

MATÉRIAUX COMPOSITES

Claude Bathias et coll.

MATÉRIAUX COMPOSITES

2^e édition

DUNOD

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



Illustrations intérieures : Alain et Ursula Bouteville-Sanders, Anthony Cristo
Photo de couverture : © Franz Massard_Fotolia.com

© Dunod, Paris, 2005, 2009, 2020 pour la nouvelle présentation
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

ISBN 978-2-10-081163-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	XI
Liste des collaborateurs	XIII
Introduction • Le marché des matériaux composites	1

A

Architecture et mise en œuvre

1 • Fibres de renforcement	9
1.1 Introduction	9
1.2 Fibres de verre	13
1.3 Renforts fabriqués par déposition en phase vapeur	15
1.4 Fibres de carbone	17
1.5 Fibres organiques	22
1.6 Fibres oxydes	26
1.7 Fibres de carbure de silicium	28
1.8 Conclusions	30
1.9 Bibliographie	30
2 • Matrices organiques	31
2.1 Introduction	31
2.2 Matrices thermodurcissables	35
2.3 Matrices thermoplastiques	64
2.4 Bibliographie	72

3 • Interface fibre/matrice	73
3.1 Introduction	73
3.2 Mouillabilité et adhésion	74
3.3 Modèles d'adhésion	74
3.4 Contraintes à l'interface	76
3.5 Caractérisation des interfaces	77
4 • Effets géométriques	83
4.1 Introduction	83
4.2 Répartition périodique des fibres et fraction volumique	83
4.3 Élasticité d'un pli unidirectionnel en fonction de la fraction volumique	84
4.4 Résistance à la traction d'un pli unidirectionnel en fonction de la fibre et de la matrice	88
4.5 Résistance à la traction des composites à fibres courtes	91
4.6 Influence de l'orientation des fibres	92
5 • Méthodes de fabrication	97
5.1 Introduction	97
5.2 Composites à matrice thermodurcissable	98
5.3 Composites à matrice thermoplastique	113
6 • Assemblages	123
6.1 Introduction	123
6.2 Assemblage par collage	123
6.3 Assemblage mécanique	129
6.4 Tenue des assemblages	130
6.5 Durabilité des assemblages	131
6.6 Conclusions	132
6.7 Bibliographie	132
7 • Composites à matrice métallique renforcés par des particules	135
7.1 Introduction	135
7.2 Propriétés physiques	139
7.3 Propriétés mécaniques	141
7.4 Procédés de fabrication	148
7.5 Conclusions	167
7.6 Bibliographie	167

8 • Les composites thermostucturaux	169
8.1 Introduction	169
8.2 Procédés d'élaboration des composites à matrice céramique et carbone	170
8.3 Les composites oxydes	171
8.4 Les composites non oxydes	173
8.5 Le comportement thermomécanique des composites à renfort tissé : relations microstructure/propriétés	176
8.6 Conclusions	194
8.7 Bibliographie	195

B

Comportement des composites

9 • Comportement élastique linéaire	199
9.1 Notion d'élasticité	199
9.2 Loi de comportement en dehors des axes d'orthotropie	205
9.3 Loi de comportement dans le cadre de la théorie des plaques	207
9.4 Détermination des caractéristiques pour un pli unidimensionnel	208
9.5 Théorie classique des stratifiés	210
9.6 Théorie des plaques sandwichs	216
9.7 Bibliographie	219
10 • Rupture des matériaux composites à hautes performances	221
10.1 Introduction	221
10.2 Critères de rupture	222
10.3 Délaminage des matériaux composites	224
10.4 Sensibilité à l'entaille des matériaux composites	237
10.5 Résistance aux impacts	248
10.6 Bibliographie	258
11 • Composites et chocs	261
11.1 Introduction	261
11.2 Effets d'échelle et problèmes de similitude : deux grandes approches pour l'établissement de lois de similitude appliquées aux structures composites	262
11.3 Premiers constats expérimentaux sur des plaques planes	266

11.4	L'influence des conditions aux limites sur la vulnérabilité à l'impact : étude et discussion à partir d'essais sur des coques	275
11.5	Incidence du couple masse-vitesse sur la rupture des fibres dans le cas d'un délaminage restreint	283
11.6	Bibliographie	303
12	• Fatigue des matériaux composites à hautes performances	305
12.1	Introduction	305
12.2	Courbe d'endurance	306
12.3	Effet d'une entaille sur la résistance à la fatigue	311
12.4	Fatigue en compression	313
12.5	Fatigue en flexion	315
12.6	Effet des surcharges en tension	316
12.7	Fatigue après impact	318
12.8	Évolution de la microstructure et des propriétés en cours de cyclage	319
12.9	Conclusions	322
12.10	Bibliographie	323
13	• Vieillissement physico-chimique des matériaux composites à matrice organique	325
13.1	Introduction	325
13.2	Vieillissement humide	326
13.3	Vieillissement thermique	336
13.4	Conclusions	345
13.5	Bibliographie	346

C

Applications des composites

14	• Substitution du métal par le composite	351
14.1	Introduction	351
14.2	Allègement	351
14.3	Durabilité	352
14.4	Production	354
14.5	Dessin des pièces	355
14.6	Conclusions	355
14.7	Bibliographie	356

15 • Applications aéronautiques	357
15.1 Introduction	357
15.2 Programme d'avion de basse consommation énergétique	358
15.3 Mise en œuvre de matériaux composites dans le transport commercial	361
15.4 Navette spatiale	368
15.5 Développement d'une aile de technologie avancée	368
15.6 Harrier AV-8B/GR5	374
15.7 Couplage élastique	380
15.8 Conclusions	387
15.9 Bibliographie	387
16 • Applications marines	389
16.1 Introduction	389
16.2 Matériaux	389
16.3 Environnement marin	392
16.4 Bateaux et navires	395
16.5 Applications sous-marines	398
16.6 Applications offshore	400
16.7 Applications futures	403
16.8 Conclusions	405
16.9 Bibliographie	405
17 • Composites élastomères	407
17.1 Introduction	407
17.2 Conception des composites élastomères	407
17.3 Matériaux	413
18 • Composites intelligents	421
18.1 Introduction	421
18.2 Le concept de technologie intelligente	421
18.3 Technologies intelligentes actuelles	424
18.4 Technologie des capteurs : la fibre optique comme capteur de déformation	429
18.5 Matériaux pour actionneurs	434
18.6 L'actualité mondiale sur les matériaux composites intelligents	442
18.7 Conclusions	444
18.8 Bibliographie	444

