

ETUDE D'UNE POUTRE CONTINUE COMBINEE EN BETON DE FIBRES

Reçu le 24/11/1999 – Accepté le 17/10/2001

Résumé

Dans le but d'augmenter la résistance à la traction et à la fissuration des sections droites normales et inclinées des poutres continues, le béton de fibres est utilisé dans le contour de la section et tout le long de l'élément, dont l'épaisseur du béton de fibres dans les zones tendues est plus importante que celle des zones comprimées. A l'intérieur du béton de fibres, on utilise un béton maigre, ce qui nous permet d'équilibrer le coût de réalisation en faisant une économie sur la quantité de ciment à utiliser. Les fibres sont utilisées en quantités minimales et nécessaires dans les zones tendues où la probabilité de fissuration est très importante, et ainsi le béton, compris à l'intérieur du béton de fibres, sera soumis à une compression due à la différence de rigidité entre ces deux composants. Les propriétés, la fiabilité et par conséquent les résistances, évaluées à partir de la notion de la densité linéique des composants, basée sur la détermination du diamètre et la finesse des fibres utilisées dans le mélange composite, permet d'apprécier les caractéristiques mécaniques, surtout vis-à-vis de la corrosion.

Mots clés: Conception, poutres combinées, biellette, fibres, fissuration, corrosion, rigidité, densité linéique, finesse.

Abstract

With an aim of increasing the tensile strength and to the cracking of the normal and tilted cross-sections of the continuous beams, the fiber concrete is used in the contour of the section and all along the element, of which the thickness of the fiber concrete in the tended zones is more important than that of the compressed zones. At the interior of the fiber concrete, one uses a lean concrete what enables us to balance the cost of realization by making an economy on the quantity of cement to be used. The fibers are used in quantities minimal and necessary in the tended zones where the probability of cracking is very important, thus the concrete included/understood inside the fiber concrete, will be subjected to a compression due to the difference in rigidities between these two components. The properties, the reliability and consequently the resistances, evaluated starting from the notion of the linear density of the components, based on the determination of the diameter and the smoothness of fibers used in the composite mixture, makes it possible to especially appreciate the mechanical characteristics with respect to corrosion.

Key Words: Design, beams combined, rod, fibers, cracking, corrosion, rigidity, linear density, smoothness.

K. AIT-TAHAR

Département de Génie Civil
Faculté des Sciences de
l'ingénieur
Université Mouloud Mammeri
Tizi-ouzou, Algérie

A. MEDDAHI

Laboratoire des Matériaux
Minéraux
et Composites (L.M.M.C)
Université de Boumerdes,
Algérie

ملخص

تحصل زيادة المقاومة ضد المد و انشقاق المقاطع العمودية و المائلة للرافدات المستمرة، باستعمال ألياف الخرسانة على محيط المقطع و طول القطعة (الرافدة) حيث سمك الخرسانة الليلية في المناطق الممدودة أكبر من المناطق المضغوطة. ونستعمل داخل الخرسانة الليلية الخرسانة ذو تركيز ضعيف. هذا ما يسمح لنا بتخفيض تكلفة الإنجاز و ذلك باقتصاد كمية الإسمنت المستعملة. نستعمل الألياف بأدنى كمية لازمة داخل المناطق الممدودة، أين يحتمل أن يكون الانشقاق مهما. و بذلك، والخرسانة ذات التركيز الضعيف الموجودة داخل الخرسانة الليلية تخضع إلى ضغط ناتج عن الفرق في المرونة بين العنصرين المركبين. وتقدر الخصائص و إمكانية الاستعمال، إلى جانب المقومات، عن طريق مفهوم الكثافة الخطية للعناصر المركبة، المبنية على إيجاد القطر و نغومة الألياف المستعملة في الخليط المركب الذي يسمح بتقدير المميزات الميكانيكية خاصة بالنسبة لتآكل.

الكلمات المفتاحية: إحداهن، الرافدة المركبة، الليف، الانشقاق، التآكل، المرونة، الكثافة الخطية، النغومة.

