

CHAPITRE -1-

LE BETON DE FIBRES

1.1 Introduction

Les matériaux composites sont reconnus comme étant la combinaison de deux ou plusieurs corps de nature et de composition différentes, et qui, contrairement aux composés chimiques, possèdent des zones identifiables à chacun de ces corps. Ainsi, les matériaux constituants ne sont qu'entremêlés laissant voir une interface ou encore une zone de transition.

Par ses nombreuses qualités, le béton se prête à de multiples conceptions. Non seulement il peut être moulé dans des formes les plus diverses, mais il a une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, il est également peu combustible et peu toxique.

Deux caractéristiques ont néanmoins limité son utilisation, il est fragile et résiste mal à la traction. Cependant, la récente mise au point de produits composites, renforcés de fibres dans les secteurs de l'aérospatiale et des plastiques, a offert la possibilité de pallier à ces lacunes.

Ce digest décrit les propriétés générales et l'utilisation en construction du béton renforcé de fibres. La promesse d'éléments plus minces, plus résistants, plus légers et moins sujets à la fissuration par la simple addition d'une petite quantité de fibres rend cette innovation très intéressante.

Pour ce qui est des matériaux composites, ils sont constitués d'un dort fibreux protégé et supporté par matrice. Ils peuvent supporter de plus grandes contraintes que leurs matériaux constitutifs. puisque la matrice et les fibres interagissent, redistribuant ainsi les contraintes de la charge externe; on parle alors de synergie. La performance des bétons renforce dépend des matériaux constituants, de l'orientation, de la longueur, de la forme, du pourcentage et de la composition des fibres, des propriété mécanique de la matrice, de l'interaction fibre-matrice et de l'utilisation prévue

1.2 Le béton de fibres

Le béton avec fibre est un béton conventionnel auquel on a ajouté des fibres durant le malaxage. Son nom: la micro-fibre.

Les microfibrilles peuvent être utilisées quand on souhaite réduire la fissuration et améliorer la durabilité. Et elles conviennent particulièrement bien aux dalles sur le sol, dalles surélevées, pavages, piscines, trottoirs, béton projet etc...

Comme armature secondaire utilisée pour assurer le contrôle de la fissuration, elle constitue une solution idéale lorsqu'elle est combinée au treillis métallique soudé ou ferraillement en acier. Cette fibre n'est pas recommandée pour remplacer l'armature exigée par les codes et les normes du bâtiment.

Les propriétés de cette fibre sont étonnantes. En effet, sa force majeure est sa capacité à diminuer le retrait plastique et les fissures d'environ 40% et plus.

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, les fibres 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, et la teneur en volume de fibre.

1.3 Historique du béton de fibres

Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. En effet les pharaons ont pensé à l'idée des pailles pour renforcer la brique de boue d'après Exode 5:6 comme il est le cas Finlandais utilisant pour la 1^{ère} fois, les fibres d'amiante dans le renforcement des poteries en argile, il y'a de cela 5000 années. D'autres sources ANTOINE, E.N - Mars 1985 et ACI COMMITTEE 554 Mars-Avril 1984 ont indiqué que l'usage de cette technique par le biais de pailles afin de renforcer les briques, tandis que les poils des animaux et les fibres pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX^e siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone.

En 1910, une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J.PORTER qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction.

Par la suite 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. Un deuxième brevet Américain sur ce sujet a été pris par WEAKLY.

En 1912, qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec l'intermédiaire d'un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le 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 usinée (par tournage) comme une masse d'acier.

Quelques années après, en 1938, un autre brevet a été établi par N. ZITEVIC en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer approximativement avec 100 mm de long et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très semblables aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu 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 de différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres d'acier dans le béton pour améliorer sa performance. Mais on note ici que celui de G.CONSTANTINESCO, en 1943 en Angleterre et en 1954 en U.S.A, mérite une attention particulière.

A partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres d'acier. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres d'acier augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles. Le premier article dans ce concept peut-être attribué à LANKARD et SHEETS. Dans cet article, ils ont

confirmé que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance.

1.4. Les fibres

Les fibres sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle.

Généralement les fibres sont aussi utilisées pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, et la fibre de grande longueur ou filament continu.

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur origine (naturelles, artificielles et synthétiques), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension (macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour des applications, il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et la mode de performance du composite.

1.5. Les types des fibres

On retrouve sur le marché plusieurs types de fibres, elles peuvent être classées par familles, un choix approprié du type de fibre à utiliser est essentiel. Chaque type de fibre possède des caractéristiques particulières qui les rendent apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre.

Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants:

- Densité,
- Résistance tension et en compression,
- Résistance aux impacts et à la fatigue,
- Module d'élasticité,
- Conductivités thermique et électrique,
- Stabilité dimensionnelle,
- Résistance aux conditions environnementales,
- Coût,

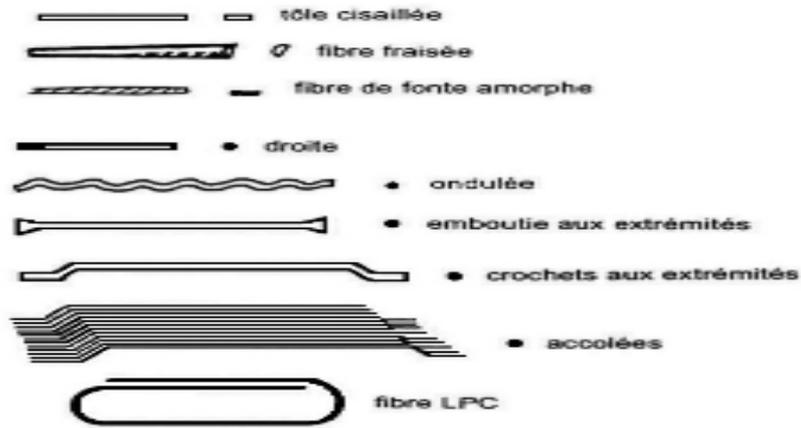


Figure 1.1 : Différentes formes de fibres

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en :

- ✓ Fibres naturelles minérales et végétales : amiante, cellulose ;
- ✓ Fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, fibres métalliques
- ✓ Fibres synthétiques organique : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide

Tableau (1.1) Les propriétés géométriques et mécaniques des différentes fibres

NATURE DE LA FIBRE	FORME DE LA FIBRE	COUPE DE LA FIBRE	LONGUEUR DES FIBRES (mm)	ÉLANCEMENT L_e/D	MASSE VOLUMIQUE (g/cm^3)	RÉSISTANCE EN TRACTION (MPa)	MODULE D'ÉLASTICITÉ (MPa)	COEFF. DE DILATATION $\mu m/m^{\circ}C$
FIBRES COURTES DISPERSÉES								
Acier	Formes irrégulières		25-35	25-55	7,8	2500	200 000	11
			10-30	-				
	Formes particulières		6-30	-				
			30-60	-				
Fonte amorphe			30-60	1200-1400	7,2	2 000	140 000	10
Amitié			5	250-350	2,6	600	100 000	10
Cellulose	Variable				0,6 à 0,8			
Polypropylène			10-30	140-1 700	0,9	500	6 000	80
Verre			10-20		2,6	2 000	80 000	9
Carbone			2-15	150-400	2,0	2 000	400 000	1
Aramide			1-10	100-600	1,2	1 800	15 000	60

1.5. 1. Les fibres de verre « E » et « AR »

Les fibres « E » sont les fibres de verre classique à forte teneur en bore elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, mais sont sensibles aux alcalis libères par l'hydratation du ciment.

Leur emploi dans le béton nécessite donc l'incorporation de polymères ou autres ajouts au mélange, au moment du gâchage qui ont pour fonction d'enrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline.

Les fibres **AR** (alcali-résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis.

Un traitement d'ensimage (dépôt d'un produit de protection) améliore encore leur tenue.

1.5. 1.1. Propriétés des fibres de verre

- ✓ Les caractéristiques mécaniques élevées de ces fibres ont déjà été mentionnées 3000 MPa pour la résistance à la traction.
- ✓ Il faut également souligner leur excellente résistance au feu (jusqu'à 800 C) ce critère ajouté a un coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confère aux bétons de fibres de verre une bonne résistance au feu.
- ✓ Les essais en cours doivent permettre d'améliorer l'évolution des caractéristiques du béton de fibres de verre lors de son vieillissement.

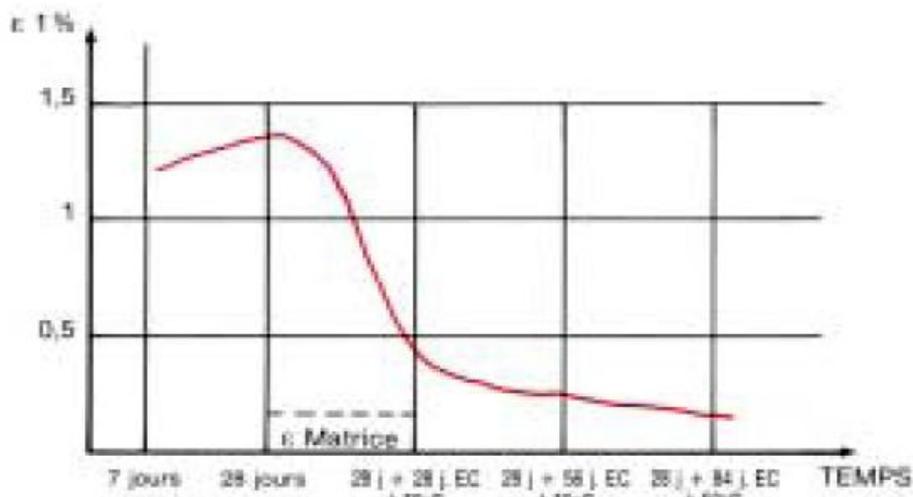


Figure 1.2. Evolution de la déformabilité d'un béton de fibres de verre au cours de son vieillissement (GRC classique)

1.5. 1.2Elaboration des bétons de fibres de verre

Ce procédé consiste à fabriquer un mortier dans un malaxeur et à y ajouter 4 à 5 % en poids de fibres de verre coupées (entre 15 à 60 mm de longueur), ce mélange peut être moulé ou pressé, mais dans tous les cas la vibration doit être de faible amplitude pour maintenir une répartition homogène des matériaux

1.5. 1.3 Projection

On utilise un pistolet pneumatique permettant de projeter simultanément le mortier déjà prémélangé et la fibre approvisionnée en bobines tresses (stratifils qui est automatiquement coupée et dispersée dans le flux de mortier.

