

Matériaux Composites

Vincent Ji

vincent.ji@universite-paris-saclay.fr

SP2M/ICMMO, bât. HM1, 3ème

Tel: 01 69 15 48 19

06 10 37 44 38

Matériaux Composites

Mécanique: CM + 4TD

→ élasticité et micromécanique

Technologie: CM

généralité (application, matrice, renfort, additif,)

caractérisation (physique/chimie/mécanique)

mise en forme (transformation)

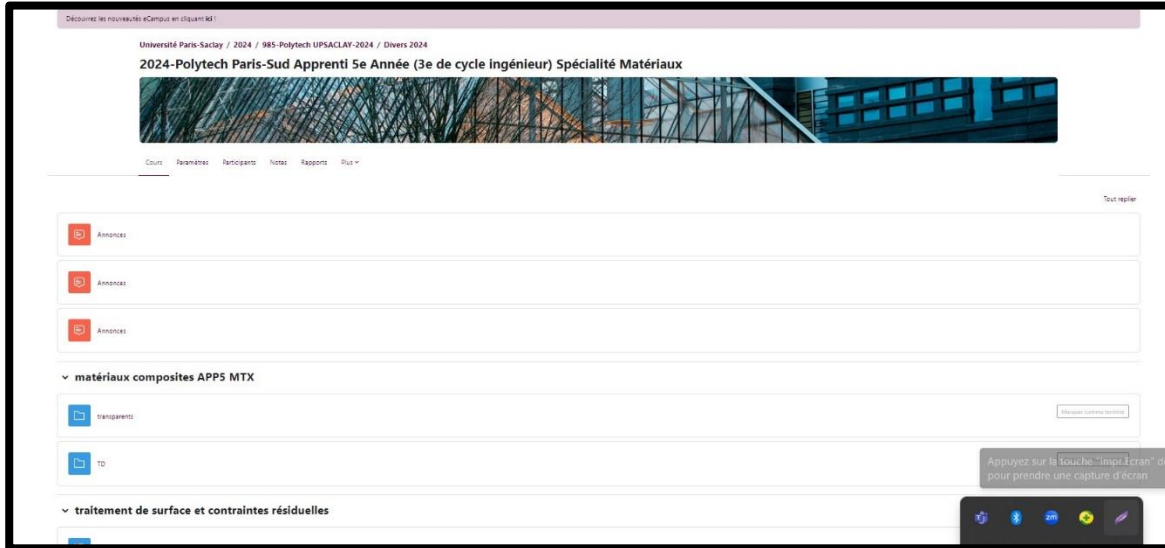
usinage et collage

contrôle et CND

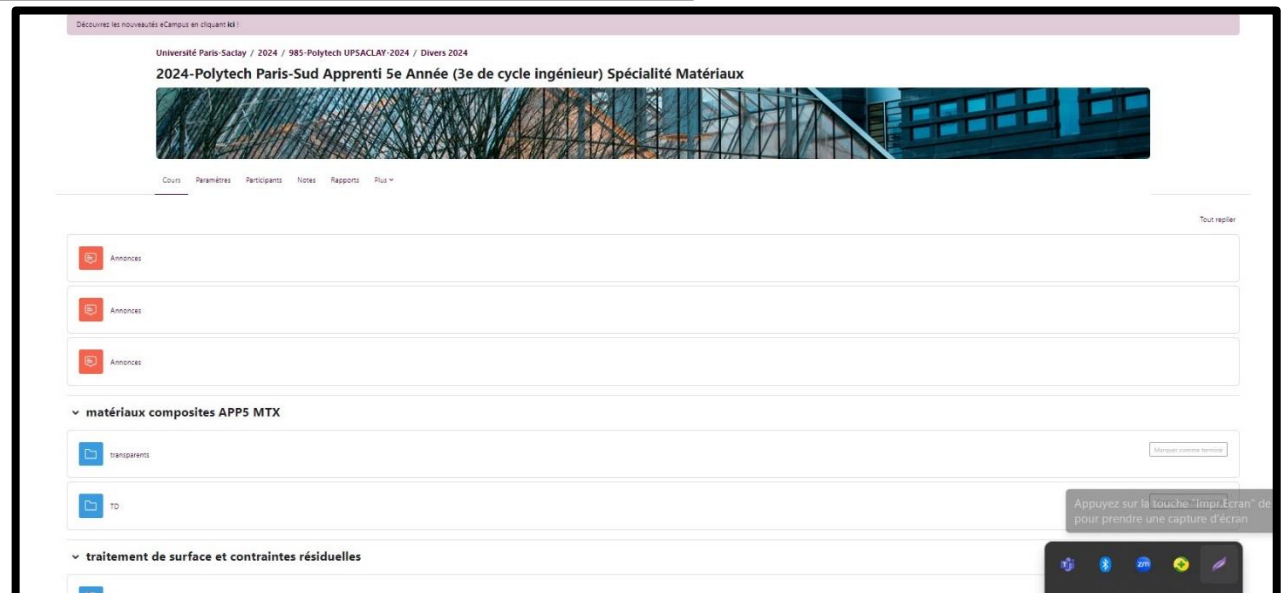
Matériaux Composites

	ET5	APP5
Cours	03/09 (2h), 04/09 (2h), 06/09 (2h), 11/09 (2h), 13/09 (2h),	03/09 (2h), 04/09 (2h), 06/09 (2h), 11/09 (2h), 13/09 (2h)
TD	17/09 (2h) 18/09 (2h) 24/09 (2h) 25/09 (2h)	10/09 (2h) 12/11 (2h) 14/11 (2h) 19/11 (2h)
Contrôle en écrit Oral	Mercredi 20/11 (2h) 02/12 (AM) et 03/12 (M)	Mercredi 20/11 (2h) -

Matériaux Composites



Rubrique/icône:
transparents



Matériaux Composites

Bibliographie:

- 1) **Matériaux composites** / Daniel Gay, 2005
- 2) **Structures composites** : calcul des plaques et des poutres multicouches / Christian Decolon, 2000
- 3) **Matériaux composites** / Claude Bathias ; 2009
- 4) **Matériaux composites** : comportement mécanique et analyse des structures / Jean-Marie Berthelot, 2005
- 5) **Matériaux composites à matrice organique** : constituants, procédés, propriétés / P. É. Bourban, L. Carlsson, J. P. Mercier, 2004
- 6) **La vie intime des matériaux composites** / F. Chinesta, 2011

