

Polymères renforcés de fibres (FRP)

Identification et champs d'application

par **Patrice HAMELIN**

Ingénieur INSA génie civil

Docteur ès sciences

Professeur des universités (université de Lyon)

1. Grandes familles pour la construction	C 950 – 2
1.1 Situation	– 2
1.2 Diverses formulations de FRP	– 3
1.2.1 Fibres de renforcement	– 3
1.2.2 Matrices polymères	– 6
1.3 Exemple de produits industriels	– 8
1.4 Différents cas d'application en génie civil	– 12
1.4.1 Structures composites ou mixtes	– 13
1.4.2 Câbles et haubans de substitution	– 14
1.4.3 Armatures passives pour le béton armé	– 15
1.4.4 Composites de renforcement, de réparation et de protection	– 15
2. FRP comme armatures passives pour béton armé	– 17
2.1 Armatures composites	– 17
2.2 Calculs prévisionnels des propriétés de composites pultrudés unidirectionnels	– 18
2.3 Durabilité des FRP	– 22
2.4 Lois de comportement et valeurs caractéristiques	– 26
3. Conclusion générale	– 27
Pour en savoir plus	Doc. C 950

Depuis une trentaine d'années les matériaux composites associant les matrices polymères à des renforts textiles ont été progressivement introduits dans le domaine de la construction. Leurs propriétés de tenue à la corrosion est à l'origine des premières réalisations industrielles dans le domaine du génie chimique.

La notion de multi-matériaux au sein de structures de type sandwich a ouvert le champ d'application des panneaux de façade, des panneaux de couverture dans le domaine du bâtiment, en combinant notamment des propriétés mécaniques et d'isolation thermique. Au regard des performances de résistances et de rigidités spécifiques de matériaux, tels que les composites carbone-époxy développés pour les applications aéronautiques, de potentielles avancées technologiques ont permis de faire évoluer les procédés constructifs des ouvrages d'art en cherchant soit :

- à substituer aux câbles et haubans métalliques des câbles composites ;
- à remplacer les tabliers traditionnels en béton armé par des éléments composites type caissons, sandwichs ou mixtes.

Lors de ces dix dernières années, dans un contexte général visant à améliorer la durabilité et la sécurité des bâtiments et des infrastructures existants, pour des conditions d'exploitation en service de plus en plus contraignantes et des conditions de sollicitations extrêmes (explosion, séisme) les composites FRP se sont affirmés comme des procédés de renforcement et de réparation particulièrement performants.

L'expérience acquise dans le domaine de la réparation et une meilleure évaluation de la durabilité de ces matériaux, dans les conditions d'environnement spécifiques au génie civil, ont permis de développer des marchés de niche pour lesquels les propriétés de tenue à la corrosion, les propriétés d'amagnétisme des FRP permettent de remplacer des armatures métalliques (acier, acier inoxydable) pour la réalisation d'ouvrages en béton souterrains, en sites marins, au sein d'installations industrielles spécifiques.

1. Grandes familles pour la construction

1.1 Situation

Les polymères renforcés par fibres (FRP ou PRV) sont essentiellement constitués de fibres continues, ou discontinues, imprégnées par des résines (figure 1 [1]). Les fibres ou renforts textiles (figure 2 [2]) présentent des résistances en traction et des modules d'élasticité nettement supérieurs aux matrices polymères qui assurent la cohésion du matériau composite.

Le traitement de surface des fibres (ensimage textile) joue un rôle prépondérant sur les propriétés finales du composite qui dépendent de l'adhésion fibres/matrice.

Le polymère influence considérablement la tenue à l'endommagement et la durée de vie du composite (fatigue, vieillissement physico-chimique) dans la mesure où la redistribution des charges sur les fibres saines, lors de la rupture d'un filament, est assurée par la matrice (figure 3 [3]) et que la protection des renforts vis-à-vis des actions extérieures (ultra violet, hygrométrie,...) est garantie par la matrice et sa tenue à la fissuration (figure 4 [4]).

Parmi les différentes techniques de transformation des composites (moulage au contact, moulage au sac, moulage par injection, infusion de résine, moulage par compression...), un des procédés le plus développé au plan industriel correspond à la fabrication par pultrusion qui permet d'obtenir des taux de renforcement supérieurs à 50 % en volume ainsi qu'une plus grande reproductibilité et fiabilité des PRV.

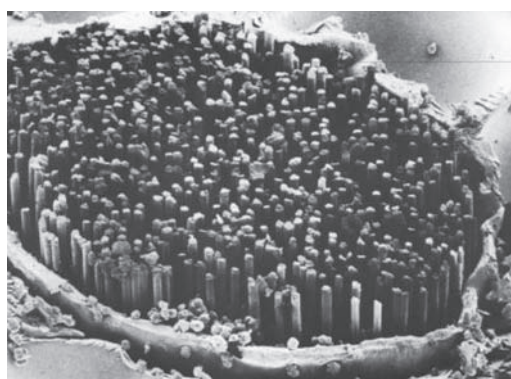


Figure 1 – Micrographie d'un FRP unidirectionnel

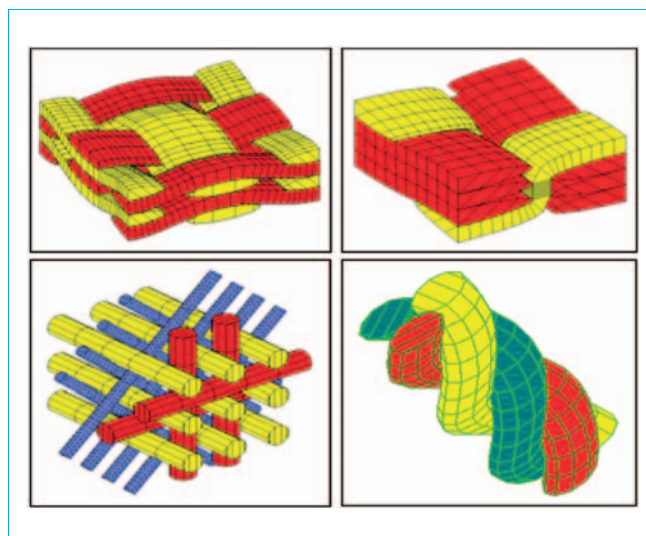


Figure 2 – Différentes configurations d'armures textiles

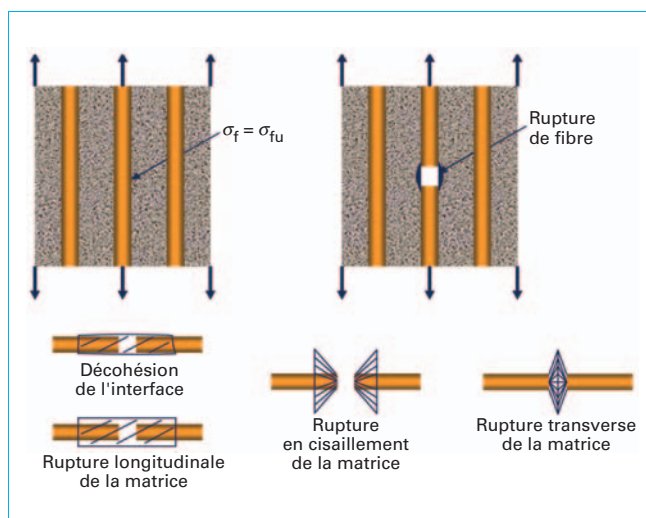


Figure 3 – Divers mécanismes de rupture d'un composite unidirectionnel

Il est par ailleurs possible de produire des profilés ou des barres joncs de FRP ou PRV de natures et de géométries variables (figure 5 [5]).

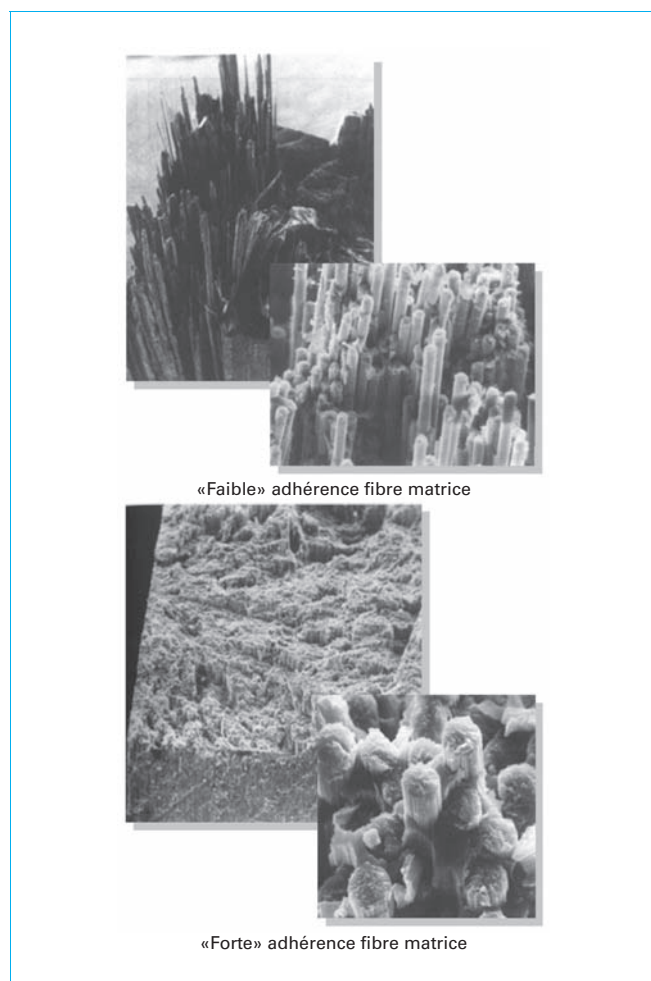


Figure 4 – Différents modes de rupture en fonction de l'adhérence fibre/matrice

1.2 Diverses formulations de FRP

1.2.1 Fibres de renforcement

Les différentes natures de fibres couramment utilisées sont le verre, le carbone, l'aramide et, plus récemment, le basalte.

Les principaux facteurs permettant d'identifier les fibres de renforcement sont :

- le titre du fil (masse linéique) ;
- la torsion du fil ;
- le diamètre des filaments (compris entre 10 et 20 microns) ;
- le nombre de brins (filés de 1 000, 3 000 filaments) ;
- le traitement de surface (ensimage textile) [54].

L'examen des diagrammes des figures 6 [54] et 7 [6] permet de dégager les différences significatives existant entre les différents types de fibres :

- module d'élasticité plus élevé pour le carbone ;
- allongement à la rupture plus fort pour le verre ;
- ténacité plus importante pour l'aramide.

Le tableau 1 [6] confirme que, pour chaque production industrielle de FRP, il est impératif de se faire préciser les principales caractéristiques des fibres de renforcement.

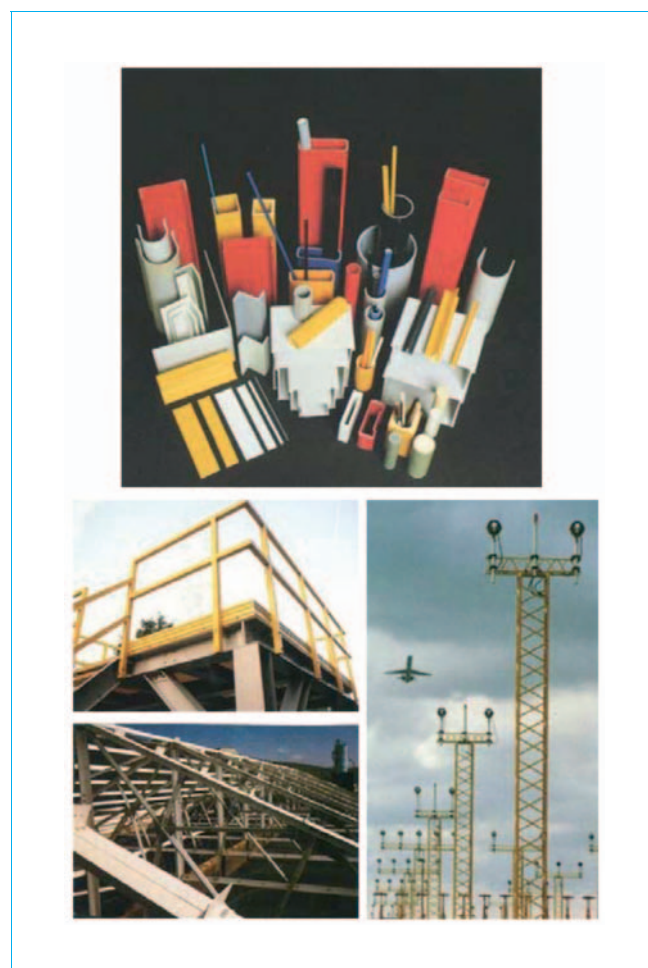


Figure 5 – Différentes géométries de composites pultrudés et exemples d'applications structurelles

Il faut aussi noter l'importance de considérer, lors des opérations de dimensionnement, des propriétés complémentaires, telles que le coefficient de dilatation linéaire, les coefficients de conductivité thermique et la durabilité des fibres dans leur milieu environnant en service (ex. alcali résistance).

■ Fibres de verre

Leurs formulations, leurs propriétés physico-chimiques, leurs techniques de fabrication et de transformation sont développées dans le chapitre fibres minérales de renforcement du volume « plastiques et composites des techniques de l'ingénieur », ([54], [55]).

Il faut souligner que le traitement de surface (ensimage) de la fibre lors de la fabrication (figure 8 [55]) permet de :

- modifier de façon significative son imprégnation par la matrice lors des opérations de formage ou de pultrusion ;
- minimiser les effets d'endommagement ou d'abrasion des filaments pendant les différentes phases de transformation ;
- modifier les propriétés d'interface ou d'interphase entre fibres et matrice et, en conséquence, d'influencer les propriétés mécaniques des FRP et leurs durabilités dans des conditions d'environnement spécifiques au génie civil.

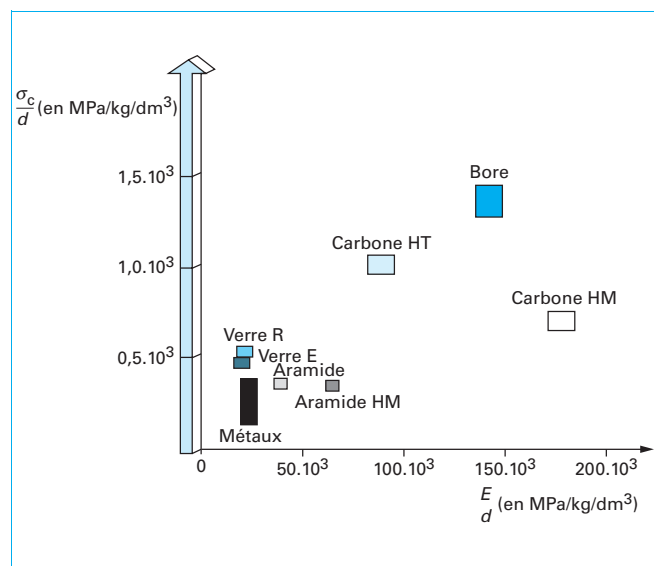


Figure 6 – Performances des composites – Résistances et modules spécifiques

Pour des raisons économiques, la fibre de verre E est la plus couramment utilisée. Le verre S est plus performant mais d'un coût plus élevé. Les fibres de verre AR (alcali résistant) sont de plus en plus utilisées, dans la mesure où l'ajout de zirconium dans la formulation initiale permet d'améliorer la résistance des fibres en milieu alcalin (figure 9 – se reporter au site Owens-Corning dans le *Pour en savoir plus*).