Le débit et l'orientation du pistolet permettent à l'opérateur expérimenté de contrôler l'épaisseur et l'homogénéité de la couche de béton projeté

1.5. 1.4 Applications

Sur chantier les mortiers de fibres de verre s'utilisent pour les enduits extérieurs monocouches ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique.

En préfabrication les domaines d'application sont très vastes :

- ✓ panneaux de façade minces de 10 à 15 mm d'épaisseur ou panneaux sandwich à isolant incorporé
- ✓ éléments de bardage et éléments décoratifs
- ✓ mobilier urbain
- ✓ éléments divers : coffrets, coffrages, habillages,
- ✓ produit d'assainissements : tuyaux, caniveaux

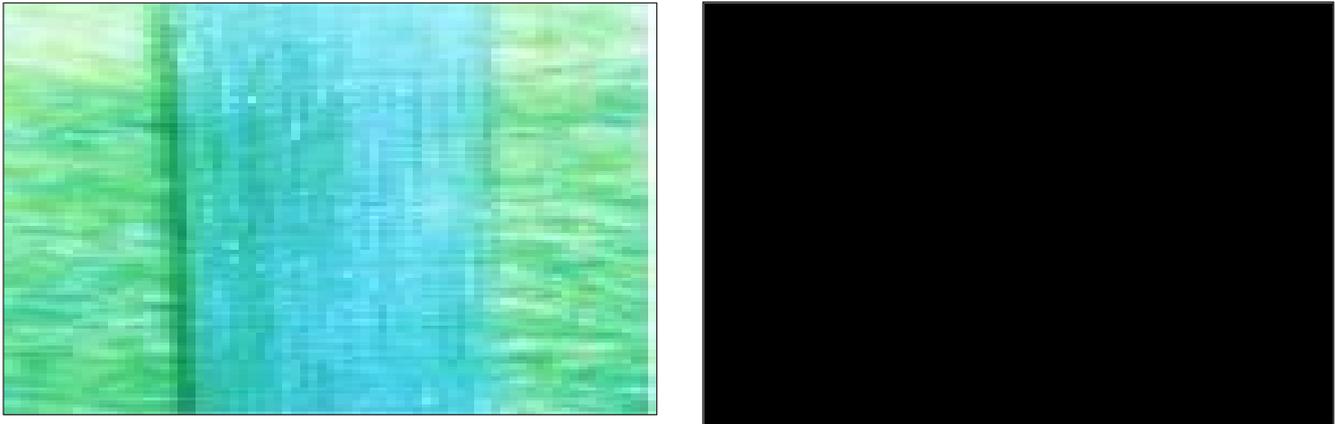


Photo.1.1 : Fibres de verre.

Les avantages et désavantages des fibres de verre peuvent être résumés comme suit (MALLICK, 1988; LABONTE, 1993; BAKIS, 1993; SCHWARTZ, 1984):

1.5. 1.5. Avantages

- ✓ Coût faible,
- ✓ Grande résistance en tension,
- ✓ Grande résistance aux produits chimiques,
- ✓ Excellent isolant,
- ✓ Grande ténacité,
- ✓ Excellente résistance aux impacts,
- ✓ Module d'élasticité faible (réduit perte de précontrainte),
- ✓ Bonne fiabilité.

1.5. 1.6. Désavantages

- ✓ Densité élevée (par rapport aux autres fibres),
- ✓ Sensibilité à l'abrasion,
- ✓ Faible module d'élasticité (grande déformation),
- ✓ Faible résistance à la fatigue,
- ✓ Grande dureté (usure des instruments de fabrication),
- ✓ Faible résistance aux charges cycliques ;
- ✓ Corrosion possible aux alcalis et aux acides hydrofluoriques,
- ✓ Vieillessement à l'humidité.

1.5. 2. Fibres d'acier

Les fibres d'acier, qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil, ont fait l'objet de plusieurs recherches. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice.

Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre. Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur diamètre, leur longueur et leurs modes d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes, ondulées, ou présenter des élargissements aux extrémités, soit en crochets pour améliorer l'accrochage dans le même but, elles peuvent présenter des aspérités, des crans surfaces.

