

Fibres et textiles

Guy Némoz

Summary

Fibres and textiles: structural materials

Reinforcing fibres have very high level of mechanical properties to compete to produce the best performance materials. The trends of organic fibers to properties comparable to carbone fibers is shown by X-rays. Spacial organisation of fibres, their architecture or « texture » brings a high flexibility for designing parts in order to meet the highest requirements. The technological evolution to 3D « textures », near net shape preforms, is the challenge for the competitiveness of those materials and their future.

Mots-clés

Fibres de renfort, architectures textiles, application, propriétés mécaniques.

Key-words

Reinforcing fibres, textile architectures, application, mechanical properties.

Les structures textiles, privilégiant par définition la géométrie élancée des fibres unitaires, génèrent des matériaux de structure dans des secteurs aussi vastes dans le monde naturel et vivant que dans les applications matérielles et industrielles. De la structure moléculaire à l'objet fini, l'orientation moléculaire et fibreuse à différents niveaux d'organisation de la matière conduit à des performances très adaptées aux fonctions. Ainsi, les différentes étapes de la réalisation d'un matériau résultent des séquences suivantes : la définition de la macromolécule, son orientation et son organisation en microfibrilles, puis en fibres et fils, et finalement l'agencement ou le croisement des fils en surfaces et en volumes, la réalisation de préformes, la combinaison avec une matière (la matrice) permettant le transfert de charges interfibrilles.

Ainsi, les performances mécaniques finales d'une structure dépendent notamment d'au moins trois étapes de leur processus d'élaboration : la nature chimique constitutive des fibres de renfort, leur procédé de filage et l'architecture fibreuse.

Une gamme très large de fibres chimiques à hautes performances mécaniques est commercialement disponible pour leur aptitude de renforcement de matériaux divers (caoutchoucs, ciments, résines ou plastiques, métaux, céramiques, ou carbonés).

Les fibres de renfort

Le renforcement d'un matériau commence par le choix de la fibre de renfort, ajusté aux diverses exigences de l'utilisation finale. Les propriétés mécaniques en traction de la fibre guident ce choix, mais d'autres considérations doivent intervenir [1] :

- le mode de sollicitation (traction pure, torsion, cisaillement, compression),
- l'anisotropie des propriétés (mécaniques, thermiques...),
- la tenue en température en fonction du temps et de l'environnement,
- l'affinité chimique (inertie ou réactivité vis-à-vis de la matrice),
- les propriétés électriques ou diélectriques.

Chacune de ces exigences va influencer le choix technique auquel se rajoutent les aspects de coût et de présentation textile (masse linéique, nombre de filaments, torsion, ensimage).

Le *tableau 1* montre les propriétés mécaniques en traction des fibres et met en évidence notamment le rôle de la masse volumique sur les performances caractérisées par leurs valeurs spécifiques calculées directement par la relation suivante :

$$E_{sp}(\text{N}/\text{tex}) = \frac{E(\text{GPa})}{\rho(\text{g}/\text{cm}^3)}$$

masse linéique (tex) : 1 tex = 1 g/1 000 m.

Évolution des fibres organiques [2]

Une avance notable dans le développement de fibres à haute performance a été la découverte de moyens de produire des fibres ayant une phase unique paracristalline plutôt que des fibres semi-cristallines à deux phases. Deux procédés ont permis d'atteindre cet objectif : le filage de gel de polymère suivi d'un surétirage des chaînes macromoléculaires flexibles, et la mise en œuvre de polymères en phase cristal liquide de type nématique.

Les hautes performances de telles fibres dépendent d'une combinaison subtile d'une haute orientation de chaînes étirées en conformation linéaire et de leur élasticité, ainsi que d'une résistance élevée des liaisons interchaînes, selon la formule :

$$\frac{1}{E_{th}} = \frac{1}{e_c} + \frac{\langle \sin^2 \theta \rangle}{2g}$$

avec E_{th} : module d'élasticité théorique de la fibre ; e_c : module d'élasticité de la chaîne polymérique ; g : module de cisaillement interchaînes et θ : angle moyen entre l'axe des chaînes et l'axe de la fibre.

