

CHAPITRE I :

LE BETON DE FIBRES

Dans ce chapitre nous allons décrire ou faire connaître, historiquement, ce nouveau constituant (fibres), son influence sur la matrice cimentaire, le nouveau comportement mécanique, thermique et d'autres propriétés du béton contenant les fibres ; sans oublier de mentionner les avantages des fibres dans le béton , et leurs domaines d'utilisations.

I.1. Introduction:

Pour présenter le béton de fibres, nous avons pris le parti de suivre l'itinéraire des matériaux de base que l'on associe pour leurs comportements respectifs transmettant, par un effet synergétique, de nouvelles propriétés au composite créé. Ainsi successivement nous abordons la présentation du matériau de base (les fibres), sa formulation, son comportement et ses propriétés.

Ce choix s'impose pour positionner notre étude. En effet, il convient de montrer par une recherche les nombreux paramètres qui influencent le comportement de ce composite dont la matrice est un matériau vieillissant, poreux, retenant l'eau, dont la stabilité est fonction de l'hygrométrie ambiante, présentant un état initial complexe (micofissures, déformations) ; quant aux fibres, elles sont de nature et de géométrie très diverses.

I.2. Historique du béton de fibres:

Historiquement, il n'y a pas une confirmation quant est-ce le concept du béton par des fibres a été connu en premier lieu. Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. C'est ainsi qu'au cours de l'histoire la technologie des matériaux a été jalonnée par l'apparition de composite de texture de plus en plus complexe.

D'après Exode 5:6 les Egyptiens ont utilisé la paille pour renforcer les briques de boue. Il y a aussi une certitude que les fibres d'amiante ont été utilisées dans le renforcement des poteries en argile, en Finlande, il y'a de cela 5000 années. D'autres sources (Antoine, E.N et Mars 1985 et ACI Committee 554 Mars - Avril 1984), ont indiqué que la paille a été utilisée pour renforcer les briques chez les anciens, tandis que les poils d'animaux et les fibres d'amiantes ont été introduits pour renforcer le plâtre et la pâte du ciment portland. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX è siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone.

Cette réalité a été confirmée par M.Braun avec d'autres chercheurs qui ont rapporté que la première matière renforcée par des fibres a été fabriquée par l'homme en introduisant la paille

et d'autres produits semblables dans des matériaux de construction tel que le mortier, le plâtre etc. . Le professeur Alberto Fava de l'université de Plata en Argentine a écrit que l'hornero, qui est un petit oiseau vivant en Argentine, au Chili et en Bolivie , avait construit avec soin son nid en utilisant bien l'argile renforcée par de la paille depuis des siècles bien avant l'homme .

A la fin du 19^{ème} siècle, les matériaux fibreux ont commencé à devenir courants et plusieurs domaines ont commencé à exploiter ce nouveau matériau.

En Algérie on trouve, chez les anciens, le prisé qui est de l'argile armée hachée en place par compression pour produire ce qu'on appelle le « Toub » qui est une brique de terre stabilisée ou non, moulée manuellement et séchée à l'air libre. Ce type de matériau est utilisé en Algérie en tant que matériau de maçonnerie et joints de murs.

Mais le vrai développement de ce type de matériau peut être attribué à Joseph Lambot. Son brevet qui a été établi en 1847, a suggéré l'ajout des fibres continues sous forme de fils ou bandes en fils d'acier pour créer un nouveau matériau. Vingt sept ans après, l'américain A.Bernard arrivé en Californie a créé une pierre artificielle par l'ajout de granulats en fer recuit dans un mélange de béton. Ensuite, en 1899 un processus de fabrication d'éléments composites à base de ciment et d'amiante a été mis au point par Lhatshele.

En 1910 une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J.Porter qui a conclu que la présence de fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction. Par la suite en 1911 Graham a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction.

Une année après, en 1912 Weakly déposa un brevet montré sur la figure (I.1).au U.S.A qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec pour intermédiaire un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton

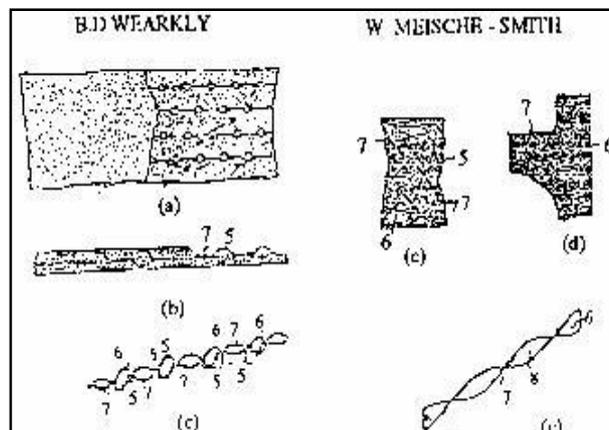


Figure (I.1): Brevet de Weakly (1912)

En 1914 le premier brevet britannique a été établi par Fickley qui a décrit d'une manière assez rigoureuse une recommandation d'inclusion dans le mélange de béton des différentes

pièces métalliques tortueuses. Il a confirmé que la résistance à la fissuration et à la fatigue a été améliorée mais il a noté aussi qu'il n'y a pas une amélioration dans la résistance du composite ni à la traction de même qu'à la compression.

A l'opposé de Fickley, le français H.Alfsen a rapporté dans ses travaux que la résistance à la traction d'un béton avec des petits éléments longitudinaux en fer, en bois ou autres matériaux a été améliorée. Il a suggéré également l'amélioration de l'état de surface des fibres. En effet, d'après Alfsen, les fibres doivent être rugueuses et arrondis aux extrémités afin de leur procurer une bonne adhérence à la matrice en béton.

En 1920, A.Kleinlogel a déposé le premier brevet allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usiné (par tournage) comme une masse d'acier. A cette période là, une étude sur les bétons avec des fibres de verre a été publiée par Griffith.

Sept années après, en 1927 deux brevets sur les bétons de fibres ont été établis par W.Smith et G.Martin en Californie. Le procédé Martin recommande l'ajout des plaquettes d'acier emboutées ou de fils d'acier dans le béton qui sert à la fabrication des tuyaux. Alors que W.Smith recommande le malaxage des morceaux de fil tordus avec le béton en vue de construire un immeuble en béton armé.

Quelques années après, en 1933 au New Jersey, H.Etheridge a inventé une technique pour améliorer la forme des fibres afin d'augmenter leur contribution. Il a recommandé ensuite d'ajouter au béton des fibres en forme d'anneaux de différentes dimensions et de différents diamètres représenté sur la figure (I.2).

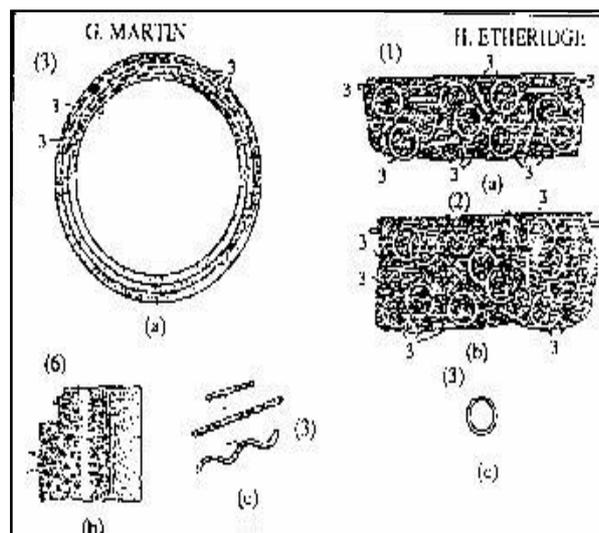


Figure (I.2): Brevet de H.Etheridge et G.Martin (1933)

En 1938, un autre brevet britannique a été établi par N.Zitevic. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer avec approximativement 100 mm de longueur et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très similaires aux fibres utilisées

aujourd'hui pour armer le béton. Il conclut qu'il y'a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement.

A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres dans le béton pour améliorer sa performance. Mais on note ici que celui de G. Constantinesco en 1943 en l'Angleterre et au USA en 1854 représenté sur la figure (I.3), mérite une attention particulière. Les paramètres qu'il a recommandé à l'époque sont similaires à ceux d'aujourd'hui pour le béton de fibres. Il a recommandé également l'emploi de fibres permettant la résistance à la fissuration et à l'absorption de l'énergie par la masse de béton. Il a suggéré l'utilisation de cette composite dans plusieurs domaines spécialement dans la construction des pistes d'aéroport, fondations de machines et tous les ouvrages similaires.

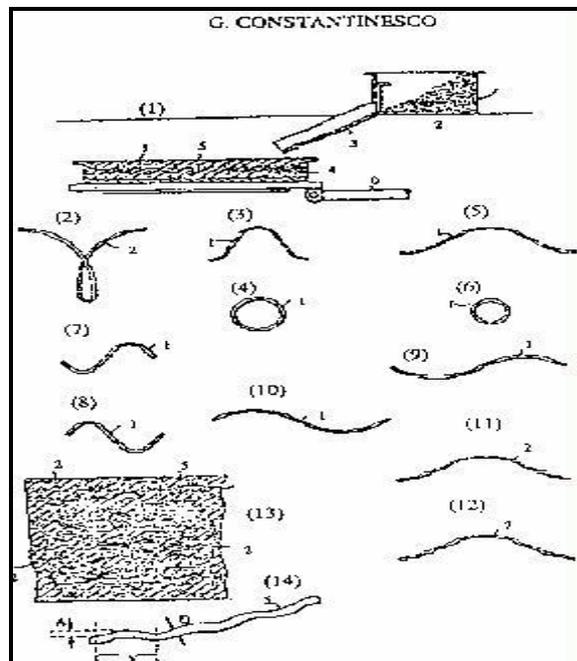


Figure (I 3): brevet de G.Constantinesco 1943

Au début des années soixante, une série de brevets ont été établis par Battelle Développement Corporation. Ces brevets sont basés sur l'utilisation des morceaux d'acier pour le béton. Une amélioration dans la résistance à la traction, l'absorption de l'énergie et la résistance à l'usure a été rapportée dans ces brevets.

En 1963, deux articles ont été publiés par Romuldi et Batson dans lesquels une analyse théorique des résultats donnés par les brevets de Battelle Développement Corporation a été fondée avec des données expérimentales obtenues à l'essai de flexion.

Par la suite, les recherches sur les bétons de fibres ont connu un réel développement grâce aux travaux de Romualdi, Batson et Mandel. Dans ces travaux, qu'on peut qualifier de fondateurs, on décrit les mécanismes de propagation et d'arrêt d'une fissure au sein d'une

matrice fragile. Ils ont aussi développé une analyse théorique des résultats donnés par les brevets de Battelle Développement Corporation et mettent notamment l'accent sur l'influence de l'espacement moyen des fibres sur le comportement du composite.

D'autres chercheurs étaient aussi actifs pendant cette période et à partir de la fin des années soixante plusieurs chercheurs à travers le monde entier sont arrivés à pousser les travaux dans ce domaine vers l'application dans des secteurs de la construction où ce type de béton a été introduit avec beaucoup de fiabilité par rapport aux bétons traditionnels. Le plus grand progrès a commencé en 1970 avec l'incorporation des fibres d'acier dans le domaine de l'industrie réfractaire. Le premier article de ce concept a été publié par Lankard et Sheets dont lequel ils ont affirmé que l'ajout de 1 à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance, sa ténacité et sa durabilité.

I.3. Présentation du béton de fibres:

Le béton de fibres est un matériau composite (ciment, granulats, fibres et vides) qui peut être considéré comme un matériau composite homogène (même résistance dans toutes les directions). Le ciment utilisé est habituellement un ciment hydraulique, c'est à dire qu'après avoir été mélangé avec l'eau, il fait prise et durcit même en présence d'un excès d'eau. Les granulats peuvent être de forme et de nature minéralogique diverse et ont des dimensions variant de quelques dizaines de microns à quelques dizaines de millimètres. Les fibres sont en acier, en plastique, en verre ou en divers matériaux naturels.

Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant avec des granulats plus petits. Pour le renforcement, les fibres sont de types variés. Elles sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élancement (le rapport de la longueur de la fibre sur le diamètre équivalent à la fibre), et la teneur en volume de fibre.

La fabrication d'un béton de fibre ne consiste pas à mélanger une certaine quantité de fibres à un béton déjà existant. C'est à dire qu'il convient d'ajuster la formulation en fonction des objectifs de mise en oeuvre et de résistance. On ajoute directement des fibres dans le mélange du béton. L'effet de cette addition est la maniabilité décroissante. Pour l'amélioration, il convient d'utiliser une quantité de fine (sable et ciment) plus haute que pour un béton ordinaire. En ce qui concerne les fibres, on utilise une faible longueur et un élancement moyen car il y a risque de former des pelotes qui rendent difficile la mise en oeuvre et nuisent au comportement

mécanique. On peut utiliser aussi des plastifiants pour obtenir une maniabilité acceptable tout en gardant le rapport eau/ciment raisonnable.

I.3.1. La matrice:

Dans le béton de fibres la matrice cimentaire est différente de celle du béton ordinaire par:

- Les teneurs en ciment qui sont ordinairement plus élevées pour le béton de fibres (BF) que pour les bétons classiques; elles varient de 325 à 450 Kg/m³ pour une granulométrie de 0 à 10 mm. (Corneille .A 1979)
- Afin d'améliorer l'ouvrabilité et réduire la teneur en eau, des cendres volantes peuvent être utilisées en remplacement d'une partie du ciment portland, par exemple 50 à 100 Kg/m³ de ciment (Venuat M.1974)
- Il en résulte une amélioration de la plasticité. En abaissant la chaleur d'hydratation et d'obtenir une réduction de coût pour le béton de fibres. (Paillère A.M-Serrano .J 1981)
- Les adjuvants réducteurs d'eau (ARE) ont aussi des effets retardateurs de prise et habituellement facilitent la manipulation du béton de fibres sur le chantier. Il est recommandé que, compte tenu des dosages importants de ciment généralement utilisés pour le béton de fibres, la quantité d'ARE soit maintenue à un niveau inférieur à celle recommandée pour le béton classique. (Milan M.1982)
- Les rapports Eau/ Ciment utilisés dans le béton de fibres doivent faire l'objet d'une intention particulière. La tendance d'augmenter la teneur en eau qui élimine certaines des propriétés avantageuses attendues de l'addition de fibres devrait être évitée. Dans le béton de fibres, des rapports eau/ ciment de 0,41 à 0,48 sont habituels. Les applications à des structures spéciales, notamment le pavage, se traduisent par des rapports E/C plus faibles (0,38 à 0,44) mais il en résulte plus de difficultés de mise en place. (Rice J. L. 1972)

I.3.2. Les Fibres – l'aspect géométrique- :

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur, leur forme et leur état de surface. Elles possèdent des caractéristiques différentes les unes des autres. Nous distinguons les fibres naturelles et les fibres artificielles ou synthétiques ; Ou le tableau (I.1) classe les différents types de fibres selon Venuat M.(1983)

Tableau (I.1) : Différents types de fibres (Venuat M.1983)

Fibres naturelles			Fibres artificielles	
Végétales	Animales	Minérales	Minérales	Organiques
Lin Chanvre Coton Celluloses Sisal	Poil Crin Laine Soie	Amiante de roches Silicomagnésiennes	Laitiers de haut fourneau Laine de roche (basalte) Carbone Céramique Métaux (acier, fonte) Verres spéciaux	Polymères longs dont les molécules sont orientées dans l'axe de fibre

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces mince ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation de structure.....), de leurs propriétés (résistance et module plus ou moins élevés, adhérence plus ou moins bonne...) de leur disponibilité et de leurs prix. Il faut mentionner aussi les qualités recherchées pour les fibres :

- être relativement longues, fines, flexibles, ne pas se casser lors du malaxage.
- Posséder une forte résistance en traction;
- Bien adhérer à la pâte du ciment (forme- adaptée état du surface facilitant l'accrochage);
- Avoir un module d'élasticité adapté (parfois très supérieur à celui de la pâte pure du ciment),
- Ne pas être attaquées par le milieu basique du ciment; ni corrodées par le milieu extérieur;
- Être stables dans le temps;
- Être sans danger pour la main-d'œuvre;
- Être efficaces pour un dosage peu élevé;
- Être d'un prix compétitif et acceptable.