L'ingénierie des matériaux est à la base de la conception "intelligente" des bétons d'aujourd'hui et du futur. Elle consiste à optimiser la composition du matériau en fonction de l'application industrielle visée. Le béton de fibres [1] est un matériau qui est obtenu par l'ajout d'éléments fibreux dans une matrice de béton pour remédier à certaines faiblesses du béton ordinaire à savoir: faible résistance à la traction, aux chocs et aux charges dynamiques, au cisaillement, à la fissuration, etc. [2-5]. L'ajout des fibres engendre une augmentation des résistances, car les fibres ont pour fonction de retarder la micro-fissuration en cousant celle-ci, de reprendre les efforts au travers des micro fissures obtenues après un certain mode et durée de chargement et évitent l'élargissement de celle-ci, et transforment le comportement fragile du béton en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes [6]. L'étude de l'effort tranchant permet de vérifier l'épaisseur de l'âme et de déterminer les armatures transversales et l'épure d'arrêt des armatures longitudinales [7]. Le dimensionnement des sections des poutres continues sur appuis multiples passe par la recherche des courbes enveloppes des moments, qui permettent de déterminer les moments maximaux sur appuis et en travées, ainsi que la longueur des chapeaux sur appuis et les arrêts de barres. L'évolution d'une poutre soumise à l'effort tranchant est définie par l'état de chargement; au début du chargement le béton de fibres n'est pas fissuré; l'équilibre interne est caractérisé par un état biaxial de contraintes très voisin de ce qui serait dans un matériau homogène. Lorsque le chargement augmente, il apparaît des fissures de

traction; l'équilibre interne est modifié et il évolue en fonction de la fissuration.

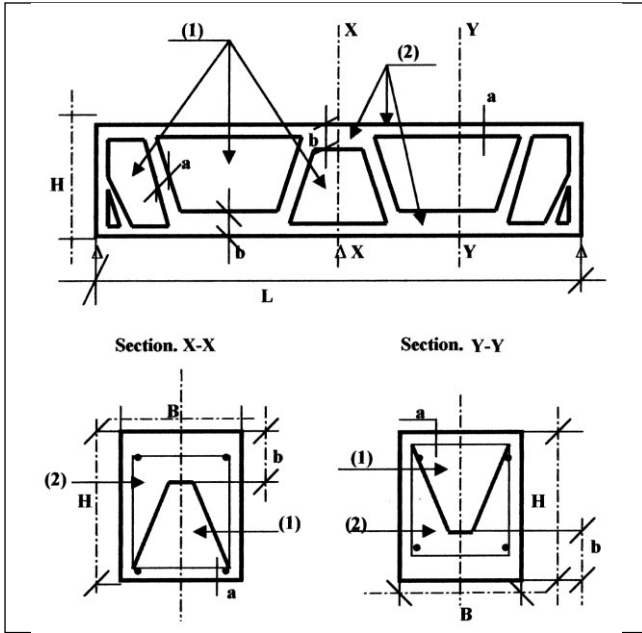


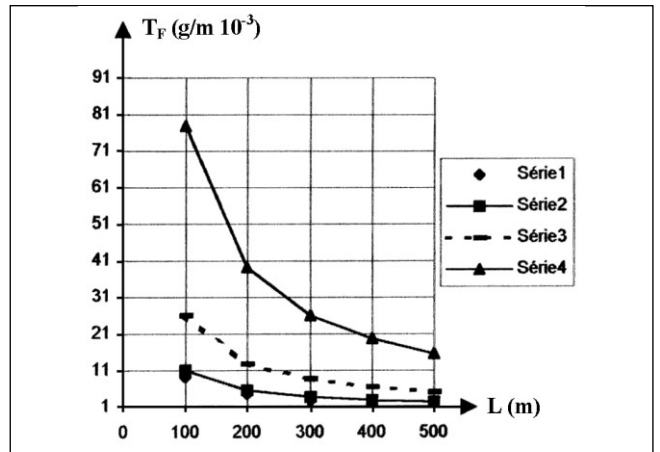
Figure 1: Poutre continue combinée à base de béton de fibres. a: épaisseur du béton de fibres dans les zones comprimées et dans les bielles inclinées. b: épaisseur du béton de fibres dans les zones tendues. (1)- béton maigre, (2)- béton de fibres.