Ainsi, avec seulement de faibles interactions Van der Waals interchaînes, une haute résistance en traction de 6 GPa est obtenue uniquement avec de très longues chaînes et une distribution très étroite de l'orientation : c'est le cas des fibres polyéthylène à très haute masse moléculaire ($M_n \approx 1,5 \cdot 10^6$).

D'autre part, pour les aramides de type paraphénylène-teréphthalamide (PPTA), une fibre de 4,5 GPa de résistance est obtenue grâce à un module de la chaîne de 240 GPa associé à une interaction hydrogène et des liaisons Van der Waals, et

Tableau I - Propriétés mécaniques en traction des fibres à hautes performances mécaniques.

ρ : masse volumique ; E : module d'élasticité ; σ : contrainte de rupture ; A : allongement ; E_{sp} : module spécifique ; R_{sp} : résistance spécifique.

Fibre	ρ (g/cm ³)	E (GPa)	σ (MPa)	A (%)	E_{sp} (N/Text)	R_{sp} (N/Text)
Organiques						
Acrylique HT	1,18	22	960	12	18,6	0,81
Alcool polyvinylique	1,3	30	1200	7	23,1	0,90
Para-aramide	1,44	60,0	2900	3,8	41,7	2,01
Para-aramide HM	1,45	120	2900	1,9	82,8	2,00
Polyamide 66 HT	1,14	6	960	20	5,3	0,84
Polyester HT	1,38	13,8	970	16	10,0	0,70
Polyéthylène HT	0,97	90	2700	3,5	92,8	2,78
Polypropylène HT	0,92	6,4	736	15,5	7,0	0,80
Viscose HT	1,46	19	730	8	13,0	0,50
Inorganiques						
Acier	7,8	200	2800	1,8	25,6	0,36
Bore	2,58	400	3600	0,8	155,0	1,36
Carbone HM (M40)	1,81	392,0	2740	0,7	216,6	1,51
Carbone HM (M50)	1,91	490	2450	0,5	256,5	1,28
Carbone HT (T300)	1,76	230,0	3530	1,5	130,7	2,01
Carbone HT (T800)	1,81	294	5490	1,9	162,4	3,03
Carbure de silicium	2,55	200,0	2900	1,5	78,4	1,14
Céramiques (SiO ₂ , Al ₂ O ₃)	2,7	152	1700		56,3	0,83
Silice	2,2	78,0	3540		35,5	1,61
Verre E	2,6	73,0	2500	3,5	28,1	0,96
Verre R	2,53	86	3300	3,3	34,0	1,30

une distribution d'orientation étroite. Pour la nouvelle aramide PBO [poly(p-phénylène-2,6-benzobisoxazole)] dont le module de chaîne est 500 GPa et une interaction interchaîne faible Van der Waals, une résistance de 6 GPa peut être atteinte uniquement si la distribution d'orientation est très étroite (tableau II).

Une autre fibre, actuellement en développement, combine un fort module de chaîne (550 GPa) et des fortes interactions interchaînes (liaison hydrogène dans deux directions), le PPIID possède une résistance en traction mesurée de 5,5 GPa mais en plus une résistance à la compression 3 à 4 fois supérieure au PPTA et PBO et voisine de celle d'une fibre de carbone haute résistance.

L'architecture textile de renforcement des matériaux

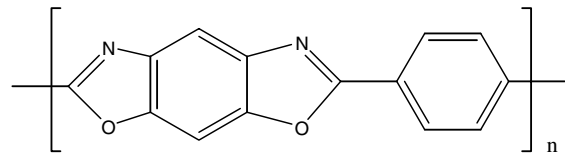
Le bon choix de la fibre et des fils est confirmé par une architecture fibreuse adaptée aux modes de sollicitation de la structure finale. Le tableau III présente les différentes possibilités d'organisation des fibres de renfort [4] en fonction de leur organisation dans le plan (axe) ou dans l'espace (dimension).