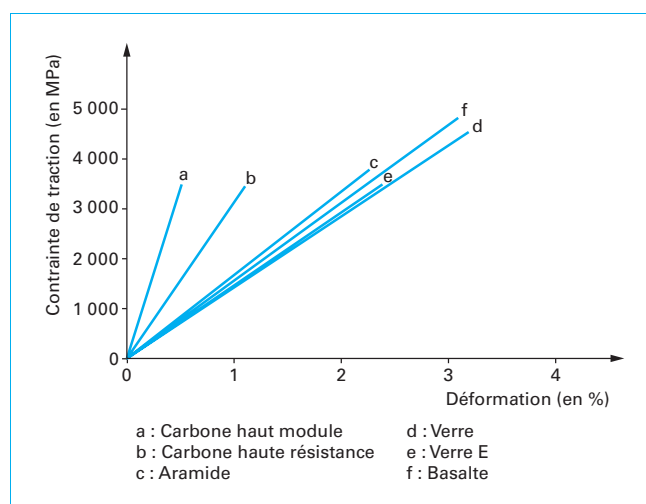


Figure 7 – Différentes lois de comportements des fibres

■ Fibres de carbone

La majorité des fibres de renforcement en carbone sont obtenues par traitement thermique de fibres, précurseur de poly-acrylonitrile (PAN), (figure 10 [56], [57]). Les données générales sont décrites au chapitre fibres de renforcement des techniques de l'ingénieur [56]. Bien que le coût soit de 10 à 20 fois plus élevé que la fibre de verre, les propriétés mécaniques (résistances et modules d'élasticité) sont directement dépendantes du mode de structuration des cristallites (figure 11 [7]) et sont comparables à celle de l'acier pour des densités nettement plus faibles.

Tableau 1 – Propriétés des fibres de renforcement

Type de fibres	Densité (en kg.m³)	Résistance en traction (en Mpa)	Module de Young (en GPa)	Allongement rupture (en %)	Coefficient de dilatation thermique (en 10 ⁻⁶ /°C)	Coefficient de poisson
Verre E	2 500	3 450	72,4	2,4	5	0,22
Verre S	2 500	4 580	85,5	3,3	2,9	0,22
Verre alcali resistant	2 270	1 800-3 500	70-76	2,0-3,0	-	-
ECR	2 620	3 500	80,5	4,6	6	0,22
Carbone (haut module)	1 650	2 500-4 000	050-500	0,5	- 1,2...- 0,1	0,20
Carbone (haute résistance)	1 750	3 500	240	1,1	- 0,6...- 0,2	0,20
Aramide (Kevlar 29)	1 440	2 760	62	4,4	- 2,0 longitudinal 59 radial	0,35
Aramide (Kevlar 49)	1 440	3 620	124	2,2	- 2,0 longitudinal 59 radial	0,35
Aramide (Kevlar 149)	1 440	3 450	175	1,4	- 2,0 longitudinal 59 radial	0,35
Aramide (Technora H)	1 390	3 000	70	4,4	- 6,0 longitudinal 59 radial	0,35
Aramide (SVM)	1 430	3 800-4 200	130	3,5	-	0,35
Basalte (Albarrie)	2 800	4 840	89	3,1	8	0,30

The figure consists of two side-by-side scanning electron micrographs (SEM) of glass surfaces. The left image, labeled (a), shows a highly textured and eroded surface with deep grooves and a rough, irregular appearance. The right image, labeled (b), shows a much smoother surface with distinct, parallel vertical ridges or grooves, indicating a more stable and less degraded state.

C 950 – 5

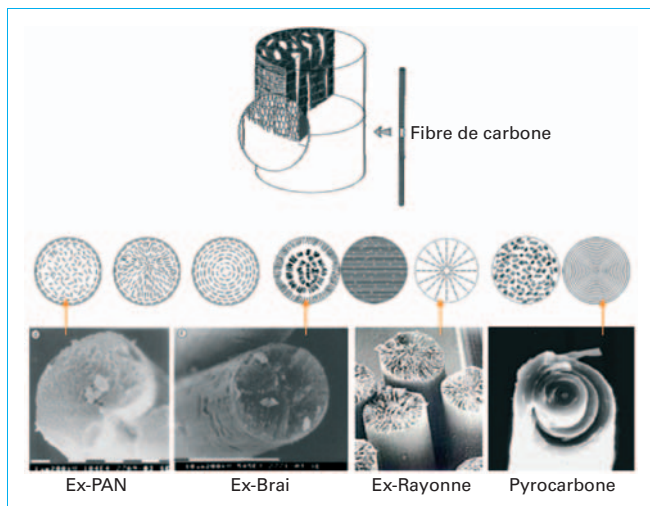


Figure 11 – Différentes configurations de microstructure de fibres de carbone

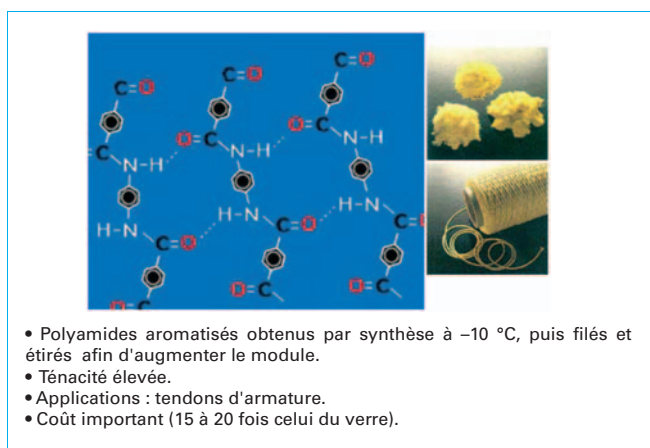


Figure 12 – Fibres d'aramide

La fibre de basalte est produite suivant un procédé proche de celui de la fibre de verre (figure 13 – site Technobasalt dans *Pour en savoir plus*). La roche est broyée, concassée, puis mise en fusion aux environs de 1500°C , étirée pour obtenir des filaments qui peuvent ensuite être conditionnés sous forme de roving ou de fibres courtes (figure 14 – voir les sites concernés dans *Pour en savoir plus*).

Les dimensions des filaments sont comprises entre 13 et 20 microns, pour une densité de $2,8\text{ T/m}^3$ avec des titres compris entre 60 et 4 850 tex.

Les différents types de fibres peuvent être transformés suivant des techniques, telles que le tissage, tricotage, tressage pour réaliser des surfaces textiles ou étoffes [54]. Il est possible de générer des tissus de renfort bi ou tridimensionnel (figure 15 [8], [9], [54]).

1.2.2 Matrices polymères

Les principaux paramètres qui influencent les propriétés des polymères sont les suivants :

- la masse moléculaire ;
- la distribution des masses moléculaires ;
- le taux de cristallinité ;

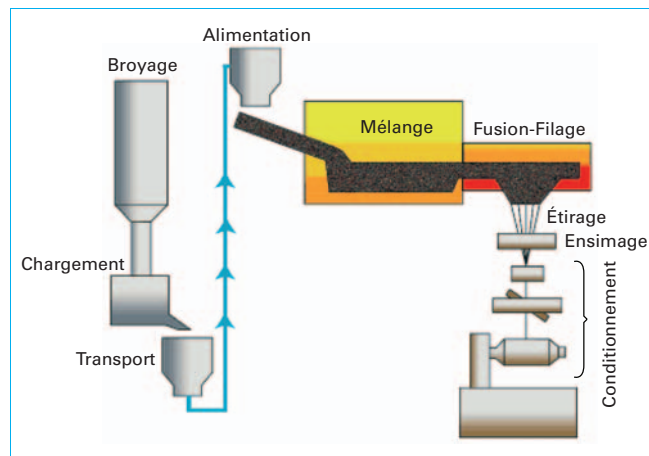


Figure 13 – Procédé de fabrication des fibres de basalte (Crédit Technobasalt)



Figure 14 – Différentes productions de fibres de basalte (Crédit Composite World)

– l'organisation du réseau macro-moléculaire (figure 16).

Une des caractéristiques essentielles pour identifier un polymère correspond à la température de transition vitreuse T_g , qui est susceptible de varier en fonction des conditions de transformation, de vieillissement ([59], [60]). Les matrices polymères sont douées d'un comportement viscoélastique qui gouverne leurs comportements rhéologiques (fluage et relaxation).

Leurs propriétés mécaniques varient en fonction de la fréquence et de la température (figures 17 et 18) et permettent d'identifier un polymère à partir de l'expression d'un module complexe.

$$E^* = E(1 + jtg\delta)$$

avec $tg\delta$ tangente de l'angle de perte mécanique de la matrice.

Cet amortissement interne peut être relié d'un point de vue physique au frottement induit par l'interaction entre chaînes (figure 18 [11], [12], [62], [65]).

Nous devons considérer deux grandes familles de matrices polymères :

- les **résines thermodurcissables** dont la structuration du réseau macromoléculaire, soit par polymérisation, soit par polycondensation ou polyaddition [59], est irréversible ;

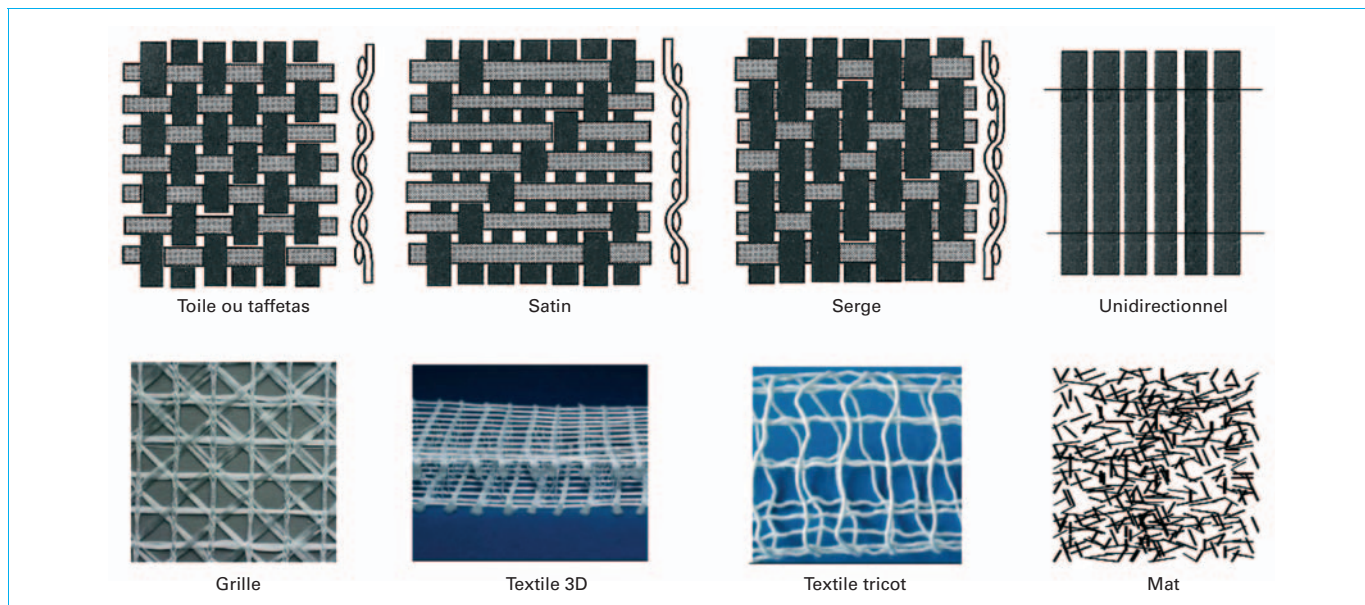


Figure 15 – Différentes configurations d'armures textiles

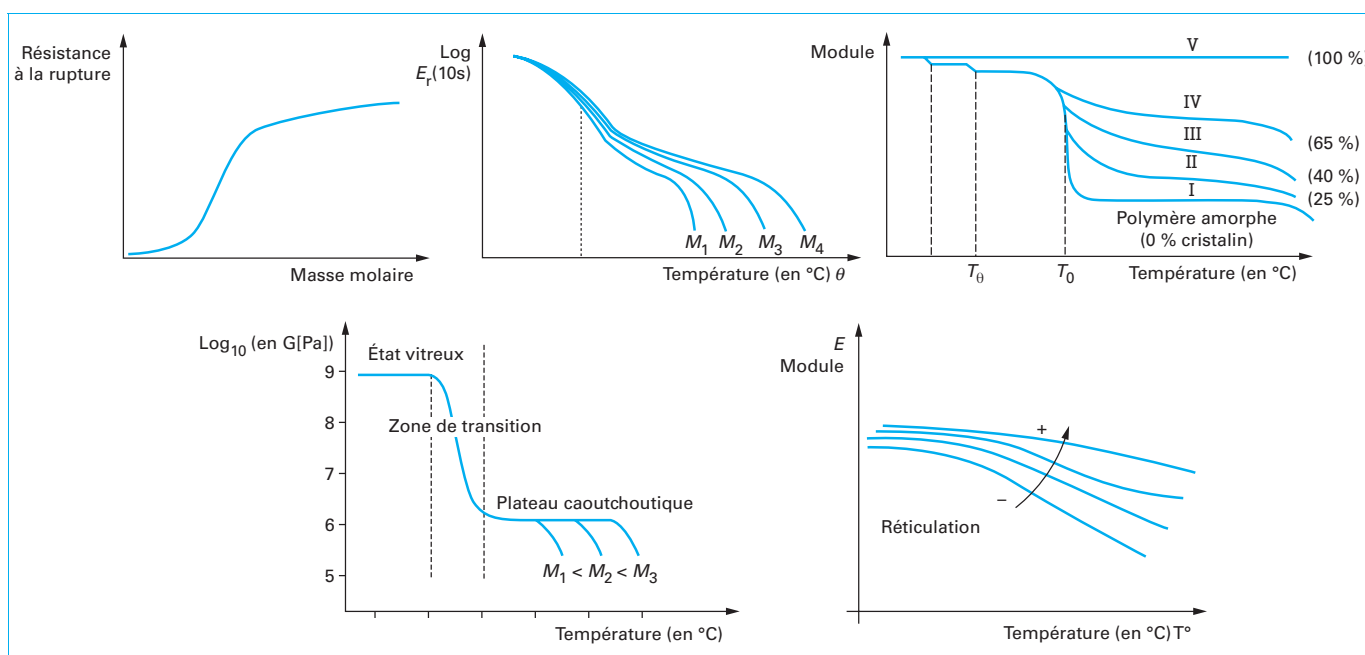


Figure 16 – Paramètres essentiels influençant les propriétés des polymères thermodurcissables

– les **résines thermoplastiques** pour lesquelles il est possible de rendre réversible l'opération de formage et, en conséquent, d'envisager plusieurs cycles de réutilisation.

■ Résines thermodurcissables

Les principales résines TD utilisées pour les FRP sont les polyesters, les époxydes, les vinylesters. Leurs caractéristiques sont celles décrites dans le tableau 2 [6].

Il faut souligner que les cycles de thermo-durcissement peuvent être optimisés en fonction des différents procédés de

transformation (moulage au contact, moulage à la presse, moulage par pultrusion...) en modifiant les conditions d'activation thermique (catalyseur/accélérateur, cycle de durcissement).

Il faut aussi retenir que les conditions de température et d'humidité relative lors des opérations de moulage et de formage sont susceptibles d'influencer, de façon significative, les propriétés instantanées et les propriétés différées des polymères.