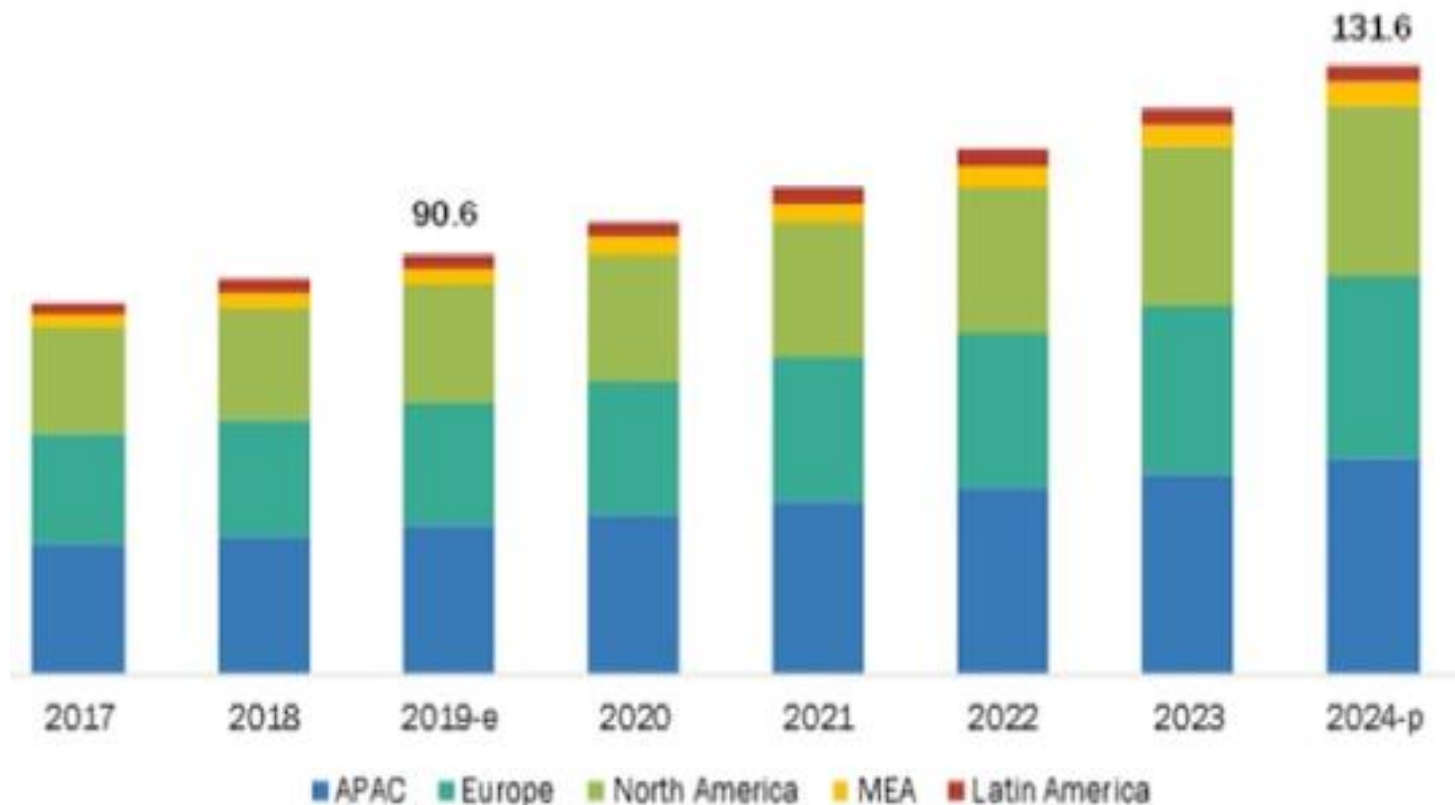
Matériaux Composites

- A) Généralité,
- B) Transformation
- C) Essais dynamiques
- D) Essais statiques
- E) Contrôle de défaillances et CND
- F) Usinages et collages
- G) Applications de collages
- H) Anticorrosion
- I) Vieillessement
- J) CMM et nano

Matériaux Composites (A)

- 1) Domaines d'applications (aéronautique, transport, bâtiment, loisir et sports, autres domaines)
- 2) Composites: GP et HP
- 3) Renforts (fibre de verre, fibres de carbone, fibres aramide, fibres PE haute ténacité, fibres naturelles, fibres biodégradable)
- 4) Propriétés des fibres
- 5) Architectures de renforcement
- 6) Matrices (Résines thermodurcissables, Résines thermoplastiques)
- 7) Principales combinaisons résine /renforts