19 • Nanocomposites	447
19.1 Introduction	447
19.2 Quelques nanocomposites anciens	450
19.3 Synthèses de particules nanométriques	457
19.4 Nanocomposites modernes	468
19.5 Nanocomposites fibrillaires	476
19.6 Composites à fibres et nanoparticules	491
19.7 Conclusions	494
19.8 Bibliographie	495
Index	509

AVANT-PROPOS

Lorsque l'on pense aux matériaux composites, on a immédiatement présente à l'esprit l'idée de hautes performances associée d'ailleurs à celle d'allègement. Cette image, illusoire en partie, présente les composites comme des matériaux coûteux. Il est vrai que les propriétés spécifiques des fibres de renfort sont exceptionnellement élevées. Il n'est pas rare d'utiliser des fibres dont la rigidité atteint plusieurs centaines de GPa pour une densité de 2. Il est vrai aussi que le succès des matériaux composites dans l'aéronautique a été acquis grâce à leur légèreté et leur résistance à la fatigue. Cependant il ne faut pas oublier qu'un moyeu de rotor d'hélicoptère en fibre de verre coûte deux fois moins cher que la même pièce construite en acier 35NCD16. En réalité, on trouve toutes sortes de produits sur le marché, les fibres coûtant actuellement entre 1 et 1 000 € le kilogramme.

Pour présenter cet ouvrage, je voudrais insister sur le caractère très innovant des matériaux composites qui méritent bien leur classement dans les *matériaux avancés*, pour plusieurs raisons.

D'abord les matériaux composites permettent a priori d'obtenir une graduation continue de propriétés éminemment variables, propriétés physiques ou mécaniques. Par exemple, le module de Young de l'aluminium est confiné autour de 70 GPa, celui de l'acier autour de 200 GPa; en revanche, celui des composites peut être imposé continûment entre 50 et 500 GPa. Ainsi sera-t-il au mieux adapté à la structure, d'où le concept de « matériaux à la carte ».

Ensuite, en généralisant l'idée précédente, le matériau composite peut être complètement conçu en même temps que la structure. Par exemple, la construction d'un réservoir sous pression sera grandement optimisée si les propriétés mécaniques des matériaux sont adaptées différemment au sens longitudinal et au sens circonférentiel du réservoir.

Enfin, les méthodes de fabrication des produits et des structures en matériaux composites permettent de réduire le nombre de pièces et d'intégrer des fonctions techniques, par exemple les articulations souples. Cet avantage des matériaux composites conduit à beaucoup d'innovation mais aussi à une réduction des coûts et à un gain de qualité.

Pour finir cet avant-propos, il convient d'évoquer quelques aspects liés à la durabilité et à la qualité des produits en matériaux composites. Rien de commun avec les matériaux métalliques : il faut « penser composites » selon l'expression du professeur Tsai. Les matériaux composites ne se corrodent pas, ils vieillissent. S'ils sont extrêmement résistants à la traction et à la fatigue, ils sont en contrepartie très vulnérables à la compression et aux chocs. Notons enfin que la conception d'une

pièce en composites passe obligatoirement par un calcul de structure beaucoup plus compliqué que celui de la résistance des matériaux métalliques.

Le contenu de cet ouvrage est volontairement limité à l'étude des matériaux composites pouvant être utilisés en substitution des métaux, voire même associés à des métaux et repensés en termes de systèmes multimatériaux, concept riche d'avenir pour l'industrie. Il comprend trois parties : la première présente l'architecture et la mise en œuvre des composites, la deuxième, leur comportement, et la dernière, leurs applications.

Claude Bathias
Professeur émérite
Université Paris X

LISTE DES COLLABORATEURS

- Chapitre 1 : Anthony Bunsell, ENSMP.
- Chapitres 2 et 5 : Émile Morel, SFIP.
- Chapitre 4 : Jacques Béchet, CNAM, Paris.
- Chapitre 6 : Peter Davies, IFREMER, Brest.
- Chapitre 7 : Jacques Masounave et Vincent Bélanger-Sabourin, École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal.
- Chapitre 8 : Jacques Lamon, Université de Bordeaux 1.
- Chapitre 9 : Laurent Proslie, Université Paris X.
- Chapitre 11 : Jean-Luc Lataillade, Philippe Viot et Ludovic Ballère, ENSAM-Paristech.
- Chapitre 13 : Jacques Verdu, ENSAM.
- Chapitre 15 : Erian Armanios, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Chapitre 16 : Peter Davies et Dominique Choqueuse, IFREMER.
- Chapitre 17 : Pierre Georget, Hutchinson.
- Chapitre 18 : Takehito Fukuda et Kaori Yuse, Université d'Osaka.
- Chapitre 19 : Georges Désarmot, ONERA.

INTRODUCTION • LE MARCHÉ DES MATÉRIAUX COMPOSITES

Le marché des matériaux composites, tous types confondus, se compte en millions de tonnes (10 Mt en 2006) alors que la production mondiale des aciers lui est plusieurs centaines de fois supérieure. Même en tenant compte de la différence de densité, l'avantage reste largement du côté des matériaux métalliques, l'écart se réduisant cependant d'un facteur 3 environ. Lorsque on annonce 10 % en masse de composite dans une automobile européenne, cela représente en fait le tiers du véhicule en volume.

En terme de chiffre d'affaires, le marché des matériaux composites reste modeste par rapport aux matériaux métalliques. Le chiffre d'affaires mondial des composites ne dépasse pas quelques dizaines de milliards d'euros.

En fait, le marché des matériaux composites à hautes performances ne se distingue pas actuellement en chiffre d'affaires mais en terme d'innovation technologique. Il fait partie des matériaux dits « avancés » dont dépend le progrès de nombreux produits marquant la civilisation moderne : avions, hélicoptères, missiles, construction navale, automobiles, skis, etc.

