

Composites à fibres de carbone dans le génie civil

par **Jean LUYCKX**

*Ingénieur du Conservatoire national des arts et métiers (chimie industrielle)
Détaché par Elf-Atochem à la direction technique de la société Soficar en charge
des qualifications aéronautiques et de développement*

1. Les matériaux composites	C 5 440 - 2
2. Les fibres de carbone.....	— 2
2.1 Propriétés des fibres de carbone	— 2
2.2 Comparaison avec les autres fibres et les aciers.....	— 2
3. Semi-produits de renforcement : obtention et utilisations.....	— 3
3.1 Fibres sèches	— 3
3.2 Tissus secs	— 3
3.3 Tissus préimprégnés	— 3
3.4 Produits pultrudés.....	— 3
4. Les composites dans la construction	— 4
4.1 Principales raisons de leur implantation	— 4
4.2 Intérêt des fibres de carbone dans le bâtiment et les travaux publics	— 4
5. Utilisation des fibres de carbone dans la réhabilitation	— 4
5.1 Remplacement des tôles métalliques par des fibres de carbone.....	— 4
5.2 Pose des renforcements : mode opératoire	— 5
6. Utilisations industrielles des composites à base de fibres de carbone	— 5
6.1 Au Japon	— 5
6.2 En Amérique du Nord	— 7
6.3 En Europe.....	— 8
7. Conclusion	— 10
Pour en savoir plus	Doc. C 5 440

Cet article est axé sur les usages structuraux des composites à base de fibres de carbone.

Nous omettons les usages liés à la décoration ainsi que les fibres courtes, bien que le béton renforcé de 1 à 4 % de fibres de carbone courtes soit connu depuis 1970. Les applications industrielles de ce béton sont restreintes à l'utilisation de fibres à bas prix et de caractéristiques mécaniques moindres. La charge de fibres de carbone permet de fabriquer des panneaux, posés à l'extérieur des bâtiments, en béton allégé relativement résistant aux intempéries. La première application de ces panneaux est le recouvrement du dôme d'Al Shaheed, à Bagdad, en Irak, en 1982. Depuis cette date, les applications semblent limitées à l'utilisation de fibres de brai (pitch) et à d'autres fibres textiles comme le polyéthylène ou le polypropylène.

1. Les matériaux composites

Toute matière première comportant des charges peut être appelée au sens général **composite**. Toutefois, dans ce traité, on réserve actuellement cette appellation à des **matériaux comportant un renfort sous forme filamentaire** [1].

Nota : le béton constitué de granulats et de pâte de ciment et le béton armé sont considérés comme des matériaux composites en génie civil.

Dans le premier cas, il s'agit d'un matériau composite constitué de deux éléments complémentaires non miscibles. Dans le second cas, il s'agit d'un composite constitué d'un liant, appelé **matrice**, le béton, et d'un **renfort de fibres longues**, les barres d'acier. La partie fibre — les barres d'acier — donne les propriétés mécaniques en traction, le liant appelé matrice dans les composites, dans ce cas le béton, est un élément nécessaire pour la mise en forme et la transmission des propriétés mécaniques en compression. La matrice intervient en outre comme protecteur des fibres. Par exemple, le pH du béton protège les barres d'acier vis-à-vis de l'oxydation et/ou de la corrosion.

2. Les fibres de carbone

Si la première fibre de carbone a été inventée et produite par T. Edison (en utilisant la pyrolyse des fibres de bambou pour leur usage dans une lampe à incandescence), les premières utilisations expérimentales datent des années 1960 et les premières unités industrielles ne sont apparues qu'au début des années 1970 avec l'introduction du polyacrylonitrile comme fibre précurseur.

2.1 Propriétés des fibres de carbone

Les fibres de carbone bénéficient de caractéristiques sans équivalent et de propriétés physiques très étendues :

- grande résistance et haut module d'élasticité en traction longitudinale ;
- grande résistance à la fatigue et à la déformation ;
- faible masse volumique ;
- grande résistance à l'usure ;
- absorption des vibrations ;
- grande stabilité dimensionnelle ;
- grande stabilité thermique (les fibres de carbone sont pratiquement incombustibles) ;
- bonnes conductivités thermique et électrique ;
- grande résistance à la corrosion vis-à-vis des acides, des bases, des sels et des produits organiques ;
- transparence aux rayons X.

2.2 Comparaison avec les autres fibres et les aciers

Les fibres de carbone sont étudiées en détail dans la référence [44].

Par rapport aux autres fibres telles que :

— les fibres de verre, qui ont un faible module et manquent de résistance aux solutions salines et/ou basiques (cf. référence [45]) ;

— les fibres aramides qui présentent un faible module, une résistance à la fatigue limitée en milieu aqueux et une tenue thermique limitée (cf. référence [46]) ;

— les fibres de polyéthylène à faible module et à tenue thermique très limitée ;

les fibres de carbone possèdent un ensemble de propriétés physiques ou mécaniques qui en font un matériau de renforcement de toute première qualité dans certaines applications liées au bâtiment et aux ouvrages de génie civil.

Le tableau 1 donne les propriétés mécaniques comparées des fibres de carbone, des composites unidirectionnels et de l'acier.

Tableau 1 – Exemples de caractéristiques mécaniques des fibres de carbone et des composites unidirectionnels comparées à celles de l'acier

Propriétés	Unité	Fibres de carbone		Aciers	
		Torayca H.R. T 300/ T 300J/T 700SC	Composites (1) carbone	Type E 235	Haute résistance
Densité		1,75 à 1,80	1,53	7,85	7,85
Propriétés mécaniques (sens longitudinal)					
Traction					
Contrainte à la rupture	MPa	3 530 à 4 900	1 760 à 2 500	315	1 860
Module	GPa	230	125 à 165	210	210
Limite d'élasticité	MPa	3 530 à 4 900	1 760 à 2 500	235	1 600
Allongement à la rupture	%	1,5 à 2,1	1,1 à 1,9	23	3 à 7
Compression					
Contrainte à la rupture	MPa		1 370 à 1 570	315	1 860
Module	GPa		125 à 165	210	210
Propriétés mécaniques (sens transversal)					
Traction					
Contrainte à la rupture	MPa		80	315	
Module	GPa		7,8 à 8,8	210	
Limite d'élasticité	MPa		65 à 80	235	
Allongement à la rupture	%		0,9 à 1,1	23	

(1) Pour une fraction volumique en fibres de carbone (de 3 000 à 24 000 monofilaments) égale à $V_f(C) = 60\%$, matrice résine époxyde.

3. Semi-produits de renforcement : obtention et utilisations

Les fibres de carbone s'utilisent essentiellement sous forme de matériaux composites. Il reste évident que des résines adéquates doivent être utilisées pour optimiser l'emploi des fibres de carbone. Plusieurs procédés de renforcements sont apparus au cours de ces dix dernières années. Les principaux utilisent directement les fibres de carbone sous forme de fil continu et d'autres font appel à un semi-produit plus ou moins sophistiqué, tel que : les tissus secs, les tissus préimprégnés ou des produits pultrudés.

3.1 Fibres sèches

La fibre de carbone est produite sous forme de fibres continues de très grande longueur. Elle est déposée et enroulée régulièrement autour d'un mandrin. Le poids des bobines dépend du type de fibre. En général, pour une fibre de carbone de 12 000 filaments, le poids des bobines varie de 500 g à 4 kg, ce qui correspond à des longueurs de fibres continues de 600 m à 5 km (soit 0,8 g au mètre linéaire).