Tableau (1.2): Différents types de fibres extrait des travaux de recherche de laboratoire de l'institut national des science

	Nature de la fibre		Forme de la fibre		Coupe de la fibre	Longueur des fibres	Elancement L/ ϕ ou L/e	Dim. des Granulats associés aux fibres (mm)				% volumique de fibre
								<1	<5	<10		
Renforcement discontinus- fibres	Acier	Relief irrégulier				25-35	25-55		x	x	x	1 à 3%
						16-32	110		x	x	x	0,7 à 2%
		Formes particulières				6-30		x	x	x	x	0,7 à 3%
									x	x	x	0,7 à 2 %
						30-40	100-150		x	x	x	0,7 à 2%
	Fonte amorphe				30-40	1200-1400	x	x	x	x	0,7 à 2%	
	Verre	e = 5 à 20 μm			10-20		x	x			5 à 6%	
	Carbone	$\phi = 7$ à 20 μm			3-15	150-400	X				2 à 5%	
	Aramide	12,4 +m			1-10	100-800	X				1 à 3%	
	Polypropylène	$\phi 51$ à 250 μm			10-30	140-1700	x	x	x	x	2 à 8 %	
Amiante	$\phi = 0.0002$ à 0.02 μm			5	5000					5 à 10 %		
	Mélange hybride : cellulose + polypro. Ou polyéthylène ou PVA etc. (pour tenu à long terme)										5 à 10%	
Renforts continus	Aramide	Fibres enduites de résine						x	x	x	X	4 à 7%
	Verre							X	x	x	x	
	Polypropylène	Filets	Fibrilles				X	x				
Verre		Tissés					x	x				

Le tableau (I-2) présente différents renforts, sans vouloir être exhaustif, il met en évidence la nature très variée des produits proposés. Nous suggérons les commentaires suivants :

- 1- Deux types de fibres peuvent être distingués : l'un composé de fibres courtes dispersées, l'autre de fibres continues. Les comportements mécaniques de ces deux types de fibres sont totalement différents. En effet, généralement, dans le cas de fibres continues, une multi-fissuration est susceptible de se développer grâce à la continuité des filaments, ce qui peut donner une grande souplesse au composite dans le mécanisme de ruine comme la montré (Keer et Hannant 1986).
- 2- La figure (I.4) montre que la taille des granulats associés aux matrices permet de mettre en évidence des domaines d'application potentiels : réalisation de plaques, gros bétons, enduits, mortiers renforcés, bétons projetés. La longueur des fibres utilisées doit être adaptée dans chaque cas, en fonction de la nature des pièces à réaliser ou des techniques de mise en oeuvre retenues (G.Odelberg 1985). Pour une longueur constante de fibre, plus la taille des granulats augmente, plus il est difficile d'obtenir une dispersion uniforme des fibres.

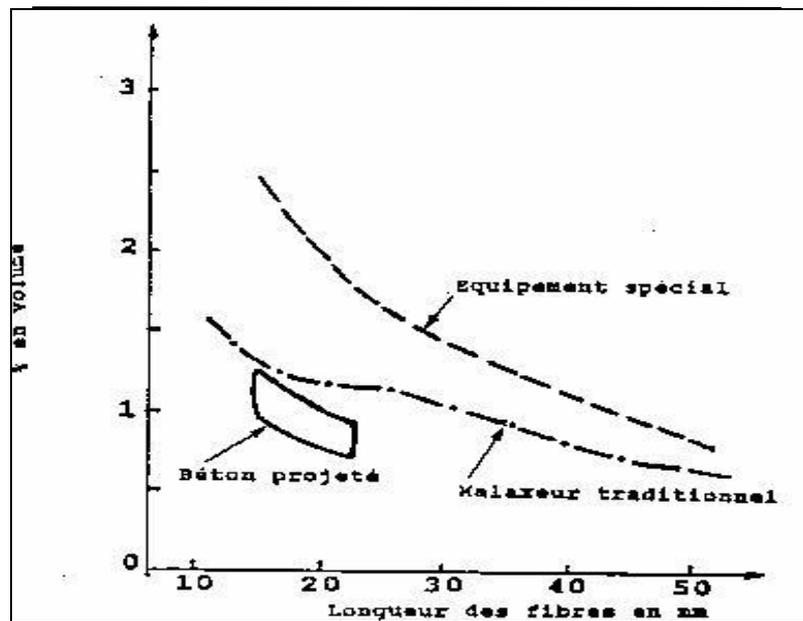


Figure (I.4): limites technologiques pour la mise en œuvre du béton d'acier
(G.Odelberg 1985)

- 3- Les données géométriques, jouent un rôle important sur l'adhérence mécanique.
- 4- Dans le cas des fibres d'acier relativement rigides, les études portent sur l'analyse de l'influence de la forme (Crochets, ondulation.....) et des surfaces à relief irrégulier.
- 5- Dans le cas de la fonte amorphe, nous sommes en présence d'une importante surface développée associée à une grande souplesse.

6- Dans le cas de filets, la continuité de la fibre et l'effet de maille assurent un excellent encastrement.

Les valeurs d'élanement sont données à titre indicatif ; Celui-ci joue un rôle important pour les propriétés rhéologiques des mélanges, ainsi que sur le coefficient d'espacement des fibres. Dans le cas de rubans, (Swamy, Mangat et Rao 1974) proposent une valeur équivalente pour caractériser l'élanement :

$$n = \frac{(b+e).L}{b.e} \quad (I.1)$$

e : épaisseur de la fibre. **b** : Largeur de la fibre **L** : longueur de la fibre.

Si l'épaisseur **e** est faible devant la largeur cette formule se simplifie :

$$n = \frac{L}{e} \quad (I.2)$$

Ce paramètre élanement des fibres peut aussi s'exprimer en fonction de la surface spécifique des fibres, de leur volume, de leur longueur et d'un coefficient K.

$$r = \frac{\text{Surface développée des fibres}}{\text{Volume des fibres}} \times K \times \text{longueur} \quad (1.3)$$

Précisons que si K est pris égal à 1 pour les fibres cylindriques les plus courantes, alors K=0.5 pour les rubans minces.

7- Les pourcentages volumiques de fibres préconisés sont présentés à titre indicatif. Ils sont liés à la composition de la matrice et au mode de mise en place utilisé.

Dans le paragraphe suivant nous démontrons l'influence de la nature des fibres sur le composite.

I.3.2.1 - Rôle de la nature des constituants : fibres et matrices :

Les fibres sont non seulement caractérisées par leur forme mais aussi par leur nature dont dépendent les grandeurs suivantes : coefficient de dilatation, résistance mécanique, souplesse, éventuellement plasticité, déformation à rupture, adhésion plus ou moins importante à la pâte de ciment et neutralité vis à vis de ce milieu.

Le tableau (I.3) suivant donne les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées. Pour compléter ce tableau, et positionner les fibres les unes par rapport aux autres en mettant en évidence leur caractère fragile ou ductile, ainsi la figure (I.6) présente les relations contrainte-déformation des différents types de fibres.

Tableau (I.3) : suivant donne les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées (G.Debicki 1987)

Fibres	Diamètre (mm)	Longueur	Masse volumique (Kg/cm ³)	Résistance traction (Mpa)	Module E (Mpa)	Allongement (%)	Coefficient de dilatation 10-6 °C-1	R au feu (°C)
Amiante (chrysolite)	0.0002 à 0.002	5 à 20	2.6 à 3	300 à 1000	80 000 à 150 000	2 à 3		1500
Polypropylène	0.01 à 0.1	25 à 75	0.9	400 à 600	4000 à 8000	15 à 20	90	150
Verre (au zirconium)	0.006 à 0.020	40 à 70	2.6	1500 à 3000	80 000	2 à 3	9	600
Acier	0.2 à 0.5	20 à 50	7.9	1000 à 3000	200 000	3 à 4	11	1500
Carbone	0.005 à 0.01	Variable	2	2000	400 000	0.5	1	400 à 1500
Fonte amorphe	30 à 60 x 0.03 x1	30 à 60	7.2	2500	130 000	2		300
Aramide	0.012	10	1.4	2800	80 000	4.2	-2	300

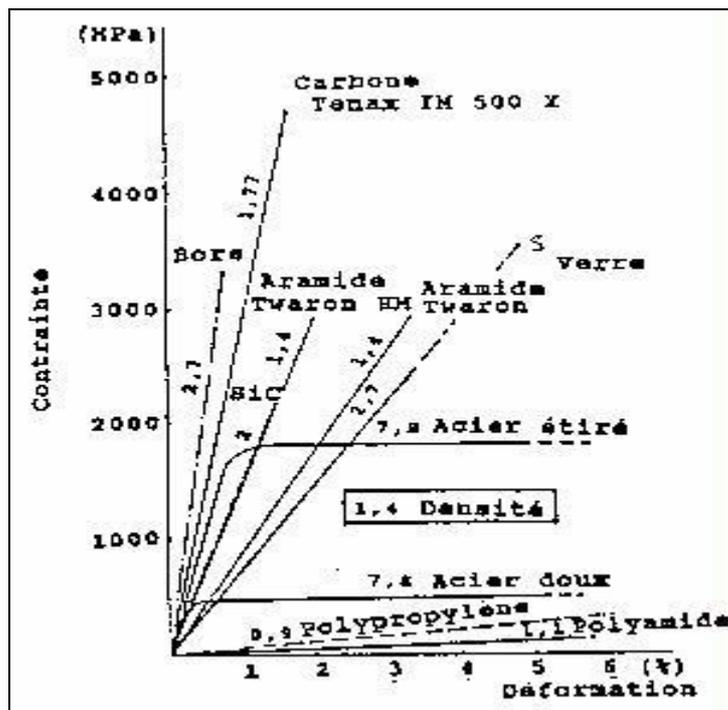


Figure (1-6): les relations contrainte- déformation des fibres de renforcement (G.Debicki 1987)

I.3.2.2. Les différents type de fibres :

Parmi les fibres les plus utilisées dans le domaine du béton, nous citons :



Photo (I.1). Différents types de fibres

I.3.2.2.1 Les Fibres polypropylène :



Photo (I.2): Différents types de fibres polypropylène

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile Gentil J. (1983). L'ajout de fibres au mortier ou au béton remonte industriellement à 1960 et ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne (Panneaux de façade de 33 mm d'épaisseur du Londonderry House à Park-Lane à Londres). Les premiers fils étaient de section circulaire et lisses.

Le polypropylène appartient à la famille de polyoléfine des produits chimiques. les fibres sont hydrophobes, qui n'absorbent pas l'eau, et non corrosives. D'ailleurs, les fibres de polypropylène ont les excellentes résistances contre des alcalis, les produits chimiques et le chlorure, et une basse conductivité thermique. Par ces caractéristiques les fibres de polypropylène n'ont donc aucun effet significatif sur la demande de l'eau du béton frais. Elles n'interviennent pas dans l'hydratation du ciment.

Les caractéristiques principales de ces fils de polypropylène sont les suivantes :

- Diamètre de 0.01 à 0.2 mm.
- Longueur : 25 à 75 mm.
- Masse volumique : 0.9 Kg/dm³.

- Résistance en traction : 400 à 8000 Mpa.
- Module d'élasticité : 4000 à 8000 Mpa.
- Coefficient de dilatation thermique : 90 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$

Les propriétés rhéologiques du béton frais renforcé par des fibres sont dues à la fois à la présence des fibres de polypropylène, très élastiques empêchant le béton frais de se déformer, et à celle de l'air occlus apportant une sorte de thixotropie. Ce béton conserve ainsi à l'état frais les empreintes faites en surface sans affaissement, ni ressuage. Nous pouvons le travailler afin d'obtenir des reliefs très variés soit manuellement, soit à l'aide de machine adaptées.

Le type de fibres à utiliser dépend essentiellement de la dimension des granulats, les fibres les plus courtes étant choisies pour des micros-béton, les plus longues pour ceux dont le « D » le diamètre est important. C'est ainsi que certains fabricants préconisent des fibres de 20 mm pour des bétons dont la dimension des granulats n'excède pas 15 mm, celles de 50 mm étant réservées à des bétons pour lesquels « D » est compris entre 30 et 40 mm.

On utilise ces type de fibres dans :

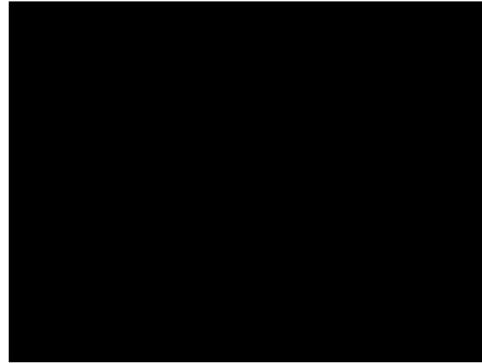
- Les pieux de fondation.
- Les pieux précontraints.
- Les panneaux de revêtement.
- Les éléments flottants de débarcadères et amarres pour les marines.
- Les matériaux de réparation des routes, couches de lest pour les tuyaux sous-marins.

I.3.2.2.2 Les fibres d'amiante :

Les fibres d'amiante sont des silicates hydratés de magnésium extraites de roches appartenant aux familles des serpentines et des amphiboles (Noiret Y.1983). Elles sont utilisées depuis l'antiquité dans la fabrication de tissu résistance au feu. Très utilisé, ce matériau composite amiante- pâte de ciment offre une résistance à la traction de 15 à 25 MPa et en flexion de 27 à 40 MPa. Selon Gilebert.G.T (1983), les fibres d'amiante ne conviennent pas pour armer des mortiers et des bétons, car elles sont trop courtes, et elles nécessitent beaucoup d'eau de gâchage. Par contre, elles conviennent parfaitement comme charge avec la pâte pure, avec ou sans ajout de poudre de silice.

I.3.2.2.3 Les fibres de verre :

Photo (I.3) : fibres de verre



L'idée d'ajout de fibre de verre remonterait à 1920. Les premiers essais furent effectués en URSS vers 1950 par ajout de fibre de verre ordinaire dans une pâte de ciment alumineux. Comme le verre ordinaire est attaqué par les alcalis des ciments portland, le Dr Majumber mit au point vers 1976 un verre spécial, non attaquable, à base de Zirconium. Cette dernière solution est la plus pratique. On peut également protéger la fibre par un ensimage (Dépôt d'un corps gras sur la fibre).

Les Fibres de verre présentent d'excellentes caractéristiques : leur résistance à la traction est supérieure à celle de l'acier et leur coefficient de dilatation est sensiblement égal à celui de la pâte de ciment.

Le tableau (I.4) montre, qu'il y a trois types de fibres de verre (Venuat M.1985) suivant leur composition chimique:

Tableau (I.4) : Composition des différentes sortes de fibres de verre (Venuat M. 1985)

Composition chimique	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	B ₂ O ₃
Verre classique	73	1	0	8	4	13	10
Verre borosilicate	55	14	0	17	5	0	8
Verre zirconium	70	0..2	16	0	0	12	8

Parmi les trois types de fibre de verre classiques seule la fibre au zirconium a une bonne résistance aux alcalins et peut être utilisée dans les compositions à base de liants hydrauliques. Les autres fibres nécessitent un traitement par des résines. La figure(I.7) donne l'évolution de la résistance dans le temps de plusieurs types de fibres de verre (Steel B.R 1971)

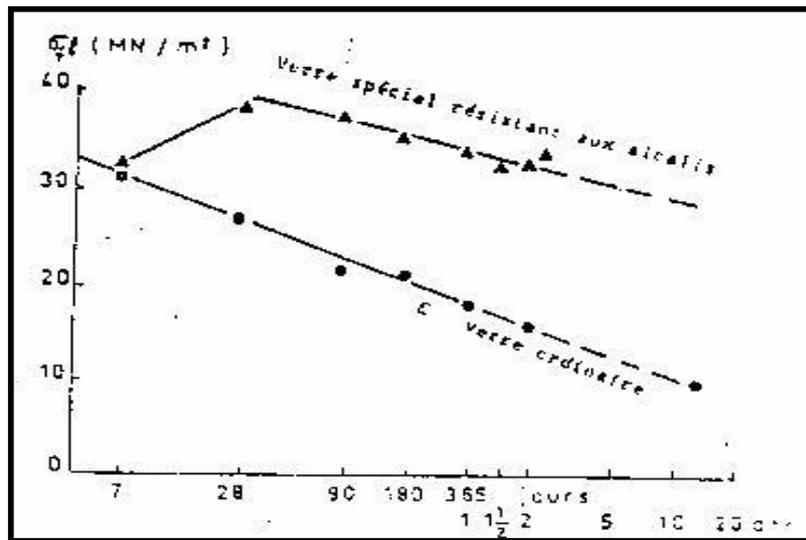


Figure (I.7): Résistance à la flexion du ciment portland de fibres en fonction du temps et conservé à l'air (échelle logarithmique) (Steel B.1971)

Les avantages apportés par l'incorporation de fibres de verre sont donc une très bonne résistance à la traction, une plus grande ductilité en compression et en traction, une réduction de l'écaillage en cas de choc, d'où des possibilités d'allégement des pièces par diminution de leur épaisseur, ce qui les fait surtout s'utiliser dans le moulage de pièces minces en mortier. Leur domaine d'utilisation est donc la fabrication de panneaux très minces, inférieurs à 20 mm d'épaisseur, de tuyaux d'assainissement, d'éléments décoratifs préfabriqués.