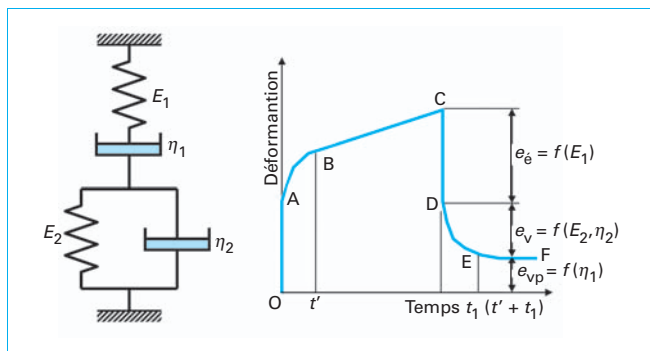


Figure 17 – Comportement viscoélastique et modèle rhéologique des polymères vis-à-vis du fluage (avant t_1 fluage, après t_1 recouvrance)

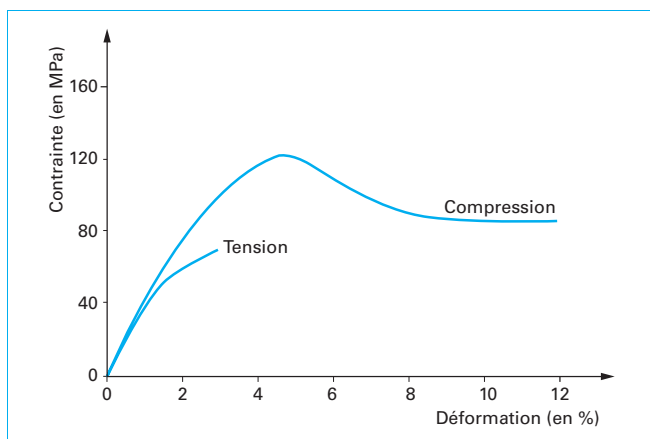


Figure 19 – Différence de lois de comportement entre traction et compression

Il se peut que le thermo-durcissement ne soit pas complet lors de l'opération de moulage et, en conséquence, une opération de post-cure (étuvage) ou un temps de maturation à la température ambiante peut être recommandé.

Lors du thermo-durcissement, des variations dimensionnelles de retrait peuvent être induites et créer des contraintes internes dans les FRP si le retrait est empêché par la présence de fibres. Pour minimiser les variations dimensionnelles de retrait, il est possible d'envisager l'addition de charges minérales qui améliorent aussi la tenue au feu et la stabilité au fluage.

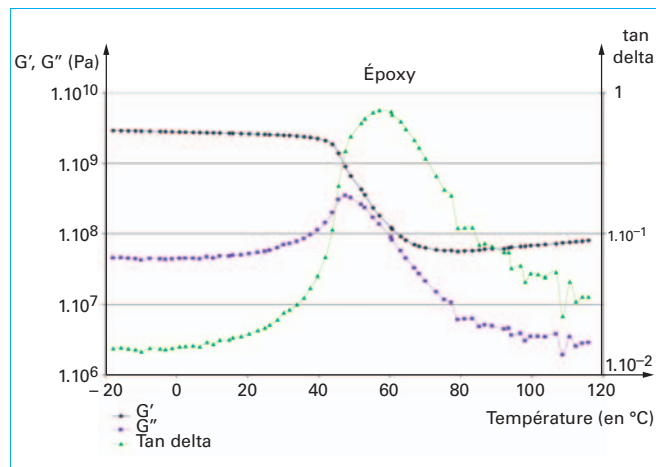


Figure 18 – Mesure des modules complexes de la résine époxy en fonction de la température, ou de la fréquence, à partir d'un visco-élasticimètre

Il faut retenir que les lois de comportement sont différentes en traction et en compression (figure 19 [6]) et que les lois de comportement peuvent varier en fonction de la température et de la vitesse de chargement (figure 20 [13], [14]).

■ Matrices thermo plastiques

Les principales familles de matrices thermo-plastiques susceptibles d'être utilisées dans les FRP (tableau 3) [6] sont :

- le polypropylène ;
- le polyester-éther-cétone (PEEK) ;
- le polysulfone (PSUL).

La stabilité en température des matrices pour les premières formulations est un point faible. Par contre, l'aptitude au thermo formage permet d'envisager des possibilités de réparation et de recyclage, qui sont forts intéressantes pour respecter les critères du développement durable.

1.3 Exemple de produits industriels

À partir des principaux composants présentés préalablement, nous pouvons distinguer trois grandes catégories de demi-produits industriels utilisés pour la construction :

- les barres ou armatures composites ;
- les plats pultrudés pour renforcement par collage ;
- les tissus techniques pour stratifiés.

Tableau 2 – Caractéristiques physiques et mécaniques des matrices polymères

	Masse spécifique (en kg/dm ³)	Module d'élasticité (en Gpa)	Coefficient de poisson	Résistance en traction (en Mpa)	Module de cisaillement (en Mpa)	Allongement à la rupture (en %)	Tenue à la température en continu (en °C)
Polyester	1,2	2,9 – 3,1	0,4	50 – 60	1 400	2 – 3	120
Vinylester	1,1	3,4 – 3,5	0,4	70 – 85	1 200	2 – 5	100 – 140
Époxyde	1,1 – 1,4	3	0,4	50 – 120	1 600	3 – 8	150 – 200
Polyimide	1,4 – 1,5	4 – 20	0,4	30 – 40		< 1	250 – 300
Phénolique	1,3	3,8 – 7	0,4	50	1 100	1 – 1,5	120 – 150

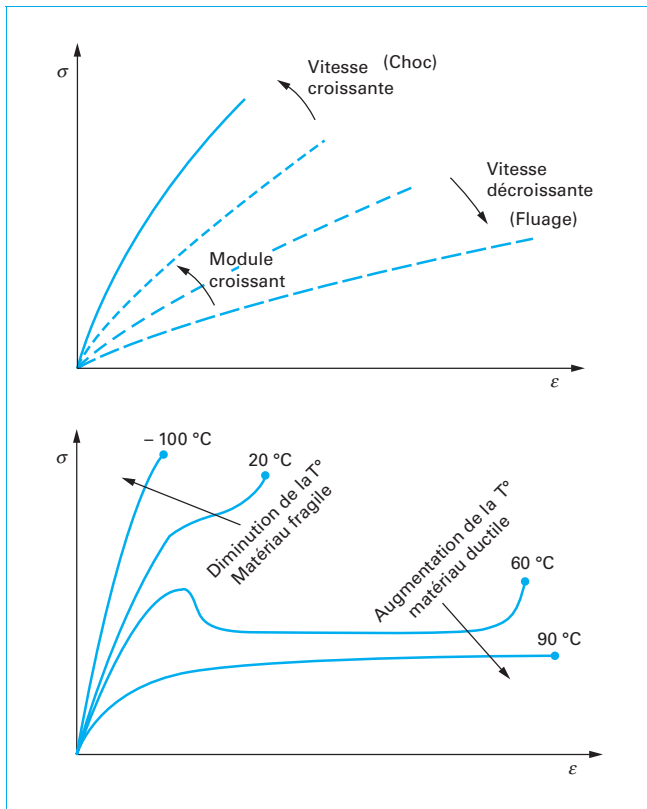


Figure 20 – Influence de la vitesse de chargement ou de la température sur les lois de comportement en traction des polymères

Tableau 3 – Propriétés des matrices thermo-plastiques

Propriétés	Matrices		
	PEEK	PPS	PSUL
Densité (en kg/m ³)	1 320	1 360	1 240
Resistance traction (en MPa)	100	82,7	70,3
Module traction (en GPa)	3,24	3,30	2,48
Allongement traction (en %)	50	5	75
Coefficient de poisson	0,40	0,37	0,37
Coefficient de dilatation thermique (en 10 ⁻⁶ /°C)	47	49	56

■ Barres ou armatures composites

Les barres ou armatures composites peuvent être formées suivant différentes géométries (de 5 à 38 mm) : section circulaire, section rectangulaire, en forme de T, de Y (figure 21) combinant des fibres de carbone, de verre, d'aramide avec des matrices polyester, vinylester, époxydes [15] – Consulter aussi le *Pour en savoir plus*.

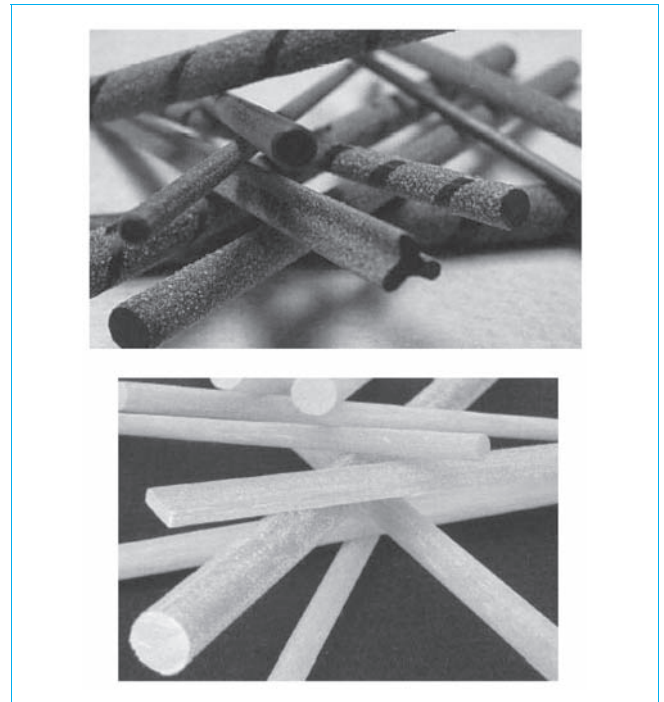


Figure 21 – Différentes sections géométriques de barres composites pultrudées

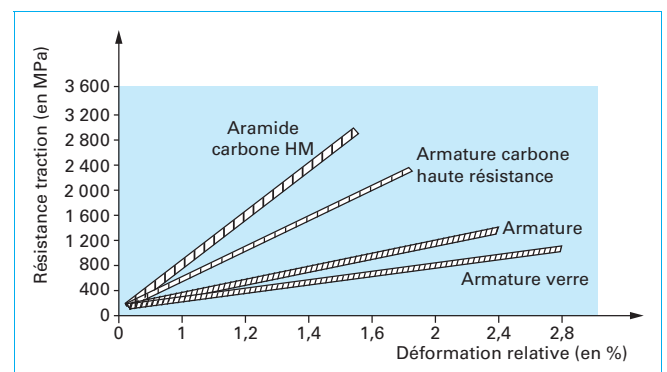


Figure 22 – Courbe contrainte/déformation de différentes armatures composites pour le béton armé

Comme le montre la figure 22 et le tableau 4, il est possible de couvrir une large gamme de propriétés mécaniques, aussi bien en résistance (1 000 à 2 500 MPa) qu'en module d'élasticité (100 à 500 GPa).

Le traitement de surface pour améliorer l'adhérence avec le béton peut être obtenu par usinage ou par dépôt superficiel, lors de la fabrication des barres, de particules spécifiques de quartz pour modifier la rugosité de surface (figure 21).

Il faut faire état de récents produits industriels qui combinent directement des fibres de renforcement de verre avec des matrices thermoplastiques. Le twintex RPP (tableau 5 (se reporter au site Owens-Corning dans le *Pour en savoir plus*)) correspond à un rowing constitué de fibres co-mêlées de verre E et de polypropylène. La consolidation est obtenue par chauffage à 180 °C-230 °C et par pressage et permet de réaliser des joncs de sections variables.

Tableau 4 – Propriétés mécaniques des armatures composites pour béton en fonction des différents types de fibres

Type d'armatures	GLASSPREE (verre)	CARBOPREE (carbone)	ARAPREE (aramide)
Résistance traction (en MPa)	1 000	2 300	1 400
Module d'élasticité (en GPa)	40	130	60
Déformation ultime (en %)	2,8	1,8	2,4
Diamètre nominal (en mm)	de 10 à 32	de 5 à 16	de 5,5 à 10
Surface (en mm ²)	de 78 à 800	de 19 à 200	de 23 à 78
Charge maximum (en kN)	de 78 à 800	de 44 à 460	de 32 à 110

Comme le confirme le tableau 6 (voir le site Shappe dans le *Pour en savoir plus*) les propriétés de composites unidirectionnels fabriqués à partir de fibres de carbone courtes de longueur comprises entre 60 et 120 mm (TPFL – Shappe, [16]) peuvent présenter des résistances comparables à un système composite plus classique, combinant matrice époxy et fibres continues.

Tableau 7 – Caractéristiques mécaniques de plats pultrudés à renfort carbone haute résistance ou haut module (d'après Sireg)

Carboprée plats pultrudés	Haute résistance	Haut module
Résistance traction (en Mpa)	3 000	2 750
Module élastique (en Gpa)	165	200
Déformation maximum (en %)	1,8	1,4
Charge ultime (en kN)	De 180 à 420	De 165 à 385
Épaisseur (en mm)	De 1,2 à 1,4	De 1,2 à 1,4
Largeur	+ de 120	+ de 60

■ Plats composites pultrudés

La seconde catégorie de renforts composites correspond aux plats pultrudés (tableau 7) dont les épaisseurs sont comprises entre 0,6 et 2 mm et les largeurs entre 50 et 150 mm (figure 23). Ces plats sont essentiellement utilisés pour le renforcement de structures existantes (maçonnerie, béton armé, structures métalliques, charpentes en bois).

Après dépolissage ou sablage en surface, ils sont collés sur les ouvrages à réparer par des résines époxydes, généralement chargées et thixotropées.

Tableau 5 – Propriétés de demi-produits verre UD-matrice thermoplastiques, Twintex R.PP

Formulation	Traction		Flexion		Vf (en %)	Orientation fibre [0°]
	σ (en MPa)	E (en GPa)	σ (en MPa)	E (en GPa)		
PP60 unidirectionnel roving verre E polypropylène	760	29,5	740	25,5	60	[0°]
PP53 unidirectionnel roving verre E polypropylène	690	25	610	22	53	[0°]

Tableau 6 – Propriétés de composites carbone-matrices thermoplastiques selon Shappe

Formulation	Traction		Flexion		Vf (en %)	Orientation fibre [0°]
	σ (en MPa)	E (en GPa)	σ (en MPa)	E (en GPa)		
CF/PA12TPFL	1,400	98	1,010	107	53	[0°]
CF/PPS TPFL	1,800	120	1,650	101	53	[0°]
CF/PEEK TPFL	1,850	85	750	92	53	[0°]
Carbone/Epoxy	1,100-1,900	120-140	1,200	125	60	[0°]

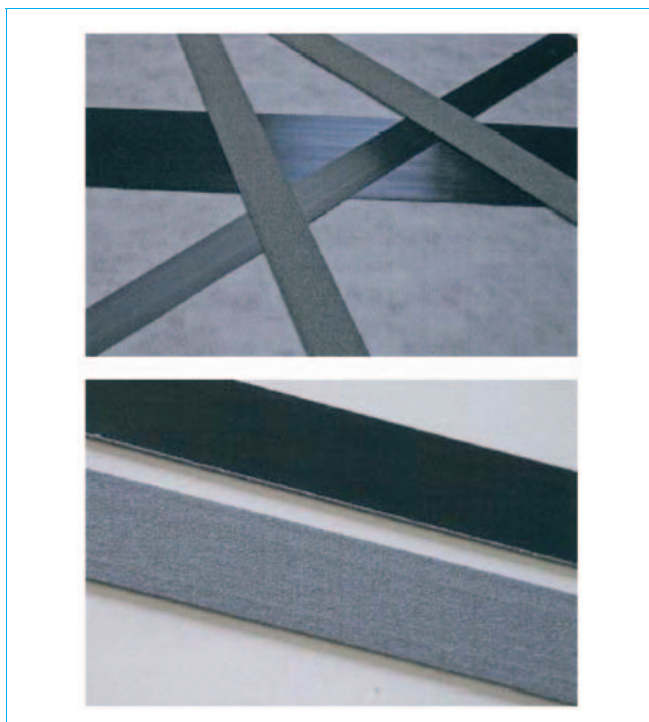


Figure 23 – Différentes configurations de plats pultrudés composites pour renforcement par collage de structures béton armé, métalliques et bois

■ Profils pultrudés

Il est possible de générer des sections géométriques plus complexes (figure 24) et de plus grandes dimensions qui permettent d'atteindre des niveaux de rigidité en flexion acceptables avec des formulations de composite de type verre/polyester, moins coûteuse que le carbone. Le tableau 8 permet de comparer les performances mécaniques de ces produits industriels par rapport à des composants mettant en œuvre des matériaux traditionnels (bois, béton, aluminium).

