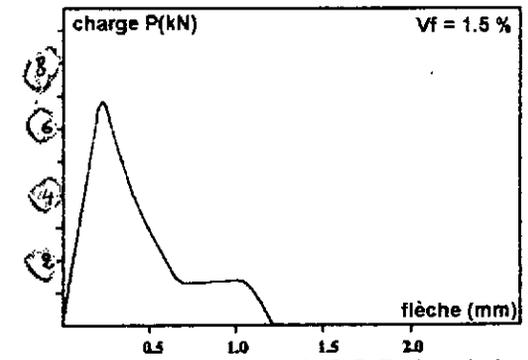
— Nombre ?

Les résultats sont donnés dans les tableaux suivants :

Béton témoin (palmier) C/S/g/G = 1/3/1.3/2.1 E/C = 0.43				B.R.F. de palmier C/S/g/G = 1/3/1.3/2.1 E/C = 0.52 Vf = 1.5%			
N°	1	2	3	N°	1	2	3
P (N)	6300	6900	7600	P (N)	5750	5850	5650
σ (Mpa)	2.33	2.55	2.81	σ (Mpa)	2.13	2.16	2.10

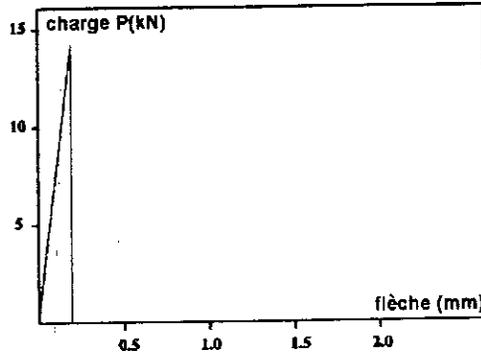


Courbe charge-flèche du béton ordinaire

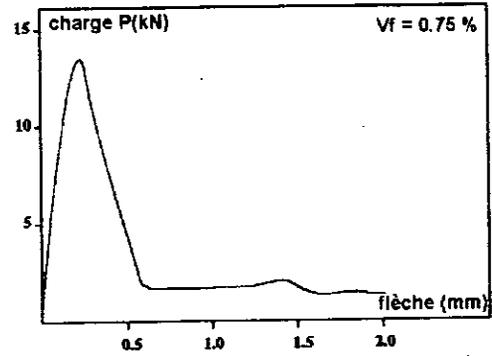


Courbe charge-flèche pour le B.R.F. de palmier

Béton témoin (alfa) C/S = 1/1.2 E/C = 0.45				B.R.F. d'alfa C/S = 1/1.2 E/C = 0.47 Vf = 0.75%			
N°	1	2	3	N°	1	2	3
P (N)	15250	13950	15000	P (N)	12750	13000	14400
σ (Mpa)	5.64	5.16	5.55	σ (Mpa)	4.72	4.81	5.33

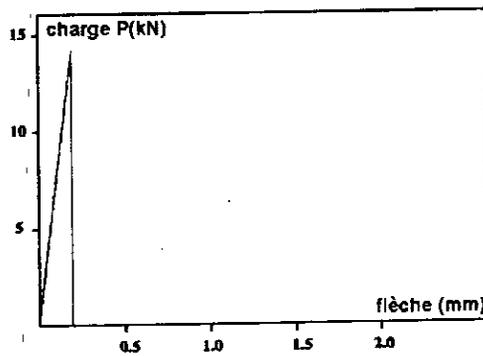


Courbe charge-flèche du béton ordinaire

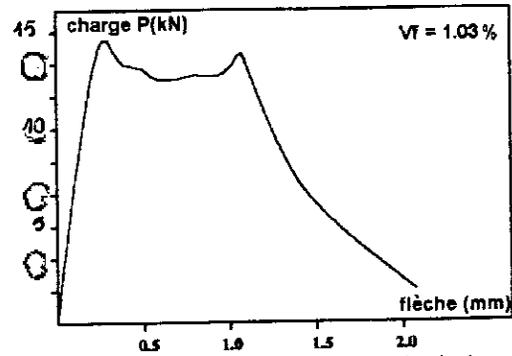


Courbe charge-flèche pour le B.R.F. d'alfa

Béton témoin (sisal) C/S = 1/1.2 E/C = 0.45				B.R.F. de sisal C/S = 1/1.2 E/C = 0.49 Vf = 1.03%			
N°	1	2	3	N°	1	2	3
P (N)	15250	13950	15000	P (N)	8700	8850	8900
σ (Mpa)	5.64	5.16	5.55	σ (Mpa)	3.12	3.28	3.29



Courbe charge-flèche du béton ordinaire.