Les fibres de verre s'ajoutent à raison de 0,45 à 4,5 % en volume, soit de 0,5 à 5% en poids, soit encore entre 12 et 115 kg par m³. Les mortiers ou bétons armés de fibres de verre sont appelés:

- CRV (ciment renforcé de fibres de verre), en français.
- GRC (glass reinforced concrete) en anglais.

Le domaine préférentiel des mortiers armés de fibres de verre est celui de la préfabrication comme par exemple :

- Bardages industriels.
- Murs anti- bruit, claustras.
- Rideaux.
- Tuyaux d'égout et canalisations diverses (caniveaux d'irrigation).
- Toiture en voile mince de béton.
- Enduit pour blocs de béton et objet décoratifs, sculptures et mobiliers urbains.

I.3.2.2.4 Les fibres d'acier :



Photo (I.4): Différents type de fibres d'acier

Les fibres d'acier sont sans doute les plus utilisées. Elles ont fait l'objet de plusieurs recherches. A l'origine, ces fibres rectilignes et de section circulaire (d'un type analogue à celle servant à armer les pneumatiques) ont évolués vers les fibres d'acier en tôle cisailée.

Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire.....), leur longueur et leur mode d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes, ondulées, ou présenter des élargissements aux extrémités, soit coudées ou en crochets pour améliorer l'accrochage. Dans le même but, elles peuvent présenter des aspérités, des crans surfaces. La figure (I.8) montre quelques types de fibres d'acier.

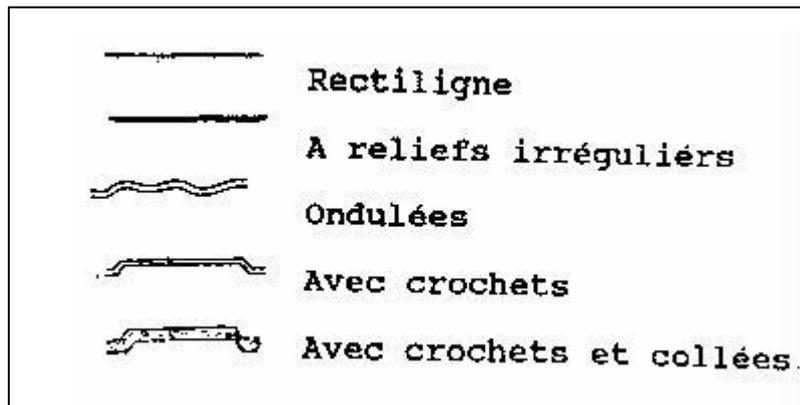


Figure (I.8): Quelques exemples de formes de fibres d'acier section circulaire, rectangulaire, carrée ou elliptique (Venuat M. 1983).

La dispersion des fibres d'acier dans le malaxeur s'opérant aisément et rapidement en évitant la formation d'oursin (ou boules de fibres), due au fait que les fibres ont naturellement tendance à s'agglomérer pendant le malaxage par suite des frottements réciproques, d'où la nécessité de prendre des précautions pour bien les répartir dans toute la masse du béton en évitant de la déverser d'un seul coup.

Les avantages de ce type de fibres sont :

- Ces fibres ne forment pas d'oursins et peuvent être introduites directement dans le malaxeur.
- S'individualisent lors du malaxage (la colle est soluble dans l'eau) se répartissent bien dans la masse et reprennent leur fort élanement d'origine favorable aux résistances.
- Les fibres qui présentent des crochets aux extrémités ont une meilleure adhérence que les fibres droites. Leurs diamètres s'échelonnent de 0,4 à 0,8 mm et leurs longueurs de 25 à 60mm.
- L'augmentation des résistances en traction et en flexion et surtout la résistance à l'usure, aux chocs et à la fatigue.
- Réduire l'épaisseur des pièces, par exemple: l'épaisseur d'un dallage prévue à l'origine de 15cm pourra être réduite à 12 cm avec l'ajout de fibres (30 à 50 kg/m³) et les joints seront plus espacés (jusqu'à 100 m² sans joint).

Leurs applications sont très nombreuses ; les principales sont les suivantes :

- Sols industriels et sol de parkings.
- Éléments de toiture en béton cellulaire.
- Tabliers de pont.
- Tuyaux en béton.
- Réservoirs sous pression.
- Revêtements de tunnel, coques de bateaux.
- Revêtements de chaussée.
- Produits réfractaires.
- Pistes d'atterrissage.
- Structures résistantes aux explosions.

I.3.2.2.5 Les fibres de carbone :

Leur utilisation, pour le renforcement de structures par mise en place de fibres de carbone, vise à compléter la structure d'un ouvrage là où ses parties tendues sont insuffisamment dimensionnées.

a) Procédé:

Le procédé est destiné à réparer et à renforcer les structures par le collage soit d'armatures passives composites à base de fibres de carbone noyées dans une matrice polymère ou d'un tissu de fibres de carbone.

Ce procédé s'applique après diagnostic, à toute structure d'ouvrage neuf ou ancien pour laquelle une augmentation de la capacité portante est recherchée. Il permet:

- D'accroître la résistance aux moments de flexion et aux efforts de traction (les lamelles);
- D'accroître la résistance à l'effort tranchant (le tissu).

b) Domaine d'application:

Ce Procédé est préconisé pour le renforcement des structures du Bâtiment et des Travaux Publics. Pour les structures en béton armé, les domaines d'application se résument en:

- Changement d'affectation de la structure : Par exemple, bureau transformé en pièce d'archivage, augmentation du trafic des charges d'exploitation;
- Modification de la géométrie de la structure: Par exemple, ouverture de trémies, suppression de poteaux, ouvertures dans un voile porteur.
- Erreur de conception initiale : Par exemple, mauvais dimensionnement des aciers, ferrailage insuffisant par conception ou défaut de positionnement;
- Réparation après un sinistre: Par exemple, incendie, diminution de la section des aciers par corrosion.
- Amélioration des conditions de service: réduction de flèche de plancher, réduction des contraintes dans les armatures, réduction d'ouverture de fissures.

c) Produits et matériels:

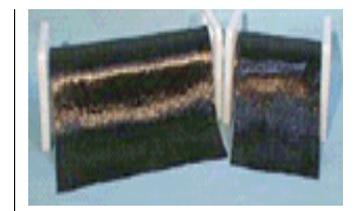
-Les lamelles: Elles sont composées de fibres de carbone, et caractérisées par:

- Module d'élasticité supérieure à 165 000 MPa.
- Allongement à la rupture supérieur à 17 %.
- Résistance à la rupture par traction supérieure à 2800MPa. Leur insensibilité à la corrosion permet leur utilisation là où des renforcements par tôles métalliques collées ne seraient pas possibles. Leur faible densité 1,5 permet une mise en place facile, sans étaieement.

- **Les fibres en tissu** C'est est un tissu composé de fibres de carbone insensible à la corrosion, souple, léger, épousant parfaitement les formes des supports qu'il recouvre, applicable jusqu'à trois couches en superposition, le tissu permet le renforcement des structures aux géométries complexes. La réparation par les fibres de carbone est devenue une technique très connue à cause de son efficacité. Elle est appliquée dans différents types d'ouvrage et à travers le monde



Photos I.5 : Fibres de carbone en lamelles



Photos I.6 : Fibres en tissu

I-3-2.3. Influencent des propriétés mécaniques des fibres sur les composite:

Les caractéristiques mécaniques des fibres, module d'élasticité et allongement à rupture sont très différentes d'une fibre à l'autre comme décrite au paravent figure (I.6). Ces seules caractéristiques permettent-elles de prévoir le comportement du matériau ? Nous tentons d'illustrer notre commentaire par des exemples.

Le module d'élasticité de la matrice n'est guère modifié à l'origine, la simple application de la loi des mélanges permet d'expliquer ce résultat Hannant (1987). Avec 5% de fibres de verre ou 2% de fibres d'acier on gagne théoriquement 11 à 13% dans le cas de fibres orientées dans la direction de sollicitation. Dans le cas de fibres dispersées, les gains théoriques sont seulement de 2%. Ainsi, le mode de fabrication ou de conservation des éprouvettes influence autant la valeur du module que la présence de fibres. Plusieurs auteurs, comme Akihama S et Al (1984), signalent qu'avec des pourcentages élevés de fibres, le décroît de façon significative s'effectue en compression (cas de fibres d'acier, de carbone, de verre). Tout se passe comme si la résistance de la liaison fibre- matrice diminuait lorsque le pourcentage volumique des fibre- matrice diminuait lorsque le pourcentage volumique des fibres augmente au- delà d'une certaine valeur. La loi précédemment énoncée montre que pour des fibres à module inférieure à celui du béton, le module à l'origine du composite baisse, résultat observé expérimentalement avec des fibres de polypropylène par J. Dardare (1975), Dave et Ellis (1979). Comme constaté avec les autre fibres, la diminution importante pour les forts pourcentages de fibres ne s'explique pas uniquement par la quantité de fibres. Précisons qu'avec les fibres de polypropylène, plus la longueur des fibres est importante, plus faible est le module. Dardare (1975) donne 16% et 13% de chute pour une longueur multipliée par 8,2 ceci dans le cas d'une conservation humide ou sèche.

Les travaux de Dave et Ellis (1979) sur des fibres de polypropylène montrent que si le module d'élasticité de ces fibres augmente, la résistance ultime de flexion augmente et le saut après la première fissuration est moins important.

La résistance à l'initiation des fissures du béton de fibres n'est pas seulement un indice pour exprimer quantitativement les caractéristiques du béton à la fissuration, mais également une valeur importante qui peut servir de critère pour le calcul d'une structure. On peut utiliser plusieurs méthodes pour repérer ce point :

La limite de proportionnalité sur le diagramme force-flèche en flexion, ou la limite de résistance de la matrice en traction du composite. Cette limite difficile à définir précisément est influencée par plusieurs facteurs :

- Le mode de conservation des éprouvettes : les éprouvettes stockées dans l'eau présentent des limites supérieures, (Ali, Majumdar, Singh (1975) – cas des fibres de verre)
- Le pourcentage volumique des fibres : le gain de résistance pour les fibres de verre, d'acier, de carbone, et les perte pour les fibres de polypropylène semblent proportionnels au pourcentage volumique de fibre. (Ali, Majumdar, Singh (1975), Dave Et Ellis (1979, Gopalaratnam Et Shah (1986), Akinam S Et Al (1986).
- Le module d'élasticité des fibres : le rôle de ce paramètre semble suggéré par l'étude de Akihama S et AL 1986, dans laquelle les auteurs comparent les courbes contraintes- déformations d'un mortier renforcé de deux types de fibres de carbone (Tableaux I.5, I.6). Les courbes contraintes- déformations obtenues sont présentées sur les figures (I.9).
- L'élanement des fibres : ce paramètre est proposé par Johanston et Coleman 1974 (figure I.10)

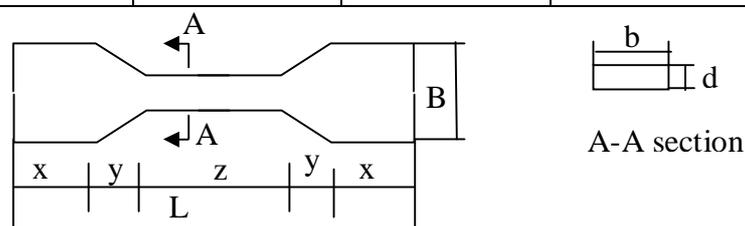
Enfin précisons qu'aucune étude expérimentale systématique ne permet de suggérer une relation simple entre la nature de la fibre et l'apparition de la première fissuration dans le composite. Il y a accord pour noter un effet favorable des fibres sur la limite de fissuration définie en contrainte, lorsque le module de la fibre est supérieur à celui de la matrice. Le gain en déformation est plus controversé faute d'une définition précise et reconnue de cette limite.

Tableau (I.5): propriétés des fibres de carbone d'après Akihama S et Al 1986

Type de fibre	Géométrie des fibres			Densité	Résistance en traction MPa	Module d'élasticité MPa	Allongement
	Diamètre μm	Longueur mm	Elancement L/d				
Pitch	14,5	3	207	1,63	7800	$3,8 \cdot 10^5$	2,1
PAN	7,0	3	429	1,90	32000	$23 \cdot 10^5$	1,4

Tableau (I.6) : composition de la matrice de ciment d'après Akihama S et Al 1986

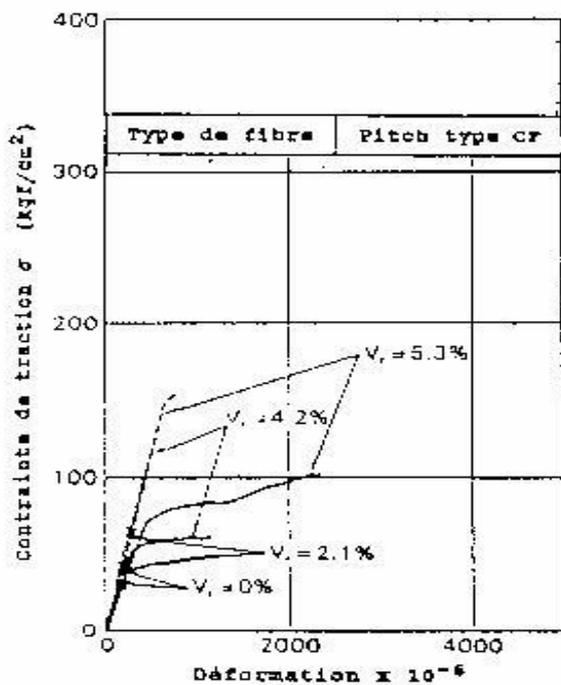
Eau / ciment	Agrégat/ ciment	Composition pondérale Kg/m^3			
		Eau	Ciment	Poudre de silicate	Méthylcellulose
0,47	0.25	512	1082	274	10,8



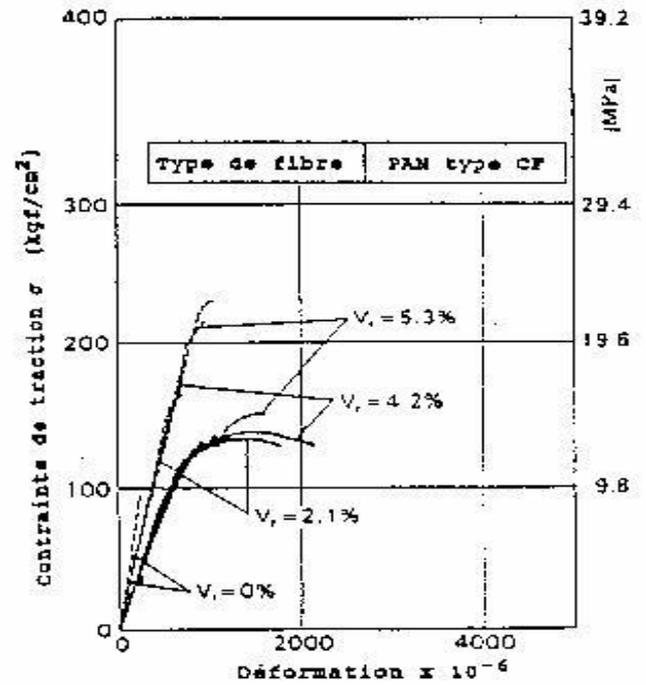
Symbole	L	B	B	D	x	y	z
Eprouvette							
Essai de traction discrète	330	60	30	6	85	40	80

Figure (I.9) a) : Géométrie des éprouvettes pour les essais de traction.

Symbole	Conditions de conservation et d'imprégnation par un polymère
—	Autoclavé sans imprégnation
.....	Imprégné de polymères après autoclavage



b) Courbe contrainte-déformation en traction.



c) Courbe contrainte-déformation en traction.