Avant d'étudier le marché économique des matériaux composites à hautes performances, un tour d'horizon du marché global des composites est présenté.

Le marché global des matériaux composites tout confondus

L'histoire récente de la production mondiale des matériaux composites est donnée dans la figure 1.

On constate que la production européenne est sensiblement égale aux deux tiers de celle des États-Unis, alors que celle du Japon est de l'ordre de la moitié de celle des États-Unis, bien que ce dernier soit le premier producteur de fibre de carbone. La production des pièces en matériaux composites a été ralentie depuis 1989, alors que l'Europe a rejoint les États-Unis à ce moment-là.

La production des différents pays européens est consignée dans la figure 2.

L'Allemagne a été le pays moteur de la production des matériaux composites en Europe en raison de la grande variété des secteurs industriels utilisateurs.

L'Italie occupe la seconde place, avec une bonne croissance. La France se situe non loin de l'Italie.

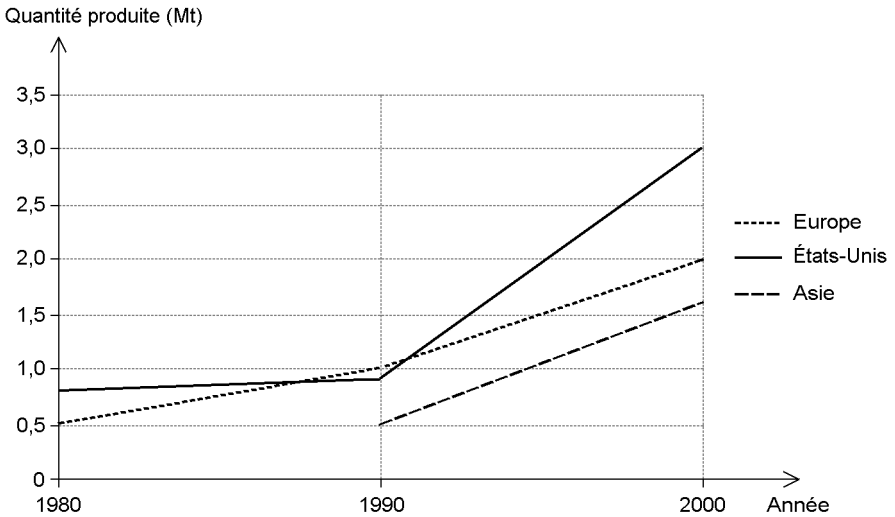


Figure 1 – Production mondiale des matériaux composites.

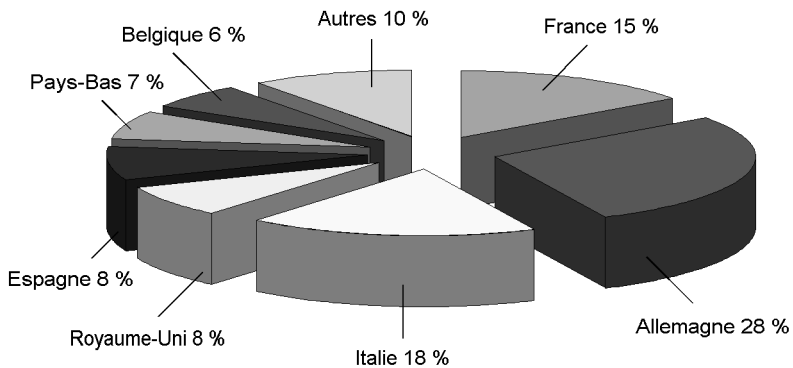


Figure 2 – Parts de marché en Europe (d'après les estimations de Nodal Consultants, 2000).

Enfin la figure 3 termine ce panorama par un classement des pays en fonction de la consommation des composites par application. On observe de grandes disparités de consommations entre les différentes zones géographiques, notamment par l'industrie du bâtiment.

Les États-Unis et l'Allemagne sont en tête de ce classement, suivis du Japon et de la France, la Grande-Bretagne étant située assez loin derrière.

La segmentation par secteur industriel, tous pays confondus, est présentée dans le tableau 1 afin de mettre en évidence les principaux débouchés des matériaux composites dans les principaux pays. La figure 4 complète cette approche en indiquant l'évolution européenne de la pénétration des matériaux avancés par secteur. On notera que le taux annuel de croissance pour les matériaux composites est toujours supérieur à celui du secteur industriel pénétré, ce qui montre la vivacité de ce domaine.

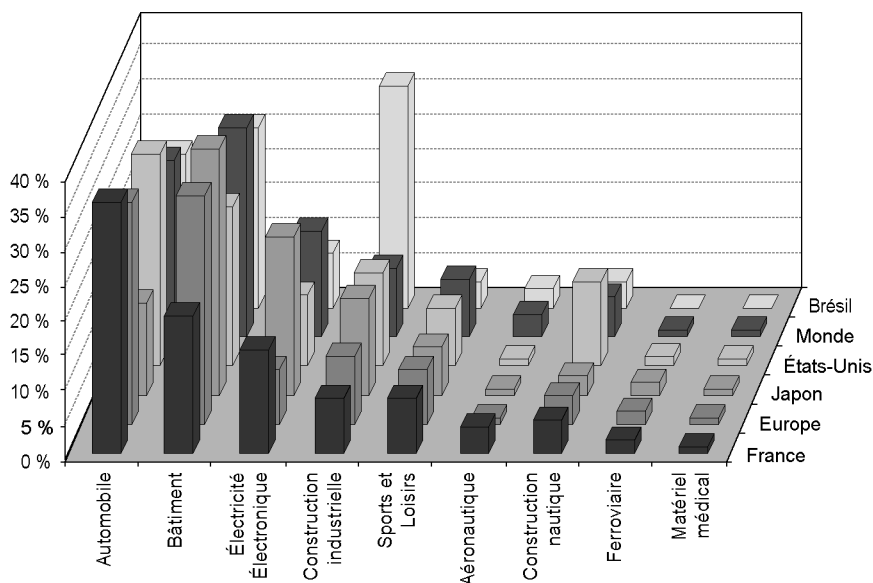


Figure 3 – Répartition géographique de la composition des composites par application.