Pour renforcer directement une structure à partir d'une bobine de fibre de carbone, il est nécessaire de pouvoir tourner autour. Ce procédé de renforcement est donc naturellement limité aux colonnes ou aux pylônes. Les bobines sont placées sur un dévidoir qui peut se mettre en mouvement dans deux directions (rotation autour de la structure à différentes hauteurs). Lorsque l'ensemble se met en mouvement, les mèches de carbone sont extraites des bobines et elles sont déposées automatiquement par enroulement autour du support à renforcer, préalablement enduit d'une résine. Après le dépôt des fibres de carbone, une couche de fermeture de résine assure la cohésion de l'ensemble. Ce procédé, facilement automatisé, est principalement utilisé dans le cas des renforcements par frettage de piles ou de colonnes (*retrofitting*) de ponts ou de bâtiments. Son principal avantage est l'automatisation complète du système de pose. Il est surtout utilisé dans le cas des renforcements de grandes surfaces ou de surfaces répétitives (multicolonnes d'un très grand pont, par exemple). Son principal inconvénient est le fait qu'une pose manuelle est nécessaire pour renforcer les extrémités hautes et basses des piles et des colonnes et que cette méthode demande en outre du temps et des manipulations importantes pour installer le matériel à dévider les bobines autour des piles ou des colonnes.

Cette méthode a surtout été développée au Japon, et elle est aujourd'hui utilisée au Japon et en Amérique du Nord.

3.2 Tissus secs

Les fibres de carbone permettent, comme beaucoup de fibres longues, de fabriquer des tissus de toutes formes et de toutes tailles, de même que des mats.

Les tissus sont fabriqués par des sociétés spécialisées. À titre d'information, beaucoup de tisseurs se trouvent dans la région lyonnaise où se trouvait, autrefois, concentré le tissage de la soie.

Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec tissé uni ou multidirectionnel se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après marouflage, une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles. Par rapport

à d'autres méthodes de renforcement, son principal avantage est une manipulation très facile sur chantier avec une absence totale de matériel lourd à déplacer.

Comparativement aux produits de renforcements rigides, les avantages de la technique de renforcement à base de tissus secs sont nombreux :

- suivi parfait de la forme du support ;
- maîtrise de l'épaisseur du film de résine.

3.3 Tissus préimprégnés

Les tissus préimprégnés sont obtenus en usine, à partir de tissus secs (cas des tissus multidirectionnels) ou à partir de fils de carbone joints sous forme de nappe (cas des tissus unidirectionnels), sur lesquels est déposé un excès de résine. L'excès de résine est éliminé par passage entre des rouleaux chauffés ou non. Le produit avant utilisation doit être conservé à froid, généralement -18°C , pour éviter la polymérisation de la résine. Les tissus doivent être ramenés à la température ambiante pour être utilisables.

À température ambiante, la souplesse du tissu préimprégné permet la pose de renforcements sur pratiquement n'importe quel type de surface. Ces renforcements sont posés et leur matrice immédiatement polymérisée sur les surfaces à renforcer. Le principal problème d'un tel renfort réside dans la phase de remontée à la température ambiante et dans les difficultés matérielles pour assurer de bonnes conditions de polymérisation sur chantier.

Les premières résines utilisées nécessitaient un matériel important, car la polymérisation était obtenue sous vide ou sous pression à des températures supérieures à 100°C .

Par contre, le principal avantage de cette méthode était la quasi-absence de bulles dans le renfort en composite après polymérisation.

Cette technique de renforcement a surtout été développée au Japon, dès la fin des années 1980.

Depuis, les fabricants de tissus préimprégnés et les formulateurs de résines ont accompli des progrès considérables. La température de polymérisation des résines est voisine de la température ambiante, ce qui a permis un gain d'exploitation très important. Cependant, l'utilisation d'un préimprégné nécessite toujours une phase de conservation à très basse température et une phase de remontée en température avant la pose, qui sont difficiles à gérer sur des chantiers de travaux publics.

3.4 Produits pultrudés

Ces produits sont obtenus à partir de mèches de fibres continues qui sont enduites par passage en continu dans un bain de résine. Ces résines peuvent être de type époxyde, polyester, vinylester ou phénolique.

L'ensemble des mèches préimprégnées passe ensuite dans une filière où l'excès de résine est éliminé, puis dans un four de polymérisation.

Les produits finis se présentent sous forme de bandes ou de joncs, plus ou moins rigides suivant les épaisseurs et les diamètres.

La section des bandes les plus courantes est 100×1 mm, leur longueur, suivant la demande, varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres.

D'autres types de profilés, y compris des tubes, peuvent être aussi fabriqués par le même procédé. Ces produits sont utilisés depuis très longtemps dans les articles de sport ; flèches d'arcs, bâtons de ski, etc. Les joncs et les tubes, les plus fabriqués par pultrusion, ont généralement des diamètres compris entre 0,5 et 15 mm.

Ce procédé a l'avantage d'être continu, automatisé, rapide et donc de réduire le coût du composite. Il permet aussi de maîtriser

les taux de fibres et de résine, et d'obtenir des formes profilées recherchées pratiquement de toutes les longueurs désirées.

À partir de ces bandes pultrudées, la technique de renforcement est similaire à celle du plat collé métallique, selon le procédé L'Hermite, mis au point en France vers 1965. Elle a démarré conjointement au Japon et en Europe, plus exactement en Suisse, à l'EMPA de Dübendorf à la fin des années 1980 sous la direction du Professeur U. Meier.

L'avantage de cette méthode est la facile extrapolation des résultats obtenus par le collage de tôles d'acier à ceux obtenus avec des produits pultrudés également collés, la technique du renforcement restant la même.

Comparée pour la technique utilisant l'acier, cette technique de renforcement permet de travailler avec des produits légers (1/5 de la densité de l'acier) ; elle a aussi l'avantage de nécessiter une pression de collage limitée et élimine les phénomènes d'oxydation.

Cependant, l'utilisation de cette technique, comme celle du plat collé métallique, permet difficilement de maîtriser les épaisseurs de colle, en raison de la rigidité des aciers et des composites. L'application de ces renforcements sur des surfaces ayant des défauts de planéité ou sur des surfaces courbes ou non développables reste très limitée.

La pultrusion permet de fabriquer des joncs. L'assemblage de joncs permet de fabriquer des câbles toronnés ou non et des treillis.

Dès les années 1980, des recherches ont démarré au Japon pour étudier le remplacement des structures en acier, formées de câbles toronnés et de treillis, par des structures résistant à l'oxydation. Les composites, à base de fibres de verre, d'aramide ou de carbone, se sont avérés d'excellentes solutions [2] pour ce remplacement.

Les premières réalisations industrielles japonaises sont apparues, au début des années 1990, sous forme de câbles composites de précontrainte dans des ponts piétonniers.

4. Les composites dans la construction

4.1 Principales raisons de leur implantation

Les matériaux composites sont utilisés par l'homme depuis des millénaires dans le domaine de la construction (cf. encadré).

Le pisé de paille et d'argile est un des plus anciens matériaux dont l'idée première est exactement celle des composites : exploiter la résistance à la rupture des fibres, en laissant à une matrice de « qualité mécanique » inférieure le soin de maintenir ces fibres dans la forme voulue [3].

Depuis des millénaires, l'homme a cherché à se protéger dans un bâtiment. Pendant des siècles, sa sécurité dépendait de protections dures, massives donc lourdes (le château fort).

La notion de constructions légères et souples ne date que de quelques décennies.

Si depuis longtemps de nombreux matériaux dits « nouveaux » tels que les composites ont été inventés et testés, leurs utilisations sont restées longtemps limitées aux applications militaires, à la conquête spatiale ou à l'industrie aéronautique.