Figure (I.9) : Les courbes contraintes- déformations de Akihama S et Al 1986

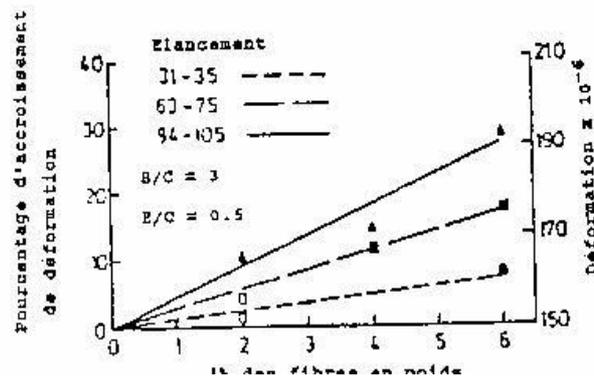


Figure (I.10):

Influence du volume et de l'éclatement des fibres sur la déformation de fissuration (pour la contrainte maximum) d'un composite avec des fibres d'acier. (Johnston et Coleman (1974))

Nous retiendrons de ces commentaires que les seules propriétés des fibres, même si elles donnent des tendances, ne suffisent pas à expliquer le comportement du composite.

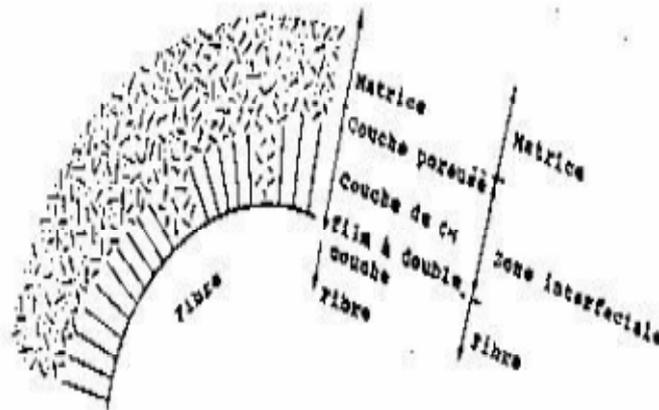
I.3.2.4. Le rôle de l'adhésion fibre – matrice :

L'observation de la zone entre fibre et matrice, met en évidence une zone de contact entre elles. La nature exacte de cette zone dans les composites à matrice cimentaire est trop complexe pour être définie par des paramètres simples. La matrice elle-même est poreuse et évolue avec des variations de volume et des propriétés en fonction du temps.

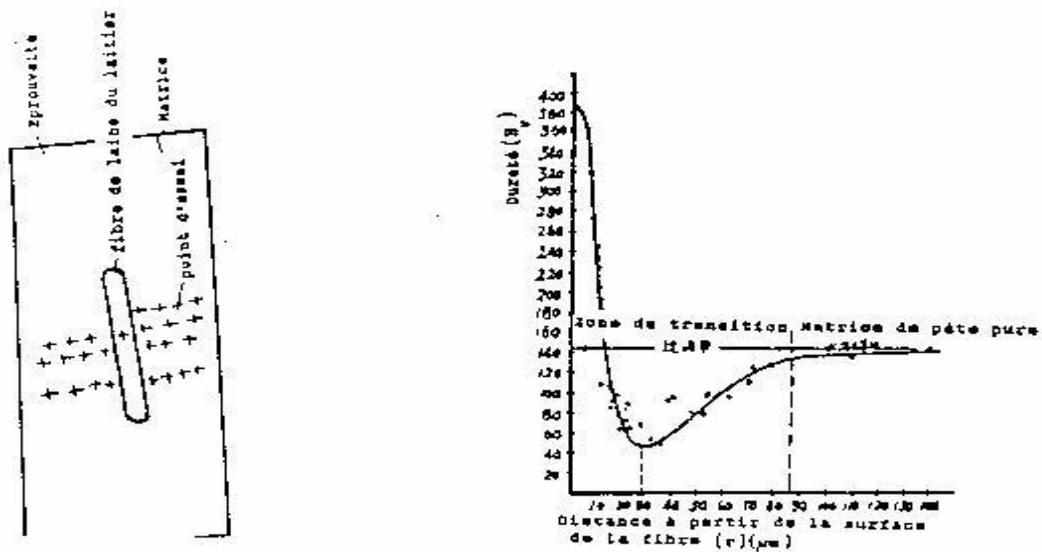
Par exemple, dans le cas de fibres d'acier, la zone de contact a une épaisseur de $50 \mu\text{m}$ autour de la fibre. La structure de la pâte dans cette zone diffère de celle que l'on trouve au cœur de la pâte. La nature de cette zone interfaciale a été étudiée pour différentes fibres (Bentur, Diamond Et Mindness (1985 A), Bentur Et Al (1985 b)). Cette zone est habituellement riche en portlandite CH (avec la notion des cimentaires), mais elle contient aussi d'autres composants (Bentur Et Al 1986) comme le montre la figure (I.11). Un mince film de $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur, connu sous le nom de Film « Duplex », c'est à dire à deux couches, (Barnes et Al 1979)) se dépose autour de la fibre. Les deux couches de ce film sont composées : l'une de chaux CH qui est en contact direct avec la surface de la fibre, l'autre s'appuyant dessus étant une simple couche de Silicate De Calcium Hydraté (C S H). Derrière le « film duplex », se trouve un anneau de CH massif d'une épaisseur de 5 à $30 \mu\text{m}$ qui occupe la plus grande partie de la zone interfaciale. On peut remarquer que cet anneau n'est pas continu et contient des paquets de matériaux poreux constitués de C H S et d'ettringite. Entre la couche de CH et le cœur de la pâte contenant le ciment bien hydraté, on trouve une zone de transition avec un matériau très poreux constitué de C-S-H. La formation de cette microstructure spéciale à l'interface provient probablement de la nature du mélange frais : l'espace voisin d'une inclusion (Fibre ou granulats) étant principalement

occupé par de l'eau qui s'accumule pendant le ressuage. Cet effet est toujours présent et ne peut être complètement éliminé même dans un mélange très dense. En plus de ces observations, la mesure de dureté montre qu'il y'a une décroissance notable de résistance de la pâte de ciment entre 0,15 et 0.75 mm à partir de la surface de la fibre

(Pinchin Et Tabor (1978)). Ces résultats pour les fibres d'acier s'observent pour d'autres fibres, par exemple (figure I.12) sur des « Titanferrous alkali-resistant slag wool fibre » (Chuanhe et Al 1986))



Figure(I.11) : Description schématique de la zone inter faciale à l'interface
D'une fibre d'acier et du ciment Benthur et Al (1986)



Figure(I.12): Mesure de la dureté au voisinage d'une fibre de « Titanium slag wool »
(Chuanhe Et Al 1986)

da

Avec des fibres en matériau polymérique tel que le nylon, le polypropylène et le carbone, le liaison fibre – matrice est entièrement mécanique et la résistance de liaison dépend de l'action d'accrochage entre la matrice et les filaments individuels de la fibre. Dans le cas des fibres de verre, l'attaque alcaline de la pâte de ciment affaiblit le renforcement fibreux et modifie les propriétés des constituants à l'interface au cours du temps. Le verre a préalablement subi un traitement de surface, « l'ensimage », induit par les technique d'étirage et de filage, conduisant à l'obtention d'une zone de transition entre le milieu alcalin et le verre favorisant à la fois une adhésion physico-chimique et une protection du verre. Le degré de défibrage de la fibre durant le processus de malaxage influence également la liaison inter faciale.

A cause de la nature de la liaison inter faciale dans les composites de ciment une mesure réelle, de la résistance de liaison, ne peut être obtenue par un seul test. Le traditionnel essai d'arrachement, noté « pull-out », ne représente pas l'état correct de contrainte dans la matrice du composite. Il représente davantage une mesure d'ancrage. En effet une fissure dans la matrice qui se propage vers la fibre est déviée dès qu'elle atteint la couche poreuse inter faciale (Bentur et Al. (1986)). Ceci conduit à une dissymétrie et une flexion durant le processus d'extraction de la fibre, alors que dans l'essai de pull-out aucune flexion n'apparaît et la dissociation a plus de chance de se produire au niveau de l'interface. Il convient de noter qu'il n'y a pas une corrélation unique directe entre la résistance à l'arrachement et la résistance en traction ou compression (Tattersall Et Urbanowicz 1974).

Les résultats précédemment cités montrent que des traitements chimiques ou physiques peuvent améliorer la liaison avec des facteurs supérieurs à 10 par rapport à la fibre non traitée. Dans ce cas l'on observe une bonification des résistances en traction ou flexion faible du même ordre de grandeur que celle obtenue par un meilleur contrôle du mélange fibre- matrice.

Les valeurs de résistance de liaison les plus élevées sont obtenues pour des pâtes pures et celles-ci diminuent lorsque la taille des granulats augmente ou lorsque le pourcentage de fibres est plus élevé. Bentur, Gray Et Mindness (1986), s'intéressent au rôle de la matrice sur l'essai de pull-out mirent en évidence une décroissance de la résistance avec l'augmentation du dosage en eau plutôt qu'avec la résistance de la matrice (Figure (I.13)). Ceci est cohérent avec notre précédent propos, dans la mesure où la tendance au ressuage est fonction de la quantité d'eau introduite. Une augmentation de la résistance en compression de la matrice n'apporte pas forcément d'amélioration sur l'adhésion si la zone de contact fibre-matrice reste aussi faible.

Si l'on recherche uniquement des gains de résistance ultime en phase fissurée sous flexion, l'étude de géométries spéciales sur les fibres d'aciers semble moins coûteuse et plus

performante que la recherche d'une bonne adhésion fibre- matrice, qui ne joue aucun rôle au delà de la fissuration.

Ainsi il est difficile de définir une grandeur intrinsèque représentative de la liaison fibre-matrice. Une bonne adhésion fibre-matrice ou une bonne résistance au glissement n'apporte pas les mêmes propriétés au composite.

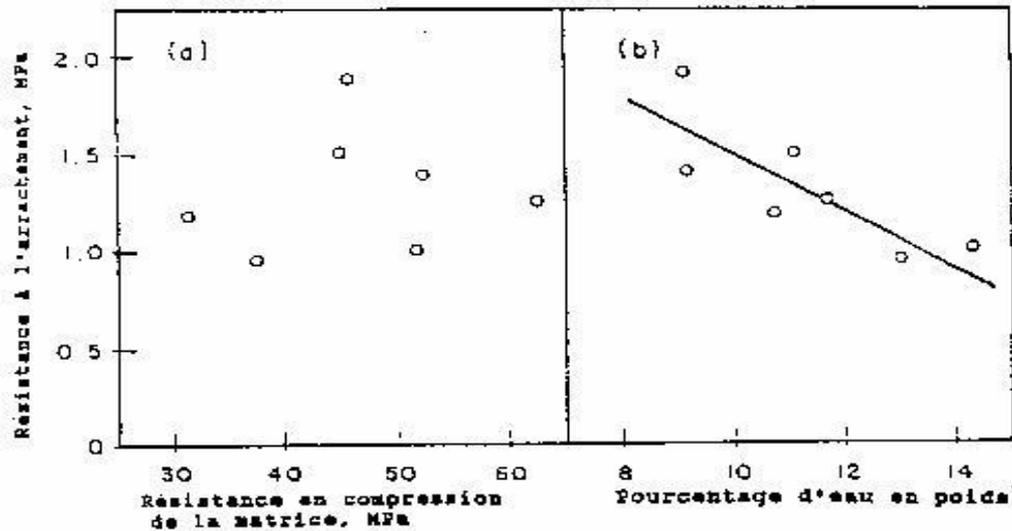


Figure (I.13):

- a) résistance à l'arrachement de fibres en acier droite en fonction de la résistance en compression de matrice.
- b) résistance à l'arrachement de fibres en acier droite en En fonction de la quantité d'eau contenue dans la matrice (Bentur et AL 1986)

I.3.2.5.les avantages et les inconvénients des fibres:

- Ils ne rouillent pas: ils ne sont pas corrosifs. Toutes les fibres sont désirables dans des environnements carbonatés. Les fibres d'aramide et de carbone montrent une bonne résistance aux environnements acides et alcalins.
- Ils sont résistants aux environnements agressifs, comme les ions chlorures.
- Ils sont insensibles aux courants électromagnétiques, à un degré moindre pour les fibres de carbone.
- Ils ont une bonne résistance en traction et un faible poids.

Ces qualité font des fibres un substitut idéals dans la structure est exposée à des agents corrosifs (sel de déverglaçage, environnements marins, gaz carbonique, gaz corrosifs, produits chimiques) ou que le système d'armature ne doit pas conduire d'électricité (planches d'alumineries, trous d'accès ou de visites d'équipements électriques et de télécommunication. etc.)

Cependant, comme tous les autres matériaux, les fibres ont des inconvénients qui peuvent être résumés dans les points suivants:

- Coût trop élevé (2 à 50 fois celui de l'acier).
- Un module d'élasticité relativement faible, sauf pour les fibres de carbone.
- -Absence de déformation plastique.
- Grand rapport de la résistance axiale sur la résistance latérale.
- Perte de résistance sous charges retenues.
- Dégradation au contact des rayons Ultra-Violet.
- Réaction des fibres de verre avec les alcalis.
- Un manque d'expérience d'utilisation des fibres.

I.3.2.6. Rôle des fibres dans le béton :

Le béton est un matériau fragile qui se rompt brutalement lorsqu' il atteint sa résistance à la traction. Les fissures s'y propagent donc de façon très rapide. Le béton armé de fibres se distingue du béton ordinaire par l'absorption d'énergie que procurent les fibres. La courbe (I.14) effort- déformation est différente : le matériau fragile au départ, s'est transformé en matériau ductile qui se rompt lentement après un allongement plus important dû à la formation d'un grand nombre de microfissures (plus grande énergie de rupture) (I.15)).

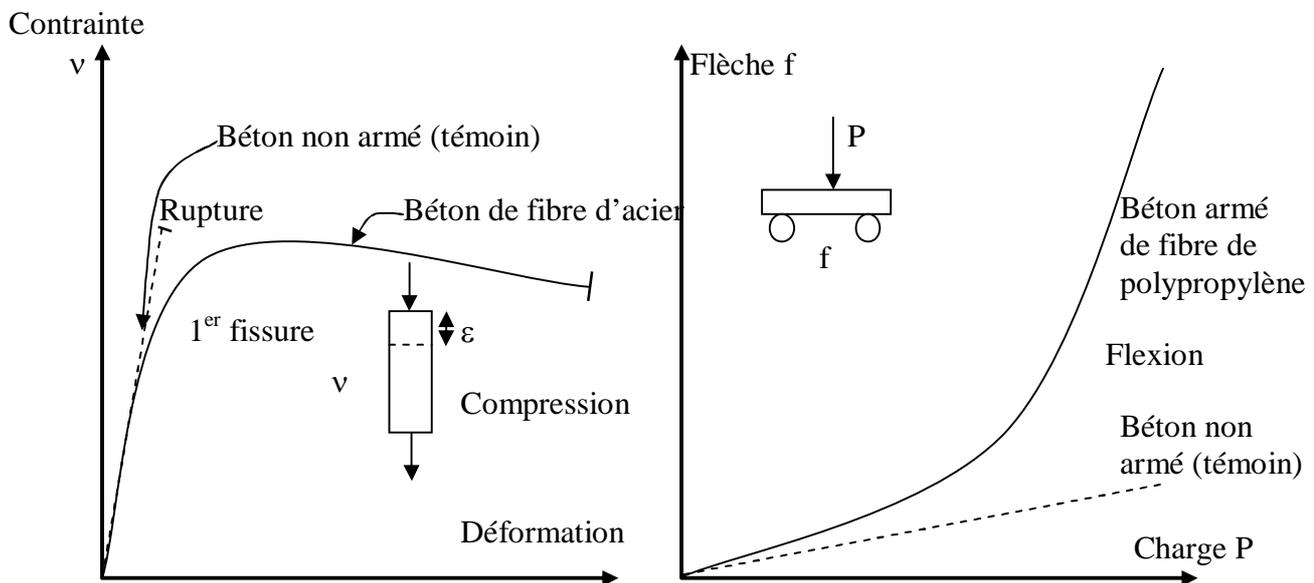
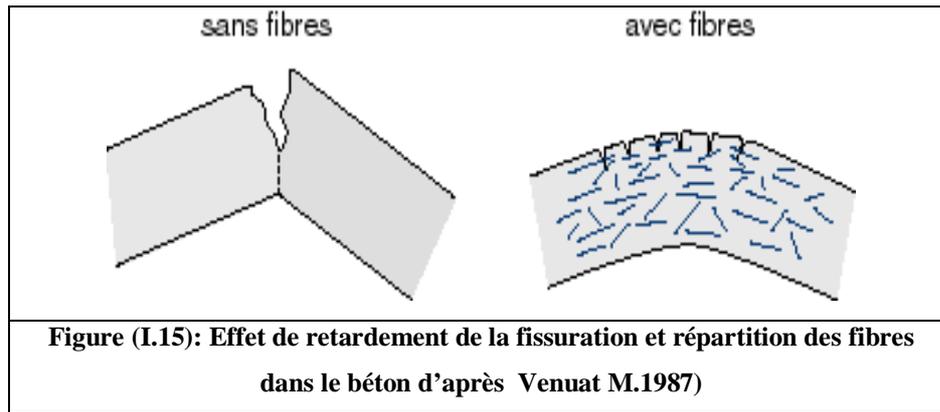


Figure (I.14): déformation d'un béton armé de fibres, comparée à celle d'un béton non armé d'après Venuat M.1987)



Les travaux de Dave Et Ellis (1979) sur des fibres de polypropylène montrent que si le module d'élasticité de ces fibres augmente, la résistance ultime de flexion augmente et le saut après la première fissuration est moins important.