■ Tissus techniques

Ils sont à imprégner par moulage au contact. La dernière configuration des textiles techniques, utilisée en construction, consiste à employer des tissus de renforcement (figure 25) qui peuvent être transformés *in situ* par des techniques de moulage au sac, ou plus simplement imprégnés de résine (vinylester, époxy) par moulage au contact.

Les ordres de grandeur de l'épaisseur des couches élémentaires varient entre 0,1 et 0,5 mm pour des poids de tissus au m², compris entre 150 gr/m² et 1 200 gr/m² (tableau 9).

■ Technologie de transformation des composites

Les principales techniques de transformation des matériaux composites compatibles avec les différentes applications génie civil sont :

- le moulage au contact ;
- le moulage au sac ;
- l'injection de résine (RTM) ;
- l'infusion de résine ;
- le moulage par compression ;
- l'enroulement filamentaire ;
- la pultrusion.

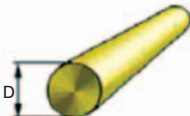
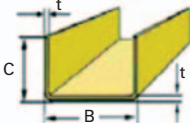

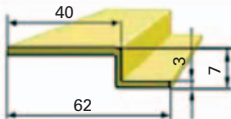
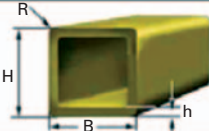
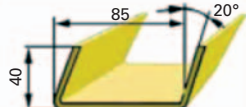
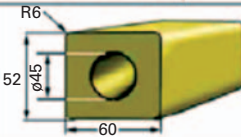
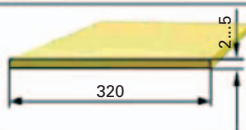
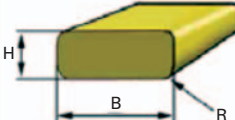
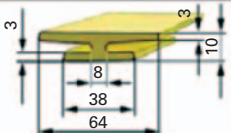
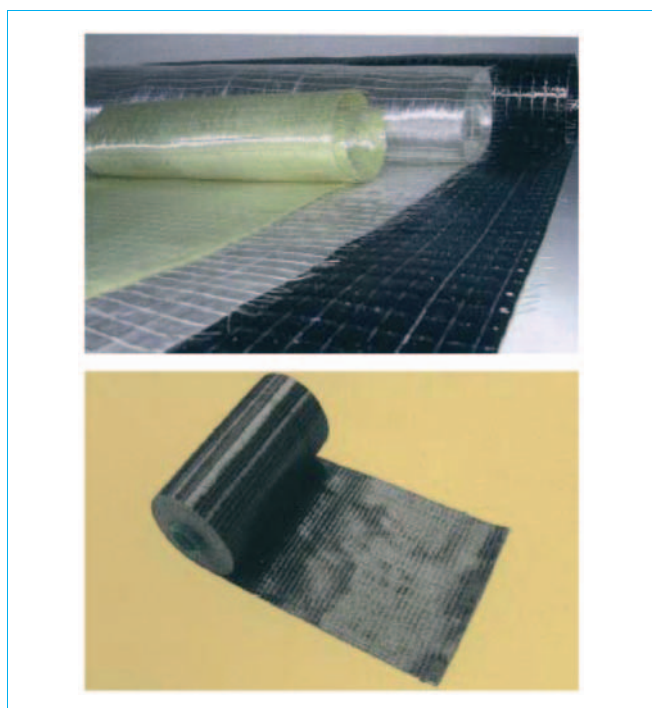
<p>Cylindre</p> <table><tr><th>D mm</th><th>kg/lrunning meter</th></tr><tr><td>15</td><td>0,353</td></tr><tr><td>20</td><td>0,628</td></tr><tr><td>36</td><td>2,035</td></tr><tr><td>42</td><td>2,769</td></tr><tr><td>49</td><td>3,770</td></tr><tr><td>76</td><td>9,068</td></tr><tr><td>80</td><td>10,048</td></tr></table> 	D mm	kg/lrunning meter	15	0,353	20	0,628	36	2,035	42	2,769	49	3,770	76	9,068	80	10,048	<p>Faisceau - U</p> <table><tr><th>B, mm</th><th>C, mm</th><th>t, mm</th><th>kg/lr. m.</th></tr><tr><td>27</td><td>13</td><td>2,3</td><td>0,265</td></tr><tr><td>70</td><td>40</td><td>3</td><td>0,920</td></tr><tr><td>90</td><td>40</td><td>3</td><td>1,020</td></tr><tr><td>400</td><td>120</td><td>14</td><td>17,920</td></tr><tr><td>400</td><td>120</td><td>18</td><td>23,040</td></tr></table> 	B, mm	C, mm	t, mm	kg/lr. m.	27	13	2,3	0,265	70	40	3	0,920	90	40	3	1,020	400	120	14	17,920	400	120	18	23,040
D mm	kg/lrunning meter																																								
15	0,353																																								
20	0,628																																								
36	2,035																																								
42	2,769																																								
49	3,770																																								
76	9,068																																								
80	10,048																																								
B, mm	C, mm	t, mm	kg/lr. m.																																						
27	13	2,3	0,265																																						
70	40	3	0,920																																						
90	40	3	1,020																																						
400	120	14	17,920																																						
400	120	18	23,040																																						
<p>Tuyau</p> <table><tr><th>Dmm</th><th>d mm</th><th>kg/lr. m.</th></tr><tr><td>60</td><td>52</td><td>1,407</td></tr><tr><td>49</td><td>45</td><td>0,590</td></tr><tr><td>76</td><td>45</td><td>5,889</td></tr><tr><td>80</td><td>45</td><td>6,869</td></tr></table> 	Dmm	d mm	kg/lr. m.	60	52	1,407	49	45	0,590	76	45	5,889	80	45	6,869	<p>Z - profilé</p> <table><tr><th>kg/lr. m.</th></tr><tr><td>0,414</td></tr></table> 	kg/lr. m.	0,414																							
Dmm	d mm	kg/lr. m.																																							
60	52	1,407																																							
49	45	0,590																																							
76	45	5,889																																							
80	45	6,869																																							
kg/lr. m.																																									
0,414																																									
<p>Tuyau rectangulaire</p> <table><tr><th>B mm</th><th>H mm</th><th>t mm</th><th>R_i</th><th>R_e</th><th>kg/lr. m.</th></tr><tr><td>60</td><td>52</td><td>4</td><td>6</td><td>3</td><td>1,664</td></tr></table> 	B mm	H mm	t mm	R _i	R _e	kg/lr. m.	60	52	4	6	3	1,664	<p>Faisceau - U avec parois oblique</p> <table><tr><th>kg/lr. m.</th></tr><tr><td>1,026</td></tr></table> 	kg/lr. m.	1,026																										
B mm	H mm	t mm	R _i	R _e	kg/lr. m.																																				
60	52	4	6	3	1,664																																				
kg/lr. m.																																									
1,026																																									
<p>Tuyau rectangulaire avec orifice circulaire</p> <table><tr><th>kg/lr. m.</th></tr><tr><td>3,061</td></tr></table> 	kg/lr. m.	3,061	<p>Panneau plastique lame</p> <table><tr><th>Толщина мм</th><th>kg/lr. m.</th></tr><tr><td>2</td><td>1,280</td></tr><tr><td>3</td><td>1,920</td></tr><tr><td>4</td><td>2,560</td></tr><tr><td>5</td><td>3,200</td></tr></table> 	Толщина мм	kg/lr. m.	2	1,280	3	1,920	4	2,560	5	3,200																												
kg/lr. m.																																									
3,061																																									
Толщина мм	kg/lr. m.																																								
2	1,280																																								
3	1,920																																								
4	2,560																																								
5	3,200																																								
<p>Faisceau</p> <table><tr><th>B mm</th><th>H mm</th><th>R mm</th><th>kg/lr. m.</th></tr><tr><td>30</td><td></td><td></td><td>0,720</td></tr><tr><td>40</td><td>12</td><td>3</td><td>0,960</td></tr><tr><td>50</td><td></td><td></td><td>1,200</td></tr></table> 	B mm	H mm	R mm	kg/lr. m.	30			0,720	40	12	3	0,960	50			1,200	<p>H - profilé</p> <table><tr><th>kg/lr. m.</th></tr><tr><td>0,722</td></tr></table> 	kg/lr. m.	0,722																						
B mm	H mm	R mm	kg/lr. m.																																						
30			0,720																																						
40	12	3	0,960																																						
50			1,200																																						
kg/lr. m.																																									
0,722																																									

Figure 24 – Diverses géométries de profilés composites industriels

Tableau 8 – Comparaison entre les performances de pultrudés et des matériaux traditionnels

Propriétés	FRP pultrudés	Béton	Acier 16D	Aluminium	Bois
Résistance traction longitudinal (en MPa)	240	36	370	220	80
Résistance traction transversal (en MPa)	50	36	370	220	0,4
Module élastique (en GPa)	28	40	206	71,0	9
Résistance au choc (en kgfxm/sm)	1,5	–	1,5	–	–
Densité (en tons/m ³)	1,9	2,4	7,7	2,75	0,6
Coefficient de dilatation thermique (en 10 ⁻⁶ , °K ⁻¹)	4/11	–	11,9	22,9	2-6
Chaleur spécifique (en J/k°C)	1 100	–	460	880	1 700
Conductivité thermique (en Watt/m°C)	0,3	–	45	203	0,29

**Figure 25 – Exemples de tissus techniques pour stratification au contact ou infusion de composite**

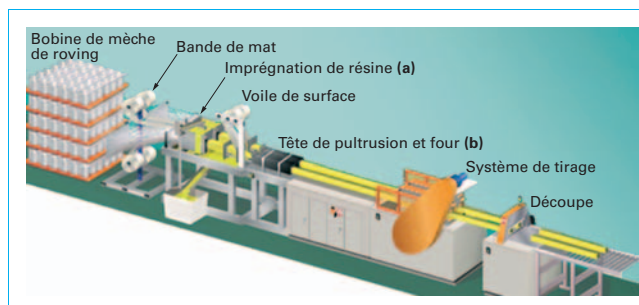
L'ensemble de ces différents procédés sont développés dans le volume matériaux des techniques de l'ingénieur [59].

C'est essentiellement cette dernière technique de transformation qui est utilisée pour produire les barres composites, ou les plats composites présentés précédemment.

La technologie (figure 26 – voir le site Schoeck-combar dans le *Pour en savoir plus*) consiste à étirer des fils unidirectionnels dans un bac d'imprégnation (a sur la figure 26) puis de réaliser une section de pièce en choisissant une géométrie de tête de pultrusion (b sur la figure 26). Le durcissement, ou le formage, de la matrice est obtenu par chauffage ou activation thermique au niveau de la tête de pultrusion et peut être poursuivi par un étuvage. Pour utiliser des renforts textiles plus complexes, il est possible de dérouler des bandes de tissus à la place des mèches de roving.

Tableau 9 – Propriétés mécaniques de couches de composites à renforts textile (d'après Sireg)

Tissus de référence	CARBOPREE (carbone)	GLASPREE (verre)
Résistance traction (en MPa)	+ de 3 500	+ de 2 000
Module élastique (en GPa)	230	70
Déformation maximum (en %)	De 1,5 à 3	De 2 à 4,4
Epaisseur (en mm)	De 0,165 à 0,345	De 0,235 à 0,470
Grammage (en gr/m ²)	De 300 à 600	De 600 à 1 200
Tissage	Unidirectionnel ou bidirectionnel	
Largeur (en mm)	500 à 1 200	

**Figure 26 – Banc de pultrusion** (Crédit Schoeck-combar)

1.4 Différents cas d'application en génie civil

Nous pouvons considérer quatre grands domaines d'applications des composites dans la construction :

- les structures, ou éléments de structures, mettant en œuvre des profilés pultrudés, ou des éléments mixtes combinant pultrudés composites et matériaux traditionnels ;