Dans cette étude (Fig.1), nous présentons une nouvelle conception de poutres continues combinées à base de béton de fibres, dans le but d'augmenter la résistance à la traction et à la fissuration des sections droites normales et inclinées. Le béton de fibres est utilisé dans le contour de la section et tout le long de l'élément, dont l'épaisseur du béton de fibres dans les zones tendues est plus importante que celle des zones comprimées (en travées et aux appuis intermédiaires). Pour reprendre les efforts tranchants, les bielles au niveau des appuis sont réalisées en béton de fibres conformément à l'analogie du treillis [2]. Les poutres combinées en béton de fibres supporteront des efforts tranchants et des moments de flexion plus importants que les poutres ordinaires de mêmes dimensions et réalisées avec le même mélange, avec des armatures classiques (Graphe 3), ce qui permettra soit, d'augmenter les portées des travées, soit de diminuer la hauteur des sections normales pour un même chargement donné, ou de prévoir des charges plus importantes dans les calculs.

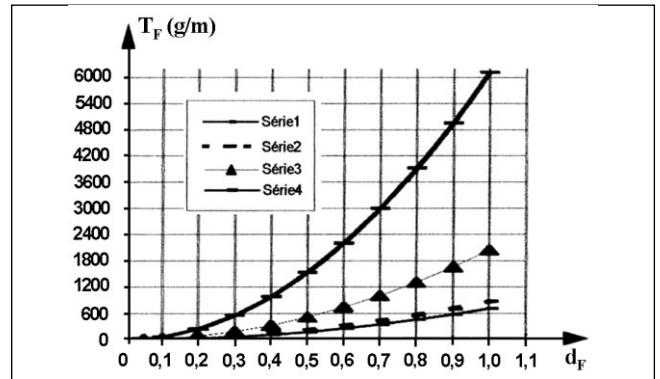
La technique de réalisation de ce type de construction se résume à couler, en première phase les bielles en béton de fibres dans un coffrage secondaire, disposé à l'intérieur d'un coffrage principal. Le coffrage secondaire est étiré vers le haut au fur et à mesure de l'avancement du coulage du béton maigre en deuxième phase.

Le rôle de couture que jouent les fibres dans les zones tendues du béton et la cohésion qu'elles donnent au droit des fissures, font que les dégradations de la matrice restent limitées, et la capacité portante de l'ensemble reste élevée [8]. Le choix du type de fibres à utiliser pour améliorer les caractéristiques mécaniques de la matrice composite est obtenu à partir de l'évaluation de la densité linéique des

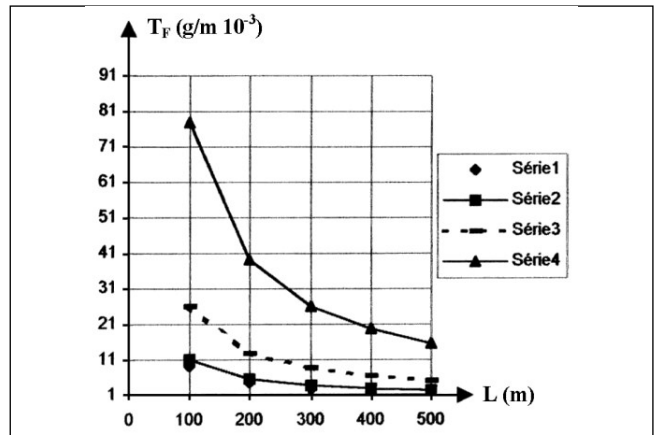
composants dans le mélange constituant la matrice. Pour apprécier la qualité de ces mélanges, et donc les caractéristiques mécaniques, nous proposons de déterminer le diamètre et la finesse des fibres utilisées dans le mélange composite (Graphe 1, 2). En effet, cette finesse permettra de calculer le nombre de fibres dans la section transversale du filé, c'est-à-dire d'évaluer le pourcentage de fibres utilisées dans la composition du mélange (Graphe 3), pour l'amélioration de leurs propriétés, de leur fiabilité et par conséquent de leurs résistances.