En effet, lorsqu'une fissure tend à se propager à l'intérieur d'un béton armé de fibres, ses deux faces sont maintenues l'une contre l'autre par la force d'adhérence de l'interface fibre-matrice et aussi, dans le cas de fibres d'acier, par le phénomène d'ancrage mécanique. L'ouverture et la propagation des fissures nécessite donc un apport d'énergie supplémentaire afin de provoquer le glissement et éventuellement la rupture des fibres.

Ce phénomène a pour effet de conférer au béton une certaine ductilité après la rupture de la matrice tout en lui permettant de conserver son intégrité structurale. C'est pourquoi le béton armé de fibres est surtout utilisé dans la construction d'ouvrages soumis aux chocs sismiques, aux impacts, aux vibrations ou encore à de grandes déformations (dalles sur sol, viaducs, routes, structures en région sismique ou maritime, etc.). Les fibres peuvent aussi permettre un meilleur contrôle de la fissuration. Un béton ordinaire peut présenter de larges fissures localisées qui facilitent la pénétration d'agents agressifs et sont nuisibles au point de vue esthétique. Dans un béton armé de fibres, par contre, si la quantité de fibres est suffisante, ces larges fissures peuvent être remplacées par plusieurs fissures de dimensions beaucoup plus réduites, ce qui améliore à la fois la durabilité et l'aspect esthétique de l'ouvrage [Banthia Et Batchelor, 1991) comme le représente la photos (I.7).

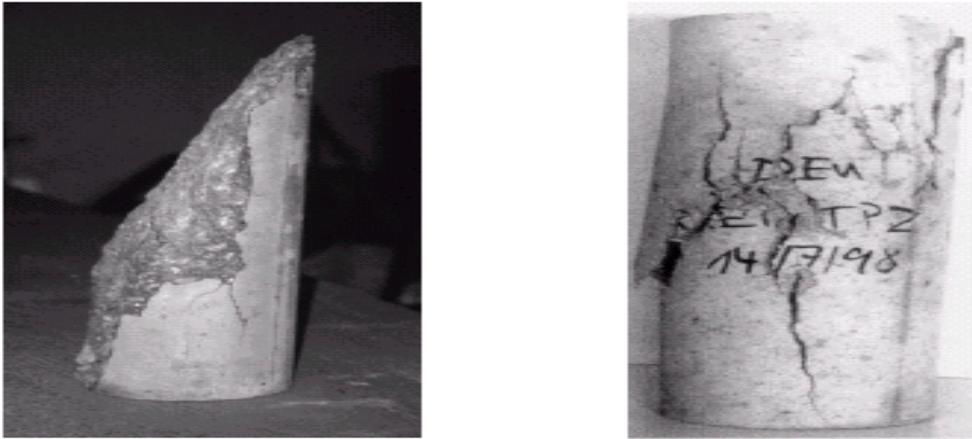


Photo (I.7): comparaison de rupture éprouvette armé de fibre et celle non armé d'après T. Budi Aulia

Pour qu'il supporte les contraintes de traction, le béton doit prendre en compte les contraintes de compression. Au lieu d'armer le béton et surtout les pièces de faible épaisseur qui posent des problèmes de dimension et de protection d'acier, on peut songer à ajouter des fibres. Selon les cas, ces fibres seront bien réparties dans la masse ou aux contraires orientées, ou encore placées à certains endroits de la pièce à renforcer. voir Figure (I.16).

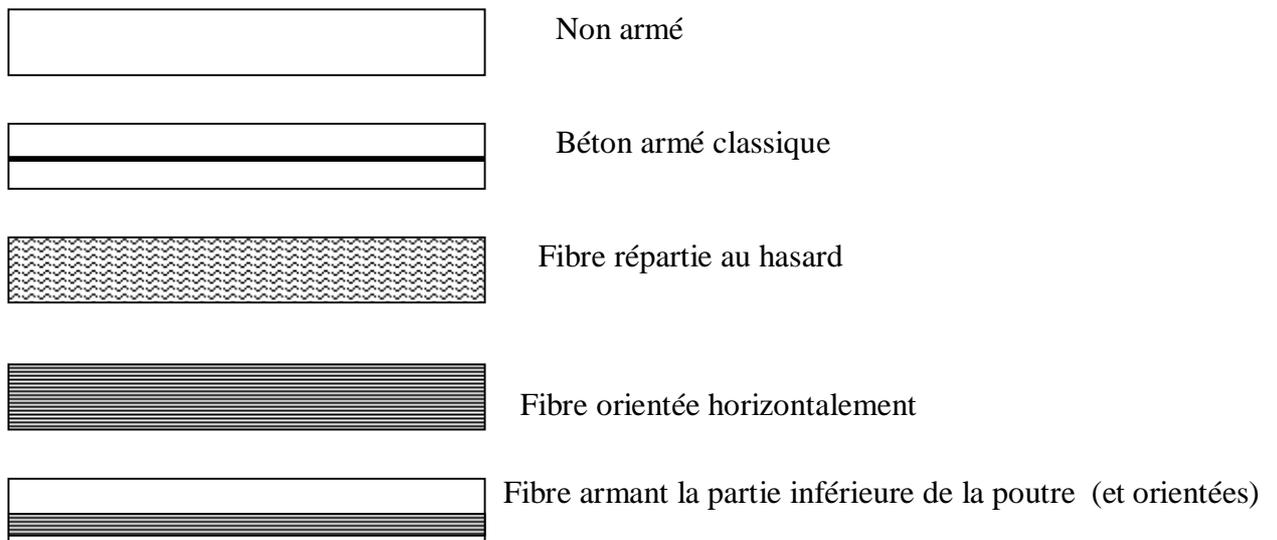


Figure (I.16): différents modes d'armature d'une poutre en béton d'après Michel Vénut1987

Les améliorations principales apportées par les fibres aux mortiers et aux bétons qui en contiennent se résument à:

- Réduction possible de l'épaisseur des pièces;
- Augmentation de la résistance en traction et en flexion;
- Accroissement de la déformabilité du matériau ; la matière est retenue par les fibres (certaines trop courtes déchaussent, d'autres plus longue se cassent);

I.3.2.7 La tenue de la fibre en milieu alcalin, condition de la durabilité du composite :

La durabilité est une propriété importante qu'il est nécessaire d'établir pour tous les matériaux de construction, et pour les nouveaux en particulier, dans différentes conditions d'environnement et d'exposition.

Certaines fibres organiques comme le polypropylène ou l'aramide résistent aux acides, aux alcalins et sont insensibles à la présence d'eau (Akihama et al. 1986), Hannant et Hughes 1986). Les composites de carbone gardent leur résistance sur des périodes supérieures à une année à l'air, sous l'eau, ou sous l'influence de cycles de gel-dégel. Bien que les bétons de fibres d'acier présentent des marbrures en surface, il n'y a pas de problème de durabilité ou de changement substantiel des propriétés de composite dans le temps (Swamy 1974)

Lorsqu'on veut utiliser les fibres de verre, on rencontre un problème important qui est la compatibilité chimique.

Le milieu fortement basique du ciment portland attaque les fibres en détruisant rapidement la résistance du composite. Les derniers travaux de recherche sur la microstructure de l'interface dans les ciments renforcés de fibres de verre ont révélé l'existence de la double couche notée « Duplex film » d'un micromètre d'épaisseur entourant la fibre de verre. Celle-ci se compose de portlandite, orientée suivant un axe perpendiculaire au verre, secondée par une bande façonnée de particule de C.S.H. Au cours du processus d'hydratation, ce « duplex film » se lie à la masse de la pâte de ciment par dépôt de l'hydroxyde de calcium additionnel, de l'ettringite ou d'autres produits d'hydratation. Cette constatation met en évidence la haute affinité des surfaces de verre pour la portlandite.

En conséquence, l'amélioration de la durabilité des bétons renforcés de fibres de verre s'est faite avec les démarches suivantes :

- Utilisation de ciment à faible alcalinité (Majumdar Et Nurse 1979, Pachtchenko Et Al 1980).
- Diminution de l'alcalinité des matrices durcies.
- Empêchement du déplacement des ions alcalins.
- Développement des fibres avec enduit imperméable résistant au milieu alcalin (Bouhekouk Et Al 1987)

Suite à l'apparition sur le marché de fibres de verre résistantes aux alcalins, on a découvert un nouveau problème qui est le remplissage de l'espace entre et autour des filaments avec des produits d'hydratation du ciment riches en calcium.

La mise en évidence de l'importance de ce remplissage pour la tenue des bétons renforcés de fibres de verre à long terme sous chargement mécanique a donné lieu à des études sur :

- L'application d'ensimage sur les filaments des fibres de verre qui change l'affinité des produits d'hydratation (Nills 1981.a).
- L'addition de polymères dispersés par l'eau qui pénètrent le paquet des filaments des fibres et se mêlent à la précipitation des produits d'hydratation du ciment dans l'espace inter filamentaire (Bijen 1979).
- L'utilisation du ciment libérant peu d'hydroxyde de calcium (Bentur 1984)
- Le stoppage de transport de la chaux (Nills 1981 b)

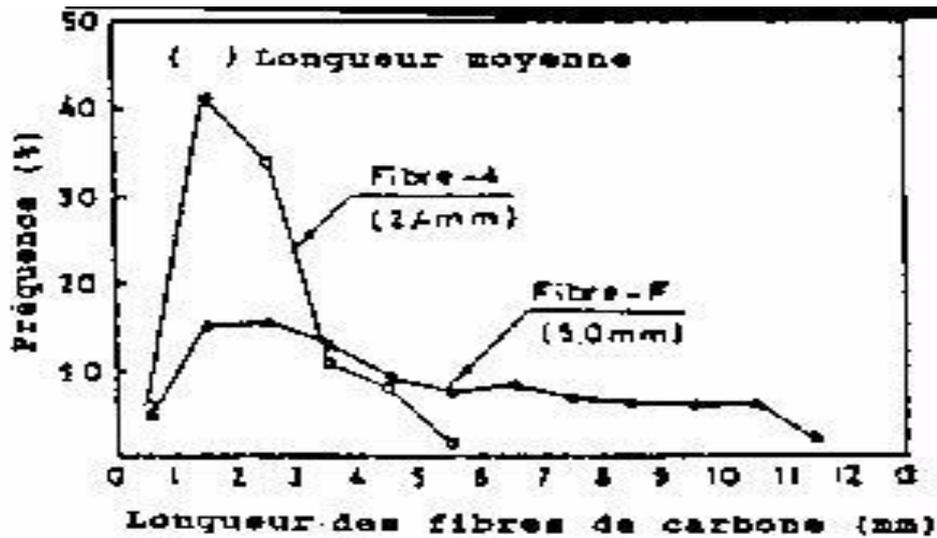
Schématiquement, l'on constate une évolution des caractéristiques du composite fibres de verre dans la matrice cimentaire : au jeune âge, il présente de très bonnes résistances et une bonne ductilité ; après six mois à un an, notamment au contact de l'humidité, le matériau présente toujours de bonnes résistances mais il se fragilise. Le vieillissement se poursuit par une dégradation des fibres en milieu alcalin.

Cette dégradation à long terme des fibres ne remet pas en cause le rôle qu'elles peuvent jouer pendant les phases de durcissement du béton. Pour l'application, il s'agit de la seule phase critique de l'élément structurel.

I.3.2.8 La tenue de la fibre durant les opérations de mise en oeuvre :

Les conditions de mise en oeuvre peuvent modifier les caractéristiques géométriques des fibres, notamment pendant l'opération de malaxage. Ainsi les fibres fragiles peuvent se rompre et les filaments se défibrer. Les paramètres importants sont alors le temps de malaxage, la taille, la quantité et la forme des granulats.

La figure (I.17) issue des travaux de Kunio Nishioka et Al 1986) montre la distribution des longueurs de fibres de carbone après malaxage, (300 à 400 fibres sont prises en compte). Toutes les fibres référencées A ont une longueur inférieure à 6 mm et la moyenne est pratiquement égale au quart de la longueur initiale. Dans le cas de la fibre F, la longueur initiale est réduite de moitié. Notant que la fibre A est plus fragile et moins résistante (Rapport de 1.55). Sur le composite ce résultat est important car si la longueur de la fibre devient inférieure à la longueur critique, l'intérêt du renforcement peut devenir nul.



Figure(I.17): distribution de la longueur des fibres de carbone après malaxage. La longueur initiale des fibres est de 10 mm (Kunio Nishioka Et Al 1986)

L'influence du temps de malaxage sur les courbes chargement déplacement de flexion, pour un composite fibres de verre E ciment adjuvante d'un latex, apparaît sur la figure (I.18), suite à une étude qui a été menée en 1984 par Dibecki:

- Pour 1 minute de malaxage les mèches de fil sont peu endommagées et confèrent au matériau une bonne résistance et une bonne ductilité.
- Pour 2 mn et 5 mn de malaxage, se produit un éclatement des mèches de fils, la résistance diminue, le matériau est plus fragile.
- Pour 8 mn de malaxage, les fibres sont défibrées, la résistance augmente à cause d'une meilleure répartition du latex le long des fibres mais le matériau continue de se fragiliser.

L'observation au microscope montre des fibres fortement striées pour 8 mn de malaxage.

Avec certaines fibres, pour une même composition au départ, le comportement du composite peut être très différent, voire contradictoire, si le processus de malaxage n'est pas rigoureusement contrôlé.