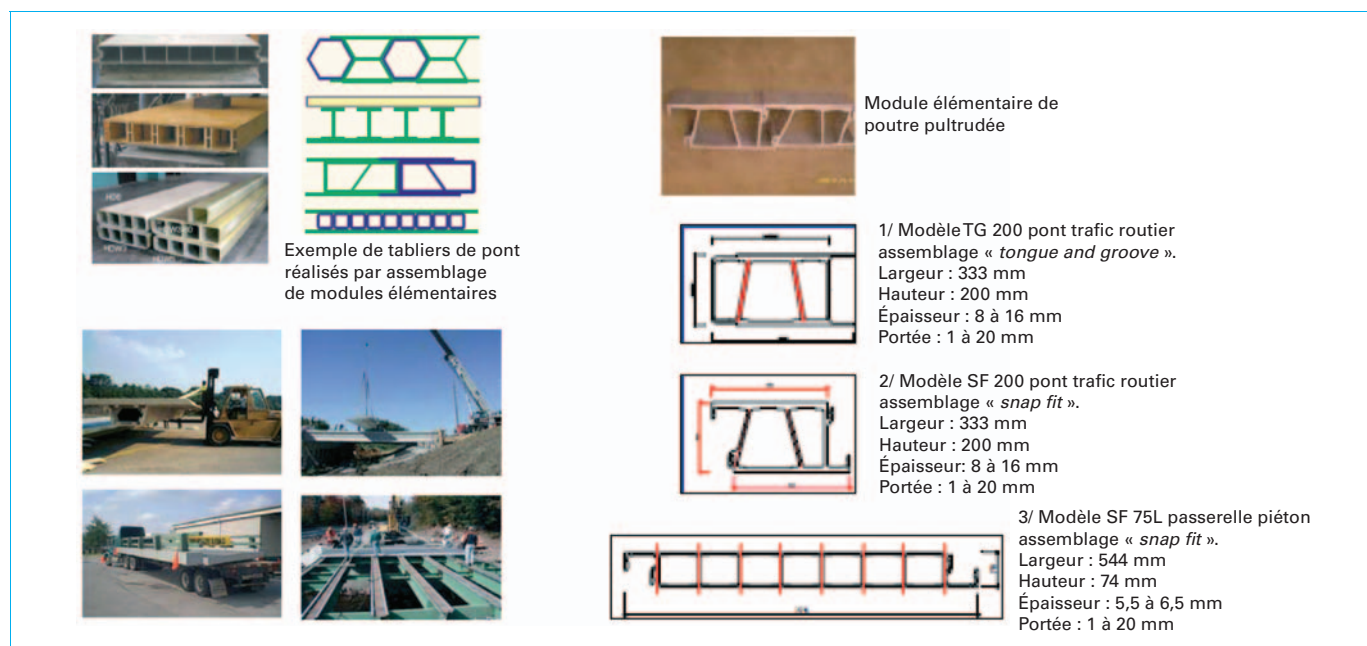


Figure 27 – Exemple de différentes sections de tabliers de ponts pultrudés

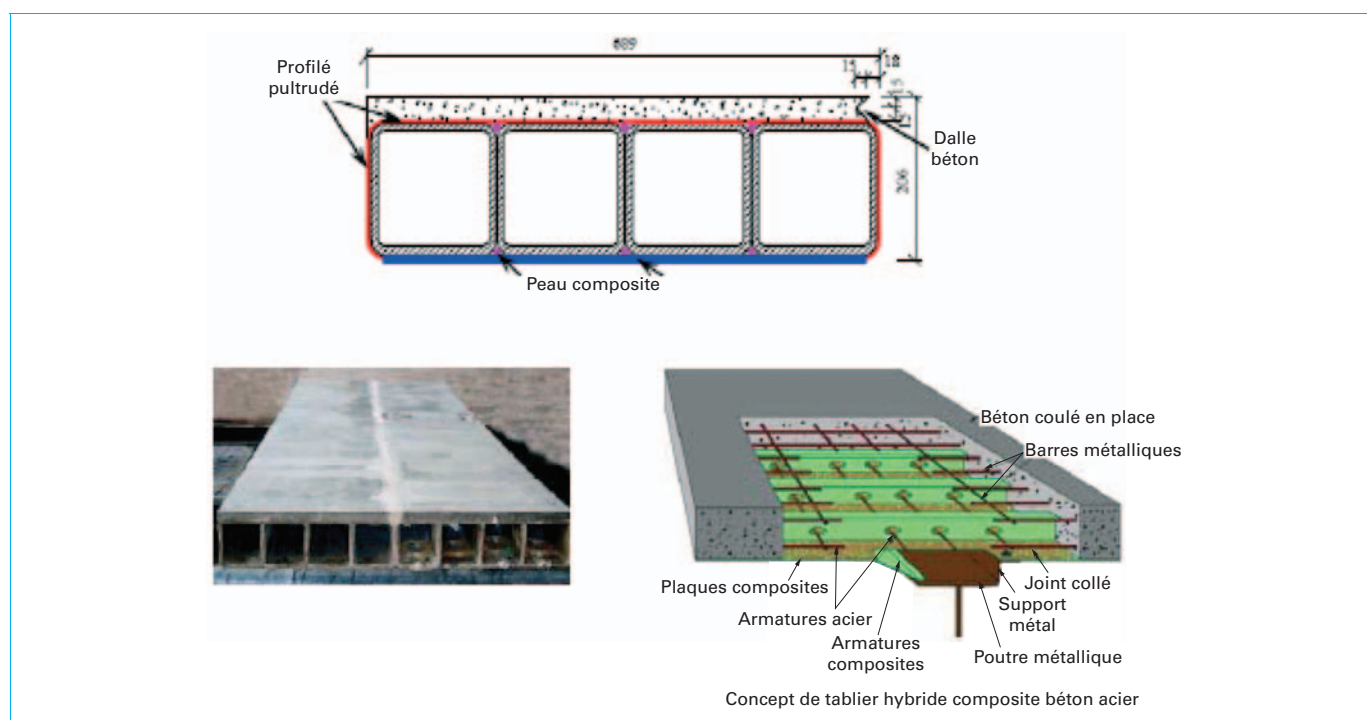


Figure 28 – Structure mixte béton/composite pour tabliers de pont

- les câbles et haubans de substitution aux câbles métalliques ;
- les armatures passives de substitution à l'acier dans le cas du béton armé ;
- les composites de renforcement, de réparation, de protection pour améliorer la durabilité et la sécurité des ouvrages existants en béton armé, en bois, en acier.

1.4.1 Structures composites ou mixtes

Les éléments structuraux sont des planchers, ou des tabliers de pont, obtenus par la pultrusion de profils de géométrie plus ou moins complexes (figure 27 [17], [18]) et assemblés entre eux mécaniquement ou par collage (figure 28 [18], [19]).



Figure 29 – Exemple de ponts mettant en œuvre des tabliers composites de différentes portées en Corée



Figure 30 – Pont ou passerelles en composites pultrudés

Les exemples de tabliers de pont provisoires ou définitifs, réalisés à partir de caissons composites, sont nombreux (figure 29 [17]) particulièrement en Corée, en Chine, aux USA et au Japon.

Leur faible poids propre, leur facilité de levage et de mise en place, leur bonne tenue à la fatigue et à la corrosion sont les principaux arguments avancés par rapport aux procédés constructifs traditionnels.

Les nombreux ouvrages expérimentaux concernent essentiellement les passerelles pour piétons (figure 30 [20], [21]) et on voit apparaître des projets de plus en plus ambitieux vis-à-vis des performances (figure 31 [20]) et des domaines d'application, notamment dans des situations exceptionnelles de remplacement à court terme de tronçons d'ouvrages défaillants (pont autoroutier, pont de chemin de fer) [18].



Figure 31 – Exemple de prototype de pont (portée 6 m – 15 m) pour chemin de fer en structure FRP pultrudé

Une application non porteuse, ou faiblement travaillante, des profilés ou des coques composites consiste à réaliser des enveloppes de protection des ouvrages existants (figure 32 [19]) pour minimiser le vieillissement des poutres porteuses (béton armé, béton précontraint, métallique) sous l'action des conditions environnementales et conférer des propriétés esthétiques originales à l'ouvrage.

1.4.2 Câbles et haubans de substitution

Les principaux avantages avancés pour remplacer les câbles métalliques par des câbles composites (figures 33 ([21], [22]) et 34 – voir le site Sireg du *Pour en savoir plus*) portent sur le poids propre plus faible, la tenue à la corrosion, l'aptitude à la déformation et, dans le cas de la précontrainte, la minimisation des pertes de précontraintes par relaxation ([24], [25]).



Figure 32 – Enveloppe de protection « *enclosure system* » en composite pour limiter la dégradation d'ouvrages en béton ou acier

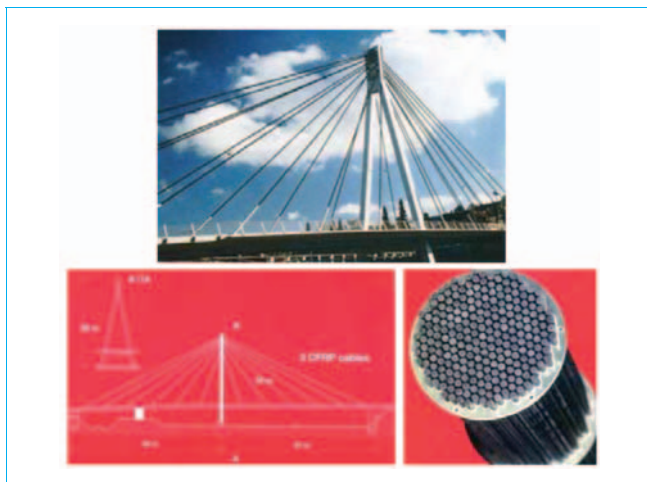


Figure 33 – Joncs pultrudés pour réalisation de haubans

1.4.3 Armatures passives pour le béton armé

Sous forme d'armatures, de treillis, de cadres pour renforcer des éléments structuraux en béton armé (figure 35), les joncs ou barres pultrudés permettent de réaliser des ferrailages, de géométrie parfois complexe, adaptés à des ouvrages particuliers (voute de tunnel, canalisation, canaux, portique de péage autoroutier...).

Le caractère élastique fragile des armatures composites est exploité pour les travaux provisoires, notamment dans les galeries souterraines, car elles facilitent les opérations de perçage ultérieures réalisées par les tunneliers (figures 36 et 37 – voir le site Sireg dans le *Pour en savoir plus*).

Dans le cas d'applications géotechniques, les armatures composites sont aussi valorisées pour leurs très bonnes résistances en traction, leur flexibilité et, par le fait, qu'elles peuvent être combinées à des opérations de drainage et d'injection pour consolider le terrain.

1.4.4 Composites de renforcement, de réparation et de protection

Ce dernier secteur d'application est certainement, à ce jour, le domaine d'application le plus important, car il concerne la mise en sécurité et la protection du patrimoine existant. Comme le montre la figure 38 ([26], [61]), des désordres de types pathologiques, induits par la dégradation des ouvrages (corrosion, abrasion), des

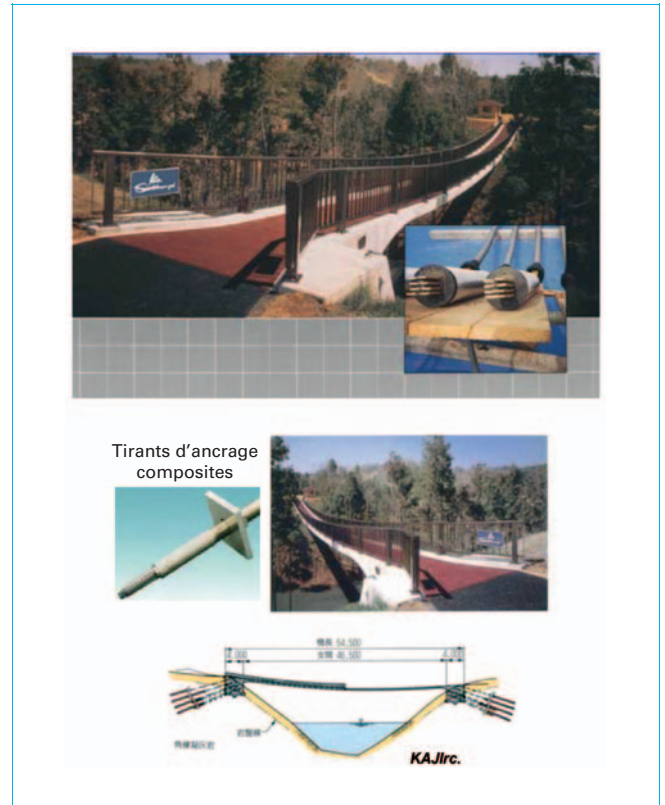


Figure 34 – Câbles de précontrainte en composite (8 plats aramide de 20×5 mm) pour une passerelle pour piétons (MITO Japon (portée 54 m)) (Crédit Sireg)

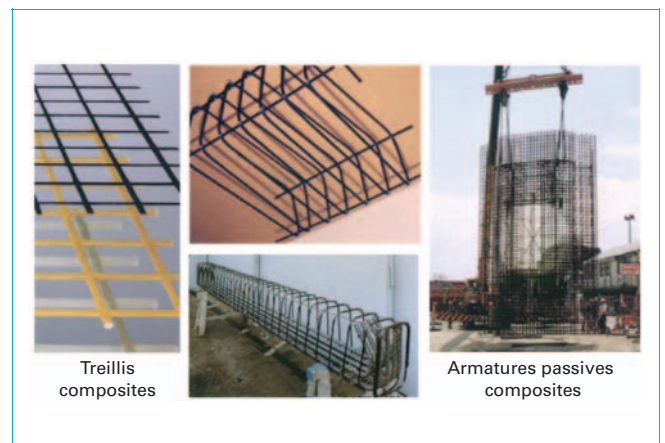


Figure 35 – Armatures pultrudées passives de renforcement du béton (Crédit Nefmac)

modifications des conditions d'exploitation des ouvrages (augmentation des charges de service), la prise en considération de défauts induits par des erreurs de conception ou d'exécution, la nécessité de mettre en sécurité les ouvrages vis-à-vis de sollicitations accidentelles ou extrêmes (choc, explosion, séisme) nécessitent de protéger, de réparer, de renforcer les bâtiments et les infrastructures (figures 39 [27], 40 et 41) ([28], [29]).



Figure 36 – Exemple d'armatures composites pour constructions provisoires (tunnels, de pieux et de piles) (Crédit Sireg)



Figure 37 – Tirants d'ancrage en composites pour travaux de renforcement (Crédit Sireg)

Les types de construction et, les différents éléments structuraux concernés sont cités dans les figures 42 et 43 [5].

Exemple

Pendant la période 1987-2009, le nombre de cas traités en réparation au Japon était d'environ 10 000 cas correspondant à 7 millions de m² pour les composites carbone et 0,3 million de m² pour les composites verre alcali résistant.

Une première estimation du marché mondial actuel est d'environ 5 000 000 de m² par an pour les cas d'application (figures 44 et 45) ([5], [30], [31]).

Le drapage ou le confinement des poteaux par composites est particulièrement performant dans la mesure où il est possible de doubler les capacités portantes en compression. De même, il est



Figure 38 – Différentes situations nécessitant le renforcement des ouvrages



Figure 39 – Diverses situations de réparations (Crédit Sireg)

possible d'augmenter de façon significative le moment de ruine d'une poutre en flexion, ou la résistance au cisaillement de murs maçonneries ([32], [40] et figure 46).

2. FRP comme armatures passives pour béton armé

2.1 Armatures composites

En associant les matrices thermo-durcissables (polyester, époxy) avec différentes fibres (verre, carbone) par des techniques de transformation de pultrusion, il est possible de réaliser des armatures (barres de différentes sections) composites pour le renforcement du béton ou d'autres matériaux de construction (figure 21).

Les tableaux 10 et 11 donnent, pour différentes compositions et formulations, des ordres de grandeur des propriétés physiques et mécaniques. Les expressions de calcul présentées en § 2.2 permettront de rechercher d'autres niveaux de performance en fonction des multiples, et potentielles, combinaisons de formulations.



Figure 40 – Confinement de poteaux par drapage et imprégnation de tissus composites (Crédit Sireg)



Figure 41 – Renforcement de poutres vis-à-vis de l'effort tranchant (Crédit Sika)

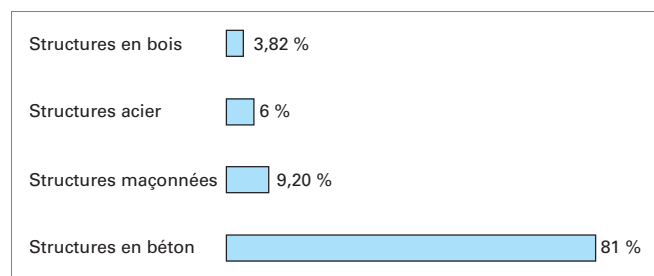


Figure 42 – Types de structures concernées

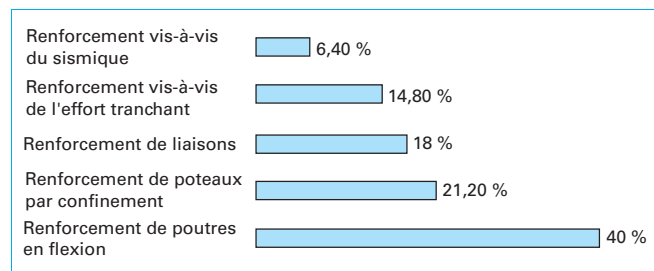


Figure 43 – Domaines d'applications du renforcement

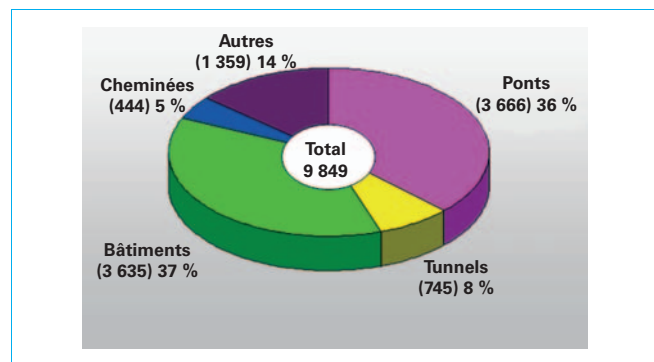


Figure 44 – Répartition du marché de la réparation (fibre de carbone) par type d'ouvrages au Japon

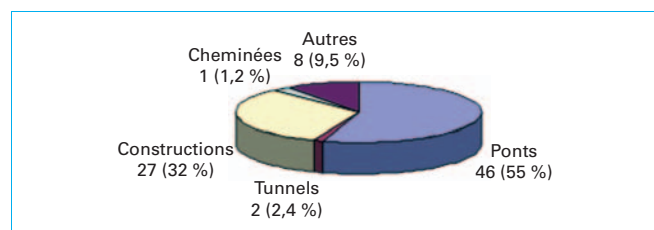


Figure 45 – Répartition du marché de réparation (verre alcali résistant) au Japon

Il faut remarquer que les résistances mécaniques sont plus fortes en traction par rapport à l'acier. Par contre, les valeurs de modules d'élasticité sont nettement inférieures à l'acier.