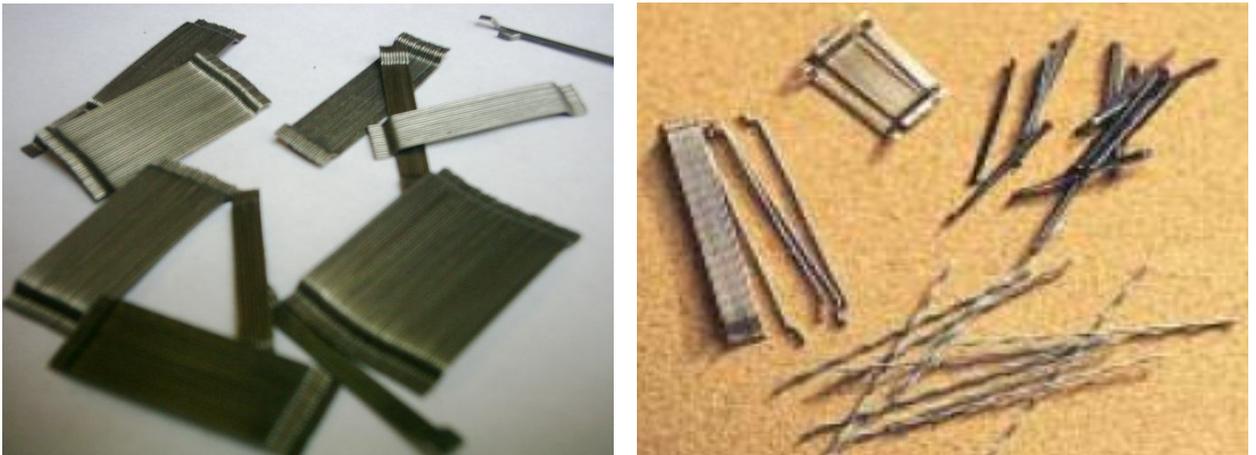


Photo.1.2 : Fibres métalliques

Les fibres métalliques notamment d'acier ont donné lieu à de nombreuses recherches pour développer leur emploi dans le béton.

A recherche de l'adhérence au béton a donné naissance à une grande variété de fibres susceptibles, par leur forme ou leur état de surface, de mieux s'ancrer dans le béton :

- ✓ fils étirés et coupés, ondulés crantés, torsadés, avec crochets
- ✓ fibres usinées à surface rugueuse

- ✓ fibre de fonderie la fibres de fonte se présente sous forme d'un mince ruban de 30 μm d'épaisseur.

Les fibres métalliques sont de types et de formes variées et présentent une très bonne compatibilité avec le béton. Les fibres sont composées d'acier au carbone, d'acier inoxydable ou d'acier galvanisé contre la corrosion. En général, la longueur des fibres varie de 25 à 60 mm et le diamètre varie de 0,5 à 1,3 mm. La fabrication des fibres métalliques s'effectue selon plusieurs méthodes en relation avec leurs formes géométriques multiples (ASTM A 820)

La résistance en traction de ces fibres varie généralement entre 1000 et 3000MPa, mais cette résistance est rarement utilisée dans le composite dû au phénomène de pull - out des fibres.

1.5. 2.1. Propriétés des fibres métalliques

Elles présentent une très bonne compatibilité avec le béton, certaines fibres sont inoxydables ou traitées contre la corrosion, en vue de certains usages particuliers

1.5. 2.2. Applications

Du fait de leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications la où on veut réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance aux chocs et tirer parti de l'amélioration de la résistance en traction pour diminuer le dimensionnement des pièces :

- ✓ dallages, parkings, pistes
- ✓ bétons projetés en galeries, tunnels, talus
- ✓ éléments préfabriqués divers : tuyaux, caniveaux, garages
- ✓ pieux de fondation

1.5. 2.3. Les bétons de fibres métalliques

Le mélange des fibres métalliques au béton doit être particulièrement soigné, certaines fibres ayant tendance à s'agglomérer, l'incorporation des fibres peut être faite soit au malaxage, soit au moment du coulage soit à la projection.

La composition du béton doit être mise au point en fonction des caractéristiques de la fibre et des emplois.

L'emploi de superplastifiant est en particulier recommandé pour compenser la diminution d'ouvrabilité provoquée par l'incorporation de fibres.

La mise en œuvre et le compactage doivent être étudiés pour le béton considéré et en fonction de sa maniabilité qui diffère généralement de celle des bétons classiques sans fibres.

Les dosages en fibres sont de l'ordre de 0.3 à 2% en volume, soit 25 à 160 Kg/m³

1.5. 3. Fibres de carbone

Le carbone est très dispendieux ce qui le rend beaucoup moins populaire que le verre moins disponible sur le marché, les fibres de carbone sont cependant reconnues comme étant les fibres les plus performantes.

1.5. 3.1. Elaboration

Les fibres de carbone sont produites par la pyrolyse de deux types de précurseur : le textile et le "pitch" (brai ou poix). Les précurseurs textiles se divisent en plusieurs branches telles que la rayonne et la polyacrylonitrile (PAN), cependant la PAN est de loin la plus commune le mode d'élaboration des fibres de carbone est relié au type de précurseur.