La création de surfaces de renforcement peut se faire avec des fibres complètement dispersées au hasard (cas du mat) ou complètement orientées dans une direction (cas des nappes unidirectionnelles). Des axes de renforcement peuvent être prédéfinis par le croisement de fils : le tissage chaîne et trame pour des renforts orthogonaux, le tissage triaxial pour des renforts à 60° et le tissage ou tricotage multiaxial (jusqu'à 9 axes).

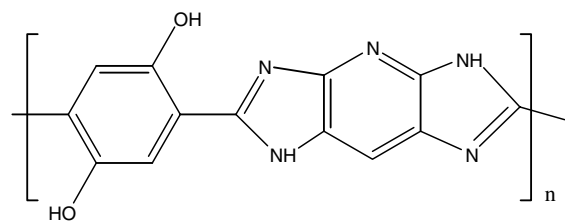
Pour entrecroiser ces fils, les techniques classiques de tissage donnent nécessairement une ondulation (embuvage) aux fils de chaîne et de trame. Au contraire, les techniques multiaxiales (Karl Meyer ou Liba) permettent de superposer

des nappes de fils parallèles aux axes choisis et liées par un fil tricoté dans l'épaisseur. Ce dernier peut jouer un rôle sur la résistance au délaminage.

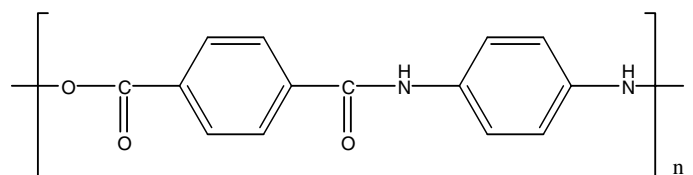
La création de volumes peut se réaliser par la superposition de nappes unidirectionnelles ou de tissus. Actuellement, les utilisateurs finaux exigent de plus en plus des architectures



PBO : poly(p-phénylène-2, 6-benzobisoxazole)



PIPD : poly(pyridobisimidazole)



PPTA : poly(paraphénylène téréphtalamide)

Tableau II - Valeurs expérimentales et théoriques des propriétés mécaniques des fibres [3].
VdW : Van der Waals ; 1d, 2d H : liaisons hydrogène (1 ou 2).

	PPTA (haut module)	Carbone (haute résistance)	PBO (haut module)	PIPD
Traction				
σ (GPa)	2,7-3,3	3,5	5,8	4,0
ε (%)	2	1,5	2,5	1,4
E (GPa)	115	230	280	330
Compression				
σ (GPa)	0,58	2,1	0,39	1,6
ε (%)	0,5	0,9	0,15	0,52
Masse volumique (g/cm ³)				
	1,45	1,8	1,56	1,7
Valeurs théoriques				
e_c (GPa)	240	1100	500	550
g (GPa)	1,5-2,7	14-30	1,0	6
Types de Liaisons				
	1d H	covalente, VdW	VdW	2d H

de renforcement qui soient au plus près de la forme finale : concept « near net shape ».

Le tissage [4]

La technologie du tissage permet le croisement de fils de façon à réaliser des pièces de révolution, le renforcement étant dans l'axe de tissage et/ou à un angle $\pm \alpha$ par rapport à cet axe. Des tubes peuvent aussi être réalisés pour diverses applications (canne à pêche, mats de planches à voiles, etc.).

Des préformes plus complexes axisymétriques ou non peuvent être réalisées en tressant les fils sur un mandrin à la forme de l'objet final (longeron de caisse automobile, arbre

de transmission de rotors d'hélicoptère, pale d'hélices...).

Le tissage tubulaire et sur mandrin crée des volumes par superposition de couches.