Plusieurs raisons ont permis à ces matériaux nouveaux de s'implanter dans l'industrie, y compris dans le domaine des travaux publics :

- des raisons **politiques** : la chute du mur de Berlin et l'effondrement du bloc de l'Est ont brutalement changé les mentalités. Les producteurs des matériaux nouveaux étant souvent limités à des utilisations dites stratégiques, le manque brutal de commandes militaires les a obligés à rechercher d'autres marchés ;

- des raisons **économiques** : dès 1992, l'industrie aéronautique a traversé une crise très importante. Les commandes d'avions ont brutalement chuté ;

- des raisons **géographiques** : le Japon est le pays le plus avancé dans les constructions parasismiques renforcées par des composites. Depuis le séisme de Kobe (1995), de nouvelles normes drastiques sont appliquées.

Cependant d'autres zones peuvent être touchées par les tremblements de terre, par exemple la Californie (1989) et, plus récemment, l'Italie (1997). Aujourd'hui, dans la plupart des pays industrialisés, de nouvelles normes sont en cours d'élaboration ;

- des raisons **techniques** : dans le domaine du génie civil, les ouvrages d'art construits depuis des décennies sont de plus en plus sollicités par le développement des transports de fret. Par exemple, en Europe, à partir de 1999, tous les ouvrages d'art devront être capables de supporter des camions de 40 tonnes ;

- des raisons **climatiques** : dans tous les pays du monde, les routes et les ouvrages d'art doivent être disponibles toute l'année. Pour beaucoup de pays, cela sous-entend le dégivrage en période hivernale, par le répandage d'énormes quantités de sels qui engendrent la corrosion des aciers et la pollution des nappes phréatiques ;

- des raisons **architecturales** : dans le domaine de la construction, les architectes sont toujours à la recherche de matériaux mécaniquement plus performants pour limiter les surfaces porteuses et donner libre cours à leur imagination dans la forme des bâtiments ; ils cherchent également à augmenter les surfaces vitrées afin de libérer nos habitations du confinement de l'espace.

4.2 Intérêt des fibres de carbone dans le bâtiment et les travaux publics

L'intérêt des utilisations de la fibre de carbone dans le génie civil se trouve essentiellement dans :

- sa faible densité ;
- ses propriétés mécaniques longitudinales ;
- l'absence de corrosion ;
- sa très bonne tenue à la fatigue ;
- sa facilité de manipulation.

Les principaux inconvénients sont en contrepartie :

- une anisotropie très marquée ;
- un comportement à la rupture de type fragile des composites ;
- un prix de matière élevé comparé à celui de l'acier.

5. Utilisation des fibres de carbone dans la réhabilitation

5.1 Remplacement des tôles métalliques par des fibres de carbone

Dans le domaine du génie civil, une phase de consolidation a succédé à la période 1950-1980. La construction en masse d'ouvrages d'art, de grands immeubles et d'installations industrielles, a laissé

place à des opérations de maintenance qui, souvent, se traduisent par la nécessité de renforcement des structures. Qu'il s'agisse de réparations à la suite de désordres ou de simple mise en conformité avec des codes de plus en plus exigeants, nombreux sont les exemples de telles opérations.

Jusqu'à présent, parmi les types de renforcements utilisés, le collage extérieur de plaques métalliques, selon le procédé L'Hermite [4] [5] est l'un des plus répandus dans le monde en raison des avantages qu'il présente [6] :

- il n'exige que des interventions mineures sur la structure ;
- il est d'un emploi souple ;
- les renforts sont peu encombrants.

Toutefois, le collage de tôles métalliques présente aussi quelques difficultés :

- sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien soigné) ;
- impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur (solicitation le long d'une face) ;
- nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif) ;
- nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage ;
- impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masses manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.

Pour améliorer la technique du collage et éviter une partie des problèmes évoqués plus haut, en France, Freyssinet International a amélioré le procédé, en 1977, en perforant les tôles collées [7] (figure 1).

Ces difficultés, ajoutées aux besoins de renforcements de bâtiments dans certaines régions à risque sismique ont favorisé la recherche et le développement de l'utilisation de fibres de carbone, pour renforcer les structures du génie civil.

À ce jour, seuls les Japonais ont construit des ouvrages d'art ou des bâtiments neufs en remplaçant les armatures en acier par des composites à base de fibres de carbone.

Dans le reste du monde, comme au Japon, l'utilisation principale des composites de carbone se retrouve dans la réhabilitation des ouvrages d'art et des bâtiments.



Figure 1 – Renforcement du viaduc de Terrenoire par tôles collées perforées (Brevet Freyssinet)

5.2 Pose des renforcements : mode opératoire

Les ouvrages à renforcer peuvent être constitués de différents matériaux tels que le béton, armé ou non, l'acier ou le bois, par exemple.

Dans toute réparation, la qualité du support est primordiale.

Dans le cas du béton, il convient d'effectuer un sablage à sec en vue d'obtenir un état de surface rugueux et uniforme en tous points avec des reliefs d'impact compris entre 0,5 et 1 mm [8] ; les dépôts de poussières et les particules non adhérentes sont éliminés par un brossage énergétique.

Dans le cas de l'acier, de la même façon, il convient d'éliminer les parties oxydées non adhérentes et de dégraisser la surface.

Dans le cas du bois, il est nécessaire de mettre à nu le matériau sain en éliminant, par exemple, les couches de peinture ou les parties contaminées après un incendie.

Le support étant ainsi préparé, le renfort peut être posé suivant les procédés décrits dans le paragraphe 4.

6. Utilisations industrielles des composites à base de fibres de carbone

6.1 Au Japon

Les Japonais vivent dans une région particulièrement touchée par les tremblements de terre et possèdent la grande majorité des lignes de fabrication des fibres de carbone. Il était donc normal que, dans un souci de développement, ils s'intéressent un jour au renforcement des bâtiments. Dans ce but, ils formèrent une association (ACC Club) qui regroupe aujourd'hui les principaux producteurs de fibres et les utilisateurs potentiels [9].

■ Câbles de précontrainte (tableau 2)

Après les premiers tests dans les laboratoires des universités spécialisées dans le génie civil, à partir de 1988, des ponts contenant des câbles à base de composites en fibres de carbone furent construits. Si les premiers ponts étaient relativement étroits et à usage piétonnier, petit à petit, avec l'expérience acquise, dès 1990, les Japonais furent capables de construire des ponts de plusieurs kilomètres de long, sous forme d'assemblage d'éléments contenant de plus en plus de câbles de précontrainte en fibres de carbone.

En 1977, pour la construction du pont suspendu de Kurushima (longueur totale 1 307 m), 4 haubans de plus de 500 m de longueur en fibres de carbone ont été utilisés pour stabiliser la passerelle de montage des câbles de suspension en acier.

Pour les Japonais, c'est une première étape pour arriver à la construction d'un pont suspendu ou d'un pont à haubans où tous les câbles en acier seraient remplacés par des câbles à base de fibres de carbone.

■ Réhabilitation

Au Japon, pays qui regroupe plus de 1 000 îles dont quatre principales, les phénomènes de corrosion saline sont souvent observés. Dans les trois dernières années, de nombreux ponts en béton précontraint ont dû être renforcés extérieurement en raison de la corrosion des aciers. Ces renforcements ont été appliqués sur les piles ou sur les faces inférieures des tabliers en utilisant des préimprégnés à base de fibres de carbone comme renfort, et suivant le même principe que le procédé L'Hermite.

