

Chapitre V : Les polymères composites

5.1. Définition

Un matériau composite est un matériau réunissant au moins deux composants. Ces matériaux ne sont pas miscibles mais présentent une forte capacité d'adhésion. L'association de ces éléments conduit à un matériau dont les propriétés sont supérieures à la simple addition des propriétés des éléments pris séparément (synergie).

1) Les structures composites : dans ce cas, les éléments associés sont de taille macroscopique. Les structures sont généralement de type sandwich. Un des premiers composites développés est le bois contreplaqué. Une structure déjà ancienne mais toujours très utilisée, en particulier en aéronautique, est la structure en nid d'abeilles.

Une structure composite plus récente est la structure « Glare » (Glass-Reinforced). Ce matériau est constitué de feuilles d'aluminium séparées par des couches en fibres de verre continues orientées noyées dans une matrice époxyde. La résine époxyde servant de lien à la fois pour les fibres de verre et les feuilles d'aluminium. Les composites présente les avantages suivantes :

- ✓ Grande résistance à la fatigue ;
- ✓ faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur ;
- ✓ insensibles aux produits chimiques comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole ;
- ✓ bonne résistance à la corrosion ;
- ✓ vitesse de fissuration faible et constante ;
- ✓ meilleure répartition des contraintes ;
- ✓ meilleure résistance au niveau des points d'assemblage ;
- ✓ meilleure résistance aux impacts ;
- ✓ poids moins élevé que des panneaux métalliques de résistance mécanique équivalente

2) La diversité des matériaux composites : les matériaux composites sont constitués d'une phase continue (la matrice) et de renfort (fibres ou particules). La matrice assure la cohésion de la structure et la transmission des efforts mécaniques vers le renfort. Selon la nature des composants, on classe généralement les composites en trois grandes familles selon la nature de la matrice :

a) *les composites à matrice organique* (thermoplastique ou thermodurcissable). À l'échelle industrielle, il s'agit des volumes les plus importants.

b) *les composites à matrice céramique*. Ces composites, difficiles à élaborer sont réservés

aux applications de hautes performances, demandant des résistances aux hautes températures, comme le domaine spatial, aéronautique, nucléaire et militaire.

c) *les composites à matrice métallique.*

5.2. Composites à matrice polymère *(Polymer matrix composites)*

Ces composites sont les plus répandus. Selon la nature des matrices et renforts il s'agit de composites de grande diffusion ou des composites à hautes et très hautes performances.

Les matrices peuvent être des polymères thermoplastiques (polypropylène, polyéthylène, polyamide,...) ou thermodurcissables (polyesters insaturés et résines époxydes).

Les renforts sont des fibres continues ou de longueur variable. L'efficacité des renforts à fibres n'est obtenue que si la longueur (l) des fibres atteint une valeur minimale critique l_c . Les fibres de renfort sont de trois types : fibres de verre, fibres de polymère (voir fibres de polymères) comme le kevlar ou encore des fibres de carbone (voir « composites de fibres de carbone à matrice polymère »). Outre les renforts à fibres, les matrices polymères peuvent contenir des charges plus ou moins renforçantes.

5.3. Composites à matrices céramiques *(Ceramic matrix composites)*

La matrice peut être constituée de carbone, de verre ou de carbures. Les matrices peuvent être déposées par voie vapeur ou formées à partir de pyrolyse de résines (exemples phénoliques) dans le cas de matrice carbone. Voir « composites carbone-carbone » et « composites de fibres de carbone à matrices verre, métal ou céramique ».

5.4. Composites à matrices métalliques *(Metal matrix composites)*

La matrice métallique est constituée par exemple d'aluminium, de magnésium, de zinc ou de nickel. Le renfort est soit de nature métallique (fils d'acier) ou céramique (carbone, alumine, poudre de diamant).

5.5. Composites de fibres de carbone à matrice polymère *(Carbon fibers - polymers Composites)*

Les composites (fibres de carbone)/ (résines) constituent des composites à très hautes performances. Leur résistance à la rupture, leur rigidité, leur résistance à la fatigue et à la corrosion sont plusieurs fois supérieures à celles des aciers et des alliages légers, tandis que, simultanément, leur densité est deux à cinq fois plus faible. De plus, leur coefficient de dilatation est pratiquement négligeable et très inférieur à celui des métaux.