Tableau 1 – Poids relatifs des applications par zone géographique.

Application	France	Europe	Japon	États-Unis	Brésil	Monde
Automobile % (milliers de tonnes)	36 (108)	32 (640)	13 (221)	30 (1 020)	22 (37)	25 (1 788)
Ferroviaire % (milliers de tonnes)	2 (6)	2 (40)	2 (34)	1 (34)	0 (0)	1 (72)
Aéronautique % (milliers de tonnes)	4 (12)	1 (20)	1 (17)	1 (34)	3 (5)	3 (215)
Construction nautique % (milliers de tonnes)	5 (12)	4 (160)	3 (51)	12 (408)	4 (7)	6 (429)
Construction civile % (milliers de tonnes)	20 (63)	33 (620)	35 (595)	23 (782)	26 (44)	30 (2 145)
Construction industrielle % (milliers de tonnes)	8 (24)	10 (200)	14 (238)	13 (442)	32 (54)	10 (715)
Électricité électronique % (milliers de tonnes)	15 (45)	8 (120)	23 (391)	10 (340)	8 (14)	15 (1 073)
Sports et loisirs % (milliers de tonnes)	8 (24)	8 (160)	7 (119)	8 (272)	4 (7)	8 (572)
Matériel médical % (milliers de tonnes)	1 (3)	1 (20)	1 (17)	1 (34)	0 (0)	1 (72)
Divers % (milliers de tonnes)	1 (3)	1 (20)	1 (17)	1 (34)	1 (2)	1 (72)
Total milliers de tonnes	300	2 000	1 700	3 400	169	7 150

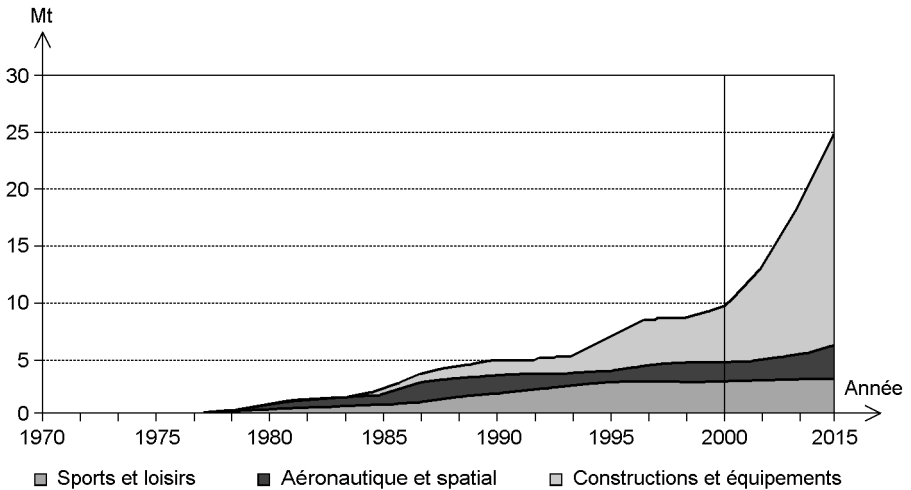


Figure 4 – Évolution de la consommation mondiale des fibres de carbone (en milliers de tonnes).

Notons de plus que le secteur du *packaging* est très dynamique, autant, voire plus, que celui de l'aéronautique pourtant pris pour référence face aux transports terrestres et à l'industrie des loisirs.

En France, les secteurs de l'automobile et de l'aérospatiale occupent 40 % du marché. En revanche, au Japon, le secteur du bâtiment est prépondérant avec une part de 35 %.

Le marché des matériaux composites à hautes performances

Les matériaux composites à hautes performances (HP) comprennent essentiellement des résines thermodurcissables et dans une moindre mesure des résines thermoplastiques, associées à des fibres de verre, carbone, aramide, bore, SiC et SiN.

Le marché mondial des composites HP ne représente que 1,5 % environ du marché des matériaux avancés, contre 8 % pour les composites de grande diffusion.

Il est intéressant de focaliser l'attention sur la fibre de carbone qui est à la base des composites de type aéronautique indispensables par exemple au programme Airbus.

Le marché mondial annuel de la fibre de carbone ex-PAN est de l'ordre de 30 000 tonnes. Le marché mondial de la fibre de verre est de 2,5 Mt/an.

Parallèlement, la capacité de production de fibre de carbone PITCH (issues du goudron de pétrole) est de l'ordre de 2 000 tonnes. Au total la fin des années 1990 est marquée par une surcapacité de production de fibre de carbone puis par une demande très forte liée, au début des années 2000, à l'essor des avions civils de nouvelle génération.

Le Japon produit beaucoup plus qu'il ne consomme, ce qui en fait le premier exportateur. Sa capacité de production est de l'ordre de plus de 5 000 t/an pour une consommation intérieure de 1 500 t à peu près, soit autant que l'Europe et deux fois moins que les États-Unis.

Au Japon, l'évolution récente de la croissance de la production et de la consommation, montre l'effort des Japonais pour le développement des composites à fibre de carbone. Leur capacité de production de fibre de carbone par habitant est trois fois supérieure à celle des États-Unis, et six fois à celle des Européens. Le Japon a donc consenti d'importants investissements dans le domaine de ces fibres à hautes performances.

Le tableau 2 indique les grands secteurs industriels dans le monde où l'innovation par les fibres de carbone est devenue incontournable.

Tableau 2 – Secteurs industriels utilisateurs dans le monde.

	Europe (%)	États-Unis (%)	Monde (%)
Aéronautique	40	50	20
Industrie du sport	30	50	50
Autres	30		30

La part de l'aéronautique est prépondérante aux États-Unis du fait de leur puissante industrie aérospatiale, de même qu'en Europe dans une moindre mesure, alors que dans le reste du monde (Asie essentiellement), la part de l'industrie du sport est en tête.

Conclusions

La production des matériaux composites à hautes performances est de l'ordre de 1 % de la production globale des composites en France, incluant les plastiques renforcés.