Tableau 2 – Liste de quelques exemples de ponts construits au Japon entre 1988 et 1997, dont une partie des câbles sont en composites à base de fibres de carbone (1)

Année	Localité	Caractéristiques du pont	Câbles expérimentaux en fibres de carbone	Nombre de joncs par câble	Diamètre des câbles (mm)
Octobre 1988	Shinmiya (Reconstruction)	Portée : 5,60 m Largeur : 7,0 m	Dalles précontraintes par torons adhérents	7	12,5
Mars 1989	Nagatsu	River footbridge (neuf) Portée : 8,0 m Largeur : 2,5 m	Dalles précontraintes par torons adhérents	7	12,5
Juin 1988 à septembre 1989	Tokyo Kita	Front gate of golf-club Longueur : 16,0 m	18 câbles (3 torons) précontrainte par post-tension	3 × 7	12,5
Février 1991	Nagoya City	Experimental line Longueur totale : 1,5 km Poutres de 19,96 m de longueur, de 1,2 m de largeur, de 0,8/1,1 m d'épaisseur	Dalles précontraintes par post-tension	7	7,5
Avril 1991	Miyisazaki	Linear experimental line Longueur totale : 7 km Poutres de 15,38 m de longueur, de 1,5 m de largeur, de 0,6/0,8 m d'épaisseur	Dalles précontraintes par prétension	7	7,5 10,5 12,5
Juin 1991	Tsukude (Passerelle)	Country club n° 8 hole bridge. Une travée : Longueur : 111,0 m Largeur : 3,6 m	Dalle suspendue précontrainte intérieure et extérieure (17 et 2 km de câbles)	7	12,5
Novembre 1992	Mishine River Bridge	Longueur : 10,5 m Largeur : 3,5 m	Dalle suspendue précontrainte par prétension	7	7,5 12,5
Mars 1993	Kuzaha Quay	Synthetic floor system of quay Longueur : 4,7 m Largeur : 3,8 m Épaisseur : 0,12 m	Dalle suspendue précontrainte par pré- et post-tension	7	12,5
Mai 1993	Hokkaido	Abuta construction area	Tirants d'ancrage	7	12,5
Mars 1996	Ishikawa (Préfecture)	Mukai Bashi bridge Longueur : 13,44 m Largeur : 12,13 m	Essai de nouveaux types d'ancrages		
Mars 1997	Onomichi-Imabari (Route)	Kurushima bridges Longueur totale : 1 307 m (pont suspendu)	4 haubans de la passerelle de montage (> 500 m) (rôle antivibratoire)	37 37	30 40

(1) D'après Advanced Composites Cables.

La mise en place se fait d'après le mode opératoire suivant :

- mise à nu du béton des colonnes (sablage) ;
- pose d'un primaire (résine époxyde de basse viscosité) ;
- pose de la première couche époxyde de collage (répéter n fois pour n couches de renforcement) ;
- pose de la couche de carbone (fibres ou tissus) (répéter n fois pour n couches de renforcement) ;
- application d'une couche de colle de fermeture (résine époxyde) ;
- après séchage, application d'un mortier de protection (contre les chocs, le vandalisme ou l'incendie).

Aux phénomènes de corrosion des aciers il faut ajouter que, dès 1996, une des conséquences du dernier séisme meurtrier de Kobe de 1995 déjà évoqué fut l'instauration de normes drastiques imposées dans tous les lieux publics, les zones industrielles et les immeubles d'habitation.

La pose de renforcements a démarré en utilisant des tissus imprégnés ou des fibres sèches, principalement par fretage des colonnes portantes. Les tissus sont posés manuellement, alors que les fibres sont déposées par enroulement (*retrofitting*). Les quantités de fibres de carbone déposées peuvent aller de 100 à plus de 800 g/m². Les principales résines utilisées sont des résines époxyde et ou viny-

lester. La mise en place du renfort se fait en utilisant le même procédé que celui des piles de ponts (cf. précédemment).

Exemple : nous pouvons citer les applications suivantes :

- en 1993 : Fujimi Bridge (Tokyo) ;
- en 1994 : Johetsu Shikansen Bridge (Nugata) ;
Yonava Bridge et Sanahara Bridge (Yamanashi),
Yogaï Bridge (Saitama),
Nagashina Hotspring Bridge, (Mie), etc.

À partir de 1995, le nombre des réalisations a fortement augmenté. Les applications se trouvent dans tous les domaines industriels, renforcement extérieur de cheminées, de tunnels routiers, ferroviaires ou de métro, de sites de stockages naturels de pétrole ou de gaz, murs de bâtiments, etc.

À noter, dans le domaine de l'innovation dans la construction au Japon, des murs de bâtiments de banques où les treillis en fibres de carbone sont utilisés non seulement pour leurs propriétés mécaniques mais aussi en tant que conducteur électrique et sont reliés aux systèmes d'alarme [10]. En mars 1998, il faut noter l'arrivée du premier bâtiment dont la structure métallique a été remplacée par une structure à base d'un composite de carbone [11].



Figure 2 – Sakawagan Bridge au Japon (8 piles de 42 à 65 m de hauteur et de 7 m de diamètre) : passerelle de mise en œuvre de la fibre de carbone

La résistance globale de ces structures renforcées permettrait, d'après les résultats des études faites dans les universités japonaises spécialisées, de supporter un séisme de 6 à 7 sur l'échelle de Richter. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, le renforcement des piles (de plus de 7 m de diamètre) d'un pont autoroutier (Sakawa River Bridge–Tomei Highway), dont certaines dépassaient 60 m de hauteur. Ce chantier se termina en mars 1998, après un an de travail. Plus de 2 tonnes de fibres de carbone furent posées [12] [13] (figures 2 et 3).

Ce programme national de mise en conformité parasismique des bâtiments et des ouvrages d'art fait aujourd'hui du Japon le premier consommateur de fibres de carbone dans les secteurs du bâtiment et des ouvrages d'art. La consommation de fibres de carbone au Japon pour l'ensemble des BTP était supérieure à 300 t en 1996 et à 500 t en 1997.

6.2 En Amérique du Nord

6.2.1 Aux États-Unis

Les études américaines ont commencé, en vue de renforcements antisismiques, suite aux conséquences du séisme de Loma Prieta (Californie) d'octobre 1989, qui avait détruit les appuis de trois tabliers de ponts. De nombreuses photos avaient été publiées à l'époque montrant les tabliers écroulés posés les uns sur les autres

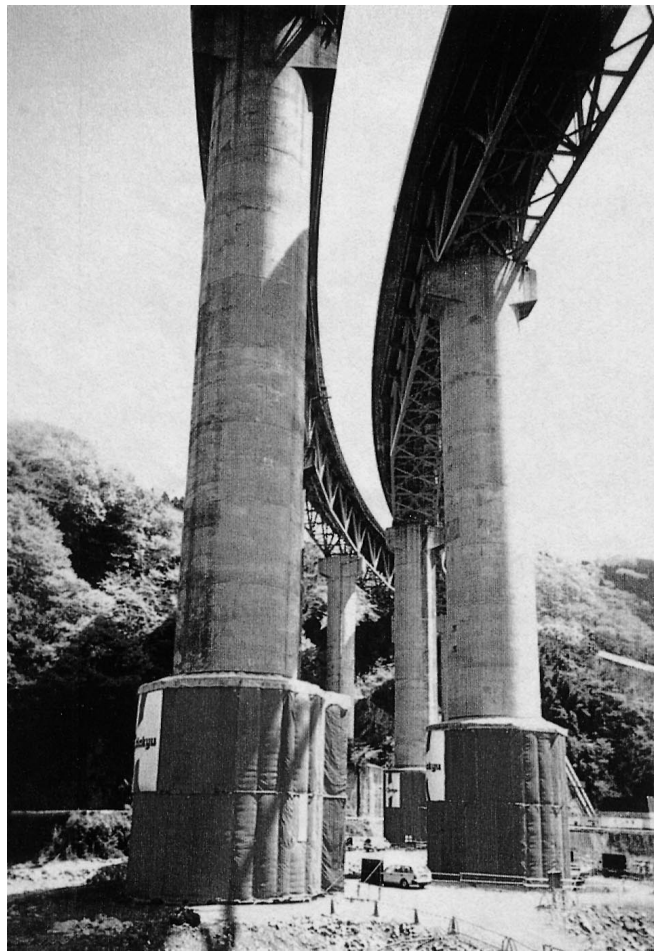


Figure 3 – Sakawagan Bridge : au pied des piles, enceinte d'isolation pour polymérisation de la matrice

tel un immense « sandwich ». Depuis, de nombreuses études parasismiques ont été entreprises pour comprendre les phénomènes de mise en résonance des ponts et leur mode de destruction [14].