Il faut aussi signaler que les lois de comportement de ces armatures sont essentiellement linéaires jusqu'à rupture (figure 47 (site Schoeck-combar)), sans présenter le palier de ductilité des barres métalliques. Ce point pose de nombreuses difficultés aux ingénieurs pour dimensionner les ouvrages en respectant des critères



Figure 46 – Réparation de maçonnerie par composite

de sécurité. La limite d'utilisation des armatures sera souvent déterminée en fonction d'une contrainte de service prenant en compte le vieillissement du matériau (cf. § 2.3. Durabilité des FRP). La ductilité pourra éventuellement être obtenue par des combinaisons de drapage, ou l'utilisation de matrices thermoplastiques.

Compte tenu des propriétés de moulage et de formage des joncs, il est possible de concevoir des demi-produits industriels élaborés sous forme :

- de treillis (figures 35, 36, 37) ;
- de cadre de montage ou d'effort tranchant ;
- de barres déformées suivant la géométrie des pièces à mouler.

L'adhérence des armatures avec le béton peut être améliorée, soit par usinage des joncs pultrudés (figure 48) soit par traitement de surface des armatures (dépôts de sable, grains de silice en surface des barres), (usinage ou tressage en surface).

L'évaluation de l'adhérence « FRP – Béton » se réalise à partir de l'essai de traction direct (*Pull out*) décrit par la figure 49 [33], [34].

Comme le montrent les enregistrements charge/déplacement de la figure 50, il est possible d'obtenir des conditions d'ancrage comparables à celle de l'acier avec, parfois, des valeurs de glissement ultimes supérieures. Selon Firas [33], la longueur de transfert est inférieure à 10 cm et, dès que la surface crantée est supérieure à 30 % il est possible d'obtenir des contraintes d'adhérence moyennes supérieures à 10 MPa (supérieures ou équivalentes aux aciers HA).

2.2 Calculs prévisionnels des propriétés de composites pultrudés unidirectionnels

L'identification d'un composite unidirectionnel fait intervenir les caractéristiques des constituants (fibres/matrices) et les fractions volumiques de chaque constituant. L'ordre de grandeur de v_f (pourcentage volumique de fibres) peut varier en fonction de chaque procédé de transformation, entre 0,3 et 0,7.

Compte tenu de l'anisotropie du matériau, induit par l'orientation des fibres, on distinguera les propriétés dans le sens longitudinal 1 (L), dans le sens transversal 2 (T), 3 (T) (figure 51 [6]).

Les expressions de calcul suivantes sont extraites du rapport de la Fib [7] en prenant en considération les notations suivantes :

- f (fibres) ;
- m (matrice) ;
- E (module d'Young) ;
- G (module de cisaillement) ;
- ν (coefficient de poisson) ;
- α (coefficient de dilatation) ;
- ρ (densité).

Tableau 10 – Propriétés des armatures pultrudées

Caractéristiques	Acier	AR GFRP Composite	Remarques
Densité	8	2,1	Pourcentage verre : 75 %
Résistance traction (en MPa)	500	> 1 000	Supérieur à 1 500 en fonction du procédé
E Module (en Gpa)	200	45	
Allongement élastique (en %)	0,2	# 2	Comportement élastique
Coefficient de dilatation thermique (10-6)	10	# 6	
Conductivité thermique	oui	Non	

Tableau 11 – Comparaison des propriétés entre armatures métalliques et armatures composites

Caractéristiques	Acier HA Fe E500	Acier inoxydable HA	Schöck ComBAR® (HA)
Résistance à la traction (en N/mm ²)	550	550	1 000
Limite d'élasticité (en N/mm ²)	500	500	1 000
Contrainte état de service (en N/mm ²)	286	286	250 (– 0,5 % d'extension)
Contrainte état limite (en N/mm ²)	435	435	337
Allongement en charge de service (en %)	0,18	0,18	0,42
Module d'élasticité (en N/mm ²)	200 000	160 000	60 000
Contrainte d'adhérence C 20/25 (en N/mm ²)	2,3	2,3	2,3
Contrainte d'adhérence C 30/37 (en N/mm ²)	3,0	3,0	3,0
Contrainte d'adhérence C 40/50 (en N/mm ²)	3,7	3,7	3,7
Recouvrement (en mm)	Classe d'expos	Classe d'expos	ds + 10 mm
Densité (en g/cm ³)	7,85	7,85	2,2
Conductivité thermique (en W/mK)	60	15	< 0,5
Coefficient de dilatation thermique linéaire $\alpha 10^{-5}/K$	1,0	1,2	0,6 (axial), 2,2 (radial)
Résistivité (en Ωcm)		$7,5 \cdot 10^5$	$> 10^{14}$
Magnétisme	oui	très faible	non

Il faut souligner que la démarche suivie reprend de nombreuses expressions de calcul développées dans des ouvrages de base de dimensionnement des structures composites ([35], [36], [62], [63]).

■ Densité

La densité du composite peut être calculée comme suit :

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

Les ordres de grandeurs des densités de composites présentées dans le tableau 12 montrent que le gain des poids, par rapport à l'acier, est significatif. Il sera possible de le prendre en considération

dans les projets, ou les notes de calcul, en considérant la notion de résistance spécifique $\frac{\sigma}{\rho}$ ou de rigidité spécifique $\frac{E}{\rho}$.

■ Coefficient de dilatation linéaire

- Dans le cas des fibres de verre

$$\alpha_L = \frac{E_f V_f \alpha_f + E_m V_m \alpha_m}{E_f V_f + E_m V_m}$$

$$\alpha_T = (1 + v_m) V_m \alpha_m + (1 + v_f) V_f \alpha_f - \alpha_L v_{LT}$$

avec $v_{LT} = v_f V_f + v_m V_m$.

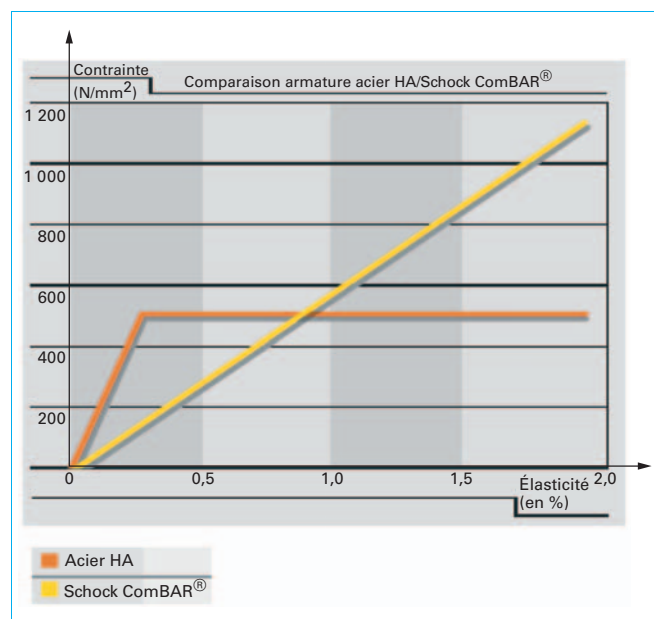


Figure 47 – Lois de comportement en traction

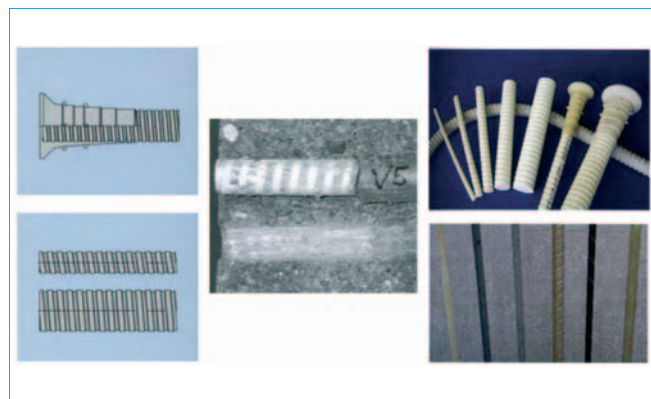


Figure 48 – Traitement de surface des armatures composites et formage des sections d'abouts pour assurer l'ancrage (Crédit Pultrall et Schoeck-combar)

- Dans le cas des fibres de carbone et d'aramide, sachant que les propriétés physiques longitudinales sont différentes des propriétés transversales ($E_{fL} \neq E_{fT}$).

$$\alpha_L = \frac{E_{fL} V_f \alpha_{fL} + E_m V_m \alpha_m}{E_{fL} V_f + E_m V_m}$$

$$\alpha_T = V_f \alpha_{fT} + V_m \alpha_m + V_f V_{fLT} (\alpha_{fL} - \alpha_L) + V_m V_m (\alpha_m - \alpha_L)$$

L'examen du tableau 13, qui donne des ordres de grandeurs de coefficient de dilatation pour des composites, montre la grande différence de valeurs entre béton et armatures composites (particulièrement dans le cas du carbone).

■ Propriétés mécaniques en traction

- Dans le cas d'un pultrudé avec un seul type de fibre, le module d'élasticité longitudinal peut être calculé à partir :

$$E_L = E_{fL} V_f + E_m (1 - V_f)$$

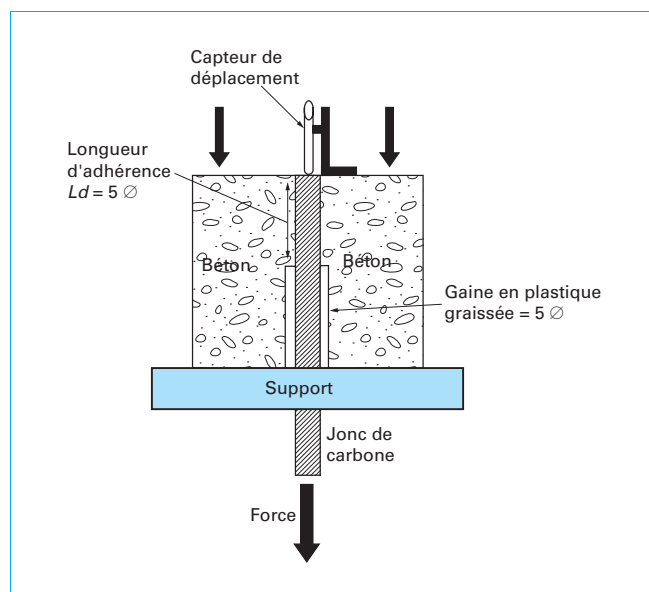


Figure 49 – Schéma de l'essai d'arrachement direct

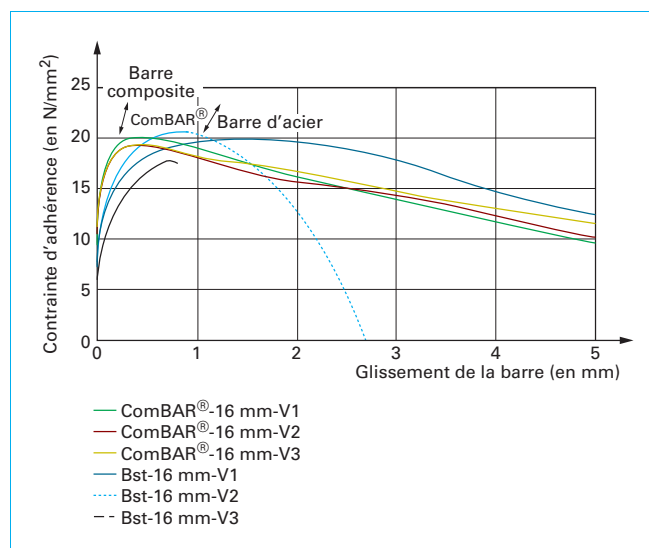


Figure 50 – Essais d'arrachement de barres composites (Crédit Schoeck-combar)

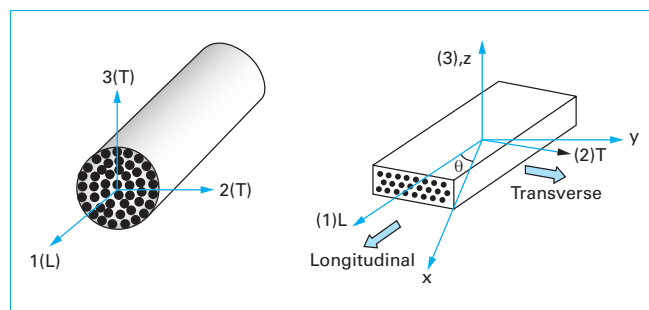


Figure 51 – Coupe schématique d'un composite unidirectionnel

Tableau 12 – Densité des armatures pour des valeurs de $V_f = 0,5$

Armature Composite	CFRP (carbone)	AFRP (aramide)	GFRP (verre)	Acier
Matrice				
Polyester	1 430-1 650	1 310-1 430	1 750-2 170	7 850
Époxy	1 440-1 670	1 320-1 450	1 760-2 180	
Vinylester	1 440-1 630	1 300-1 410	1 730-2 150	

- Dans le cas d'un composite avec deux types de fibres :

$$E_L = E_{1f}V_{1f} + E_{2f}V_{2f} + E_m(1 - V_{1f} - V_{2f})$$

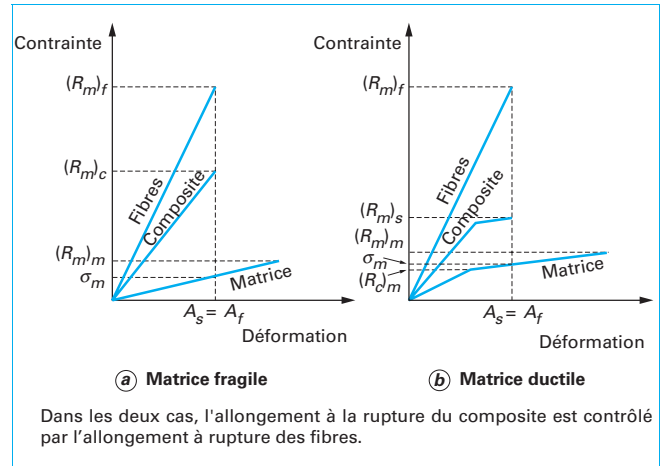
La prévision du calcul de la contrainte à rupture du composite (tableau 14) se doit de prendre en considération la loi de comportement de la matrice et la notion de pourcentage critique V_f^* de fibre (figures 52 et 53) au dessus duquel il faut se situer si on souhaite être plus performant que la matrice.