Cette production est marginale en tonnage, mais le chiffre d'affaires est largement supérieur à 1 % en raison du prix des composites HP de 10 à 50 fois plus élevé que ceux des composites à grande diffusion.

Après un développement fulgurant dans les années 1970, ralentie entre 1980 et 1990, la production globale des matériaux composites à hautes performances a perdu un peu de son dynamisme à partir de 1989, pour le retrouver en 2005.

Les principaux secteurs industriels consommateurs de matériaux composites HP sont essentiellement l'aéronautique, l'industrie spatiale, la construction navale, l'industrie du sport, l'électronique, le génie chimique.

Bibliographie

1. Ministère de l'Industrie, *L'industrie française des composites*, mai 2002.
2. J. MATSUI (Toray Industrie), exposé au Japon, 1993.
3. J. LAMANACHE (Vetrotex), *Le marché européen des composites*, juin 1993.
4. Centre de promotion des composites (CPC)/Syndicat général de l'industrie du plastique armé (SGIPA), *Étude économique sur l'industrie française des matériaux composites*, 1991.
5. Syndicat professionnel des productions de matières plastiques (SPPMP), *Les composites : données économiques et prévisions européennes et mondiales de 1987 à 1995*, 1990.
6. Revue *Composites*, n° 2, mars/avril 1994.
7. Revue *Caoutchouc et Plastiques*, n° 684, février 1994.
8. Revue *Plastiques modernes et Élastomères*, mars 1991.

A

Architecture
et mise en œuvre

1.1 Introduction

Une fibre est une forme de matière extraordinaire possédant une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevés que ceux du même matériau sous forme massive. Sous la forme d'un filament fin, les propriétés d'un matériau sont beaucoup plus proches des valeurs théoriquement possibles que tout autre forme de matière, surtout en résistance à la rupture. En effet, la résistance à la rupture d'un matériau n'est pas une propriété intrinsèque mais dépend des défauts présents à la surface ou dans le volume du matériau, qui engendrent des concentrations de contrainte. Le verre est un matériau élastique, et chaque enfant qui a envoyé un ballon dans une vitre sait qu'il est fragile. La résistance à la rupture du verre dépend des micro-défauts superficiels.

Si nous étirons à chaud du verre sous forme massive, il est facile de montrer que la surface doit subir des changements drastiques. La figure 1.1 montre un cylindre de matière étirée, d'un diamètre réduit à un centième de sa valeur initiale. Le diamètre des trous d'une filière pour fabriquer des fibres de verre est d'environ 1 mm et le diamètre de la fibre est de l'ordre de 10 μm . Nous pouvons ainsi voir que la longueur de la matière a augmenté de 10 000 fois, si nous conservons le volume; un calcul simple montre que la surface a été multipliée par 100. Le mouvement massif de la matière de l'intérieur de la fibre à la surface efface tous les défauts de surface qui auraient affaibli le verre dans sa forme initiale; en conséquence sa résistance augmente. De plus, pour des longueurs égales, le volume de la fibre est nettement réduit, ce qui diminue la probabilité de trouver des défauts importants dans la masse du matériau; il en résulte une nouvelle amélioration de la résistance. Un assemblage de fibres ayant le même volume que le cylindre initial de verre aura donc une résistance beaucoup plus élevée. Pour ces raisons, une fibre de verre peut avoir une résistance des centaines de fois plus élevée que le même verre de forme massive. L'analyse statistique de Weibull sur la rupture des fibres est indiquée dans la référence bibliographique [1].

Le verre est un matériau vitreux et isotrope, il le reste même après un étirage. Le module d'élasticité reste donc inchangé et reflète la structure de la matière et son organisation. La fibre de verre possède en conséquence le même module de Young que le verre massif.

Pourtant, si la structure peut être alignée parallèlement à l'axe de la fibre, elle aura un module de Young plus important dans ce sens. Le développement des fibres organiques au milieu du XX^e siècle a été l'origine d'une grande famille de fibres qui possèdent des propriétés reliant surtout une grande rigidité axiale à une faible densité.

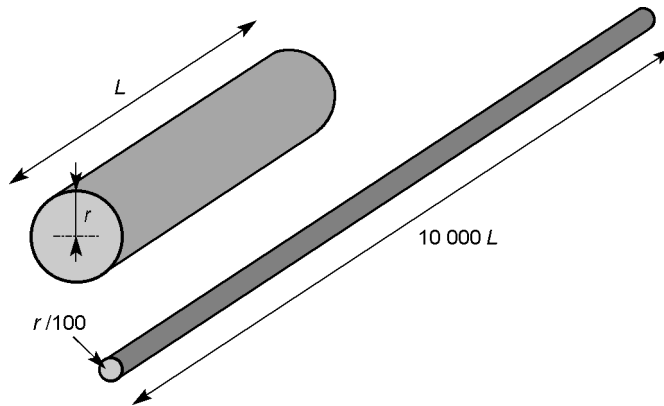


Figure 1.1 – L'étirage d'un matériau provoque une redistribution de la matière, augmente l'aire du cylindre et élimine des défauts superficiels.

Une première technique pour aligner la structure est l'étirage. La figure 1.2 montre comment la structure moléculaire des polymères peut être alignée par étirage.

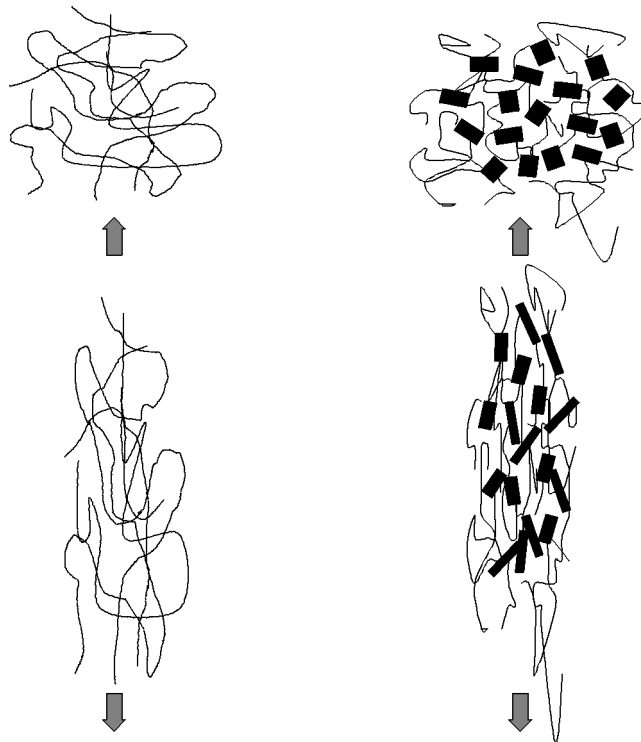


Figure 1.2 – Effet d'un étirage, à gauche sur un polymère amorphe, à droite sur un polymère semi-cristallin. Les zones noires représentent des régions cristallines.