Les résines les plus fréquemment utilisées dans la confection de ces composites sont des résines époxydes, dès lors que leurs températures d'utilisation ne dépassent pas 200 °C. Ces résines présentent plusieurs avantages

- Importante commodité de mise en œuvre
- Excellente adhérence aux fibres de carbone;
- Faible retrait au cours du durcissement;
- Très bonne résistance aux agents et/ou conditions extérieurs.

5.6. Méthodes de mise en œuvre des polymères composites

Il y a trois principaux types de processus de fabrication pour les FRPs : la pultrusion, le tissage et le filament (enroulement filamentaire). Les barres d'armature en matériaux composites sont produites en général à l'aide du procédé de pultrusion. Le procédé de transformation en continu, dit pultrusion, permet de fabriquer par une opération unique et continue le matériau composite et le produit fini sous forme de profilés longs. (Figure I). Les cadences de production sont de l'ordre du un mètre de profilé par minute. Une schématisation de processus de fabrication des renforts composite est montrée dans la Figure I.



Figure I : Procédé de pultrusion

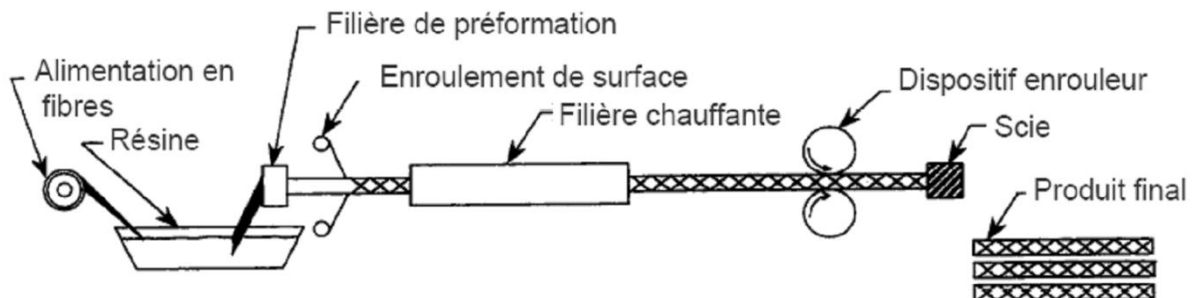


Figure II : Schématisation du procédé de fabrication par pultrusion

La matrice a quant à elle pour fonction essentielle de conserver la disposition géométrique du renfort. Elle participe également à la répartition des contraintes au sein du composite et protège les fibres des agressions chimiques. Un autre avantage considérable de ces matériaux

est la grande souplesse d'utilisation, puisque les taux de fibres, leur structure, leur orientation sont ajustables.

5.7. Propriétés mécaniques

Les fibres reprennent principalement des efforts dans le sens des fibres. La matrice, quant à elle, transfère les contraintes aux fibres, et les protège. Selon un bulletin de la Fédération Internationale de Béton (FIB, 2001), les propriétés mécaniques de matériaux composites peuvent être approchées simplement comme ci-dessous:

$$E_f = E_{fib}V_{fib} + E_mV_m \quad (\text{Équation -1})$$

$$f_f \approx f_{fib}V_{fib} + f_mV_m \quad (\text{Équation -2})$$

Où E_f est le module d'Young du matériau composite dans la direction des fibres, E_{fib} le module d'Young des fibres, E_m le module d'Young de la matrice, V_{fib} la fraction volumique de fibres, V_m la fraction volumique de la matrice, f_f la résistance en traction du matériau composite, f_{fib} la résistance en traction des fibres, f_m la résistance en traction de la matrice, avec $V_m + V_{fib} = 1$.

La fraction volumique V_{fib} typique est de l'ordre de 0,6 – 0,65. La résistance et le module d'Young des fibres sont plus importants par rapport à ceux de la matrice, le comportement mécanique des matériaux composites est donc piloté par les propriétés mécaniques des fibres et la quantité de fibres (fraction volumique).