Courbe charge-flèche pour le B.R.F. de sisal

Interprétation des résultats :

- Le diagramme charge - flèche du B.R.F. est composé de deux phases caractéristiques :

- une phase élastique correspond à la phase linéaire du béton non fissuré, suivit d'une chute rapide après fissuration du béton,

- une phase post fissuré correspond^à l'étirement des fibres sous l'effet de la charge.

La similitude du comportement du béton dans la première phase du diagramme avec ou sans fibres montre que la participation des fibres dans la résistance du matériau est négligeable avant fissuration du béton.

Après fissuration, ce sont les fibres qui doivent reprendre la totalité de la charge, ce qui n'est pas le cas pour les graphes obtenus (B.R.F. de palmier et d'alfa).

4.2.4 Remarques et discussion des résultats :

a) Problème d'adhérence :

Pour des bétons de ce genre, nous devions utiliser des fibres très fines, pour avoir une meilleure distribution, c'est à dire un béton homogène, Or les fibres que nous avons obtenu avaient des dimensions très importantes à savoir plus de 1mm de diamètre pour l'alfa, donc il fallait les défibrer, et pour ce faire, les endommager était inévitable, Vu que ce problème ne pouvait être résolu, nous les avons utilisés à leur état brut.

En conséquence l'adhérence est affectée par :

↓ la surface lisse des fibres d'alfa,

- et par réaction chimique entre le contenu des feuilles du palmier et le ciment.

Par contre, le béton de fibres de sisal a donné un comportement acceptable compte tenu du pourcentage utilisé.

b) Problème de la détermination de la composition adéquate du béton:

L'addition de fibres dans un béton courant change complètement le comportement du mélange frais, de telle manière que, dans certains cas, la mise

en oeuvre devient extrêmement difficile. Une adaptation de la composition du béton en fonction de la quantité et de la forme et dimensions des fibres ajoutées, devient alors nécessaire, Or il n'existe aucune méthode qui adapte cette composition à l'ajout des fibres.

Donc on était obligé à tester plusieurs compositions basées sur des recommandations données par les auteurs pour aboutir à une composition qui améliore l'ouvrabilité sans affecter la résistance.

D'autre part le pourcentage des fibres nous était exigé par le phénomène d'agglomération des fibres lors du malaxage, ce pourcentage dépassait légèrement 1% dans le meilleur des cas, alors que d'après certain auteur le pourcentage optimum des fibres est de l'ordre de 2% .

CHAPITRE 5

5. Conclusion :

Nous pensons que cette étude a été plus que bénéfique, même si les résultats n'ont pas été très satisfaisantes. Cependant il nous a été possible de présenter, aussi explicitement que possible, ce nouveau matériau, ainsi que de donner l'étendu de son application, ainsi que ses propriétés.

Vue la nouveauté du matériau, une norme n'a pas été encore définie, d'où la difficulté de l'exécution d'essais conventionnels et normalisé. Des essais qui concerne les fibres et les bétons de fibres.

Lors des essais nous avons remarqué une mauvaise adhérence fibre - béton, ceci revient du fait de l'utilisation de fibres de grandes dimensions et qui présentaient des surfaces de contacts très lisses.

Les fibres offrent au béton une certaine ductilité. Elle offrent un contrôle meilleur des fissures puisque elles les réduisent d'une manière considérable.

Du point de vue estimation critique des formes et des propriétés des bétons fibreux, il est claire que la technologie appropriée pour un développement d'une production de qualité est de première importance, pour ce faire, un travail d'investigation doit être lancé et qui traitera les points suivants :

- classification des fibres naturelles en considérant les propriétés physiques et chimiques,
- étude de l'interaction morphologique des propriétés entre les fibres et le béton,
- étude des propriétés et leur évolution dans le temps, et la possibilité de l'exécution d'essais sur la durabilité accélérée.

- le développement du type de produit ainsi que les méthodes de production, à savoir l'extraction et le traitement des fibres, la conversion de ces fibres en des formes utilisables, leur répartition dans la matrice béton.

Des procédures standards doivent être établies pour évaluer ainsi que contrôler le produit, le contrôle concerne l'impact, l'absorption de l'eau, le retrait, résistance aux attaques chimiques, et durabilité.

□

REFERENCES

- [1] Synthèse des études et recherches sur les bétons de fibres réalisées au
CEBTP (France),
revue du béton N° 520, Janvier 1994.
- [2] Techniques de l'ingénieur, 1989-1991
pages : C2210.12 - C2210.16
- [3] R.N. SWAMY - Concrete technologie and design,
tome 2: New reinforced concretes, 1988
- [4] Mostefa MIMOUN - Les renforts fibreux utilisés dans les matériaux de
construction,
revue "Algerie Equipement" N°15, Septembre 1994.