Graphe N°1: Relation entre la densité linéique "T_F" et la longueur "L" du fil élémentaire.



Graphe N°2: Relation entre la densité linéique "T_F" et le diamètre "d_F" pour différents types de matériaux.



Graphe 3: Diagramme contraintes-déformations du béton de fibres en fonction du pourcentage de fibres μ_F (%).

MODES DE RUPTURE PAR EFFORT TRANCHANT

Les modes de rupture par effort tranchant sont obtenus soit par:

- Ecrasement des bielles de béton de fibres comprimées limitées par les fissures à 45° [7].
- Rupture d'armature de l'âme, lorsque celle-ci atteint sa limite de résistance en traction.
- Ruine des éléments de transmission des efforts au voisinage du point d'application des efforts.

Vérification du béton de l'âme

(Etat limite ultime par compression des bielles de béton de fibres)

Pour déterminer les efforts internes, on fait une coupure parallèle aux bielles de béton de fibres.

On cherche, sur une surface OH perpendiculaire aux bielles, l'effort F_c mis en évidence par cette coupure. Cette force s'exerce sur une surface réelle égale à $b_0 \cdot OH$, avec b_0 et h_0 respectivement la largeur et la hauteur de la section transversale.

Si " σ_c " est la contrainte dans la bielle (Fig. 2):

$$F_c = \sigma_c \cdot (b_0 \cdot OH)$$

$$OH = Z (1 + \cotg \alpha) / \sqrt{2}$$

$$F_c = \sigma_c \cdot b_0 \cdot Z (1 + \cotg \alpha) / \sqrt{2} \quad (1)$$

Or: $F_c / \sqrt{2} = V$

$$\Rightarrow \sigma_c = 2 \cdot (V / b_0 \cdot Z) / (1 + \cotg \alpha) \quad (2)$$

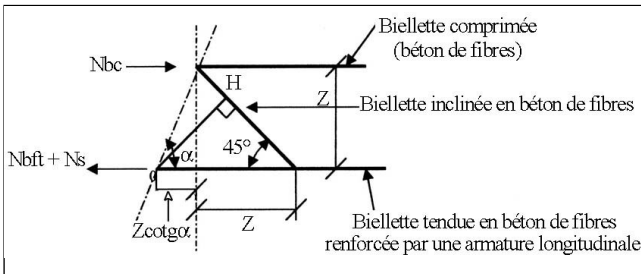


Figure 2: Coupure parallèle aux bielles de béton de fibres.

Il faut vérifier que: $\sigma_c \leq v \cdot R_{bc} / \gamma_{bf}$, expression dans laquelle " v " est un coefficient de minoration qui tient compte de la présence des armatures transversales: même si elles n'interviennent pas dans l'équilibre, elles entraînent un effort de traction par adhérence sur le béton de fibres des bielles, et " γ_{bf} " représente le coefficient de travail du béton de fibres.

On remarque que la contrainte dans la bielle ne dépend que de la valeur de l'effort tranchant et des dimensions géométriques. Néanmoins, cette valeur doit être inférieure ou égale à la résistance de la matrice composite qui est nettement supérieure à celle du béton ordinaire.

Lors du comportement linéaire, l'adhérence entre les fibres et la matrice en béton est parfaite; l'effort de traction " R_{bf} ", est donné par la relation suivante:

$$R_{bf} = \Psi \cdot (1 - \mu_F) \cdot R_b + \varphi \cdot \mu_F \cdot R_F \quad (3)$$

φ et Ψ représentent le taux de travail respectivement des fibres et du béton (paramètres de non-linéarité variables entre 0 et 1).