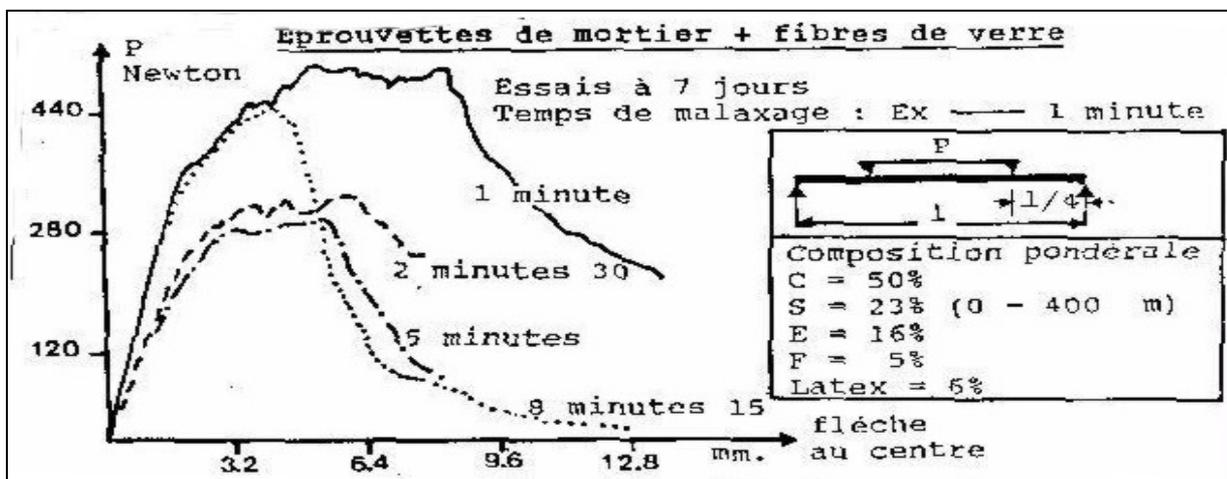


Figure (I.18): Courbes charge – flèche obtenues en fonction du temps de malaxage d'après Dibecki . 1984

I.3.3 Formulation du béton de fibres

Effectivement l'ajout de fibres d'acier dans le béton modifie le squelette granulaire. On doit donc augmenter la quantité de sable pour optimiser ce squelette granulaire et rendre ainsi le béton plus compact puisqu'il est de cette façon plus maniable. Cette première affirmation constitue la première hypothèse confirmée sur laquelle repose la méthode Baron-Lesage développée en France il y a environ 25 ans : Une méthode générale pour la composition d'un mélange de béton. De plus lorsque la quantité de sable augmente la porosité du béton augmente. Pour contrer cet effet, il faut alors utiliser plus de pâte de ciment pour remplir les vides et augmenter cette fois l'action mécanique entre les fibres et la pâte de ciment. Plus le dosage en fibres est élevé plus le rapport sable/pierre est élevé. Par conséquent plus la quantité de pâte de ciment augmente également, plus l'élanement (rapport longueur/diamètre) de fibre est élevé. Plus les quantités de sable et de pâte de ciment sont élevées plus on obtient une meilleure maniabilité du béton. Aussi pour être efficaces les fibres doivent avoir une longueur supérieure à 2 fois le diamètre des granulats. Une démarche d'optimisation d'un mélange de béton de fibres a été adoptée. Cette méthode se base sur la méthode Baron-Lesage mentionnée plus haut. Déjà utilisée pour les bétons ordinaires et les bétons à haute résistance avec fumée de silice, elle a été adaptée par Rossi et Harrouche (1990) pour optimiser le squelette granulaire des bétons de fibres. Cette démarche comporte trois étapes :

- 1) Fixer d'abord le rapport eau/ciment, le pourcentage de fibres à utiliser et la quantité de super plastifiant.
- 2) Fabriquer plusieurs mélanges en faisant varier le rapport sable/pierre qui devrait être autour de 1.0 en gardant constant le rapport eau/ciment et les quantités de pâte de ciment et super plastifiant fixés au départ. Déterminer la maniabilité de chacun des mélanges de préférence avec un maniabilimètre. Le mélange présentant la meilleure maniabilité est celui ayant le rapport sable/pierre (SR) optimal.
- 3) Augmenter ou diminuer la quantité d'eau et de ciment utilisée, tout en gardant les rapports eau/ciment et SR constants. Pour obtenir une bonne maniabilité il faut faire varier également la quantité de super plastifiant. Cette troisième étape repose sur la deuxième hypothèse confirmée par la méthode Baron-Lesage : la quantité optimale d'agrégats ne dépend pas de la nature ou du volume de pâte de ciment. En suivant cette procédure ; on arrive à fabriquer de très bons mélanges de béton de fibres avec des maniabilités comparables à des bétons blancs. Il faut par contre s'assurer que ces bétons de fibres très maniables aient un minimum de ségrégabilité et qu'aucun oursin de fibres

ne se forme. Pour éviter ces oursins il est suggéré d'ajouter les fibres graduellement dans un béton très plastique pour éviter une concentration locale des fibres.

1-3.4. Comportement du béton de fibres vis-à-vis des actions thermiques :

Deux questions peuvent se poser :

- 1- Un étuvage améliore-t-il ou au contraire augmente –il les caractéristiques du composite ?
- 2- Des dilatation différentielles entre fibre et matrice ($\alpha = 12 \text{ à } 16 \cdot 10^{-6}/\text{c}$) endommageront –elles prématurément le matériau ?

On peut répondre que sous l'effet des variations de température la matrice ($\alpha = 10 \cdot 10^{-6}/\text{c}^\circ$) et la fibre se dilatent. Ces variations relatives ne doivent pas détériorer le composite. Sous les sollicitations de ce type se posent du fait de la compatibilité des coefficients de dilatation. L'effet des résistances en compression du béton et du béton renforcé de fibres a été étudié par Faiyao et Al-Aussi (1986). Ils en déduisent que la résistance, en compression du béton de fibres d'acier ou de verre, est supérieure à celle du béton mais reste indépendante du pourcentage de fibres vis à vis de cette sollicitation pour un volume de renforcement de 0,5 à 1%. Notons que les fibres d'acier trouvent une application importante dans le renforcement des produits réfractaires (Hackman 1980).

La fibre de carbone dans la matrice de ciment est mise en traction pour les variations de température positives et en compression pour les variations négatives. L'interface fibre matrice est ainsi sollicitée. Pour ce type de fibre, Shigeyuki Akihama et Al (1986) mirent en évidence qu'à partir de 140 c° le composite commence à perdre ses propriétés mécaniques. Les fibres en matériaux polymériques, du fait de leur important coefficient de dilatation, sont sollicitées en compression (20 MPa pour du polypropylène pour une variation de $+60^\circ$), et en traction pour un δT négatif.

I.3.5 La mise en oeuvre de béton de fibres:

On peut incorporer dans un mortier ou béton une certaine quantité de fibres longue de quelques centimètres, tout simplement comme un granulats additionnel dans une bétonnière. C'est la une technologie d'emploi immédiat et nous centrerons notre propos sur elle. Il convient de noter que d'autres techniques très performantes existent comme la projection ou le moulage par centrifugation, et il n'est pas irréaliste de prévoir que d'autres procédés (voir figure (I.19)) , comme le moulage par pultrusion ou le moulage en continu, voient le jour.

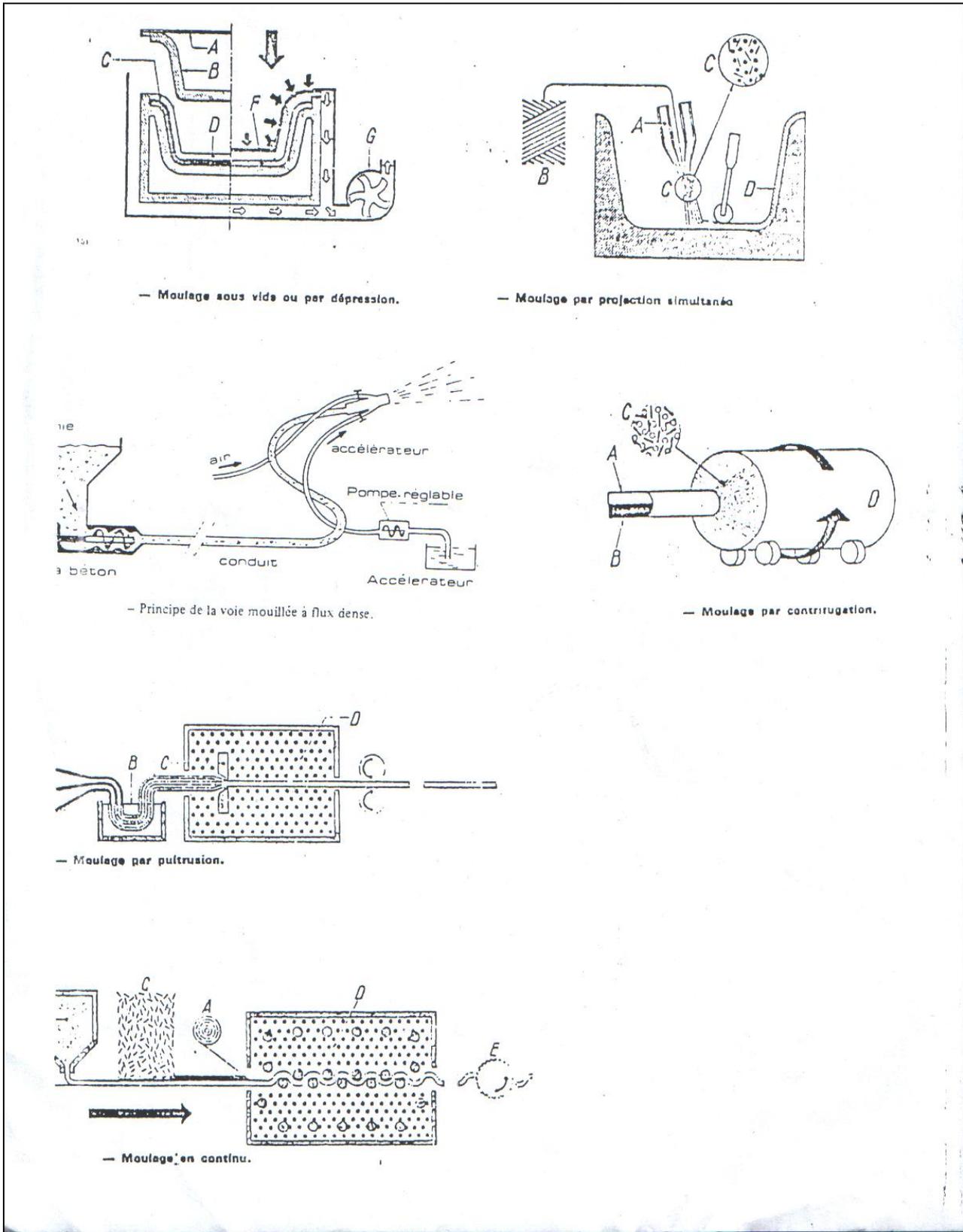
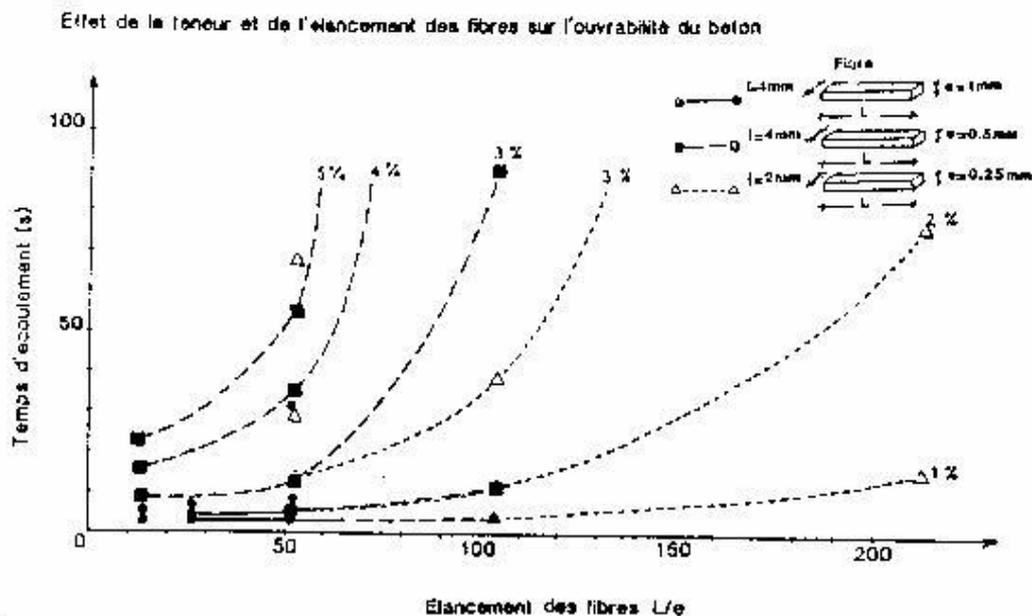


Figure (I.19) : Principales méthodes de mise en œuvre d'après les Travaux De Recherche De Laboratoire De L'institut National Des Science Appliquées De Lyon

L'addition de fibres à un béton ordinaire pose très vite des problèmes d'élaboration, dus à la réduction de la maniabilité du mélange. L'expérience montre que ce n'est pas uniquement la géométrie des fibres et le volume incorporé qui influencent les propriétés rhéologiques du béton frais renforcé de fibres, mais aussi la taille, la forme et la fraction volumique des gros granulats et des fines rajoutées.

Pour les mesures d'ouvrabilité, le cône d'Abrams reposant sur une méthode d'écoulement statique n'est pas un bon indicateur de l'aptitude relative des bétons à une bonne mise en place. Les méthodes dynamiques, permettant la mesure d'un temps d'écoulement du béton soumis à une vibration donnée, semblent être un meilleur indicateur (l'essai V_e-B_e ou le maniabilimètre LCL- Edgington (1973)).

La figure (I.20) (Boucekouk-Debicki- Hamelin (1987)) donne l'effet du pourcentage de fibres et leurs élancement sur l'ouvrabilité du béton pour des rubans composés de fibres de verre enrobées de thermoplastique. Des résultats semblables ont été obtenus par Edgington et Hannant (1972) avec des fibres d'acier. Ceux-ci montrent une diminution rapide de l'ouvrabilité avec l'augmentation de l'élancement de la fibre, ainsi qu'avec l'augmentation de la proportion volumique des fibres incorporées. Une forte réduction de l'ouvrabilité se produit également lorsqu'on augmente la teneur en grains de dimension supérieure à 5 mm dans le mélange (Edgington (1973)). Précisons que le rajout de fines diminue également l'ouvrabilité



Ainsi apparaît une « limite pratique de faisabilité » que les chercheurs ont essayé de préciser. Dans le cas de fibres d'acier c'est la non formation d'oursins qui sert de critère. Dans le cas des fibres d'acier, les formules suivantes sont proposées pour définir le pourcentage massique ou volumique maximale de fibres intégrables ($V_{f_{max}}$)

$$V_f < 3 \frac{d}{l} \quad (I.4)$$

d : diamètre de la fibre

l : Longueur de la fibre

*- **Tattersall et Al** (1974)

$$V_f < \frac{600}{\Gamma_c} (1 - A_g) \quad (I.5)$$

V_f : proportion des fibres, en fraction pondérale

$$A_g = \frac{\text{masse des granulats supérieurs à 5 mm}}{\text{masse totale du béton}} \quad (I.6)$$

Γ_c : élancement (longueur de la fibre sur son diamètre)

*- **Edginton** (1973)

$$100 \frac{V_f}{V_m} < 75 \pi \frac{g}{g_m} \frac{d}{l} \cdot K \quad (I.7)$$

V_m : proportion de la matrice, en fonction pondérale.

G_m : masse volumiques de la matrice et de la fibre.

$$\text{Ou } K = \frac{G_m}{G_m + G_g}$$

G_m ; est la masse relative de la matrice moins la masse des grains inférieurs à 5 mm.

G_g : la masse relative des grains supérieur à 5 mm.

*- **G. Liqui** (1986) :

$$V_f < \frac{B}{l/d - 16} 1.08 \left(1 - \frac{D_{max}}{32.5} \right) \quad (I.8)$$

B est une constante dépendant des proportion de mélange du béton (valeur courante 1,8).

D_{max} : taille du plus gros granulat en mm.

L'utilisation de plastifiant et de superplastifiant permet d'augmenter les pourcentages de fibres introduites en ayant un rapport eau sur ciment qui conserve de bonnes propriétés à la matrice. Le rajout d'eau dans la matrice pour augmenter le pourcentage de fibres peut annuler pratiquement les gains de résistance mécanique obtenus avec les fibres.

I.3.6 Propriétés des bétons de fibres :

On observe une différence de comportement sous sollicitation du béton renforcé de fibres et du béton traditionnel. Leurs courbes effort-déformation sont très différentes. Il en résulte certaines modifications dans les propriétés du béton. La courbe dépend des paramètres suivants.

- Pourcentage de fibres
- Longueur des fibres (ou rapport de la longueur sur le diamètre).
- Forme de la section dont dépend la surface latérale d'adhérence et notamment du rapport de la section sur le périmètre.
- Forme des fibres (à crochets, ondulées, plates, droites).
- Nature des fibres.
- Béton de la matrice (formation, dimension de granulats, teneur en ciment, maniabilité).
- Orientation des fibres vis-à-vis de la direction de l'effort.

I.3.6.1 Propriétés mécaniques:

I.3.6.1.2 Résistance a la compression :

La résistance à la compression simple qui est déterminée par la valeur maximum de l'effort appliqué, est la caractéristique de base des bétons employés dans les structures. Dans le cas du béton de fibres, l'introduction des fibres dans la matrice peut avoir deux effets contradictoires : d'une part maintenir les fissures, ce qui est favorable pour la phase post pic, mais d'autre part créer des défauts supplémentaires à l'interface fibre- matrice. Ces défauts peuvent servir d'amorce à l'endommagement et donc limiter la charge maximale.

Généralement, la plupart des résultats de la littérature qui comparent un béton normal à un béton de fibres, montrent une légère augmentation de l'effort maximum de compression avec la teneur en fibres. Dans certain cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime (Balaguru 1992, Banthia 1995, Paskova 1997, Yin 1988) et comme l'illustre la figure (I.21) tirée d'une publication de Johnson W. et Al 1974 où on montre le gain de 15% de la résistance à la compression. Dans d'autres cas (figure (I.22)) une légère diminution (Rossi 1994 et Dardar J 1975) est montrée cette diminution à partir de $V_f=0.5\%$ pour des fibres de polypropylène. On peut aussi négliger l'effet de fibre en compression si le volume de fibre est inférieur à 0.75% Chez Balaguru 1992 et inférieur à 1% chez Pascova 1997. Le changement du module d'élasticité est aussi négligeable.