Composites: grand marché

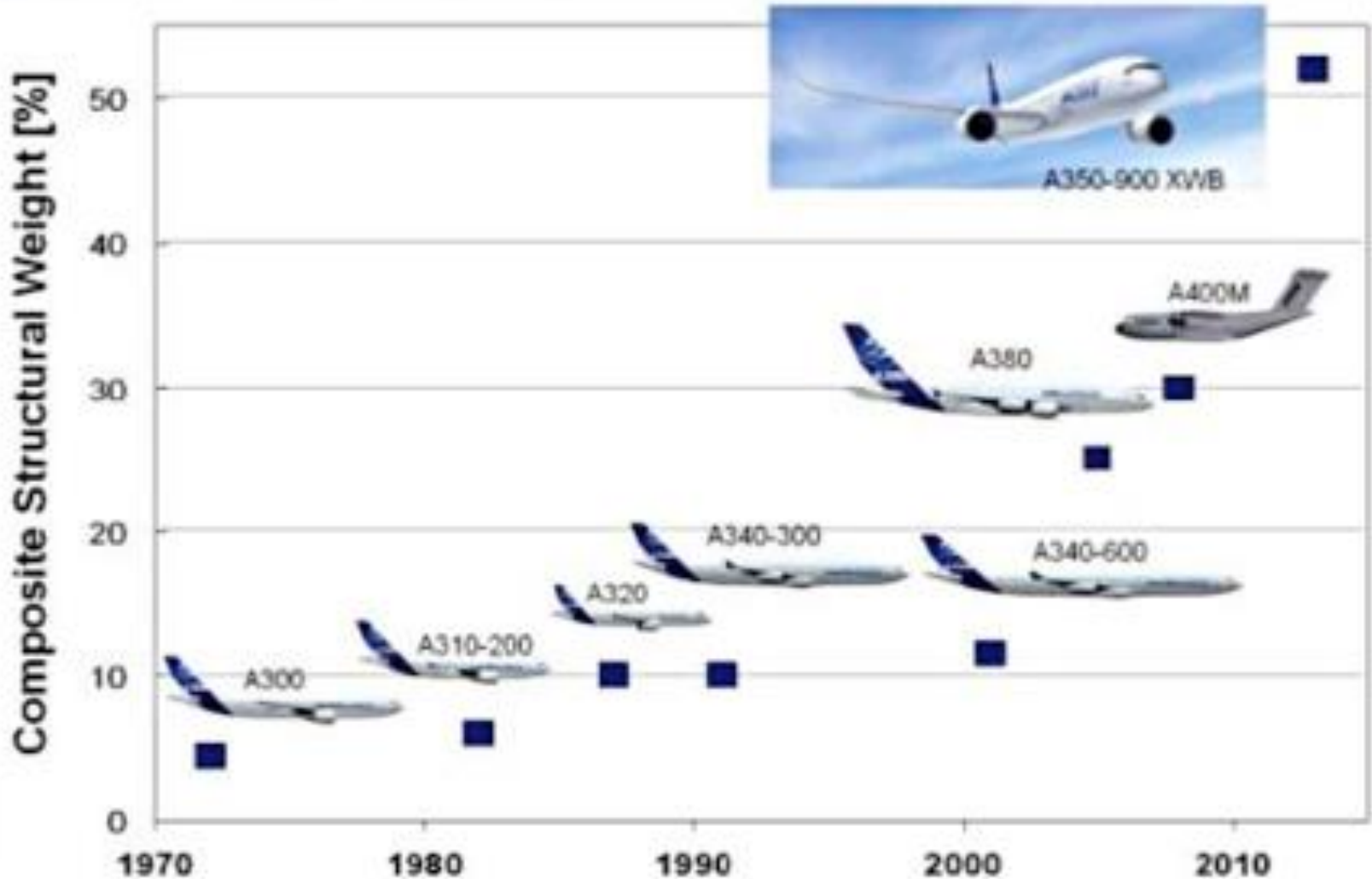


©2019 MarketsandMarkets Research Private Ltd. All rights reserved.