5.8. Utilisation des matériaux composite dans le génie civil

5.8.1. Renforcement par composites collés (plats et tissus)

Les progrès réalisés ces dernières années dans la formulation des produits organiques de synthèse permettent de remplacer le renforcement à l'aide de tôles d'acier par le renforcement en utilisant les matériaux composites. Deux méthodes pour la confection des composites en fibres de carbone ont été employées. La première, qui est le plus généralement employé, consiste en l'application in situ de la résine sur une toile tissée (wet lay-up method) (Figure III.a) ou deux feuillets unidirectionnels (Figure III.b). La deuxième méthode est la préfabrication du composite dans des formes variées (Figure III.c). La première méthode est plus souple et permet la réparation sur les surfaces incurvées et déformées et même autour des coins, alors que la préfabrication permet un meilleur contrôle de qualité.

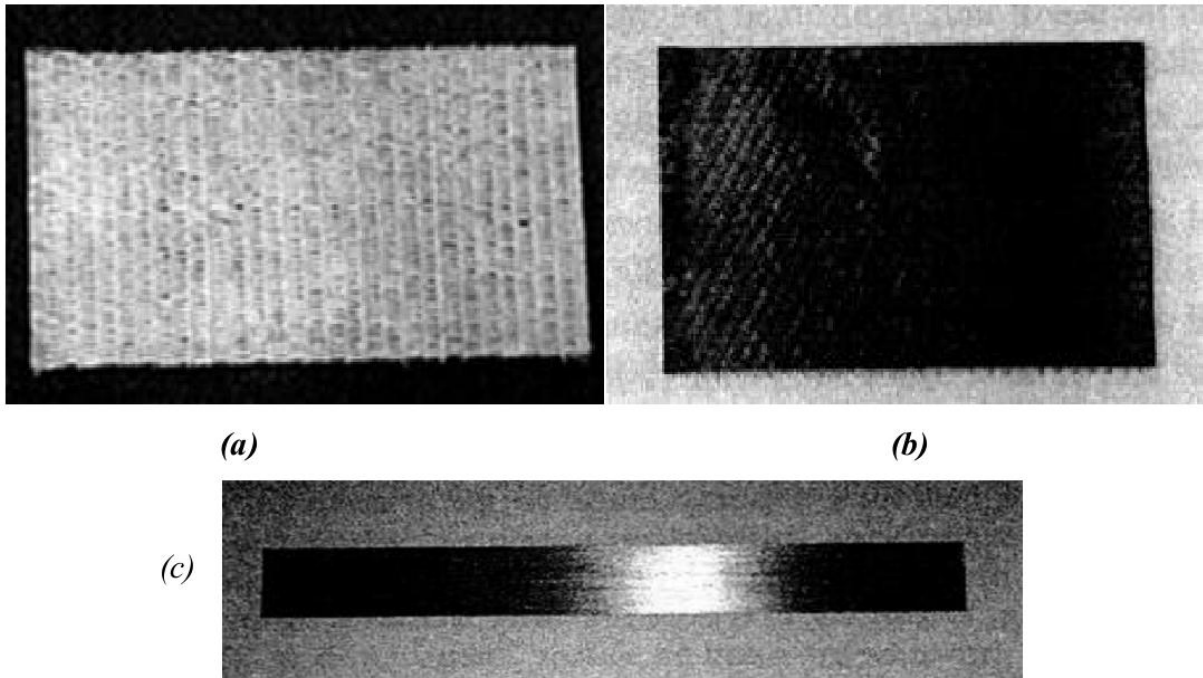


Figure III : Différents types de composite : (a) tissu de fibre de verre ;
 (b) deux feuillets de fibre de carbone ; (c) plat préfabriqué en fibre de carbone.

La plupart des renforts composites utilisés dans le génie civil sont des composites carbone - époxyde ou verre - époxyde associant des fibres longues (carbone ou verre) à une matrice époxydique pour constituer un polymère renforcé de fibres (FRP - fiber reinforced polymer). Les avantages de l'utilisation de ces renforts sont nombreux. On peut citer par exemple les performances de tenue à la corrosion des polymères, leur facilité de pose et de formage sur les structures à réhabiliter ainsi que les propriétés mécaniques spécifiques des fibres qui leur sont associées, leur grande résistance à la fatigue, leur orientation contrôlée. Dans les années 90, les études sur l'utilisation de matériaux composites pour la réhabilitation se sont multipliées pour mieux comprendre les problèmes posés par cette nouvelle technique (Nanni et al, 1995, Arduin et al, 1997, Assih, 1998, Ferrier, 1999, Avril, 2002, Sierra Ruiz, 2002, etc.).