La présence de fibres change le mode de rupture de béton. Il devient plus ductile. Cette ductilité dépend des facteurs volume fraction de fibre, géométrie des fibres, et composition de la matrice. L'addition de fibres augmente la déformation au sommet puis la courbe descend lentement comme le montre Gapalaratnan VS et Shah S.P 1985 dans leurs résultats statiques en

compression, que la présence de fibres (d'acier) dans la matrice augmente la résistance à la rupture de 35% pour 1.5% de fibres, et la déformation correspondante à la résistance maximale augmente de 38% (figure 1.23) éprouvette cylindrique de diamètre 76 mm et 152 mm de hauteur).

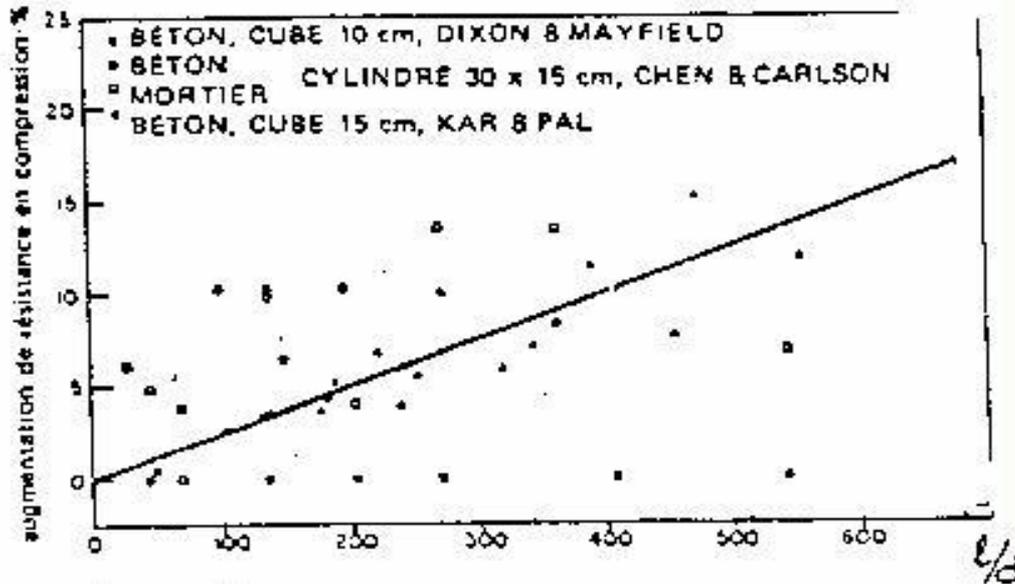


Figure (I.21) : Augmentation de la résistance en compression en pourcentage d'un béton ou mortier armé de fibres d'acier en fonction des paramètres L/d (Johenson W. et Al 1974)

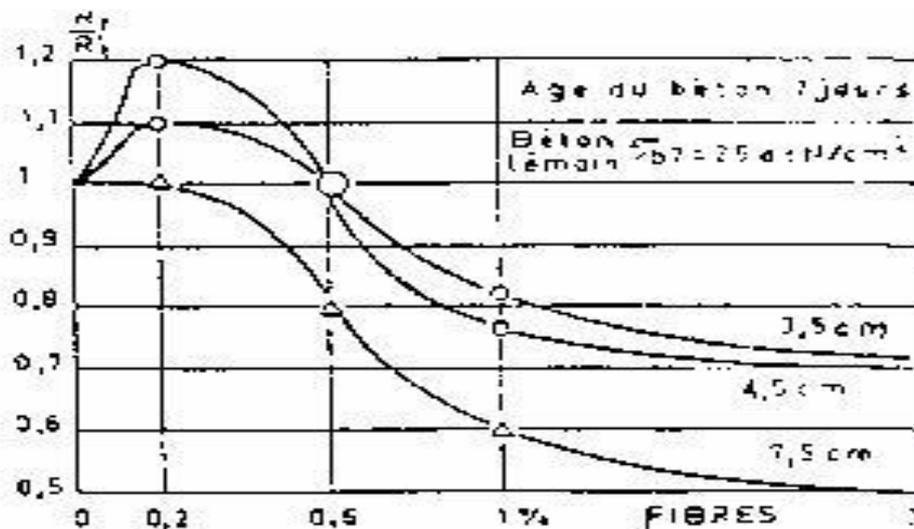


Figure (I.22) : Influence de la longueur et de pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton armé de fibres de polypropylène (Dardar 1975)

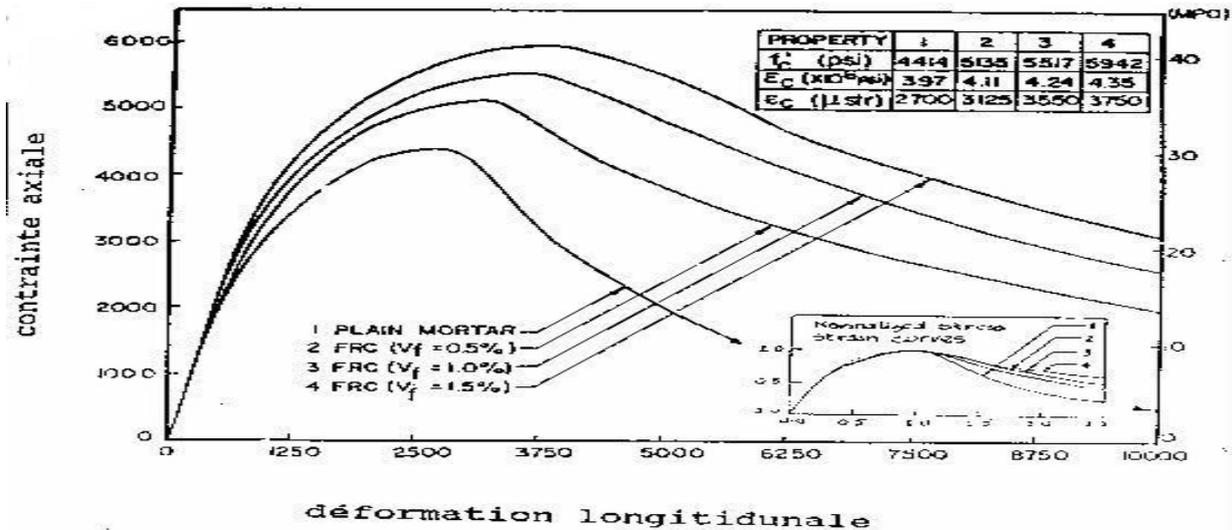


Figure (I.23): relation entre la déformation longitudinale et la contrainte axiale en compression
(Gopalaratnam V.S et Shah S.P 1985) (Fibres L= 2.54 cm)

I.3.6.1.3 Résistance a la traction :

Comme il a été illustré au dessus, les fibres modifient principalement le comportement après fissuration. Les fibres ont deux rôles: d'une part elles sont susceptibles de retarder l'apparition de la macrostructure de la matrice et d'autre part, elles réalisent une couture sur les lèvres de la fissure formée dans l'éprouvette, ceci augmente de la "ductilité" au matériau. Durant la première phase, la microfissuration se répartit uniformément dans le volume. Le matériau est caractérisable par une loi de comportement. Pour augmenter la résistance à la fissuration. Il semble logique en utilisant un fort pourcentage de fibres courtes. Conditions aux limites du corps d'éprouve. Des fibres longues bien ancrées et ductiles offriront une bonne résistance à l'ouverture des fissures (Houari 1992)

Les fibres sont introduites dans le béton pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la macrofissuration. En revanche, le comportement postfissuration est fortement lié à la teneur en fibres, à leur orientation et à leur mode de fonctionnement. Mais la contrainte postfissuration n'est pas directement proportionnelle à la quantité de fibres introduite.

Plusieurs méthodes expérimentales ont été développées pour quantifier l'action des fibres sur le contrôle de la fissuration. Ce sont l'essai de fendage et de module de rupture (qui ne donnent accès qu'à une valeur pic qualifiée de résistance, l'essai de flexion (avec mesure de la flèche et du comportement postfissuration) et l'essai de traction uniaxiale. Cependant, la plupart de ces essais ne permettent pas de déterminer un comportement intrinsèque du matériau. En effet, les résultats dépendent généralement de la taille des éprouvettes et font intervenir des effets structuraux qu'il est difficile d'analyser en terme de comportement en traction (Casanova 1996)

Les augmentations de résistance en traction dues aux fibres sont variables. La plupart des chercheurs proposent qu'il y a une légère augmentation de la contrainte ultime et présence d'une phase post pic. Balaguru (1992) propose que l'on puisse négliger l'effet de fibre en on peut dire que les améliorations constatées dépendent essentiellement de la forme des éprouvettes, des paramètres liés à la géométrie et au pourcentage volumique des fibres utilisées.

D'autres chercheurs comme Johnson C. et Coleman R.A 1974 indiquent sur les figures (I.24.a et I.24 b) que l'augmentation relative de la résistance en traction du béton renforcé de fibres est donnée par la formule suivante.

$$\frac{\sigma_c - \sigma_m}{\sigma_m} = 0.015 V_F \left(\frac{L}{d}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (I.9)$$

Avec L : Longueur de fibre.

d : diamètre de fibre

V_F : volume de fibres.

La résistance à la traction du composite s'exprimant par :

$$\sigma_c = \left(1 + 0.015 V_F \left(\frac{L}{d}\right)^{\frac{3}{2}}\right) \sigma_m \quad (I.10)$$

Cette formule a l'intérêt de mettre en évidence les deux paramètres qui jouent un rôle primordial dans la résistance à la traction.

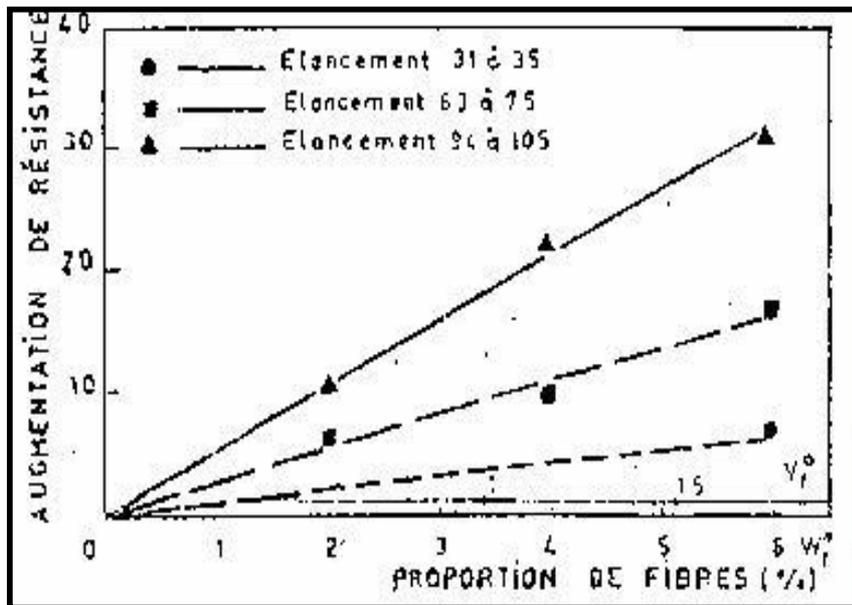


Figure (I.24) a : augmentation de la résistance $\frac{\sigma_c - \sigma_m}{\sigma_m}$ à la traction d'un mortier armé de fibres d'acier en fonction du volume de fibre (Johnson et Colman 1974)

fonction du volume de fibre (Johnson et Colman 1974)

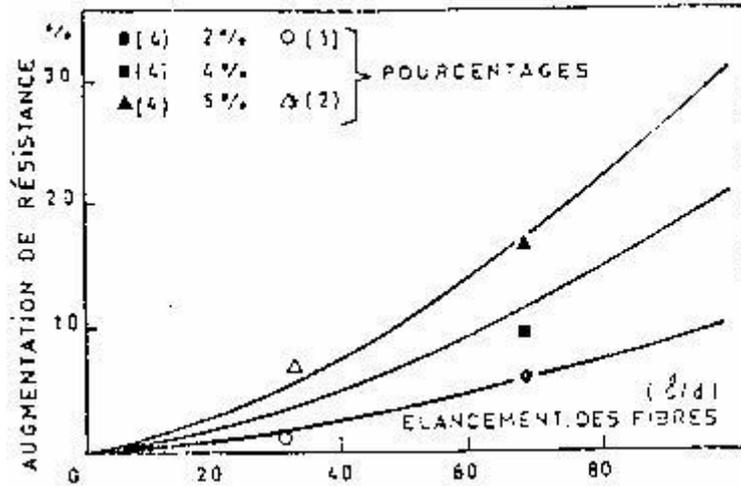


Figure (I.24 b) : augmentation de la résistance à la traction $\frac{\sigma_c - \sigma_m}{\sigma_m}$ d'un mortier armé de fibres d'acier en fonction de l'élançement des fibres (Johnson et Colman 1974)

Cependant, le rôle de la longueur apparaît clairement dans toutes les recherches, comme le montre (Majumdar 1975) dans son article dont est extraite la courbe suivante (figure 1.25) :

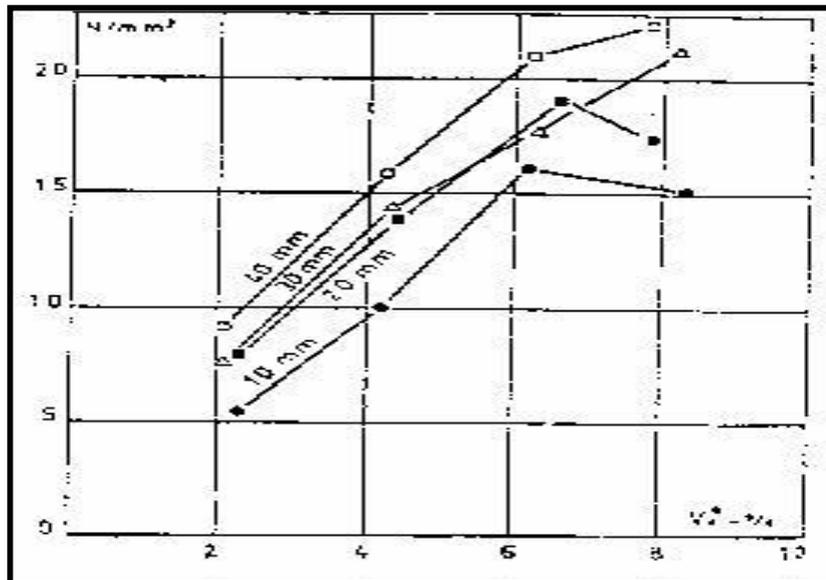


Figure (I.25): Résistance à la traction du ciment armé de fibres de verre en fonction du pourcentage en volume de fibres V_f et pour différentes longueurs de fibres (Majumdar 1975)

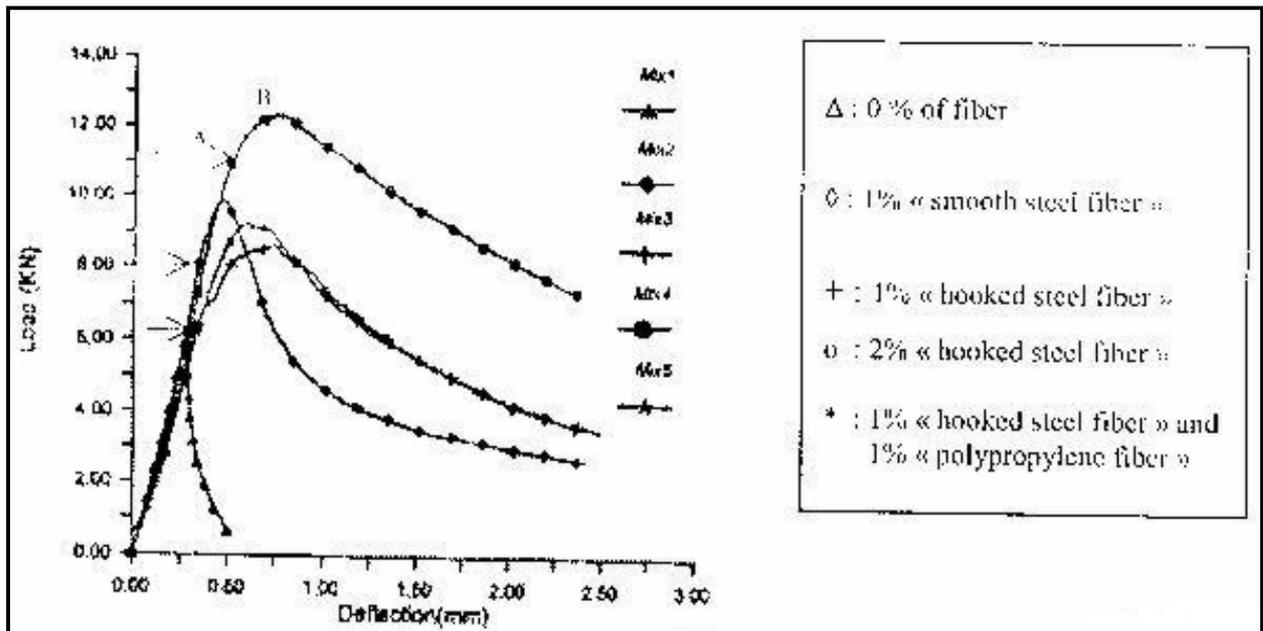
I.3.6.1.4 Résistance en flexion :

Le comportement en flexion est l'aspect le plus important pour un béton de fibre car ce matériau composite subit le plus souvent ce type de chargement dans ses applications. On ajoute des fibres dans la matrice pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration. L'amélioration de la résistance de première fissuration est ordinairement un gain secondaire. En flexion, la structure fissurée peut reprendre des efforts bien supérieurs à ceux relevés lors de l'apparition de la première fissure.