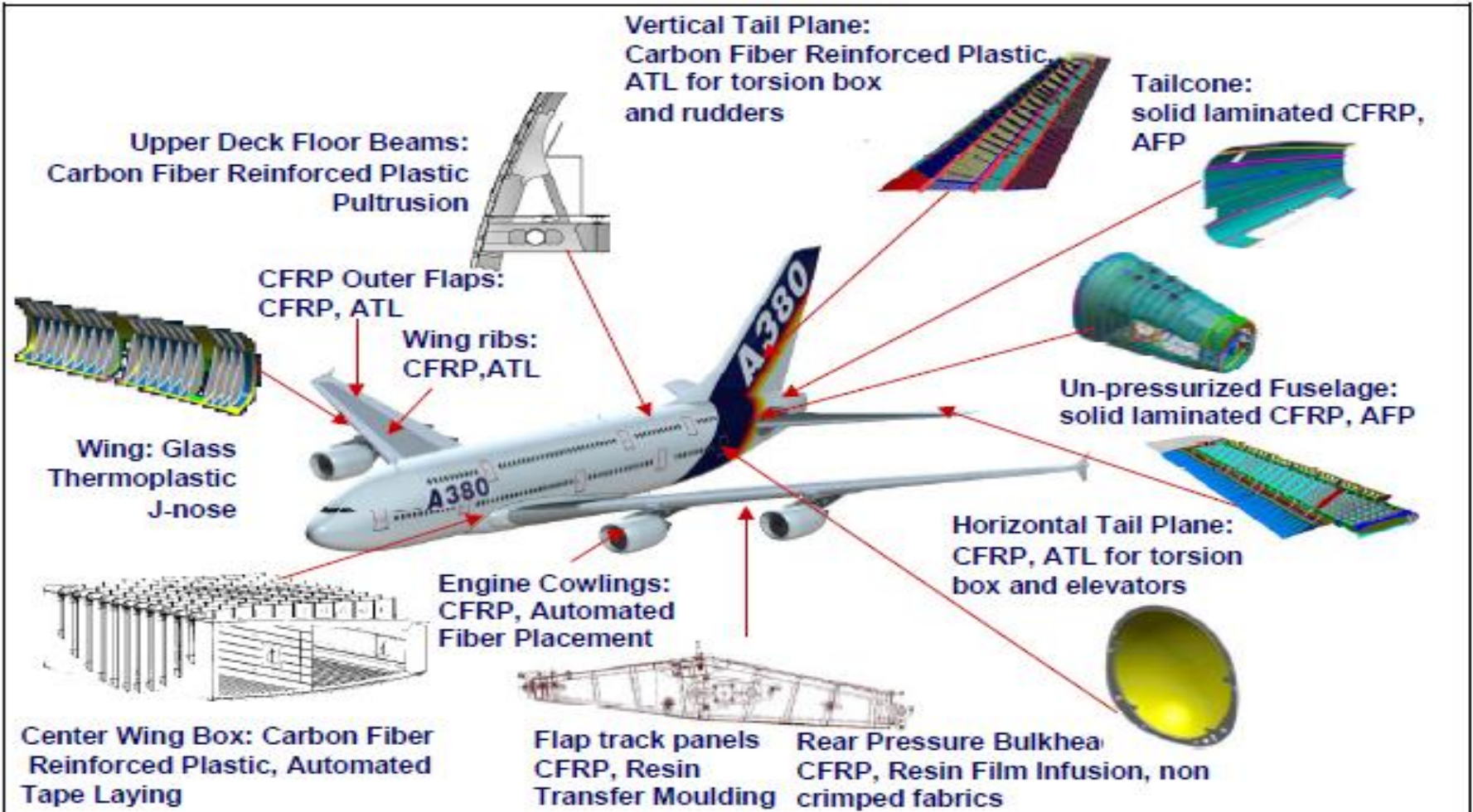
Note: e= estimated; p= projected.

Le marché mondial des composites par grandes régions
(en milliards de dollars)