La relation (3) peut s'écrire sous la forme suivante:

$$R_{bf} = R_b + \lambda_{red} R_F \mu_F \quad (4)$$

λ_{red} est le coefficient de travail des fibres métalliques en compression qui dépend du type d'ancrage, de l'orientation des fibres et de la surface de contact entre le béton et les fibres, fonction de la longueur de la fibre et sa longueur d'ancrage.

$$\sigma_c \leq (v \cdot R_{bc} + \lambda_{red} R_F \mu_F) / \gamma_{bf} = v \cdot R_{bc} / \gamma_{bf} + \lambda_{red} R_F \mu_F / \gamma_{bf} \quad (5)$$

ce qui correspond donc à une augmentation de:

$$" \lambda_{red} R_F \mu_F / \gamma_{bf} "$$

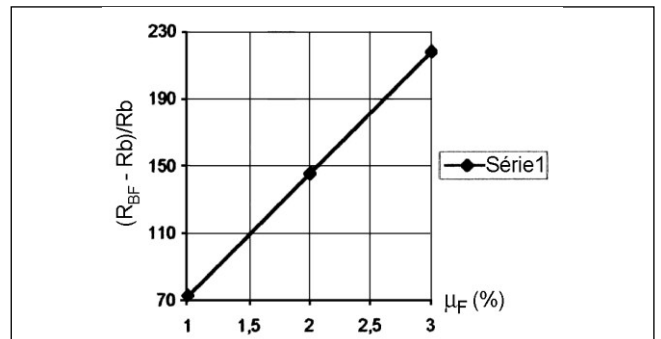
La variation de la résistance en traction du béton de fibres par rapport au béton maigre $(R_{bf} - R_b) / R_b$ (Graphe 4), est fonction du pourcentage des fibres incorporées et de leurs coefficients φ et Ψ .

A l'état ultime, sous l'effet de traction, la valeur de la résistance du composite dépend seulement du travail des fibres. Cette dernière est alors donnée, dans le cas d'une orientation aléatoire, par la relation suivante:

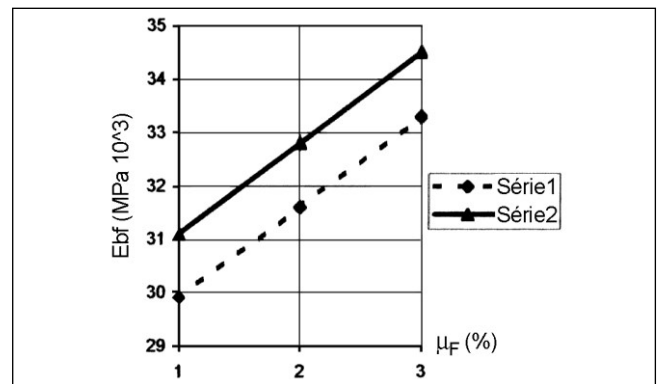
$$R_{bf} = \lambda_{red} \cdot \mu_F \cdot R_F \quad (6)$$

Les composites ont un module généralement intermédiaire, pondéré entre ceux de leurs constituants. Les modules des composites peuvent dépasser ceux de leur matrice, en supposant tout naturellement que les déformations des fibres et de la matrice sont identiques (Graphe 5). De cette façon, le module est donné par la relation suivante:

$$E = \Psi \cdot (1 - \mu_F) \cdot E_b + \varphi \cdot \mu_F \cdot E_F \quad (7)$$



Graphe 4: variation de la résistance en traction du béton de fibres par rapport au béton ordinaire en fonction du pourcentage de fibres " μ_F ".



Graphe 5: Variation du module de déformation longitudinal du béton de fibres " E_{BF} " en traction en fonction du pourcentage de fibres " μ_F " et du dosage du béton. Série 1: C=350; Série 2: C=400.

Comportement de la poutre sous l'effet d'un moment de flexion

Dans un essai de flexion, l'apport de fibres dépend considérablement de leur aptitude à absorber une grande quantité d'énergie après fissuration de la matrice de béton. Lorsque les fibres sont suffisamment ancrées, elles peuvent être sollicitées jusqu'à la limite de leur résistance en traction.