La figure (I.26) donne la courbe charge- flèche qui représente les deux comportements :

- Partie linéaire (entre O et A), le point A est la limite de proportionnalité et correspond à la première fissuration de la matrice. Nous notons F_f cette charge de fissuration à laquelle correspond une contrainte σ , calculée avec la théorie élastique.

Dans la partie développement de fissuration (entre A et B), les fibres jouent le rôle d'armatures dans les zones fissurées. Le point B correspond à la charge maximale reprise par l'élément de structure. On désigne cette charge par F_{max} . Avec cette valeur et les caractéristiques géométriques de l'éprouvette, il est possible de calculer un module de rupture (MOR), déterminé en supposant le matériau élastique jusqu'à rupture. Le module de rupture est une grandeur commode pour comparer des composites ou pour les dimensionner. Cependant, à partir de cette grandeur, il n'est pas possible de connaître l'état de contrainte et de déformations dans le composite avec la seule théorie élastique



La figure (1.26): courbe de charge – flèche en flexion (Masdar Helmi Juin 1998)

Le diagramme charge- flèche intègre à la fois un comportement de matériau et un comportement de structure en fonction du type de fissuration à se développer. L'analyse de ce résultat expérimental permet de caractériser la ténacité du matériau avec le calcul d'indices basés sur des considérations énergétiques

I.3.6.1.5 La ténacité :

Le concept de l'indice de la ténacité du béton de fibres est dû au besoin de l'identification et de la mesure d'une propriété qui permet de différencier un béton de fibres d'un béton normal

Le béton de fibres est plus ductile qu'un béton normal, c'est à dire qu'une grande énergie est demandée pour pouvoir fissurer le béton de fibres et spécialement pour faire augmenter la fissure jusqu'à la rupture.

Cette grande quantité d'énergie est appelée ténacité et peut être évaluée en effectuant des essais de flexion. Cette évaluation est faite à partir d'un coefficient sans dimension appelé indice de ténacité.

Généralement, la ténacité est représentée par les aires sous les diagrammes charge flèche en flexion. Mais les chercheurs ont essayé d'identifier la ténacité sur une base numérique au lieu de la base graphique. Pour cela, la question qui a été posée est : comment doit on interpréter la relation graphique (charge- flèche) par des nombres qui peuvent donner une identification significative au concept de la ténacité.

Des chercheurs ont essayé de quantifier la ténacité par un indice qui permet de mesurer et de comparer la capacité d'absorption énergétique des divers bétons de fibres. Pour cela toutes les méthodes ont été basées sur des essais de flexion.

- **La méthode ACI comite 544** (1978) définit la ténacité par un indice unidimensionnel. Cet indice est calculé en utilisant l'aire défini par la courbe charge- flèche d'une éprouvette testée en flexion. Il est égal au rapport entre l'énergie totale absorbée par l'obtention d'une flèche au centre de 1.9 cm et l'énergie absorbée jusqu'à l'apparition de la premier fissure.

- **La méthode japonaise (JCI)** : qui définit la ténacité comme l'aire comprise entre la courbe charge- déformation et l'axe horizontal indiquant la déformation jusqu'à une déformation de 1/50, ou I est la portée de la poutre. L'éprouvette utilisée est une poutre de 150x150x 450 ou bien 100x100x300, chargée au milieu.

L'indice de ténacité est calculé avec la formule suivante :

$$\bar{\sigma}_b = \frac{T_b I}{\delta_t . b . h} \quad (I.11)$$

Où

$\bar{\sigma}_b$: L'indice de ténacité (N/mm²)

T_b : La ténacité par flexion (J)

δ_t : La déformation correspondant avec L/150

- **La méthode ASTM C1018 /**

définit l'indice de ténacité comme le rapport entre l'aire OAB et l'aire OACD (figure (I.27)). Dans cette méthode les éprouvettes sont double tranchant, soumises à une force excentrée de compression.

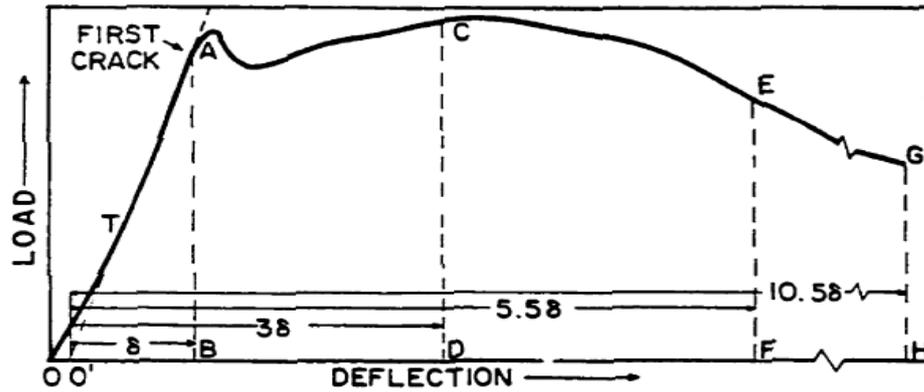


Figure (I.27): Courbe De Calcul De L'indice De Ténacité Par La Méthode ASTM C1018

I.3.6.1.6 Résistance aux chocs :

Le cas de chargement dynamique, tel que le choc, remet en question les modélisations et les lois de comportement du béton fibreux sous chargement statique ou quasi-statique. La structure interne hétérogène fait que chaque composant se déforme différemment et que l'interaction inter granulaire engendre des frictions internes différentes pour chaque niveau de contrainte.

Gopalaratnam V.S et Shah S.P (1985) ont effectué un certain nombre d'essais avec un appareil de type Charpy pour le B.A.F de fibres d'acier. Ils ont montré que pour un même type de chargement (flexion) le rapport résistance statique à la résistance dynamique est égale à 0.79 , 0.99 et 1.11 pour des pourcentages de fibres de 0.5 , 1 et 1.5 % respectivement (Pourcentage des fibres en volume).

Krenchel H a trouvé dans ses essais aux chocs en compression, que la résistance dynamique du béton renforcé par de fibres d'acier varie en fonction du pourcentage de fibres et du rapport L/d. Le (tableau (I.7)) suivant montre ses résultats :

Tableau (I.7):la résistance dynamique en fonction du pourcentage de fibres

Par Krenchel H. (1974)

$V_f = 0$	$\sigma_c = 2.9 \text{ KNm/mm}^2$	
$V_f = 2\%$	$\sigma_c = 20 \text{ KNm/mm}^2$	L/d= 85
$V_f = 1\%$	$\sigma_c = 30 \text{ KNm/mm}^2$	L/d=170

(Parimi S. et J. Rao J. 1974) proposent de calculer la résistance aux chocs en additionnant la résistance de la matrice et l'apport des fibres par la formule :

$$T_F = \left(\frac{L}{E}\right) \cdot V_F \left(\frac{L}{d}\right)^2 \quad \text{Avec} \quad T_C = T_m + T_f \quad (\text{I.12})$$

(Kaxamura N. 1984) a montré qu'en flexion dynamique, le mortier sans fibres n'a aucune résistance après la limite élastique, ce qui n'est pas le cas pour le béton de fibres. Au-delà de cette limite, il a montré que la flèche augmente alors que la résistance reste constante, et elle augmente quand le pourcentage de fibres augmente Tableau (I.8)

Tableau (I.8): La résistance à la flexion et aux chocs en fonction du pourcentage de fibres (Kaxamura .1984)

Matériau	Résistance à la flexion MN/m ²	Résistance aux chocs MN/m ²
Ciment en pâte pure	8	1.7
Ciment+ 1% de fibres polypropylène l=51 mm	5.9	18.6
Ciment+ 5% de fibres verres l=32 mm	41.5	16.7
Ciment+ 1% de fibres polypropylène +5% de fibres de verres	33.4	35.4

I.3.6.2 Autres propriétés du béton de fibres :

a) Retrait :

Le durcissement du béton dans l'air s'accompagne d'une variation de son volume apparent : le retrait dont les causes ont fait l'objet de nombreuses hypothèses et théories et dont les conséquences sont importantes pour la fissuration. Si le retrait est gêné, ce qui est le cas courant, le béton est mis en traction et la fissuration se produit lorsque la résistance du béton est insuffisante.

Le retrait est un phénomène complexe d'équilibre hygrométrique, qui dépend, non seulement des facteurs internes tels que la nature et le dosage du ciment, la compacité et la granulométrie du mortier ou du béton, mais aussi de facteurs extérieurs, tel que hygrométries ambiants. Si l'atmosphère est sèche, il y a évaporation en surface : le retrait augmente. Si l'atmosphère devient humide, de la vapeur se condense dans les capillaires : le retrait diminue.

En règle générale, le retrait du béton, avec ajout de fibre, est plus faible que celui du béton témoin sans fibres.

Des essais sur des bétons de fibres de fonte par exemple, que le premier retrait d'hydratation, dû à la prise et au début du durcissement du béton les premières heures qui suivent le gâchage, ainsi que le retrait de dessiccation après durcissement du béton, sont inférieurs à ceux du béton témoin, sans fibres, de même composition.

Cette diminution du retrait, en présence de fibres, est d'autant plus remarquable que le départ d'eau du béton est accéléré par la présence de fibres.

Ce phénomène peut être expliqué par le fait que la présence de fibres dispersées augmente la grosseur des pores dans le matériau ainsi que leur volume, en diminuant ainsi l'intensité des étreintes capillaires, tout en facilitant l'évaporation de l'eau libre.

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

b) Comportement Au Fluage :

Contrairement au mortier et béton conventionnel, les éprouvettes renforcées de fibres sont moins sensibles aux phénomènes de fluage en compression par rapport à la traction. P.N .Swamy a mis ceci en évidence en étudiant le comportement au fluage d'éprouvettes en béton soumises à une sollicitation de flexion. La (figure (I.28) illustre ce constat :

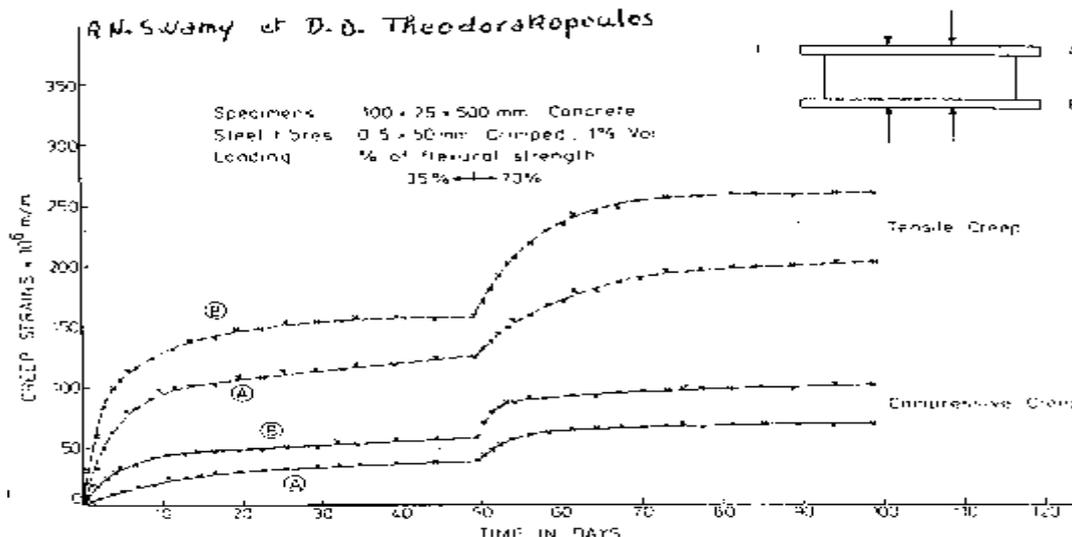


Figure (I.28): Comportement au fluage d'éprouvettes de béton de fibres soumises à une sollicitation de flexion par Swamy .P.N et Theodropoulos

I.3.7 Les avantages du béton de fibres par domaines d'applications :

On peut distinguer deux modes d'utilisation des fibres :

- Le béton renforcé de fibres seules
- Le béton renforcé avec des armatures traditionnelles dans lequel on introduit des fibres (application structurale des bétons de fibre)

Dans le premier cas on utilise les propriétés des bétons de fibre, qui seront liées au type de matrice utilisée, à celui des fibres, et à la méthode de mise en œuvre retenue.

- Utilisation des propriétés de flexion, pour réaliser des coques minces.
- Amélioration de la tenue des pièces au jeune âge.
- Modification des variations dimensionnelles, lutte contre les fissurations.

Dans le cas des applications structurales soumises à la flexion :

- On diminue de 40% l'ouverture des fissures.
- Augmentation de la rigidité après fissuration.

- Peu d'augmentation de la résistance ultime.
- Augmentation de la résistance au cisaillement.

Dans le cas de structure à la compression :

- Amélioration de la charge ultime.
- Pas de rupture catastrophique.

Dans le cas des structures soumises à des sollicitations combinées :

- Amélioration de la résistance et de la rigidité obtenues sous sollicitations simples mais qu'on ne retrouve pas forcément dans le cas du comportement des structures sous sollicitations combinées.

Dans le cas de portique :

- Augmentation de la rigidité d'ensemble de 25%.
- Augmentation de 100% de la capacité de dissipation d'énergie.
- Meilleure résistance aux déterminations face aux chargements cycliques.
- Modification des modes de rupture : cisaillement, flexion.
- Pour des valeurs de rigidité identiques les phénomènes de fissuration sont moins importants.
- La résistance à la destruction locale est meilleure dans le cas de bétons de fibre qu'avec le béton seul.

Dans le cas de sollicitation de type choc :

- Par rapport au béton : la loi de comportement du matériau est fortement modifiée, l'énergie absorbée est plus importante, la durée de choc est augmentée, et les modes de rupture sont différents (localisation, flexion- cisaillement- poinçonnement).

I.4 Conclusion:

En résumé, nous abordons, à travers la bibliographie, d'abord des problèmes liés à l'élaboration du matériau. Nous précisons que:

- Sous l'appellation "Béton de fibres" il existe une grande famille de matériaux très différents.
- D'un point de vue générale et simple, le béton de fibres est constitué en trois phases:
 - la matrice cimentaire.
 - Les fibres.
 - La zone de transition (interface) fibres- matrice.
- Le rôle des fibres dans la matrice cimentaire sur les différentes phases de comportement du matériau est fonction de différents paramètres.
- La liaison fibre- matrice est souvent une zone de faiblesse, difficilement caractérisable mécaniquement: de plus une bonne adhésion fibre- matrice ou une bonne résistance au glissement n'apporte pas les mêmes propriétés au composite.
- Il convient de compléter notre bibliographie centrée sur les propriétés mécanique de béton de fibres en notant l'importance des opérations et des conditions de mise en oeuvre qui conditionnent la structuration du matériau, pouvant créer une anisotropie de comportement (Debicki G. 1988)
- Les fibres limitent les phénomènes de propagation rapide et instable de la rupture du béton. Elles modifient les cheminements des fissures dans les structures.
- La ténacité des éprouvettes est nettement augmentée par la présence des fibres. Elle est caractérisée principalement par des mesures énergiquement globales de l'élément de structure que constitue l'éprouvette.
- Les caractéristiques des fibres et de la matrice jouent un rôle important sur la réponse mécanique du matériau.
- On remarque que le béton de fibres est très utile et son application est très large surtout dans le cas de sollicitation dynamiques