Les filaments passent premièrement à une cyclisation mouillée pour ensuite être étirés à température élevée permettant aux chaînes polymères d'être alignées dans la direction des filaments. Ces filaments sont ensuite chauffés à l'air (220°C) pendant environ deux heures, provoquant une oxydation, La prochaine étape consiste à carboniser les filaments en les chauffant graduellement à environ 1500°C en atmosphère inerte. Bien que les filaments contiennent à cette étape surtout du carbone augmentant considérablement leur résistance en tension, une distribution encore imparfaite de ces atomes entraîne un bas module d'élasticité des filaments (HR).

Alors que les filaments carbonisés sont subséquentiellement traités à la chaleur à environ 3000°C, leur structure devient plus ordonnée ; on assiste à une graphitisation. Les filaments ainsi transformés ont atteint un haut module d'élasticité (HM/UHM) au détriment de leur résistance en tension.

1.5. 3.2.Types de fibres

Les types de fibres de carbone sont classés selon leurs propriétés mécaniques. Ces propriétés dépendent des cycles de pyrolyse ainsi que de la nature du précurseur.

On distingue deux types de fibres divisés en quatre grandes classes de fibres.

1..5. 3.2.1.Les types I :

Sont les types hauts modules soient les classes UHM (ultra haut module) et HM (haut module),

1.5. 3.2.2.Les types II :

Sont les types hautes résistances soient les classes I THR ou VHS (Très haute résistance ou very high strength) et HR ou HS (haute résistance ou high strength).

En général, Les fibres de faible module ont une densité et un coût plus faible ainsi qu'une résistance en tension et une déformation aux ruptures plus grandes que les fibres de hauts modules.

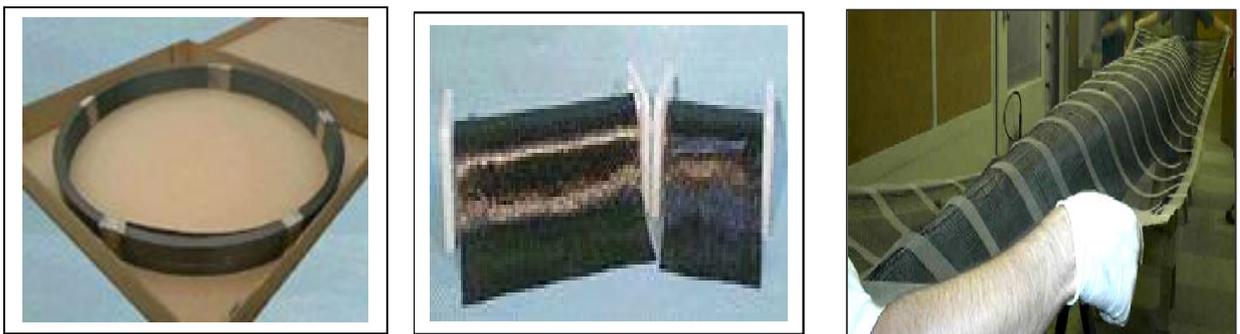


Photo1.3 : Fibres de carbone.

Les avantages et désavantages des fibres & carbone peuvent être résumés comme suit (MALLICK, 1988; LABONTE, 1993; SCHWARTZ, 1984):

1.5. 3.3. Avantages

- ✓ Grande résistance en tension et en compression,
- ✓ Excellente tenue à haute température,
- ✓ Grande résistance à la fatigue,
- ✓ Excellente rigidité,
- ✓ Bonne conductivité électrique et thermique,
- ✓ Inertie complète à la corrosion et aux produits chimiques (sauf O₂ et acides oxydants a chaud),
- ✓ Insensibilité à l'humidité et aux rayures,
- ✓ Faible coefficient de dilatation,
- ✓ Usinage facile.

1.5. 3.3. Désavantages

- ✓ Coût élevé,
- ✓ Corrosion de contact par pile galvanique avec les métaux,
- ✓ Sensibilité aux impacts et à l'abrasion,
- ✓ Faible ténacité,
- ✓ Mauvais isolant,
- ✓ Faible allongement et rayon de courbure ;
- ✓ Raideur à l'enroulement (bobinage difficile).

1.5. 4. Fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile. Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfinés des produits chimiques. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : déformabilité élevée, imputrescibilité et bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPa.

Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel), ainsi que l'élaboration de panneaux décoratifs de 33cm d'épaisseur et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux

Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité plus faible que la pâte durcie Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit à l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement, soit aux chocs mécaniques.



Photos 1.4 : fibres polypropylène.

1.5. 4. 1. Propriétés des fibres de polypropylène

Si leurs caractéristiques mécaniques ont des valeurs plus faibles que celles des fibres métalliques, il faut cependant mentionner leur insensibilité chimique, leur souplesse, qui rend aisée leur incorporation au béton et leur allongement à la rupture (15 à 20 %), qui favorise la « ductilité » du béton.