Composites: application → Aéronautique

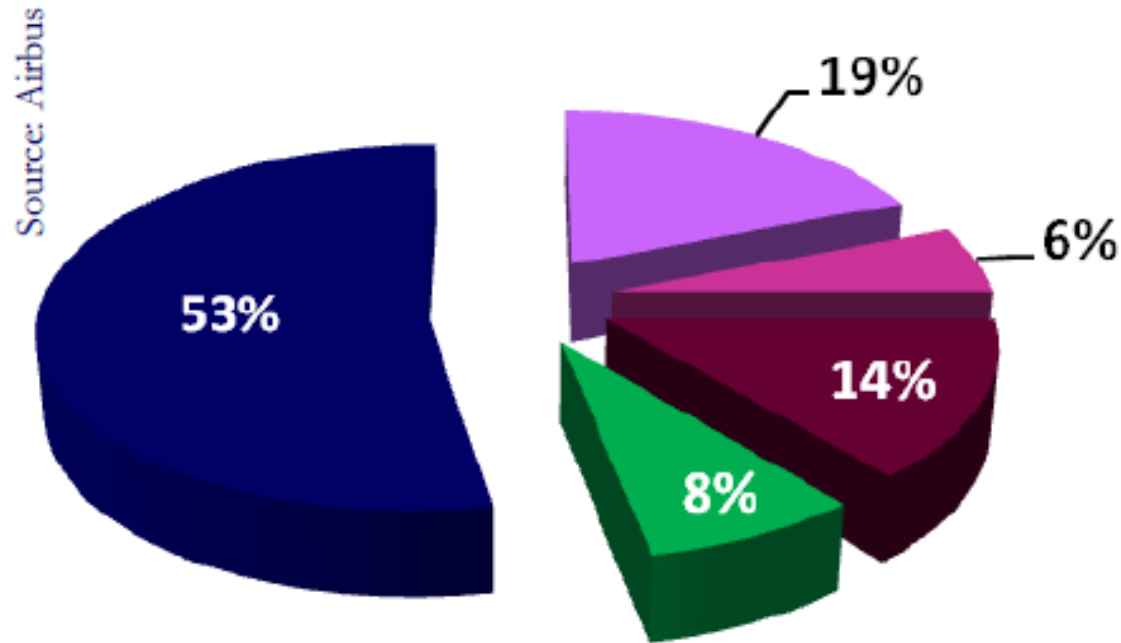


Composites: application → Aéronautique



Principales applications des composites à matrice organique sur l'Airbus A380

Composites: application → Aéronautique



The first Airbus with a structure over 50%
composites

■ Al/Al-Li ■ Steel ■ Titanium ■ Misc. ■ Composites

Structure en matériaux composites de l'A 350

Composites: application → Aéronautique

- Boeing 737
- Hélicoptère de Bell Textron
- CRJ de Bombardier



Composites: application → Aéronautique

- Propulseur NASA
- Station internationale
- Canadarm de Spar



Composites: application → Transport

- NEV de Bombardier
- Formule 1 de BAR
- Viper de Chrysler



Composites: application → Transport

- Camion de Paccar
- Train de Bombardier
- Autobus de Novabus



Composites: application → bâtiment

Les qualités des composites (légèreté, résistance au feu, résistance mécanique et chimique, possibilité de créativité) sont prometteuses.

Les fournisseurs ont développé de nombreux produits depuis 2000: fenêtres, portes, substituts d'ardoise, renforts de poutres, etc.

Dans ce secteur, l'origine française de leaders mondiaux du BTP (Bouygues, Vinci, etc.) est un atout fort pour le développement commercial des technologies composites.

Composites: application → bâtiment

- Isolateur de ligne
- Perche isolante
- Luminaire de rue
- Échelle isolante



Composites: application → Loisirs et sports

- Ski alpin
- Planche à voile
- Vélo de compétition
- Patin à roues alignées



Composites: application → Loisirs et sports

- SEA DOO
- JET BOAT
- Catamaran



Composites: application → autres domaines

Les **matériels ferroviaires** utilisent les matériaux composites,

- les développement de l'entreprise d'équipements de trains pendulaires, Comtas,
- Bombardier-ANF de réaliser des wagons en structure composite.

L'équipement industriel (boîtes de stockage, isolation) et **l'équipement électronique**, représentent 26% du marché des composites à matrice organique. Le potentiel plurifonctionnel des composites (alliant par exemple étanchéité et propriétés électriques) est important.

En **électronique**, les boîtiers céramiques pour microprocesseurs d'Égide sont utilisées dans le monde entier.

Composites: application → autres domaines

Les composites jouent un rôle croissant dans le **secteur dentaire** (implants) et **biomédical** (matériaux prothétiques), en dépit de fortes contraintes de bio-compatibilité.

la réalisation **d'instruments de musique** (pianos, clavecins, violons et accordéons) offre des opportunités de niches prestigieuses, porteuses d'image du savoir-faire.