Celui-ci est utilisé par l'industrie textile pour produire des fibres, telles que les fibres de Nylon (polyamide) ou de polyester, ayant des propriétés différentes (figure 1.3). Cependant, le module atteint un maximum en raison de l'enchevêtrement des molécules qui, à la limite, provoque leur rupture.

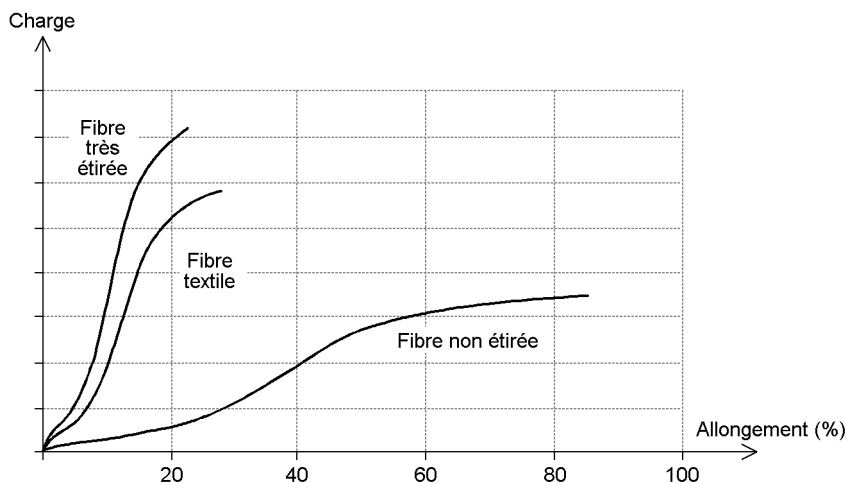


Figure 1.3 – L'étirage d'une fibre thermoplastique augmente la raideur et la résistance à la rupture en diminuant la déformation à la rupture.

Pour mieux aligner les macromolécules, les fabricants de fibres se sont tournés vers la technologie des cristaux liquides. Certaines solutions de polymères montrent, à la lumière polarisée, des zones d'orientation. Les macromolécules de ces polymères contiennent des groupements cycliques très rigides ; elles ne peuvent donc pas être pliées comme les molécules linéaires. Une solution mésophase de ce type permet à ces macromolécules de bouger dans l'espace et de rencontrer d'autres macromolécules du même type. Les forces dues aux liaisons hydrogène ou de Van der Waals les orientent localement dans la solution. Dans un bac qui contient une telle solution, les régions des cristaux liquides sont globalement arrangées d'une façon aléatoire, mais si la solution passe par une filière, elles deviennent orientées, parallèles à l'axe de la fibre, en raison de l'écoulement de la solution (figure 1.4). Les fibres fabriquées par cette méthode, telle que le Kevlar, possèdent une très grande rigidité dans la direction axiale, même sans étirage, mais sont très anisotropes et fibrillaires. Il est également possible d'aligner les macromolécules d'un thermoplastique simple en solution très diluée afin de permettre une grande mobilité des macromolécules. Une optimisation des conditions d'étirage peut également aligner la structure moléculaire. Cette dernière technique est employée pour produire des fibres telles que le Dyneema® fabriqué à partir de polyéthylène haute densité.

On renforce un matériau afin de produire un matériau structural à la fois léger, résistant et rigide, autrement dit possédant des propriétés spécifiques (rapport de résistance ou de rigidité à la densité très élevée). La rigidité de la matière n'est pas

liée à la densité puisque la résistance de séparation des atomes est contrôlée par les électrons de valence à la périphérie et non par le noyau. Pour cette raison, des fibres de très haut module élastique sont fabriquées avec les éléments parmi les plus légers. Le carbone est le sixième élément dans le tableau de Mendéléïev, et la liaison entre les atomes de carbone est la plus forte que nous trouvons dans la nature. Les premières fibres de carbone ont été fabriquées par pyrolyse de fibres naturelles de bambou et plus tard par la conversion des fibres de cellulose régénérée; mais le taux de carbone disponible dans la cellulose pour fabriquer des fibres de carbone n'est que de 24 % tandis qu'il est de 49 % dans les fibres de polyacrylonitrile (PAN). Ces dernières, qui sont très similaires aux fibres acryliques utilisées dans les moquettes, sont à la base de la plupart des fibres de carbone fabriquées comme renforts pour les matériaux composites. La pyrolyse du PAN sous azote au-delà de 1 000 °C donne des fibres de carbone. Une température de pyrolyse de 1 500 °C leur fournit une résistance à la rupture maximale tandis que des températures plus élevées augmentent leur module mais aux dépens de la résistance. Une variation de la température de pyrolyse permet alors la fabrication d'une grande gamme de fibres de carbone ayant des propriétés différentes.

Il est possible de fabriquer des fibres de carbone à partir du résidu du raffinage de pétrole ou de houille de charbon. Ces matériaux sont connus sous le nom *brai* ou, en anglais, *pitch*. Le brai contient jusqu'à 90 % de carbone mais le raffinement de ce matériau naturel est coûteux. Les fibres de carbone produites à partir du brai possèdent les modules de Young les plus élevés de toutes les fibres.