Il est possible de calculer la résistance ultime du composite (tableau 14) à partir de l'expression :

$$f_{Lt} = f_{ft} \left[V_f + \frac{E_m}{E_{fL}}(1 - V_f) \right]$$

■ Propriétés en compression

La prévision des caractéristiques en compression est plus complexe que dans le cas de la traction, dans la mesure où les

**Figure 52 – Influence de la loi de comportement de la matrice sur les propriétés du composite UD**

mécanismes de ruine peuvent être variables d'une formulation à une autre (influence de la géométrie des fibres, interface fibre/matrice, influence des résistances de la matrice).

- **Pour une première approche**, le calcul du module d'élasticité en compression (module initial tangent) pourra être déterminé à partir de la même expression que celle de la traction. Par contre, il est possible de proposer les expressions de contrainte ultime suivantes, suivant les modes de ruine :

- **Micro flambage des fibres**

$$f_{Lc} = \frac{G_m}{1 - V_f}$$

avec $G_m = \frac{E_m}{(1 + \nu_m)}$

Tableau 13 – Coefficient de dilatation thermique pour l'acier et les composites pour $0,5 < V_f < 0,75$

Direction	Coefficient de dilatation thermique ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)				
	Acier	Acier inoxydable	GFRP (verre)	CFRP (carbone)	AFRP (aramide)
Longitudinal, α_L	11	10 à 16,5	6 à 10	- 9 à 0	- 2 à - 6
Transversal, α_T	11	10 à 16,5	21 à 23	74 à 104	60 à 80

Tableau 14 – Résistances traction des FRP pour $0,5 < V_f < 0,75$

Propriétés	Matériaux			
	Acier	GFRP (verre)	CFRP (carbone)	AFRP (aramide)
Module longitudinal (en GPa)	200	35 à 60	100 à 580	40 à 125
Résistance (en MPa)	450 à 700	450 à 1 600	600 à 3 500	1 000 à 2 500
Allongement (en %)	5 à 20	1,2 à 3,7	0,5 à 1,7	1,9 à 4,4

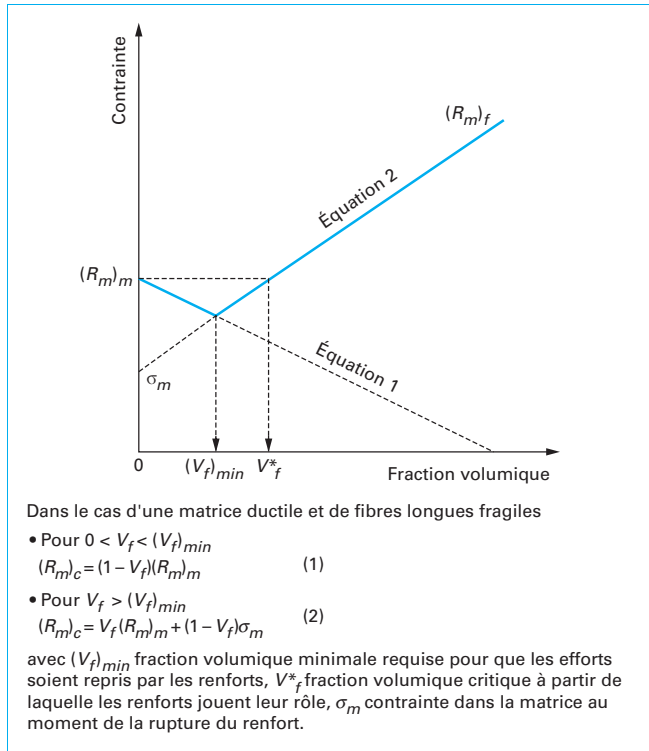


Figure 53 – Notion de pourcentage critique dans les composites UD

• Rupture par traction transverse due à l'effet de poisson

$$f_{Lc} = \frac{[E_f V_f + E_m (1 - V_f)] (1 - V_f^{1/3}) \varepsilon_{mu}}{v_f V_f + v_m (1 - V_f)}$$

avec ε_{mu} déformation ultime en traction de la matrice.

• Rupture des fibres en cisaillement

$$f_{Lc} = 2f_{fs} \left[V_f + (1 - V_f) \frac{E_m}{E_f} \right]$$

avec f_{fs} résistance en cisaillement des fibres.

En fait, il est aussi impératif de savoir identifier une contrainte limite de service de l'armature composite en déterminant la contrainte de flambement en mode libre et en mode guidé.

Dans ce cas, le niveau de fissuration du béton joue un rôle prépondérant, ainsi que les caractéristiques géométriques de la barre. Une vérification expérimentale est à recommander.

■ Comportement en cisaillement

Le module de cisaillement transverse pourra être calculé comme suit :

$$G_{13} = G_m \frac{V_f + \eta_{13}(1 - V_f)}{\eta_{13}(1 - V_f) + V_f G_m / G_f}$$

$$\eta_{13} = \frac{3 - 4v_m + G_m / G_f}{4(1 - v_m)}$$

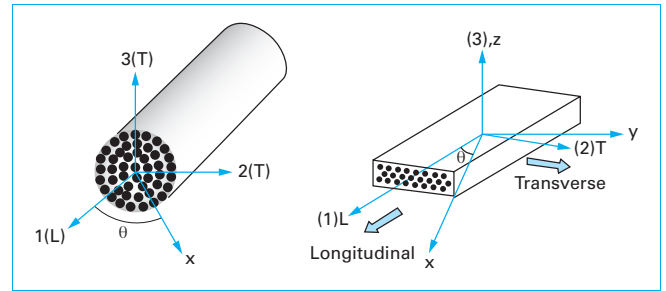


Figure 54 – Repère de calcul pour les propriétés hors axes

■ Propriétés mécaniques hors axes d'orthotropie

Il est impératif de chercher à évaluer les propriétés de résistance au cisaillement des composites pultrudés hors axes d'orthotropie (figure 54 [6]).

• Dans un premier temps, le module longitudinal du composite pour une orientation θ peut être estimé par :

$$E_{x(\theta)} = \frac{1}{\frac{c^4}{E_L} + \frac{s^4}{E_T} + 2c^2 s^2 \left(\frac{1}{2G_{LT}} - \frac{v_{LT}}{E_L} \right)}$$

avec $c = \cos \theta$

et $s = \sin \theta$

$$\text{avec } E_T = \frac{E_m E_{fT}}{E_m V_f + E_{fT} (1 - V_f)}$$

$$G_{LT} = \frac{G_m G_f}{G_m V_f + G_f (1 - V_f)}$$

• La résistance en traction pour un angle θ peut être déterminée comme suit :

$$f_{x(\theta)t} = \frac{1}{\sqrt{\frac{c^4}{f_{Lt}^2} + \frac{s^4}{f_{Tt}^2} + c^2 s^2 \left(\frac{1}{f_{LTs}^2} - \frac{1}{f_{Lt}^2} \right)}}$$

avec f_{Tt} résistance en traction direction transverse

$$f_{Tt} = \frac{E_T f_{mt}}{E_m} (1 - V_f^{1/3})$$

et f_{LTs} résistance au cisaillement dans le plan :

$$f_{LTs} = \left[1 + (V_f - V_f^{1/2}) \left[1 - \frac{G_m}{G_f} \right] \right] f_{ms} C_v$$

avec C_v coefficient qui tient compte du taux de vide V_v

$$C_v = 1 - \sqrt{\frac{4V_v}{\pi(1 - V_f)}}$$

2.3 Durabilité des FRP

Les performances mécaniques des composites et, plus particulièrement des composites pultrudés sont directement dépendantes des conditions de fabrication et de la dispersion des caractéristiques des composants. Compte tenu du retour d'expérience limité sur la durabilité de ces nouveaux matériaux, les contraintes de

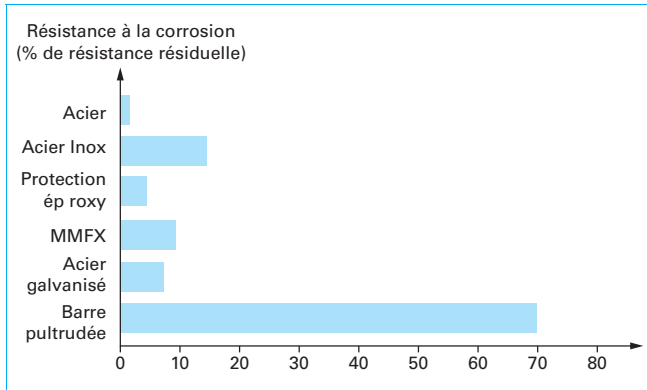


Figure 55 – Comparaison de la tenue à la corrosion (Crédit Pultrall)

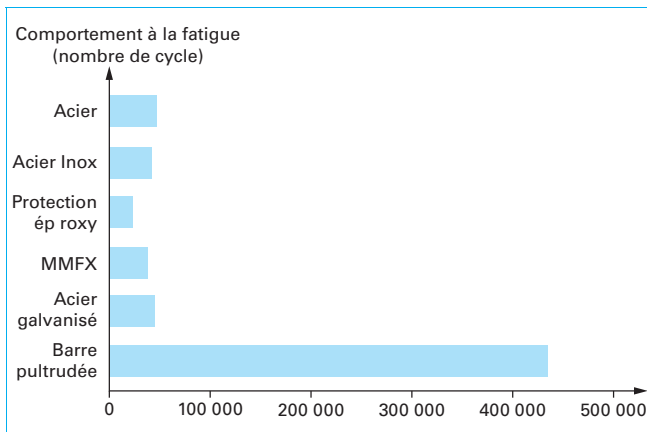


Figure 56 – Comparaison de la tenue à la fatigue (Crédit Pultrall)

service à respecter seront à évaluer en fonction de la prévision du vieillissement de ces matériaux pour des conditions d'environnement spécifiques aux applications de génie civil.

Les trois composants constitutifs (matrice, fibres, interface) sont susceptibles de se dégrader sous l'action d'agents plus ou moins agressifs, comme l'eau, les chlorures, le milieu alcalin et la température, mais aussi les ultra violets, la carbonatation, l'action des acides et des bases ([37], [38], [39], [40]).

Il n'en demeure pas moins que la comparaison du comportement à la corrosion et à la fatigue des armatures composites, par rapport aux aciers, est favorable à ces nouveaux matériaux (figures 55 et 56).

La prévision de la durabilité des matériaux composites s'appuie essentiellement sur des méthodes expérimentales et des procédures de vieillissement accéléré [39], [40], [41], [42], [43].

■ Essais de fluage thermo-stimulé

La détermination de la fonction fluage d'un composite peut être réalisée par des essais de fluage et de relaxation à différents niveaux de contrainte de déformation [45]. Pour évaluer de façon comparative la tenue dans le temps pour des durées de 10 ans, 50 ans, 100 ans, il est possible de développer des essais de fluage thermo-stimulés s'appuyant sur des principes d'équivalence temps/température [44], [45], [10].

Le principe consiste à réaliser des essais de fluage sur des bases de temps limités (0 à 30 mn) à des niveaux de contraintes correspondant au niveau de contraintes de service f_{td} pour différents

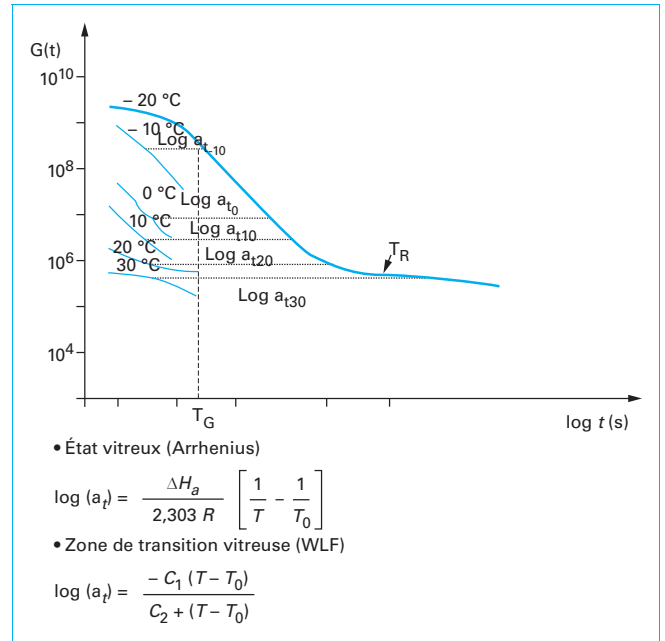


Figure 57 – Principe de construction d'une courbe maîtresse pour une température de référence T_R par application du principe d'équivalence temps/température

paliers de température évoluant de 2 à 5 °C. Il est possible par translation entre chaque point de recouvrement (a_t) de construire une courbe maîtresse pour une température de référence T_R (figure 57 [12], [46], [47]).

Le lissage de cette courbe prévisionnelle permet d'identifier les coefficients empiriques de la loi de fluage.

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une contrainte initiale σ , sa déformation instantanée ϵ_0 pourra être calculée à partir de l'expression :

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma}{E_{fl} V_f + E_m (1 - V_f)}$$

Le fluage est essentiellement dû à la matrice et le transfert de charge se fait progressivement sur les fibres. La déformation finale du composite pourra être estimée à :

$$\epsilon_\infty = \frac{\sigma}{E_{fl}}$$

La fonction fluage pourra être établie :

$$\epsilon(t) = \beta \log t + \epsilon_0$$

avec β paramètre de fluage déterminé expérimentalement.

■ Essais de fatigue

La résistance de la tenue à la fatigue et la détermination de la durée de vie pour un niveau de contrainte donnée peut être établie expérimentalement (figures 58 [46] et 59).

Les différents coefficients de la loi de fatigue peuvent être identifiés à partir des courbes expérimentales conduites à $10^6 - 10^8$ cycles.