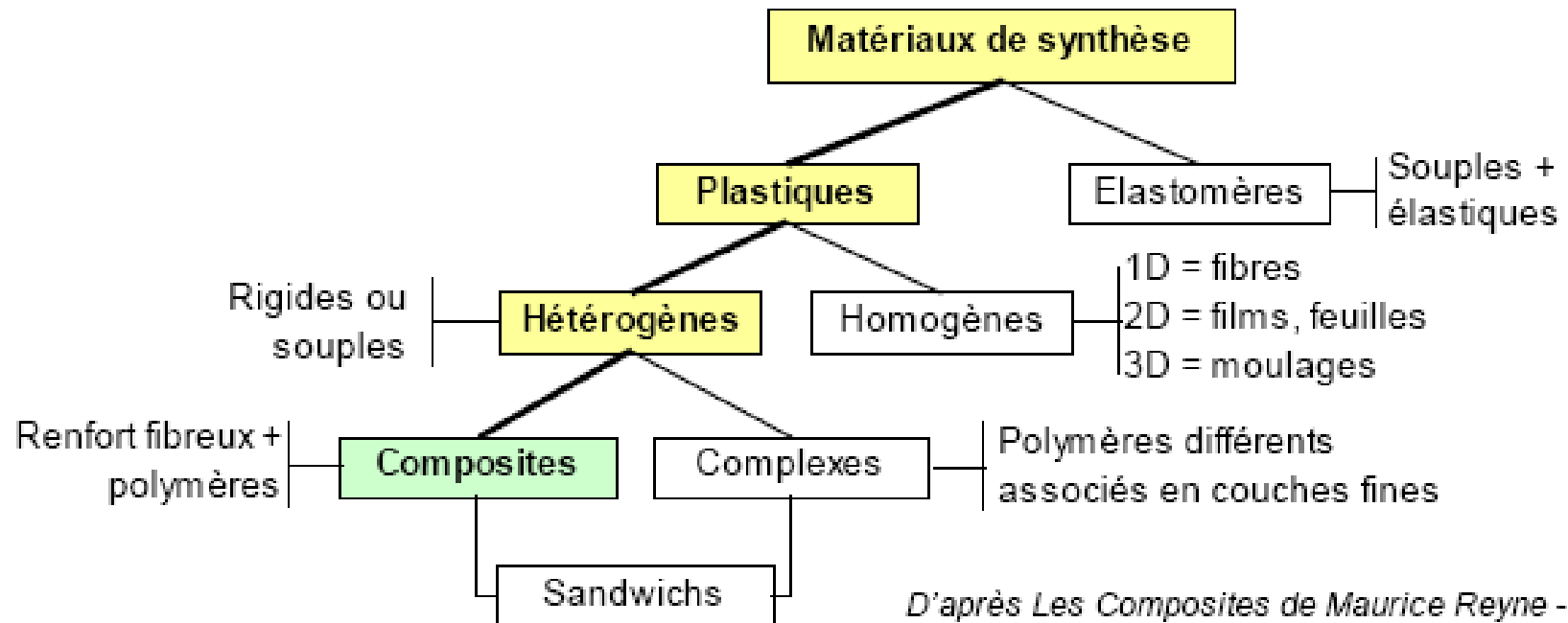
Composites: MATERIAUX & TECHNOLOGIES

Les matériaux composites ont été limités à ceux constitués par :

- une **matrice organique**, résine thermoplastique (TP) ou thermodurcissable (TD),
- une **structure de renfort** constituée de fibres, qui peuvent être de verre, de carbone, d'aramide ou de fibres naturelles (lin, chanvre, sisal),
- ces deux constituants principaux reçoivent des **additifs** ou **charges** nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice. Ils permettent de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés : pigments de coloration, agents anti-UV, charges ignifugeantes, isolation thermique ou acoustique.

Composites: MATERIAUX & TECHNOLOGIES

Arborescence des matériaux de synthèse



D'après Les Composites de Maurice Reyne - PUF

Dans le cadre de cette présentation, on distingue deux grandes familles

- les composites de **grande diffusion (GD)**, peu coûteux, occupent une large part de marché,
- les composites **hautes performances (HP)**, assez onéreux, dont le marché est réduit.

Composites: MATERIAUX & TECHNOLOGIES

- Les GD représentent 95% des composites utilisés
- des plastiques armés ou des plastiques renforcés,
 - le taux de renfort avoisinant 30%.
 - dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas maîtrisée (avec fibres courtes).
 - les principaux constituants de bases sont les résines polyesters (95% des résines thermodurcissables) avec des fibres de verre (+ de 99% des renforts utilisés !).
 - renforts et matrices sont à des coûts voisins.