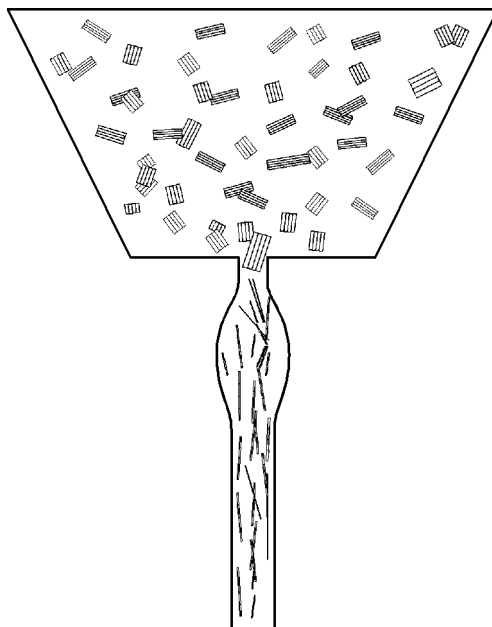


Figure 1.4 – Alignement des cristaux liquides par l'écoulement d'une solution mésophase pour produire une fibre organique de très haut module.

Un procédé semblable à celui utilisé pour la fabrication de fibres de carbone peut être employé pour produire des fibres céramiques de petit diamètre (environ 10 μm) à base de carbure de silicium. Il est ainsi possible de fabriquer des composites à matrice céramique résistant à des températures supérieures à 1 000 °C. D'autres fibres céramiques peuvent être fabriquées à partir d'oxydes. Ces fibres trouvent des applications comme isolant réfractaire et sont utilisées dans le renforcement des alliages légers. Les fibres de bore et de carbure de silicium sont fabriquées sur des substrats par la technique de déposition en phase vapeur. Ces fibres sont des filaments de grand diamètre (environ 140 μm) et les fibres de SiC fabriquées par cette méthode peuvent renforcer du titane.

1.2 Fibres de verre

La production industrielle des fibres de verre a débuté dans les années 1930 aux États-Unis où deux sociétés ont commencé à fabriquer des filtres industriels composés de fibres de verre. Les deux sociétés ont fusionné en 1938 pour devenir Owens Corning. Depuis, le marché des fibres de verre s'est beaucoup développé et les fibres sont devenues les renforts les plus utilisés dans les matériaux composites. Elles représentent plus de 99 % en poids des renforts utilisés dans les composites si nous ne tenons pas compte du caoutchouc renforcé.

Le verre est composé essentiellement de silice (SiO_2), abondante puisqu'elle est le constituant principal du sable et peu chère. Néanmoins la silice possède une température de fusion d'environ 1 750 °C et cette température élevée exclut la possibilité de filer de la silice fondue à travers une filière, faute de trouver un matériau pour la filière qui puisse résister à cette température. La silice est donc combinée avec d'autres éléments tels que l'oxyde de sodium (Na_2O), l'oxyde de potassium (K_2O), le fluor (F), l'oxyde de calcium (CaO), l'oxyde de magnésium (MgO) et l'oxyde de bore (B_2O_3) pour mieux contrôler la température alors réduite à environ 1 200 °C. D'autres éléments tels que l'alumine (Al_2O_3) sont employés pour stabiliser la structure du verre et pour modifier ses propriétés physiques. La composition des différents types de verre est donnée dans le tableau 1.1. Le verre de type E est le plus souvent utilisé pour les renforts. Il a initialement été développé pour ses propriétés électriques – ce qui explique la lettre E. Le verre E est moins cher que les autres verres en vertu du volume de production mais nous pouvons noter que le module de Young ainsi que la densité sont similaires à ceux de l'aluminium. Le verre n'apporte en conséquence aucun avantage quant aux propriétés spécifiques par rapport à l'aluminium. Les verres du type S (*strength*) ou R (*resistance*), qui contiennent plus d'alumine, possèdent des propriétés mécaniques plus élevées que celles du type E et sont utilisés pour des structures à hautes performances en verre résine. Le verre C résiste bien à la corrosion en milieux acides et le type D a été développé pour des applications diélectriques.

Le verre fondu est filé à travers une filière qui contient des centaines de trous de 1 ou 2 mm environ de diamètre. Les filaments sont étirés à un diamètre final compris entre 5 et 15 μm , ce qui produit une mèche de fibres de verre. Les fibres de verre sont plus résistantes que le verre massif en raison du moins grand nombre de défauts mais les propriétés intrinsèques telles que le module de Young restent

inchangées. La densité du verre sous forme de fibre est légèrement moindre en raison de la plus grande vitesse de refroidissement qui génère une structure plus ouverte dans la fibre que celle présente dans le verre massif. Les fibres de verre sont fragiles et élastiques, elles sont susceptibles d'être endommagées par abrasion. C'est pour cette raison que les fibres sont revêtues, pendant le filage, d'une résine dont le premier rôle est de protéger les fibres. Ce revêtement est appelé *ensimage*. De plus, l'ensimage sert de lubrifiant pour la transformation de la fibre en tissu ou autre produit, et d'adhésif avec la résine. Il contient aussi, pour certaines applications, un agent antistatique.

Tableau 1.1 – Composition et propriétés des fibres de verre.

Type de verre	E	S	R	C	D
SiO ₂	54	65	60	65	74
Al ₂ O ₃	15	25	25	4	
CaO	18		9	14	0,2
MgO	4	10	6	3	0,2
B ₂ O ₃	8			5,5	23
F	0,3				
Fe ₂ O ₃	0,3				
TiO ₂					0,1
Na ₂ O				8	1,2
K ₂ O	0,4			0,5	1,3
Propriétés					
Densité	2,54	2,49	2,49	2,49	2,16
Résistance (20 °C) (GPa)	3,5	4,65	4,65	2,8	2,45
Module élastique (20 °C) (GPa)	73,5	86,5	86,5	70	52,5
Déformation à la rupture (20 °C) (%)	4,5	5,3	5,3	4,0	4,5

Les fibres de verre sont fabriquées en continu et enroulées sur des bobines (figure 1.5), avant d'être transformées en composites.