Des essais de renforcements à l'aide de tissus préimprégnés, basés sur les méthodes japonaises, ont été développés dans de très nombreuses universités dont l'université de Californie à San Diego. À partir de 1994, des tests sismiques en laboratoire, sur des maquettes de plus en plus grandes, ont démontré l'intérêt de l'utilisation des fibres de carbone. Depuis, des renforcements ont été effectués sur des sites sensibles, comme en Californie, par exemple. Les ouvrages sont généralement renforcés par addition de structures externes en composites à base de fibres de carbone. Ces composites sont obtenus par polymérisation *in situ* de la matrice des fibres préimprégnées.

Exemple : nous pouvons citer :

- en 1996 : Highway Bridge à Butler, Ohio [15] ;
- en 1997 : Great Western Bank Building à Sherman Oaks, Californie [16] ;
- en 1997 : Foulk Road Bridge à Delaware, Californie [17].

Aux États-Unis, contrairement au Japon et à l'Europe, les renforcements de colonnes et des piles de ponts se font aussi bien avec des fibres de carbone qu'à l'aide de fibres de verre ou d'aramide.

Cependant, pour des raisons de durabilité et de résistance à la fatigue, les fibres de carbone commencent à dominer ce marché naissant.

Enfin, un document qui devrait paraître bientôt sera édité par le comité 440 de l'Institut américain du béton (*American Concrete Institute*) à l'intention des spécialistes du génie civil. Il sera possible d'y trouver des normes de calcul concernant différentes utilisations de renforcements à base de matériaux composites [18]. Ce document permettra sans doute d'accélérer l'introduction des matériaux composites dans les structures des bâtiments et des ouvrages d'art.

6.2.2 Au Canada

Au Canada, des études ont été menées pour renforcer extérieurement des ponts anciens corrodés ou ne pouvant supporter l'augmentation des surcharges de calcul. Le procédé L'Hermite devient peu applicable dans ce pays, du fait de la très forte corrosion saline liée aux énormes quantités de sels répandues sur l'ensemble du réseau routier pendant la longue période hivernale [19].

À partir du début des années 1990, de nombreuses universités (Alberta, Laval, Manitoba, Royal Military College, Sherbrooke, Queen's, Waterloo, etc.) commencèrent à travailler sur les renforcements et les frettages des piles de ponts et des colonnes de bâtiments. Les matériaux de base principalement utilisés étaient les fibres de verre, d'aramide et de carbone. Les très nombreuses publications [20] laissent présager un futur prometteur aux matériaux composites, mais aujourd'hui les applications en grandeur réelle restent limitées.

Nous pouvons cependant en citer quelques-unes qui appartiennent plus au domaine des « *chantiers expérimentaux* ».

■ Ponts :

- en 1993, renforcement du pont de Calgary (Alberta) par des câbles de 6 m de long. L'objet de ce travail était essentiellement de contrôler la durabilité d'un tel renforcement [21] ;
- en 1996, réhabilitation du pont Clearwater Creek (Alberta) à partir de bandes de tissus de fibres de carbone préimprégnées [22] ;
- en 1996, autoroute A 10 à Saint-Étienne-de-Bolton (Québec), renforcement par l'équipe de recherche de l'université de Sherbrooke de 12 colonnes (sur un total de 18) de pont par des tissus à base de fibres de verre, d'aramide et de carbone, et instrumentation de l'ensemble pour suivi dans le temps [23] ;
- en 1996, renforcement des bases des ponts Jacques Cartier et Champlain qui enjambent le Saint-Laurent à Montréal [23] ;
- en 1997, renforcement d'un pont âgé de 27 ans à Winnipeg (Manitoba) par pose de tissus de fibres de carbone [24] ;
- en 1997, renforcement d'un pont autoroutier, traversant l'Assiniboine River à Headingley (Manitoba) à l'aide de tissus et de câbles en fibres de carbone. Ce pont a été entièrement instrumenté pour être suivi dans le temps [25].

■ Bâtiments :

- en 1995, à Sherbrooke, renforcement par frettage à l'aide de tissus préimprégnés de plusieurs colonnes de bâtiment dans l'enceinte de l'université [23] ;
- en 1996, développement d'un programme spécifique de réhabilitation des bâtiments par les gouvernements fédéral, provincial et municipal de Sherbrooke [23]. À ce titre, le premier bâtiment renforcé fut un garage en sous-sol (Webster parking garage), en utilisant des produits pultrudés ;
- en 1997, dans le centre de Winnipeg (Manitoba), une structure de toiture a été renforcée par le même procédé [24].

Dans la plupart de ces chantiers expérimentaux, nous pouvons noter une grande collaboration entre les universités et les groupes industriels. Compte tenu du caractère très innovant de ces réhabili-

tations, les chantiers ont tous été instrumentés, généralement par fibres optiques, et le suivi en fatigue se fait au niveau national par l'intermédiaire de l'ISIS Canada (*Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures*). Comme aux États-Unis, une norme de l'Association canadienne de normalisation (ACNOR/CSA) et portant sur l'utilisation des composites dans des applications structurales est en cours de rédaction. Cette norme inclura un chapitre sur l'amélioration du comportement des structures renforcées sous charges sismiques.

L'utilisation de fibres de carbone en génie civil représentait aux États-Unis et au Canada environ 30 tonnes en 1996 et un peu moins de 50 tonnes en 1997. La croissance de ce marché devrait être supérieure à 30 % par an pendant les cinq prochaines années.

6.3 En Europe

En Europe, de nombreuses universités de la Communauté européenne ont travaillé sur les renforcements à base de matériaux composites.

Depuis plusieurs années, un projet « Brite » a réuni plusieurs pays sur ce sujet. Fin 1997, aucune application industrielle n'a été réalisée à la suite des résultats des études de ce projet.

Cependant, en Europe, les applications industrielles sont apparues plus rapidement qu'aux États-Unis et qu'au Canada, grâce à des groupes de travail plus restreints et, en particulier, grâce au Professeur Meier de l'EMPA de Dübendorf (Suisse).

■ Câbles

Le premier test en vraie grandeur fut la construction d'un pont, au début des années 1990, avec des câbles de précontrainte à base de composite en fibres de carbone, où passent toujours des dizaines de camions de livraison par jour dans l'usine de BASF à Ludwigshafen.

Parallèlement à ce travail, U. Meier a travaillé sur la conception des haubans sous forme de câbles en fibres de carbone et sur les ancrages. Il avait déjà publié, dans les années 1989-1990, des articles qui faisaient état de la possibilité de relier l'Europe à l'Afrique sous la forme d'un pont à haubans, passant au-dessus du détroit de Gibraltar, d'une portée de plus de 8 km en utilisant des câbles à base de composites de carbone [26] [27].