Avant fissuration (stade linéaire), le comportement du composite est élastique linéaire et l'adhérence entre les fibres et la matrice est parfaite. A l'instant où apparaît une fissure, il y a chute brutale de la contrainte (celle-ci est alors égale à la différence entre la résistance du composite et la résistance du béton seul) et le comportement est élastique non linéaire [5]. La rupture de l'élément survient alors, soit par arrachement, soit par rupture des fibres. Le dimensionnement des sections vis-à-vis du moment de flexion s'effectuera en considérant l'état limite ultime qui peut-être atteint soit par écoulement plastique des aciers, soit par écrasement du béton; ensuite, ce dimensionnement doit satisfaire les conditions de l'état limite de service. Le domaine post-fissuration présente pour toutes les fibres un palier plastique important [1]. Le comportement de la matrice est linéaire jusqu'à fissuration du composite. Au moment de l'apparition de la première fissure, il y a chute de la résistance, la zone tendue se déforme alors d'une manière non linéaire. La résistance du béton au seuil de la première fissuration dépend essentiellement des caractéristiques du béton, et moins du type et du volume des fibres utilisées. Après fissuration de la partie tendue de la matrice composite, les fibres interviennent lors de la reprise des efforts en retenant le matériau de part et d'autre de la fissure. La rencontre du plan de la fissure avec des fibres perpendiculaires à ce plan conduit à une dissipation de l'énergie de fissuration, soit par un arrêt temporaire de la fissuration, soit par une ramification de la fissuration en plusieurs fissures secondaires, décalées latéralement par rapport à la direction principale du plan de fissuration.

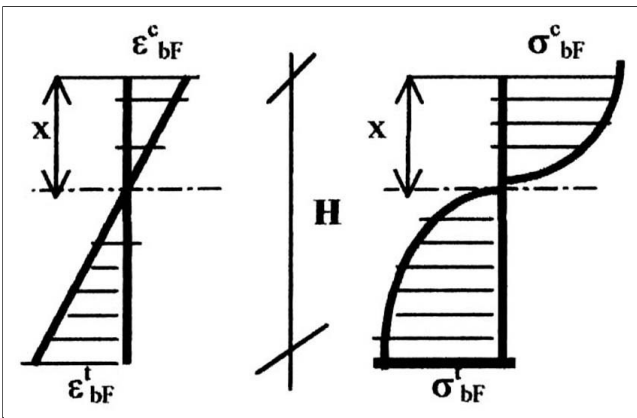


Figure 3: Diagrammes des contraintes et des déformations.

La valeur de la contrainte dans la zone tendue juste au moment de fissuration sera égale à (Fig. 1et 3):

$$\sigma_{bt}^Z = R_{bf} (Z/h - x)^n, \text{ avec } 0 \leq Z \leq h-x-b; \quad (8)$$

où:

σ_{bt}^Z : contrainte du béton de fibres à la distance "Z".

R_{bf} : résistance à la traction du composite.

Z : distance de la fibre la plus tendue par rapport à l'axe neutre.

x : hauteur de la zone comprimée.

b : épaisseur de la couche du composite (béton de fibres).

n: paramètre caractérisant la non-linéarité du béton de fibres.

L'état limite ultime peut être atteint de deux façons:

- par écoulement plastique des aciers ($\epsilon_s = 10^{0/100}$).
- par écrasement du béton de fibres en compression.

En utilisant l'hypothèse des sections planes, on déterminera les relations existantes entre toutes les déformations à savoir:

$$\begin{cases} \epsilon_{bf}^c = \epsilon_{bf}^t \cdot (x / h-x) \\ \epsilon_b^c = \epsilon_{bf}^t \cdot (x-a / h-x) \\ \epsilon_{b^t}^Z = \epsilon_{bf}^t \cdot (Z/h-x) = \epsilon_{bf}^t \cdot (h-x-b/h-x) \\ \epsilon_s = \epsilon_{bf}^t \cdot (h_0-x / h-x) \end{cases} \quad (9)$$

En utilisant le principe des contraintes non linéaires et l'hypothèse des sections planes, la contrainte dans l'armature tendue est égale:

$$\sigma_s = \epsilon_s E_s \beta_s / \varphi_s$$

φ_s est un coefficient, fonction du rapport entre l'état de contrainte et le module d'élasticité de l'armature tendue.