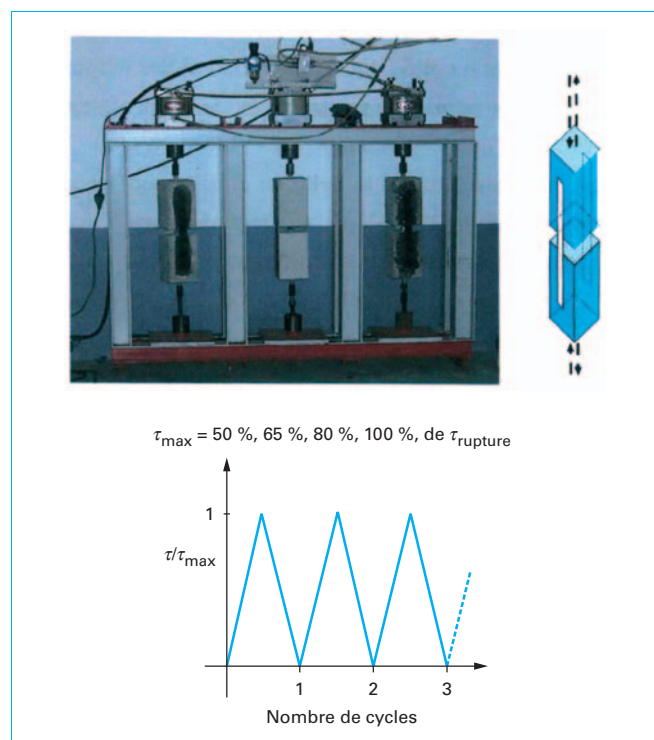


Figure 58 – Montage expérimental de fatigue pour armatures composites collées sur béton

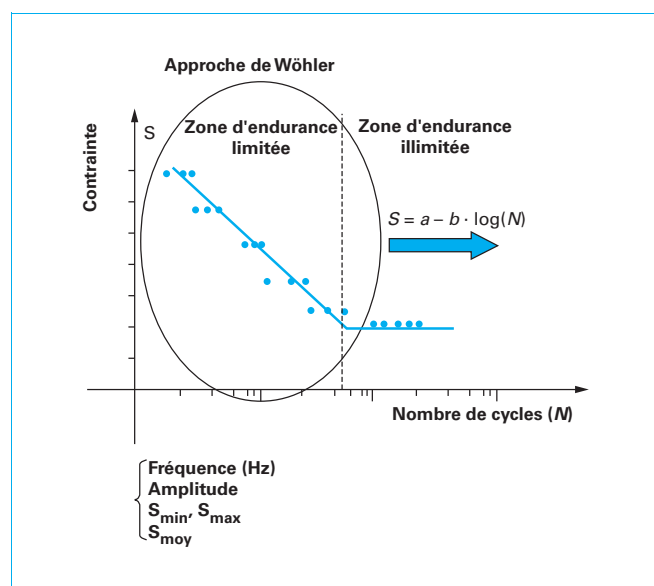


Figure 59 – Exemples de courbe de Wöhler pour évaluer la fatigue d'armatures FRP

■ Méthode de calcul prenant en compte le vieillissement du composite

Nous reprendrons ici la méthode proposée par le groupe de travail de la Fib [6] qui permet de déterminer pour différentes formulations de composites et conditions de vieillissement, le niveau de variation de leurs propriétés mécaniques :

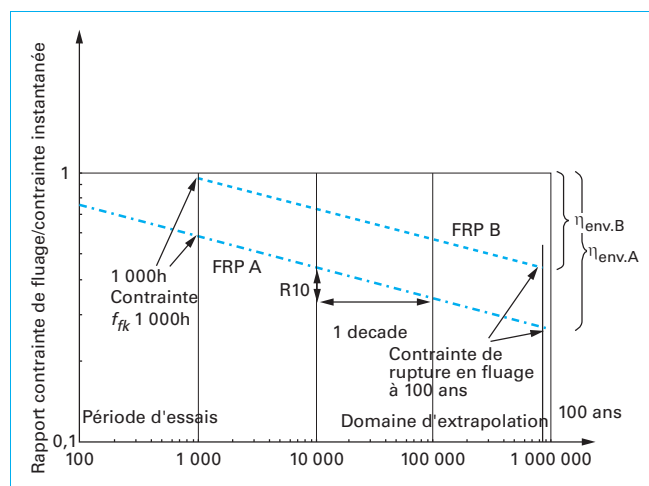


Figure 60 – Variation du coefficient R_{10} et de la résistance en traction à 1 000 h pour deux formulations de composites et une condition d'environnement (ciment Portland humide)

$$f_{fd} = f_{fk0} / (\eta_{env,t} \cdot \gamma_{frp})$$

avec f_{fd} résistance en traction à long terme,
 f_{fk0} valeur caractéristique en traction instantanée,
 η_{env} facteur de pondération dû au vieillissement (rapport entre propriétés à court terme et propriétés à long terme),
 γ_{frp} coefficient spécifique au type de composite (formulation, fabrication).

■ Détermination du coefficient η environnant exprimé en %

$\eta_{env,t}$ facteur de pondération dû à l'action du milieu environnement peut être déterminé à partir de la courbe de la figure 60,

$\eta_{env,t}$ rapport entre les contraintes à court terme et à long terme.

La valeur de contrainte à long terme peut être extrapolée à partir de la contrainte de vieillissement à 1 000 h et d'un coefficient de réduction R_{10} correspondant à la perte de résistance (en pourcent) pour une durée d'une décennie en échelle log. La durée de vie à 100 ans correspond à 3 décades en échelle log.

$$\eta_{env,t} = \frac{f_{fk1\,000h} / f_{fk0}}{\left(\frac{100 - R_{10}}{100} \right)^\eta}$$

Si on ne connaît pas $f_{fk1\,000h}$ (déterminé expérimentalement) avec $n = 3$, pour des conditions d'environnement normales.

$$\eta_{env,t} = \frac{1}{\left(\frac{100 - R_{10}}{100} \right)^{n+2}}$$

avec R_{10} diminution de la résistance en traction exprimée en % par décennie (figure 60) due à l'action de l'environnement (tableau 15).

Pour d'autres conditions d'environnement, η peut être calculé comme suit :

$$\eta = \eta_{mo} + \eta_T + \eta_{SL}$$

Tableau 15 – Différents coefficients de pondération en fonction des natures de renforts

Type armature		R_{10}	$f_{fk\ 1\ 000\ h}/f_{fk}$	$\eta_{env, t}$	$1/\eta_{env, t}$
Verre	GFRP class 3	25 %/dec	> 56 %	4,16	24 %
	GFRP class 2			t.b.d.	t.b.d.
	GFRP class 1			t.b.d.	t.b.d.
Aramide	AFRP class 2	15 %/dec	> 72 %	2,25	44 %
	AFRP class 1			t.b.d.	t.b.d.
Carbone	CFRP class 2	5 %/dec	> 90 %	1,29	77 %
	CFRP class 1			t.b.d.	t.b.d.

Tableau 16 – Prise en compte de l'humidité

n_{mo}		
Ambiance (a)	Ambiance (b)	Ambiance (c)
- 1	0	1

avec n_{mo} coefficient dépendant des conditions d'humidité (tableau 16),
 n_T coefficient dépendant de la température (tableau 17),
 n_{sL} coefficient dépendant de la durée de vie en service souhaitée (tableau 18).

■ Détermination du coefficient R_{10} par extrapolation de résultats de vieillissement à 1 000 h

Comme le montre la figure 60, le coefficient R_{10} correspond à la pente de la droite en échelle log/log donnant l'estimation de la durée de vie en heure pour un niveau de contrainte donné.

De nombreux auteurs, Uomoto [40], Burgoyne [48], Weber [49], Ferrier-Hamelin [50] ont remarqué que la pente était un peu différente d'un matériau à un autre.

Exemple : FRPB en comparaison de FRPA) ou différente d'une condition d'environnement η_{env} à une autre.

■ Facteur d'endurance à 1 000 h ($f_{fk} = 1\ 000\ h$)

Tableau 17 – Influence de la température

n_T			
$T_{moyen} < 5\ ^\circ C$	$5\ ^\circ C < T_{moyen} < 15\ ^\circ C$	$15\ ^\circ C < T_{moyen} < 25\ ^\circ C$	$25\ ^\circ C < T_{moyen} < 35\ ^\circ C$
- 0,5	0	0,5	1

Tableau 18 – Valeurs de n_{sL}

n_{sL}			
1 an	10 ans	50 ans	100 ans
1	2	2,7	3

Ce facteur doit être déterminé pour chaque formulation expérimentalement en fonction de différentes conditions d'environnement (température, hygrométrie) et de différents niveaux de contrainte.

Dans l'absence de données expérimentales, une première évaluation peut être faite à partir des expressions suivantes en fonction du coefficient R_{10} .

$$f_{fk\ 1000\ h} = f_{fk} * \left[\left(\frac{100 - R_{10}}{100} \right) \right]^2$$

avec R_{10} en % égal à :

- 25 (verre) ;
- 15 (aramide) ;
- 5 (carbone) ;

$$f_{fkd} = f_{fk\ 1000\ h} * \left[\left(\frac{100 - R_{10}}{100} \right) \right]^n * \frac{1}{\gamma_f}$$

avec $\gamma_f = 1,25$ en première approximation.

■ Prise en compte de l'humidité : n_{mo}

L'humidité joue un rôle considérable sur le vieillissement des composites. En accord avec les règles de calcul des ouvrages ACI [38] ou Eurocode 2, il est possible de considérer différentes classes d'exposition [51] :

- **ambiance sèche (a)** : intérieur, à l'abri de la pluie avec 50 % d'humidité relative ;
- **ambiance humide (b)** : extérieur, soumis à la pluie avec un taux d'humidité d'environ 80 % (XC3, XD1, XD3, XS1, XS3) ;
- **milieu saturé (c)** : immergé dans l'eau, taux d'humidité 100 %.

Les valeurs du coefficient n_{mo} à prendre en considération sont données par le tableau 16.

■ Influence de la température

De nombreux travaux scientifiques ([52], [53]) et des recommandations établies pour des composites mis en œuvre dans la construction ([37], [39], [40]) ont montré que la température accélère les mécanismes de vieillissement. En conséquence, le tableau 17 donne une estimation du coefficient n_T en fonction d'une température d'utilisation moyenne annuel T_{moyen} .

■ Coefficient de pondération pour la durée de vie en service η_{sL}

Comme le montrent les exemples de courbes de vieillissement pour lesquelles le rapport de la contrainte de service pour une durée de vie donnée sur la contrainte instantanée varie de façon linéaire en fonction du temps (représentation log/log), (figure 61).

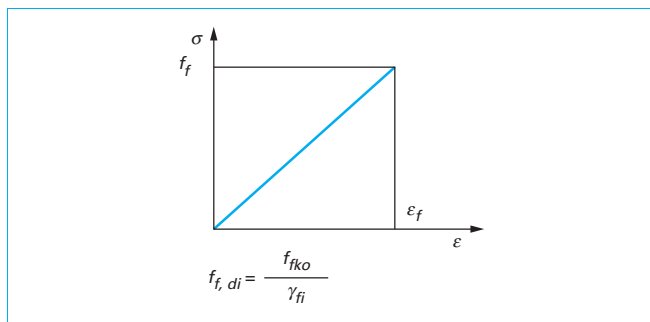


Figure 61 – Loi de comportement du composite

Tableau 19 – Corrections à apporter à la surface

Diamètre	γ_{ϕ_o}	$\approx \phi_o$	0,75 ϕ_o	0,50 ϕ_o
n_d	0	0	0,5 (0,3)	1 (0,6)

Il est possible d'identifier des coefficients de pondération sur la résistance du matériau en fonction d'une durée de vie espérée.

Il est évident que la validation de ces coefficients peut s'appuyer sur des essais de fluage thermo-stimulés comme nous l'avions évoqué précédemment ([12], [10]).

■ Prise en considération des facteurs de forme des renforts composites n_d

Le vieillissement des pultrudés est dû à des échanges et des réactions chimiques qui s'effectuent à la surface des pièces composites avec le milieu extérieur agressif. En conséquence, dans le cas d'armatures composites, à pourcentage volumique identique de taux de renfort dans la section de béton, la surface varie en fonction du diamètre des armatures.

Tableau 21 – Coefficients de pondération

	γ_f Pultrudé carbone	Stratifiés carbone	Stratifiés verre
ELS	$\gamma_{fi} = 1,4$	2	2,5
ELU	$\gamma_{fi} = 1,25$	1,4	1,6
ELU accidentel	$\gamma_{fi} = 1$	1,1	1,3

Si le diamètre de l'armature ayant fait l'objet de vieillissement est ϕ_o , la correction à apporter est définie par le tableau 19.

Synthèse. En conséquence, en fonction des différentes natures de composites, des différentes conditions de vieillissement il est possible d'estimer, pour des durées de vie données, les coefficients de pondération à appliquer sur les performances initiales (tableau 20).

2.4 Lois de comportement et valeurs caractéristiques

Nous retiendrons ici les principales relations proposées par l'AFGC. La loi de comportement instantanée et différée du FRP sera considérée comme linéaire et élastique (figure 61).

γ_f pour la détermination des résistances caractéristiques différées des pultrudés carbone époxy ou verre-époxy à l'ELU et à l'ELS sera déduit du tableau 21.

Les valeurs caractéristiques différées, prenant en compte l'action de l'environnement, seront calculées comme suit :

$$f_{fd,env} = f_{fk0} * \frac{1}{\eta_{env,t} * \gamma_{fi}}$$

Tableau 20 – Exemple de valeurs calculées de coefficients de pondération

Matériels	f_{fk0} (en MPa)	f_{fk1000} (en MPa)	R_{10}	Moist. cond.	n_{mo}	MAT (en °C)	n_T	Serv Durées de vie	n_{SL}	n	$\eta_{env,t}$	$1/\eta_{env,t}$	γ_t	f_t (en N/mm ²)
CFRP class 1	2 000	2 000	3 %	Sec	- 1	10	0	100	3	2,0	1,1	94 %	1,25	1 505
CFRP class 2	2 000	2 000	5 %	Sec	- 1	10	0	100	3	2,0	1,2	90 %	1,25	1 444
AFRP class 1	2 000	1 800	15 %	Sec	- 1	10	0	100	3	2,0	1,6	65 %	1,25	1 040
GFRP class 2	1 400	1 000	20 %	Sec	- 1	10	0	100	3	2,0	1,9	46 %	1,25	512
GFRP class 3	650	366	25 %	Wet	1	20	0,5	50	2,7	4,2	5,9	17 %	1,25	87
GFRP class 3	650	366	25 %	Wet	1	10	0	1	1	2,0	3,2	32 %	1,25	165
GFRP class 3	650	366	25 %	Sec	- 1	20	0,5	100	3	2,5	3,6	27 %	2,25	143
GFRP class 1	1 100	1 000	18 %	Wet	0	10	0	100	3	3,0	1,8	55 %	1,25	441
GFRP class 1	1 100	1 000	18 %	Wet	1	10	0	1	1	2,0	1,5	67 %	1,25	538
GFRP class 1	1 100	1 000	18 %	out-door	0	30	1	100	3	4,0	2,2	45 %	1,25	362

Les valeurs caractéristiques différées prenant en compte l'action de l'environnement seront calculées à partir de la condition :

$$f_{fd,env} = \min \left(\frac{f_{fk0} * 1}{\eta_{env, \gamma_{fi}}}; \frac{0,65 * f_{fk0}}{\gamma_{fi}} \right)$$

Le module d'élasticité $E_{f,d}$ sera pondéré en prenant en considération la fonction fluage ou relaxation déterminée expérimentalement. Dans l'absence de données sur le fluage, le module d'élasticité du composite unidirectionnel, pour une durée infinie, sera pris égal à :

$$E_{f,ddifféré} = 0,9 V_f E_f$$

3. Conclusion générale

Les matériaux composites FRP ou PRF associent matrices polymères thermodurcissables ou thermoplastiques à des fibres d'origine textile en verre, carbone, aramide, balsate. Leurs propriétés mécaniques et, plus particulièrement leurs résistances en traction, ou leurs résistances ou rigidités spécifiques (rapport entre

résistance ou module d'élasticité et densité) sont particulièrement performantes par rapport à l'acier. La stabilité physico-chimique des matrices polymères et la très bonne tenue à la fatigue des fibres permettent de concevoir des armatures de renforcement pour le béton armé, des câbles et haubans plus durables et d'un poids propre plus faible pour les ouvrages d'art.

Les applications dans le domaine de la construction sont de plus en plus nombreuses, notamment pour des ouvrages construits dans des conditions environnementales particulièrement agressives (milieu marin).

À ce jour, les armatures ou les techniques de renforcement par FRP sont particulièrement utilisées pour la réparation et la maintenance d'ouvrages en béton armé, béton précontraint, en maçonnerie. Il est possible de compenser les pertes de résistance et de rigidité des constructions endommagées par insertion (NSM), par collage ou placage de plats composites.

La prévision de la durée de vie de ces nouveaux matériaux peut être estimée à partir de méthodes théorico-expérimentales et confirme l'efficacité de ces nouvelles technologies de construction, ou de renforcement pour des conditions d'exploitation normales, telles que celles définies dans les Eurocodes.