Après les calculs théoriques, de nombreux tests furent effectués à l'EMPA et le résultat le plus spectaculaire de ces travaux a été le remplacement de deux haubans en acier par deux câbles de fibres de carbone sur le pont de Winterthur en 1996 [28]. Chaque câble est constitué de 241 joncs de 5 mm de diamètre. La charge de rupture de chaque câble installé est supérieure à 1 300 t. Pour des raisons techniques, le choix de ce laboratoire s'est porté sur l'utilisation de composites à base de fibres de carbone *Torayca T 700SC* [29]. Ce choix est lié à la très grande résistance à la rupture de cette fibre (4 900 MPa) et à son très bon allongement à la rupture (> 2 %). Bien que la résistance transversale des composites à base de fibres de carbone soit limitée, l'EMPA sut adapter un nouveau concept d'ancrage [30].

En 1997, une étude similaire était en cours en Hollande pour remplacer, sur un pont de Rotterdam, une partie des haubans en acier par des câbles à base de composite en fibres de carbone.

En janvier 1998, les sociétés actives dans le monde des composites étudient un projet de construction au Danemark, à titre expérimental, d'une passerelle (longueur 80 m, largeur 3,5 m) munie de haubans et de torons de précontrainte, le tout en composite époxyde-fibres de carbone.

■ Réhabilitations à partir de plats pultrudés et de tissus

En Europe, les principales applications industrielles de réhabilitations sont apparues en Suisse fin 1991, puis en France à partir de 1996.

En Suisse, toujours sous l'impulsion du Professeur U. Meier, de très nombreuses études de renforcement à base de fibres de verre, d'aramide et de carbone ont été faites, en y incluant des tests de fatigue et de durabilité [31] [32]. La technique développée est basée sur l'utilisation de produits pultrudés comme renforcement externe des ponts en remplacement des plaques d'acier du procédé L'Hermite. Les fibres de carbone *HR de type Torayca T 700SC* ont été choisies pour leurs propriétés mécaniques et leur allongement supérieur à 2 % [33].

Par rapport au renforcement en acier, les principaux avantages des pultrudés au carbone sont :

- la facilité de pose ;
- la durabilité, liée à l'absence de corrosion du composite.

Après quelques chantiers d'essais contrôlés directement par l'EMPA en 1992, cette technique fut employée par la société Sika en Suisse dès 1993, puis étendue en Allemagne dès 1995 et en Angleterre en 1996 [34] (figure 4).

Fin 1997, plus d'une centaine de ponts ont été renforcés en utilisant ce principe, dont le premier pont anglais, à Dales town of Skipton, au nord du Yorkshire, en octobre 1997 [35].

En France, sous l'impulsion de la société Soficar, (J.V. Toray/Elf Atochem) et du LCPC (Laboratoire central des Ponts et Chaussées), une étude démarra fin 1994, soutenue par le « Plan génie civil 1995 » du METT (ministère de l'Équipement, du Tourisme et du Transport) et la DRAST (Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques), d'un système de renforcement à base de tissus secs imprégnés *in situ*. Freyssinet International, qui connaissait parfaitement le procédé L'Hermite et ses limites, fut très vite partie prenante et devint le chef de file de ce groupe de travail. Ce travail fut effectué avec la collaboration d'Atofindley, de l'École normale supérieure de Cachan, de Porcher Industries et de SGN.

Les résultats de cette collaboration ont donné naissance à un produit appelé *TFC®* (tissus de fibres de carbone), marque déposée par Freyssinet International (figures 5 et 6).

Comparativement à l'utilisation des produits pultrudés, ce procédé a l'avantage de simplifier les opérations de pose et offre la possibilité de permettre le renforcement de surfaces non planes [36] (figure 7).

D'après une étude technico-économique de Freyssinet International, le coût global de la pose de tissus secs de fibres de carbone est très largement inférieur à celui d'un renforcement à base de plats collés métalliques [37].



Figure 4 – Renforcement de poutres à l'aide de bandes pultrudées collées (photo SIKA)

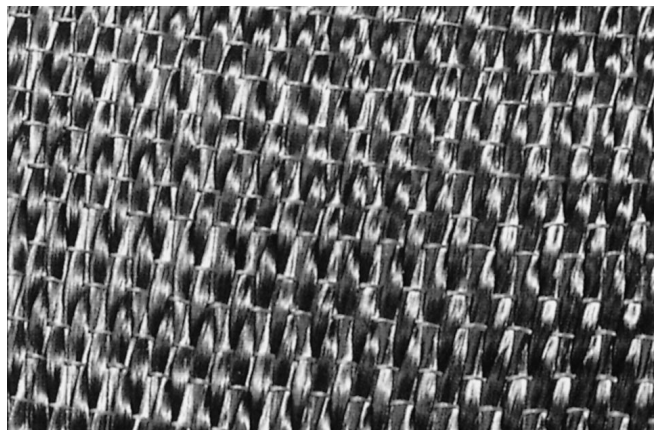


Figure 5 – Tissu de fibres de carbone TFC®



Figure 6 – Renforcement d'une dalle de plancher par TFC dans un immeuble à Saint-Maurice



Figure 7 – Renforcement par TFC de surfaces non planes



Figure 8 – Passage supérieur sur l'A10 entre Allainville et Allaine



Figure 9 – Mise en place à la main de TFC

En 1996, Freyssinet renforçait le premier pont autoroutier français en remplaçant les plats collés métalliques classiques par des tissus secs et imprégnés sur place par un adhésif spécifique à base de résine époxyde, mis au point par Atofindley, compatible avec le béton et capable d'imprégner les fibres de carbone [38]. Ce premier travail de renforcement en France a permis au groupement d'être primé et de recevoir le Label IVOR (Innovation validée sur ouvrage de référence), de la part du Plan génie civil du METT/DRAST en octobre 1997 et le premier trophée d'innovation dans la catégorie « Construction et Infrastructures » lors des Journées européennes des composites en avril 1998 (figures 8 et 9).

Après ce premier succès et dès le printemps 1997, l'application devenait industrielle. Depuis, Freyssinet a renforcé en France et à l'étranger des dizaines de ponts et de bâtiments avec le procédé TFC® [39].

Fin 1996, le marché des BTP représentait en Europe un peu plus de 25 t de fibres de carbone et 50 t en 1997. La croissance de ce marché devrait être largement supérieure à 30 % par an pendant les prochaines années.

7. Conclusion

Dans le monde, aujourd'hui, les principaux phénomènes qui ont conduit les fibres de carbone à s'implanter petit à petit dans le renforcement des bâtiments et des ouvrages d'art sont :

- la **réhabilitation** ou la **mise en conformité** des ouvrages existants, soit pour des raisons de pertes des propriétés initiales, soit pour des raisons de remises à niveau liées à de nouvelles normes ;
- la **construction** de nouveaux bâtiments et d'ouvrages d'art plus légers et plus performants.

Dans le cas de la réhabilitation, le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres de carbone a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcements à base d'acier [40] [41] [42].

Le pays qui utilise aujourd'hui le plus ce procédé est le Japon.

Si le but principal recherché est la protection des bâtiments et des ouvrages d'art du risque de destruction lors d'un tremblement de terre, ce type de renforcement a aussi l'avantage d'être pratiquement insensible à la corrosion dans les conditions climatiques particulières de ce pays, essentiellement formé d'îles.

Les premières techniques ont été mises au point au Japon. Depuis, elles ont été améliorées et les utilisations se sont étendues tout d'abord en Europe puis en Amérique du Nord.

Dans le domaine des constructions neuves, les applications sont aujourd'hui beaucoup plus limitées.

Elles devraient cependant se développer tout d'abord à titre expérimental pour augmenter les bases de données, afin de permettre un jour la construction de très grands ouvrages où les matériaux métalliques, malgré leurs propriétés mécaniques remarquables, ne pourront être utilisés, à cause de leurs propriétés spécifiques (rapport propriétés mécaniques/densité).