Les contraintes (Fig. 1,3) du béton de fibres comprimé, de l'armature, du béton tendu à la distance "Z" de l'axe neutre et du béton comprimé, sont données respectivement par les relations suivantes:

$$\begin{cases} \sigma_{bf}^c = \sigma_{bf}^t \cdot (x / h-x) (\varphi_{bf}^t \cdot \beta_{bf}^c / \varphi_{bf}^c \cdot \beta_{bf}^t) \\ \sigma_s = \epsilon_{bf}^t (h_0-x) / (h-x) E_s \beta_s \varphi_{bf}^t / \varphi_s E_{bf} \beta_{bf} \\ \sigma_{b^t}^Z = \epsilon_{bf}^t (h-x-b) / (h-x) \beta_b E_b \varphi_{bf}^t / \varphi_b \beta_{bf}^t E_{bf} \\ \sigma_b^c = \epsilon_{bf}^t (h-a) / (h-x) \beta_b E_b \varphi_{bf}^t / \varphi_b \beta_{bf}^t E_{bf} \end{cases} \quad (10)$$

β_s et β_{bf} représentent des paramètres de non-linéarité des déformations de l'armature tendue et du béton de fibres.

Dans les équations (10), les paramètres β_b , β_s , β_{bf}^c , β_{bf}^t , φ_b , φ_s , φ_{bf}^c et φ_{bf}^t sont difficiles à déterminer théoriquement. Des expériences sont obligatoires pour pouvoir évaluer les valeurs exactes de ces paramètres. Une fois ces paramètres déterminés, il sera alors très facile de connaître les valeurs exactes des contraintes limites pour chaque constituant formant la matrice composite.

La prochaine étape consistera à réaliser plusieurs séries de poutres qui permettra de déterminer tous les paramètres expérimentalement ainsi que l'état de contrainte-déformation, ce qui contribuera à mettre en évidence les avantages de ce type de construction.

ESTIMATION DE LA DENSITE LINEIQUE DES COMPOSANTS DANS LE MELANGE

De par les propriétés nouvellement obtenues à partir de ces mélanges, ces nouveaux matériaux sont utilisés dans de nombreux domaines, et trouvent leur application dans l'aéronautique, l'industrie de l'automobile, la construction, etc. [8].

Détermination du diamètre des fibres

Soit une fibre de forme cylindrique homogène de longueur L_f et de diamètre d_f . La finesse d'une fibre est une caractéristique importante des matériaux composites. Elle est caractérisée par la densité linéique qui se détermine par l'expression $Tr = M_f/L_f$ où M_f et L_f représentent respectivement la masse et la longueur de la fibre.

Le volume de la fibre (cm^3) est égal au produit de sa longueur par la surface moyenne de la section transversale et s'écrit: $V = S * L_f$.

La masse d'une fibre sera égale donc à:

$$M_f = V * \rho = S * L_f * \rho = (\pi * d_f^2 * \rho) / 4$$

La finesse est alors donnée par:

$$Tr = M_f / L_f = 0,785 \cdot 10^3 \cdot \rho \cdot d_f^2$$

$$\text{avec } d_f = 35,68 \sqrt{Tr / \rho}$$

Connaissant la densité linéique des fibres, on peut déterminer leur diamètre et par conséquent le nombre de fibres dans une section transversale, ce qui nous permet d'améliorer les propriétés des fibres (Graphe 1, 2).

Résultats de calcul des diamètres et finesse des fibres

N°	Nature des fibres	ρ (g/cm)	D_f (μm)	T_f (tex)
1	Polypropylène	0,91	$37,40 \sqrt{T_f}$	$0,715 \cdot 10^{-3} \cdot d_f^2$
2	Acétate	1,13	$33,56 \sqrt{T_f}$	$0,887 \cdot 10^{-3} \cdot d_f^2$
3	Laine	1,32	$31,06 \sqrt{T_f}$	$1,037 \cdot 10^{-3} \cdot d_f^2$
4	Chlorure de polyvinyle	1,35	$30,71 \sqrt{T_f}$	$1,060 \cdot 10^{-3} \cdot d_f^2$
5	Polyester	1,38	$30,37 \sqrt{T_f}$	$1,084 \cdot 10^{-3} \cdot d_f^2$
6	Lin	1,48	$29,33 \sqrt{T_f}$	$1,162 \cdot 10^{-3} \cdot d_f^2$
7	Rayonne de cuivre	1,52	$28,94 \sqrt{T_f}$	$1,194 \cdot 10^{-3} \cdot d_f^2$
8	Verre	2,50	$22,57 \sqrt{T_f}$	$1,963 \cdot 10^{-3} \cdot d_f^2$