Les fibres peuvent être tissées, comme les fibres textiles utilisées pour fabriquer des mats non tissés dans lesquels la disposition des fibres est aléatoire. Ces deux produits peuvent par la suite être drapés pour prendre la forme voulue puis imprégnés de la résine pour fabriquer le composite. D'autre part, les fibres peuvent être coupées et mélangées à une résine afin d'obtenir un produit semi-fini qui pourra ensuite être moulé.

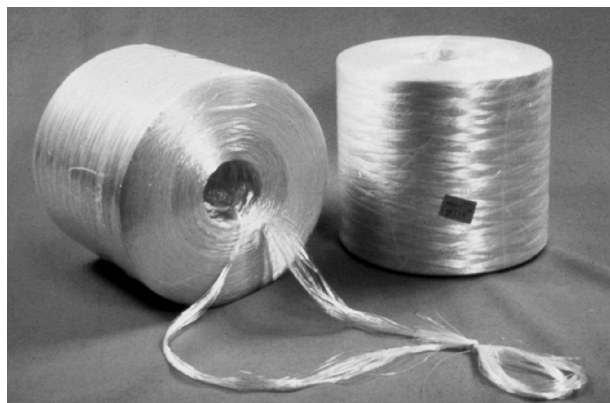
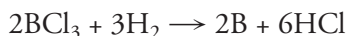


Figure 1.5 – Bobines de fibres de verre.

1.3 Renforts fabriqués par déposition en phase vapeur

Jusque dans les années 1960, les fibres de verre étaient les renforts les plus raides disponibles. Toutefois, des fibres ayant des modules de Young beaucoup plus élevés ont été développées pendant cette décennie; la fibre de bore fut la première. Le bore est le cinquantième élément dans le tableau de Mendeleïev mais est trop dur pour être tréfilé ou fondu puis converti en filament. Les filaments de bore sont fabriqués par déposition de bore en phase vapeur (CVD en anglais) sur un substrat de tungstène (schéma de gauche de la figure 1.6). Cette technique de déposition d'un matériau sur un substrat permet d'obtenir un dépôt dense composé de petits grains de bore. Le tungstène est utilisé, sous forme de filament, comme substrat car il conserve sa résistance mécanique à haute température; il est de plus conducteur électrique et disponible sous forme filamentaire pour les filaments des ampoules électriques. Les filaments utilisés comme substrat ont un diamètre d'environ 12 μm et le diamètre du filament de bore produit est de 140 μm .

Pour fabriquer un filament de bore, du trichlore de bore (BCl_3) est mélangé avec de l'hydrogène (H_2) à une température de 1 100 °C environ. Un dépôt de bore (B) peut être ainsi réalisé suivant la formule :



Le filament de tungstène est chauffé par effet Joule lors de la déposition.

Les fibres de bore sont très résistantes non seulement en traction mais aussi en compression. Leur comportement est élastique de la température ambiante à 650 °C mais la résistance à la rupture décroît progressivement au-delà de 300 °C en raison de l'oxydation de la surface.

Le tableau 1.2 donne les propriétés des fibres de bore et des fibres de carbure de silicium (SiC), qui sont également produites aux États-Unis et en Grande-Bretagne par déposition en phase vapeur sur un substrat de tungstène ou de carbone (voir § 1.7). La section d'une fibre de SiC est représentée figure 1.7.

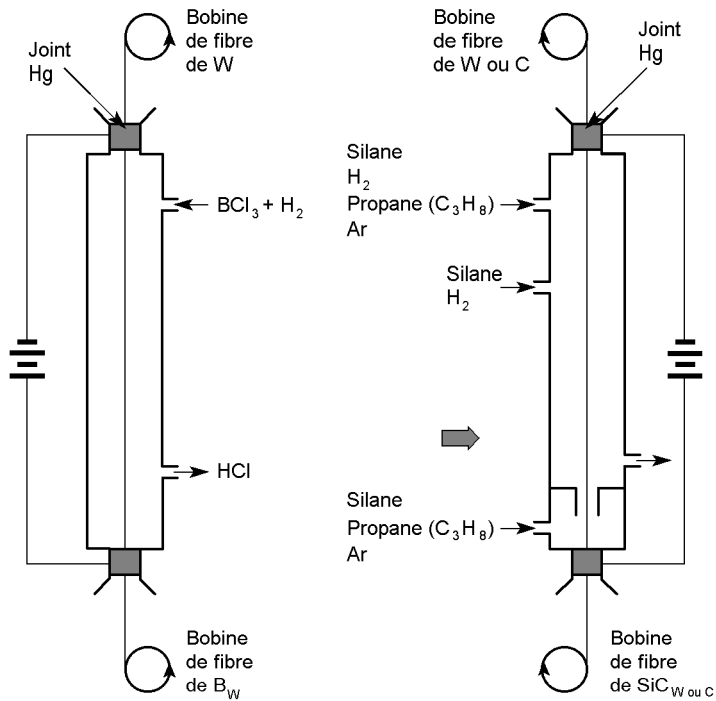


Figure 1.6 – Fabrication des fibres de bore (à gauche) et des fibres de SiC (à droite) par dépôt en phase vapeur.

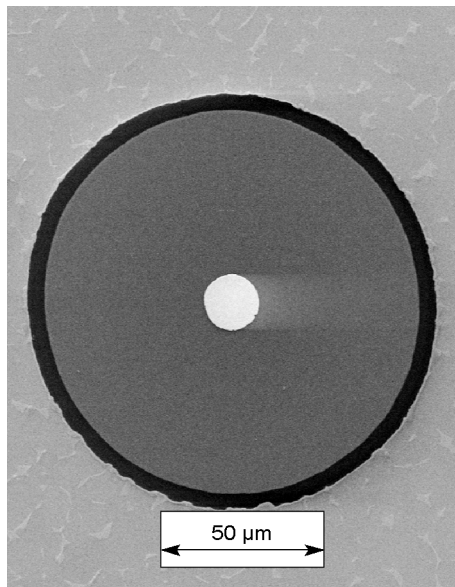


Figure 1.7 – Section d'une fibre de SiC fabriquée par dépôt en phase vapeur. On voit le substrat ainsi que la couche protectrice à la surface.