De même, au Japon, à titre d'exemple dans la construction de bâtiments, un projet de construction d'un immeuble de forme pyramidale de 2 à 4 km de haut (!) est à l'étude depuis de nombreuses années.

En dehors de ces très grands projets, l'ensemble des applications de renforcements représente, dans le monde d'aujourd'hui, un marché potentiel annuel très important, de plusieurs milliers de tonnes.

En Europe, les récents séismes de la région d'Assise vont sans doute accélérer les procédures de mise en conformité des bâtiments d'habitation et des bâtiments industriels.

Très prochainement, des normes et des codes seront édités en Europe et en Amérique du Nord.

La recherche des applications des fibres de carbone ne fait que commencer. En effet, à l'ensemble des applications citées dans cet article, et à titre d'exemple, nous pouvons ajouter des débuts d'applications dans le domaine de l'off-shore. L'exploitation pétrolière en mer très profonde (> 1 300 m) exigera des solutions techniques impliquant légèreté et résistance élevée.

Dans ces conditions, nous pouvons supposer que les composites à base de fibres de carbone, présentant les caractéristiques demandées pour ce type d'applications, tendront à remplacer l'acier [43].

Les compagnies pétrolières américaines commencent déjà des expérimentations et les Européens ont démarré des études depuis plusieurs années.

Les résultats obtenus et les expérimentations en grandeur réelle de ces très grandes structures auront sûrement des synergies avec les applications dans le domaine des travaux publics.

Composites à fibres de carbone dans le génie civil

par **Jean LUYCKX**

*Ingénieur du Conservatoire national des arts et métiers (chimie industrielle)
Détaché par Elf-Atochem à la direction technique de la société Soficar en charge
des qualifications aéronautiques et de développement*

Données économiques

■ Prix des fibres

Il fluctue fortement en fonction des qualités produites, des coûts de contrôle et d'essais exigés par les clients. Depuis 1988, les prix moyens des fibres ex-PAN de haute résistance (HR), de module intermédiaire (MI) et de haut module (HM) ont globalement été divisés par deux voire trois, tandis que l'amélioration des connaissances et des technologies a permis des augmentations significatives des propriétés mécaniques.

■ Évolution du marché des fibres de carbone base PAN de 1992 à 2000

Pendant ces cinq dernières années, les fibres de carbone obtenues à partir d'une base PAN (polyacrylonitrile) ont accentué leur domination sur les fibres obtenues à partir des bases brai et autres matières premières (viscose, résidus pétroliers, etc.).

Avec l'arrivée de la crise économique dans les années 1992-1995, touchant particulièrement l'industrie aéronautique, qui a fait fortement chuter les prix et occasionner le retrait de certains producteurs du marché (Courtaulds, BASF, Asahi Kasei, etc.), les principaux producteurs de fibres de carbone ont cherché à se diversifier dans de nouvelles applications industrielles.

Ces nouveaux marchés ont été, entre autres, les marchés du bâtiment et des travaux publics, pour lesquels les premières applications ont été faites au Japon dès 1984.

■ Augmentation des capacités de production

Le tableau **A** montre l'augmentation de la demande au cours des cinq dernières années, demande qui va continuer de croître dans les années futures.

Depuis fin 1995, les unités de production de fibres de carbone sont saturées. Depuis le début 1996, la demande est supérieure à l'offre, et les principaux producteurs ont décidé d'augmenter leur capacité de production dès la fin 1996.

Pour partie, ces nouvelles capacités sont opérationnelles depuis le début de 1997 et d'autres viendront en 1999.

Les principales augmentations de capacités nominales programmées fin 1997 sont les suivantes :

- Toray : + 1 800 t/an au Japon (1998) et + 1 800 t/an aux USA (1999 — nouveau site industriel) ;
- Toho : + 1 000 t/an en Europe (1998) et + 200 t/an (1998) au Japon ;
- Akzo : + 1 000 t/an aux USA (1998) à base de PAN textile ;
- Mitsubishi : + 1 500 t/an au Japon (1998) ;
- Zoltek : + 1 000 t/an en Europe (1998) à base de PAN textile.

Compte tenu de ces données, dans quelques années, la différence de consommation des fibres de carbone du secteur aéronautique et de l'industrie, actuellement servie partiellement, sera encore plus accentuée.

Tableau A – Évolution des capacités de production et de la consommation des fibres de carbone dans le monde (en tonnes), d'après Asian Chemical News (3 mars 1997)

Année	1992	1996	2000
Capacités nominales de production (1) (2)			
Amoco (USA).....	950	1 150	1 850
Akzo (USA).....	365	2 270	2 270
Hercules/Hexcel (USA).....	1 715	1 715	1 715
Mitsubishi (J + USA).....	820	1 900	3 400
Toray (J + E).....	2 610	3 700	7 300
Toho (J + E).....	2 500	3 700	5 100
Autres.....	2 160	810	1 810
Total.....	11 120	15 245	23 445
Consommation mondiale			
Aéronautique (3).....	2 350	1 800	2 100
Sport (3).....	2 250	3 761	3 900
Industrie (3).....	1 900	3 582	6 809
Total.....	6 500	9 143	12 809

(1) Capacité réelle de production (mixt products) = capacité nominale multipliée par 0,6 à 0,8.
 (2) USA : États-Unis ; J : Japon ; E : Europe.
 (3) Données Soficar.

Pour servir les demandes industrielles, de nouvelles fibres de carbone fabriquées à partir de PAN textile (de 50 000 à 320 000 monofilaments) apparaissent. Si ces fibres ont des caractéristiques mécaniques moindres, d'après leurs fabricants, les coûts de production en sont plus faibles. Il est difficile de savoir aujourd'hui si les fibres à larges mèches seront une alternative partielle aux fibres de carbone principalement produites aujourd'hui (de 3 000 à 24 000 monofilaments).

De nombreuses études et des investissements lourds seront nécessaires à la mise au point des procédés de transformation de ces nouvelles fibres. Le rôle des préimprégnateurs et des autres transformateurs sera sans doute déterminant.

Pour les cinq prochaines années, le taux de croissance global de la consommation des fibres de carbone devrait être supérieur à 10 % par an.