Remarque: Le calcul est conduit pour quatre types de matériaux, représentés par les graphes (1 et 2), à savoir:

- Série 1 : fibres métalliques
- Série 2 : fibres de verres
- Série 3 : fibres de Nylon
- Série 4 : fibres polypropylènes

ANALYSE DES RESULTATS

- 1- La section transversale peut supporter un effort tranchant plus important, d'une quantité égale à: " $\lambda_{red} R_F \mu_F / \gamma_{bF}$ ".
- 2- Pour un même chargement donné, nous pouvons, soit diminuer la section transversale, d'où un gain important de matériaux par rapport aux constructions traditionnelles, soit augmenter les portées des travées, d'où un apport supplémentaire à prendre en considération lors de la conception, et ceci dans un rapport d'équilibre des sollicitations.
- 3- Les constructions proposées, qui permettent d'avoir des résistances très importantes, présentent un comportement ductile et une meilleure résistance à la

formation des micro-fissures, retardant ainsi l'apparition des fissures concentrées. La corrosion des armatures est retardée du fait de la présence des fibres au contour de la section, d'où un enrobage résistant.

- 4- Cette conception permet un gain de matériaux et une économie d'énergie.
- 5- La présence des fibres réduit la pente descendante de la courbe des contraintes-déformations au-delà de la contrainte maximale.
- 6- L'élément proposé présente une rigidité plus importante, la flèche est plus petite par rapport à celle d'un élément en béton armé.
- 7- A partir d'une densité linéique des fibres, on peut déterminer leur diamètre et par conséquent la section transversale, ce qui nous permet de combiner les différents types de fibres pour améliorer leurs caractéristiques physico-mécaniques et donc les propriétés de la matrice composite.

CONCLUSION

Le développement de la construction est intimement lié au développement effectif de la technique de réalisation et au diminution du prix de revient (énergie et matériaux). Concernant les bétons de fibres, on peut aboutir à des matériaux très différents les uns des autres, selon que l'on utilise tel ou tel type de fibres, en pourcentage variable dans la matrice de béton dont la composition granulaire est optimisée en fonction du type et du pourcentage de fibres. L'ajout des fibres dans la matrice permet d'augmenter la résistance à la traction, retarde la micro-fissuration en cousant celle-ci, etc. La construction combinée proposée présente énormément d'avantages tels que: un pourcentage de fibres utilisé très réduit, un poids de la structure léger, etc.

Ce type de construction est réalisable dans le cadre de la préfabrication et recommandé pour les grandes portées telles que les poutres de ponts.

Une recherche appropriée pour une utilisation rationnelle de l'acier et la création de nouveaux types de matériaux répondant aux règles économiques et sécuritaires des nouvelles constructions est recommandée dans toute étude ultérieure.

REFERENCES

- [1]- Zhan Z., "Contribution au dimensionnement des pieux en béton armé de fibres"; Thèse de doctorat, Université d'Orléans, France, (1991).
- [2]- Ait-Tahar K., "Constructions combinées à base de béton de fibres", Thèse de Ph.D, juin (1991).
- [3]- Rabinovitch F.N., "Béton armé de fibres", M- Stroiizdat, (1989).
- [4]- Absi E., "Béton de fibres (synthèse des études et recherches réalisées au CEBTP", Annale ITBTP., N°520, décembre (1994).
- [5]- Bouafia Y., Foure B., Kachi M.S., "Relation effort-ouverture des fissures dans le cas du béton armé de fibres d'acier", *Annales de L'I.T.B.T.P.*, Avril (1998), pp.5-12.
- [6]- Bantia N., Azzabi M. and Pigeon M., "Restrained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites", *Materials and Structures*, 26, 161, (1993), pp.405-413.
- [7]- Mougin J.P., "Calcul des éléments simples et des structures de bâtiments", Berti Editions, Alger, (1994).
- [8]- Gusev V.E., "La matière première pour les articles de laine tissée et non tissée", Edition Industries Légères, (1977). □