Comme la plupart des matières plastiques, les fibres de polypropylène sont peu résistantes au feu : leur température de fusion est d'environ 160 C mais leur fusion n'affecte pas la résistance du béton

1.5. 4. 2. Les bétons de fibres de polypropylène

La fabrication du béton avec fibres de polypropylène ne soulève aucune difficulté, la répartition des fibres se faisant facilement et ne nécessitant pas de précaution particulière lors de malaxage.

Les fibres de polypropylène améliorent la maniabilité du béton et sa cohésion. Ces propriétés sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (bordures, tuyaux) en même temps qu'elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou arêtes des pièces moulées ou des dallages.

Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait » ainsi que leur résistance aux chocs. Les dosages couramment pratiques sont de l'ordre de 0.05 à 0.2 en volume (0.5 à 2 Kg de fibres par m³ de béton)

1.5. 4. 3. Application

Des propriétés précédentes découlent les applications des bétons de fibres de polypropylène :

- ✓ Dallages industriels et chaussées
- ✓ Pièces préfabriquées (panneaux décoratifs)
- ✓ Sculptures
- ✓ Éléments réalisées avec coffrages glissants
- ✓ Mortiers projetés
- ✓ enduits

1. 6. Hybrides :

Les hybrides sont la combinaison de deux ou plusieurs fibres sous une même matrice, Cette procédure permet d'accroître étendue des propriétés pouvant être réalisées par les composites. Des spécifications de design peuvent ainsi être rencontrés à un coût plus économique que les composites à hautes performances ou encore les composites conventionnels.

Des associations de fibres de différentes caractéristiques commencent à être utilisées.

BANTHIA ET AL. [2004] montrent que l'association des fibres synthétiques et des fibres métalliques peut donner aux BAP des comportements plus ductiles, que dans le cas des bétons fibrés seulement avec les fibres métalliques.

KAWAMATA ET AL. [2003] ont essayé d'utiliser dans le cas des bétons autoplaçants des fibres longues en association avec les fibres courtes. Selon ces auteurs, les fibres courtes empêchent la formation des petites fissures, retardant ainsi la formation des macro fissures, qui seront à leur tour reprises par les fibres les plus longues et demandent une plus grande dissipation d'énergie pour rompre. Par là la ductilité du matériau serait augmentée.

Le carbone possède une haute résistance en tension et un haut module d'élasticité mais sa résistance à l'impact est faible .Par contre, l'aramide possède une bonne résistance à l'impact mais un faible module d'élasticité comparée au carbone. Une combinaison de ces matériaux sous une même matrice permet de mettre à profit les meilleures qualités de chacune de ces fibres. Ainsi un hybride contenant 50% de carbone et 50% d'aramide démontre une résistance à la flexion trois fois supérieure à l'aramide seul (SCHMARTZ, 1984).

L'hybride le plus rencontré dans les barres d'armature est le verre-carbone. Si des propriétés mécaniques un peu plus faibles que le carbone peuvent être utilisées, un utilisateur peut grandement tirer profit du coût de celui-ci en y ajoutant du verre. Si par contre pour une utilisation donnée le verre démontre une trop grande flèche, des fibres de carbone à haut module d'élasticité peuvent être combinées au verre. Les fibres de carbone augmenteront aussi la résistance à la fatigue, la rigidité en torsion sans oublier d'ajouter son effet conducteur.

Puisque les hybrides sont renforcés par plus d'un type de fibre, une ductilité artificielle est obtenue. En tension, la rupture débute à partir des fibres possédant la plus faible capacité d'élongation et se poursuit jusqu'aux fibres les plus élastiques. En résumé, la rupture finale du matériau se produit lorsque les fibres possédant la plus grande capacité d'étirement (module d'élasticité le plus faible) se ruptures donnant ainsi une relation contrainte-déformation non- linéaire (SUGITA, 1993).

1.7. Rôles des fibres dans le béton

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent, parfois rapidement. Les fibres noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration comme il est indiqué dans la (figure.I.1.3). Les barres d'armature en acier jouent un rôle analogue, car elles agissent comme des fibres de grande longueur. Les fibres courtes et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme. Les fibres sont ajoutées à la gâchée de béton, qui contient habituellement du ciment, de l'eau et des granulats fins et grossiers.