Références bibliographiques

- [1] REYNES (M.). – *Les composites*. Presses Universitaires de France, Que sais-je ?
- [2] FRP International (Hiver 1997) vol. V, issue 1, p. 4-5.
- [3] BESSIÈRE (J.-F.). – *La potentialité des matériaux composites de synthèse dans l'architecture*. École d'architecture de Paris Belleville, mémoire de fin d'études (1996).
- [4] L'HERMITE (R.). – *L'application des colles et résines dans la construction*. Ann. ITBTP, série Béton et béton armé (nov. 1967), n° 239.
- [5] L'HERMITE (R.) et BRESSON (J.). – *Béton armé d'armatures collées*. Colloque RILEM, Paris (4-6 sept. 1967), p. 175-203.
- [6] THEILLOUT (J.-N.). – *Le renforcement des structures par la technique des tôles collées : étude de fonctionnement*. Bull. liaison Labo. P et C., n° 169 (sept.-oct. 1990), p. 91-107.
- [7] FREYSSINET INTERNATIONAL (STUP). – *Procédé de renforcement d'ouvrage par tôles collées perforées*. Brevet français n° 77 24639 (10 août 1977).
- [8] THEILLOUT (J.-N.). – *Vérification de l'aptitude au collage des surfaces en béton*. Bull. liaison Labo. P et C., n° 167 (mai-juin 1990), p. 5-12.
- [9] Document ACC (Advanced Composite Cable) Japon. Adresse : Furukawa Building (A.M. Engineering K.K.), 2-3-14 Muromachi, Nihonbashi, Chuo-Ku, Tokyo 103, Japon. Tél. : 81.3.3231.0690, fax : 81.3.3242.7584.
- [10] FRP International. – *Security guard using CFRP, new products* (Printemps 1996), vol. IV, issue 2, p. 6.
- [11] ACM Monthly. – *World's first CF/PH truss application for building construction*. (mars 1998), issue 316, p. 6-7.
- [12] KUJI NISHI et al. – (En langue japonaise) Doboku-Sekou Magazine, *Anti-seismic reinforcement of carbon fibre sheet for highway hollow columns*. (Avr. 1998), n° 39, vol. 4.
- [13] ACM Monthly. – *Tow sheet « MBraces »*. (Mars 1998), issue 316, p. 4-5.
- [14] HARIK (I.). – *Dynamic testing and seismic evaluation of long span truss bridges*. Recent advances in bridge engineering. Advanced rehabilitations, durable materials, non destructive evaluation and management. U. Meier et R. Betti, eds, EMPA (1997), p. 285-292.
- [15] FRP International. – *Carbon plates for Ohio bridge*. (Été 1996), vol. IV, issue 3, p. 3.
- [16] FRP International. – *Seismic retrofitting*. (Été 1997), vol. V, issue 3, p. 2.
- [17] CHAJES (M.). – *Infrastructure rehabilitation using composites*. (<http://www.ce.udel.edu/faculty/chajes/load.foulk.html>.)
- [18] *Composite New InfraStructure*, n° 83, p. 3 (5 janv. 1998).
- [19] GREEN (M.F.) et SOUKI (A.). – *FRP strengthened concrete structure*. Recent advances in bridge engineering. Advanced rehabilitations, durable materials, non destructive evaluation and management. U. Meier et R. Betti, eds, EMPA (1997), p. 219-226.
- [20] NEALE (K.W.) et LABOSSIERE (P.). – « *State-of-the-art report on retrofitting and strengthening by continuous fibre in Canada* » : Non metallic (FRP) reinforcement for concrete structures. Processing of the third international symposium, vol. 1 (oct. 1997), p. 25-39.
- [21] ALEXANDER (J.G.S.) et CHENG (J.J.R.). – « *Field applications and studies of using CFRP sheets to strengthen concrete bridge girders* ». Advanced Composites Materials in Bridges and Structures. M.M. El-Brady, éd., CSCE (1996), p. 465-472.
- [22] LABOSSIERE (P.), NEALE (K.W.) et MARTEL (S.). – « *Strengthening of existing structures with composite materials* ». Practical applications in Quebec. Recent advances in bridge engineering. Advanced rehabilitations, durable materials, non destructive evaluation and management. U. Meier et R. Betti, eds, EMPA (1997), p. 89-96.
- [23] HUTCHINSON (R.), ABDELRAHMAN (A.) et RIZKALLA (S.). – *Shear strengthening using CFRP sheets for a prestressed concrete highway bridge in Manitoba, Canada*. Recent advances in bridge engineering. Advanced rehabilitations, durable materials, non destructive evaluation and management. U. Meier et R. Betti, eds, EMPA (1997), p. 97-104.
- [24] SHEHATA (E.), ABDELRAHMAN (A.), TRADROS (G.) et RIZKALLA (S.). – *CFRP for large span highway bridge in Canada*. Recent advances in bridge engineering. Advanced rehabilitations, durable materials, non destructive evaluation and management. U. Meier et R. Betti, eds, EMPA (1997), p. 251-258.
- [25] SHEHATA (E.), RIZKALLA (S.), ADAMS (A.) et STEWART (D.). – *Strengthening of concrete roof using CFRP strips*. Proc. 1997, CSCE Annual conf., Sherbrooke, Québec (27-30 mai 1997), vol. 6, p. 1-10.
- [26] MEIER (U.). – *Proposal for a carbon fibre reinforced composite bridge across the Strait of Gibraltar at its narrowest site*. Proc. Instn. Mech. Engrs. vol. 201, n° 201, p. 184-189.
- [27] MEIER (U.). – *Carbon fibre reinforced polymers*. Modern materials in bridge engineering, structural engineering international, vol. 1 (1992), p. 1-12.
- [28] SHURTER (U.) et MEIER (B.). – *Storchenbrücke Winterthur*, Schweizer Ingenieur und Architekt (oct. 1996), n° 44, p. 4-13.
- [29] MEIER (U.) et MEIER (H.). – *CFRP use in cable support foot bridge*. Modern Plastics (avr. 1996), p. 87-89.
- [30] MEIER (U.). – EMPA, Swiss patent – CH 01 270/94-3.
- [31] DESKOVIC (N.), TRIANTAFILLOU (T.) et MEIER (U.). – *Innovative design of FRP combined with concrete : short term behavior*. Journal of Structural engineering (juil. 1995), p. 1069-1078.
- [32] DESKOVIC (N.), TRIANTAFILLOU (T.) et MEIER (U.). – *Innovative design of FRP combined with concrete : long term behavior*. Journal of Structural engineering (juil. 1995), p. 1079-1089.
- [33] MEIER (U.), DEURING (M.), MEIER (H.) et SCHWEGLE (G.). – *Strengthening of structures with CFRP laminates : research and applications in Switzerland*. Advanced composite materials in bridges and structures, 1st International Conference. Sherbrooke, Québec, Canada (1992), p. 243-251.
- [34] FRP International. – Été 1997, vol. V, issue 2, p. 2-6.
- [35] Construction News n° 25 (16 oct. 1997).
- [36] CHABERT (A.) et LUYCKX (J.). – *L'utilisation des fibres de carbone dans les BTP*. Composites, n° 15 (mai-juin 1996), p. 23-28.
- [37] COLLIN (B.) et CHABERT (A.). – *Performance of carbon fiber tissue-epoxy resin composites for flexural strengthening of reinforced concrete beams*. FRPRCS-3, Third international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, Sapporo, Japon (14-16 oct. 1997), V 1, p. 395-402.
- [38] FREYSSINET INTERNATIONAL. – *Ouvrages d'art*. N° 28 (nov. 1997), p. 9-13.
- [39] FUZIER (J.-P.), LACROIX (R.) et LUYCKX (J.). – *Bridge Strengthening by carbon fibres*. Recent advances in bridge engineering ; Advanced rehabilitations, durable materials, non destructive evaluation and management. U. Meier et R. Betti eds, EMPA (1997), p. 142-146.
- [40] MEIER (U.) et KAISER (H.). – *Strengthening of structures with CFRP laminates, advanced composite materials in civil engineering structures*. ASCE, Las Vegas (1991), p. 224-232.
- [41] NANNI (A.). – *Concrete repair with externally bonded FRP reinforcement*. Concrete International J., 97 (1995), p. 22-26.
- [42] CLÉMENT (J.-L.), DUMAS (C.) et BELHOUL (M.). – *Numerical simulations of RC beams strengthened by carbon fiber cloth*. EURO-C Symposium, Bagastein, Autriche (30 mars-3 avr. 1998).
- [43] ODRU (P.) et SPARKS (C.-C.). – *Les matériaux composites haute performance pour la mer profonde*. Conférence Internationale DOT, Rio de Janeiro, Brésil (1995).

Dans les Techniques de l'Ingénieur

- [44] LUYCKX (J.). – *Fibres de carbone*. – A 2 210. Traité Plastiques et Composites, vol. AM5 (1994).
- [45] GUILLON (D.). – *Fibres de verre de renforcement*. – A 2 110. Traité Plastiques et Composites, vol. AM5 (1995).
- [46] PINZELLI (R.). – *Fibres aramides pour matériaux composites*. – A 3 985. Traité Plastiques et Composites, vol. A M5 (1995).