- 1 - fibres et polymère
- 2 - Interface
- 3 - support en béton
- 4 - couche de protection

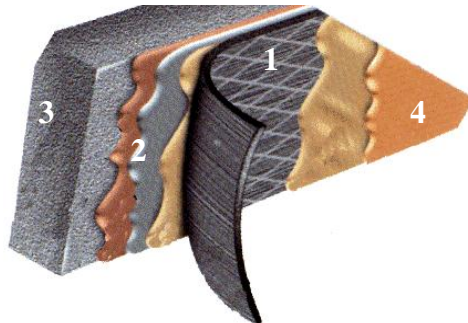


Figure III : Conception du système multicouche, (AFGC, 2003)

Le principe de la réparation par FRP est décrit dans la Figure III. Ce procédé constructif comprend différents éléments :

- Le composite : association d'un tissu technique (en général verre, carbone ou aramide) avec une matrice (polymère thermodurcissable : résine époxy, résine vinylester).
- L'interface est constituée soit de la colle soit de la résine d'imprégnation du tissu.
- Le substrat correspondant à la couche de béton qui peut être traitée en surface (nettoyage, sablage, couche d'imprégnation...).

Les principales applications de ce mode de renforcement portent sur le renforcement des poutres en béton vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant et sur le renforcement ou le confinement de poteaux en béton armé (voir Figure IV).

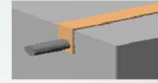


Figure IV : Principales applications industrielles de renforts composites selon la technique EBR (External Bonded Reinforcements) poteau (confinement), renfort de poutre en flexion, et à l'effort tranchant (doc SIKA)

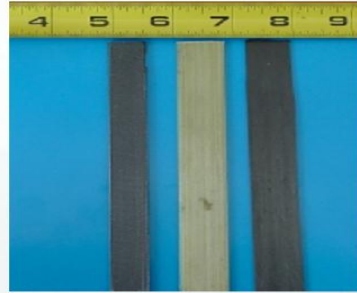
5.8.2. Insertion de renforts composites dans des engravures préparées sur la surface de béton-méthode NSM

La méthode consiste à sceller des joncs ou des plats de polymères renforcés en fibres de carbone ou de verre (CFRP et GFRP) (voir FigureV) dans des engravures déjà préparées sur la surface de la poutre à renforcer. Par opposition à la technique de renforcement externe EBR, l'usage de la méthode NSM protège mieux le renforcement des sollicitations externes, telles que les chocs de véhicules, tout en assurant un bon ancrage des renforcements. Comparativement aux techniques traditionnelles, tôles collées et EBR, L'utilisation de la technique NSM minimise d'une manière significative les problèmes de décollement préliminaire aux extrémités. Dans certain cas, il est plus facile de travailler en utilisant la technique NSM que d'utiliser celle de la méthode traditionnelle EBR. Un autre avantage est lié au fait que la surface du béton n'est pas complètement couverte, ce qui prévient le piégeage de l'humidité dans la structure et réduit les risques d'altération dus aux cycles gel- dégel.

Near Surface Mounted FRP Bars/Strips



**GFRP
Bars**



**GFRP & CFRP
Strips**



**CFRP
Bars**

Figure V : Différents types de renforts utilisés pour la méthode NSM

5.9. Conclusion

Le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres (PRF) a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement à base d'acier. Les fibres de carbone ou de verre présentent en effet divers avantages : faible densité, absence de corrosion, excellentes propriétés mécaniques, très bonne tenue à la fatigue et facilité de manipulation. Un des grands avantages de ce procédé de réparation est la possibilité de renforcer la structure sans interrompre l'exploitation de l'ouvrage. On peut tout de même noter un coût de fabrication de matériaux composites encore élevé. Mais cette contrainte économique est moindre par rapport à la reconstruction des ouvrages et à la valeur culturelle des patrimoines historiques.