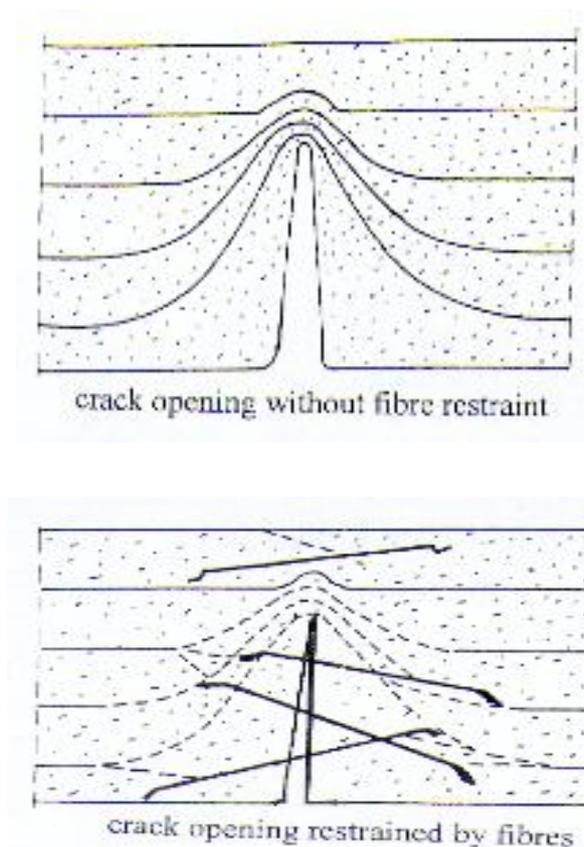


Figure.1.3. Effet de retardement de la fissuration avec fibres et béton

1.8. Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres :

Tableau (1.2) Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres

Fibre	Diamètre en μm	Densité	Allongement de rupture en %	Module d'élasticité, en GPa	Résistance en traction, en GPa
Acier	5-500	7,8	3-4	200	1-3
Verre	9-15	2,6	2-3,5	80	2-3
Polypropylène	7,5	0,9	20,0	5	0,5
Particules de mica	0,01-200	2,9	-	170	0,25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	2,3	200	3
Carbone	7,5	1,7-2,0	0,5-1,0	300-400	2-3

Si le module d'élasticité de la fibre est élevé par rapport au module d'élasticité du béton, les fibres reprennent une part des charges, augmentant ainsi la résistance à la traction du matériau. L'augmentation du rapport longueur/diamètre des fibres accroît habituellement la résistance à la flexion et la ténacité du béton. Les valeurs de ce rapport sont généralement comprises entre 100 et 200, car des fibres de trop grande longueur ont tendance à former des boules dans le mélange, créant ainsi des problèmes d'ouvrabilité.

En général, les fibres réduisent le fluage, c'est-à-dire la déformation du béton avec le temps sous une contrainte constante. Par exemple, le fluage en traction d'un béton renforcé de fibres d'acier peut représenter seulement 50 à 60 % de celui d'un béton ordinaire et le fluage en compression, 10 à 20%.

Le retrait du béton, qui est provoqué par la perte de l'eau pendant le séchage, est en partie empêché par les fibres. Le retrait du béton peut être diminué de 35 % ou moins si l'on ajoute 1,5 % de fibres par volume.

D'autres propriétés du béton comme la résistance en compression et le module d'élasticité ne figurent pas dans les tableaux car elles sont nettement moins touchées par la présence des fibres.

1.9. Fabrication de béton de fibres

Avant de mélanger le béton, la longueur des fibres, leur quantité et la composition du mélange sont choisies pour éviter la formation de boules de fibres. Dans les mélanges renforcés, le mortier occupe d'habitude environ 70 % du volume, contre 50 % pour les mélanges de béton courants, non renforcés de fibres.

Les panneaux en ciment renforcé de fibres ne contiennent pas de granulats grossiers. Ces produits sont généralement réalisés en projetant simultanément le mortier et les fibres hachées. Un mortier ayant un rapport eau/ciment élevé facilite la projection. Il existe d'autres méthodes de fabrication, dont le coulage, moins universel que la projection, et le moulage sous pression, où le rapport eau/ciment moins élevé permet d'obtenir un produit plus résistant.

Des adjuvants chimiques sont ajoutés au mélange de béton renforcé de fibres, notamment pour augmenter son ouvrabilité. En Amérique du Nord, les entraîneurs d'air et les réducteurs d'eau sont ordinairement additionnés aux mélanges qui contiennent une proportion de 50 % ou plus de granulats très fins.

Les superplastifiants incorporés à des bétons renforcés de fibres peuvent abaisser le rapport eau/ciment et améliorer la résistance, la stabilité volumétrique et l'ouvrabilité des mélanges frais.

1.10. Diverses applications de béton de fibre :

Les nombreuses innovations de la technologie des bétons renforcés de fibres ont permis d'étendre considérablement la gamme des applications (**Tableau 1.3**).

Tableau 1.3. Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment*

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince de béton, enduit pour blocs de béton.
Acier	Éléments de toiture en béton cellulaire, revêtements de chaussée, tabliers de pont, produits réfractaires, tuyaux en béton, pistes d'atterrissage, réservoirs sous pression, structures résistantes aux explosions, revêtements de tunnel, coques de bateaux.
Polypropylène, nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, éléments flottants de débarcadères et amarres pour les marinas, matériaux de réparation des routes, couches de lest pour les tuyaux sous-marins.
Amiante	Voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et de protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toiture plates et ondulées, revêtements de mur.
Carbone	Éléments ondulés pour la construction des planchers, structures de membrane simple ou double courbure, coques de bateaux, planches d'échafaudage.
Particules de mica	Remplacent partiellement l'amiante dans les panneaux à base de ciment, les tuyaux en béton ; matériaux de réparation.
*La combinaison de plusieurs types de fibres peut être utilisée pour des besoins particuliers.	