Les non tissés (mats)

La technologie d'aiguilletage de fibres permet de réaliser des non tissés 3D avec un renfort perpendiculaire apporté par l'aiguilletage. Le procédé Novoltex [5] développé par SEP permet de réaliser des plaques épaisses ou des pièces de révolution.

Après imprégnation, les préformes de fibres de carbone sont comblées par pyrolyse pour donner des matériaux C/C qui sont usinables pour fabriquer des disques de frein par exemple. Une technologie a été brevetée récemment afin de fabriquer des non tissés par aiguilletage à double paroi pour ménager des espaces entre les zones fibreuses ; il s'agit du procédé Napco (G. Le Roy).

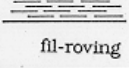

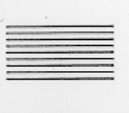

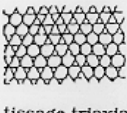
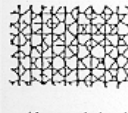
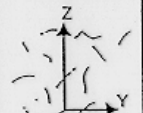



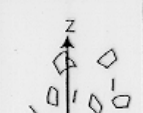
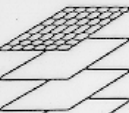

Le tissage 3D

Le tissage multi-axial orthogonal ou non de fils ou de tiges en carbone a été développé à des fins aéronautiques et spatiales. CEA et Brochier [6], SEP, Aérospatiale [7], ont développé dans les années 70 des technologies semi-automatiques afin de satisfaire des demandes de la défense. Ces technologies sont maintenant automatisées, mais restent très spécifiques et coûteuses. Il est intéressant de rappeler qu'il existe d'anciennes technologies de tissage qui sont adaptables à la réalisation de préformes 3D.

Le tissage multicouche

L'insertion de trames dans plusieurs nappes de fils de chaîne parallèles permet de fabriquer des textiles épais utilisés notamment pour le renforcement de bandes transporteuses en caoutchouc.

Tableau III - Principaux types d'architectures textiles de renfort.

Dimension		0 NON - AXIAL	1 MONO - AXIAL	2 BIAXIAL	3 TRIAxIAL	4 ~ MULTI - AXIAL
1 D			 fil-roving			
		 mats à fibres coupées	 nappe préimprégnée	 armure toile	 tissage triaxial 1)-3)	 tissu, tricot multiaxiaux
3 D	Élément linéaire	 tresse 3-D	 tissage multicouche	 tissage triaxial 3-D	 tissage multi-axial 3-D	
	Élément plan	 laminé	 poutre en H ou I	 nid d'abeille		

Aérospatiale a développé cette technologie pour faire un matériau « 2,5 D » à base de carbone.

Le tissage double paroi [8]

Le tissage classique de velours consiste à lier 2 nappes de fils de chaîne, maintenues à une certaine distance, avec un fil de trame qui se trouve perpendiculaire aux nappes de chaînes. Une lame coupe en deux ce fil pour en faire le poil du tissu de velours.

Cette technologie a donné naissance aux tissus double paroi obtenus sur ce principe ; dans ce cas, on supprime la coupe du poil de façon à réaliser un matériau 3D. Plusieurs sociétés (Parabeam, Vorwek) ont eu l'idée d'imprégner par une résine thermodurcissable ce textile, afin de réaliser un contretype de sandwich type nid d'abeille.

Tissavel a imprégné un tel textile par une résine thermoplastique pour fabriquer un plancher plat de bateau pneumatique.

La plus ancienne préforme volumique a été obtenue sur un métier Jacquard, tissée à plat ; les commandes fil à fil du métier permettent de ne pas entrecroiser tous les fils et de laisser une poche vide en forme. Il s'agit par exemple du tissage des cônes de radome créés par Brochier pour le nez du Concorde.