1.11. Propriétés du matériau composite (béton de fibre) :

Les fibres peuvent améliorer la ténacité, la résistance en flexion ou les deux, et sont choisies en fonction de leur disponibilité, de leur coût et de leurs propriétés. Par exemple, les fibres de polypropylène augmentent nettement la ténacité du béton mais ont peu d'effet sur sa résistance en traction. Par contre, les mélanges de fibres de polypropylène et de verre donnent un béton de grande résistance en flexion et très tenace (voir les tableaux 3 et 4).

Tableau 1.4. Ténacité des matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés

Matériau composite	Volume de fibres en pourcentage (%)	Ténacité p/r aux produits non renforcés*
BÉTON		
acier	0,5	2,5-4,0
acier	1,0	4,0-5,5
acier	1,5	10-25
verre	1,0	1,7-2,0
polypropylène	0,5	1,5-2,0
polypropylène	1,0	2,0-3,5
polypropylène	1,5	3,5-15,0
nylon	1,0	1,5-1,7
MORTIER		
acier	1,3	15,0
amiante	3-10	1,0-1,5
PÂTE DE CIMENT		
verre	4,5	2,0-3,0
particules de mica	2,0-3,0	3,0-3,5
* Ces valeurs sont des valeurs types seulement et peuvent varier selon la méthode d'essai, le procédé ou le mélange.		

Tableau 1.5. Résistance en flexion de matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés

Matériau composite	Volume de fibres (en %)	Résistance en flexion p/r aux produits non renforcés*
BÉTON		
acier	1-2	2,0
verre	1-2	2,5-3,5
MORTIER		
acier	1,3	1,5-1,7
verre	2	1,4-2,3
amiante	3-10	2,0-4,0
PÂTE DE CIMENT		
verre	4,5	1,7-2,0
particules de mica	2-4	2-2,5
polypropylène	1-2	1,0
*Ces valeurs sont des valeurs types seulement et peuvent varier selon la méthode d'essai, le procédé et le mélange.		

1.12. Effet des fibres sur la maniabilité et la résistance du BAP

1.12.1. Effet sur la maniabilité

Dès son apparition, c'est peut être la maniabilité des BAP qui attire l'attention. Cette propriété qui assure la fabrication et la mise en œuvre des ouvrages peut aboutir toujours à une finition de qualité acceptable.

L'incorporation des fibres que ce soit de polypropylènes ou métalliques, peut apporter quelques modifications sur les comportements rhéologiques ou mécaniques des BAP.

[Y .ROUSSEL] a montré que l'apport en fibres diminue la précision de l'indice d'ouvrabilité qu'apporte l'essai d'étalement, et la maniabilité semble devenir moins bonne lorsque le volume de fibres dépasse le 1% du volume de mélange [CANADA 2000].

D'autres chercheurs ont montré que l'association des fibres synthétiques et des fibres métalliques peut donner aux BAP des comportements plus ductiles que dans le cas des bétons fibrés seulement avec des fibres métalliques [2006].

[HOCINE OUCEIF ET COLL.] ont montré aussi, que pour une même composition de béton, une teneur de 0.5% de fibres courtes (métalliques) a la même efficacité que l'utilisation de plus de 1% de fibres plus longues (synthétiques). Ils ajoutent également, que pour un BAP bi fibré de différentes dimensions et propriétés (fibres métalliques de fonte amorphe adhérente de 20mm et 30mm, et fibres synthétiques glissantes de 40mm et 50mm), ils ont pu formuler des BAP répondants aux critères rhéologique fixés [2006].

1.12.2. Effet sur la résistance

Les fibres ont habituellement un faible effet sur la résistance à la compression. Leur effet le plus significatif a trait au comportement en flexion (traction), ainsi dans plusieurs applications, les bétons renforcés de fibres sont utilisés dans des endroits où ils sont soumis à de tels efforts [Y.ROUSSEL .2000].

Les fibres métalliques utilisées essentiellement en dallages industriels, dallages de parking, les pistes, les pieux, les déversoirs de barrage, les silos [G.DREUX ET J.FESTA en 1996] , présentent une bonne résistance à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité et une réduction du nombre de joints de retrait [BETONS VICAT].

Egalement, les fibres polypropylènes n'assurent pas un renforcement structural du béton, elles s'opposent aux effets du retrait plastique et peuvent se substituer pour cette fonction au treillis antifissuration [SIKAFIBRES ANTIFISSURES].

1. 13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons résumé, l'état de connaissance sur le historique et le comportement mécanique des bétons de fibres, les types, les avantages et désavantages de chaque type de fibres aussi que influence de la présence des fibres dans les béton renforcés par des fibres.

Quelques recherches sur le béton auto plaçant avec fibres et leurs effets sur la maniabilité et la résistance.