Applications [9]

Fibres et textiles ont donc des performances mécaniques et une flexibilité permettant de renforcer ou de structurer une gamme très large de matériaux que l'on peut illustrer par la classification suivante :

Renforcement du caoutchouc

Très ancienne application structurante, le renforcement des pneumatiques, courroies, bandes transporteuses et tuyaux est efficace grâce aux performances intrinsèques des fibres telles que PVA, viscosse, polyamide, polyester, aramide et verre. La construction de l'architecture en unidirectionnel (courroies), en tubes tricotés (tuyaux) ou en tissage 3D multicouche (bandes transporteuses) constitue autant d'exemples des savoir-faire textiles.

Le développement de ces applications, notamment dans l'automobile, conduit à des évolutions technologiques permanentes : accroissement de la durabilité, amélioration de performances en compression et de l'adhérence à la matrice élastomérique.

Renforcement du ciment

Le ciment, matériau traditionnellement renforcé par des fers à béton, voit ses performances s'élargir pour des applications très spécifiques grâce à l'utilisation de fibres telles que polypropylène, verre, carbone, acrylique, PVA. Certes, le milieu fortement basique oblige à faire des choix de fibres plutôt inertes dans cet environnement ou à modifier la formule (cas du verre spécial résistant aux bases).

La nécessité de réparer certains ouvrages d'art et la protection antisismique sont des exemples phares du développement des fibres de renfort. Le coût des fibres est cependant une limitation pour ce marché naissant pour les matériaux composites. L'utilisation des fibres de carbone

pour des constructions sans influence sur les champs électromagnétiques d'appareils en milieu hospitalier a été démontrée de façon exemplaire au Japon.

Renforcement de matériaux polymères

Les résines thermoplastiques et thermodurcissables constituent le secteur le plus innovant avec une forte croissance : les matériaux composites rigides de structure, voire les matériaux souples renforcés tels que les textiles enduits. Les principales fibres de renfort de ces applications sont le verre, le carbone, l'aramide et le polyéthylène haute ténacité, le polyester (pour les textiles enduits).

Toutes les architectures textiles sont utilisées avec notamment le développement de surfaces textiles multi-axiales ou de volumes. La tendance technologique forte va vers la réalisation de préforme au plus près de la forme finale de l'objet à réaliser, de façon à optimiser les conditions de mise en œuvre, les performances et les coûts.

Les applications de ces renforts couvrent tous les secteurs, de l'aéronautique aux sports et loisirs. L'atout majeur est le rapport performances/poids dû notamment à la faible densité des fibres par rapport aux matériaux traditionnels.

Renforcement de matrices inorganiques

Les métaux, les céramiques et le carbone peuvent être renforcés par des fibres et structures textiles à base de bore, carbure de silicium, silice-alumine et carbone à très haute performance mécanique et thermique et sont utilisés dans des applications aéronautiques et spatiales.

Les matériaux carbone/carbone constituent sans doute le segment de marché le plus large avec des applications notamment dans les disques de frein pour avion. Les performances de la fibre de carbone associées à une distribution spatiale prédéterminée confèrent à la fonction freinage, durabilité, bon coefficient de frottement et évacuation de la chaleur.

Références

- [1] Némoz G., *L'Act. Chim.*, nov. 1999, p. 56.
- [2] Sikkema D.J., *Polymer Fibres 2000*, juillet 2000, Manchester.
- [3] Sikkema D., Northolt M., *Pour la Science*, déc. 99, 266, p. 112.
- [4] Chou T.W., Ko F.K., *Textile Structural Composites*, vol. 3, Composite materials serie, Éd. Elsevier, 1989.
- [5] Olry P., Brevets français n° 2584106 et 2584107.
- [6] Rolincik P., *Sampe Jour.*, oct. 1987, p. 40.
- [7] Cahuzac C., *ECCM*, Bordeaux, 1992, p. 921.
- [8] Verpoest I., *Texcomp 2*, Leuven, mai 1994.
- [9] *TUT*, n° 40, vol. 2, 2001.



Guy Némoz

est chef de Marché textiles techniques à l'Institut Français du Textile-Habillement*.

* avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex.

Tél. : 04 72 86 16 13. Fax : 04 78 43 39 66.

E-mail : gnemoz@ifth.org