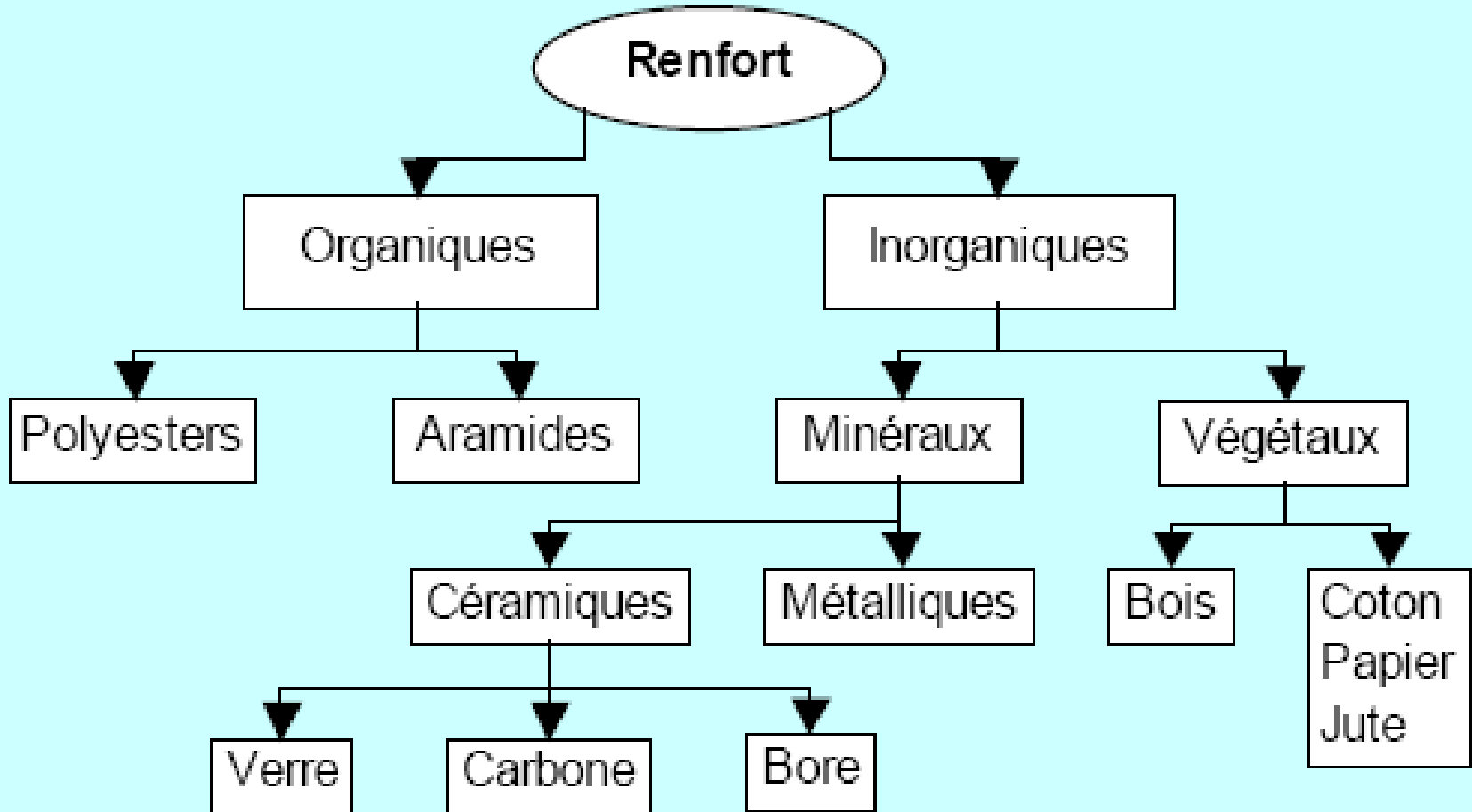
Composites: MATERIAUX & TECHNOLOGIES

Les HP, principalement utilisés dans l'aéronautique sont d'un coût élevé.

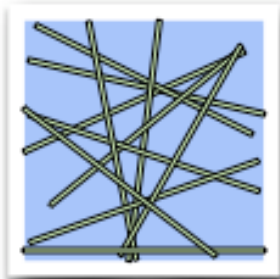
- Les renforts sont des fibres longues.
- Le taux de renfort est supérieur à **50%**, et ce sont les renforts qui influent sur le coût.
- Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieur à celles des métaux.
- Des méthodes de calculs de structures et d'homogénéisations ont été développés pour les HP.

Composites: Renforts

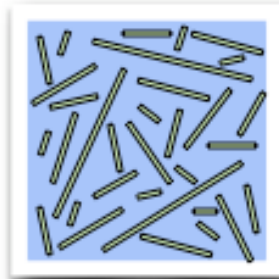
Principaux matériaux de renfort



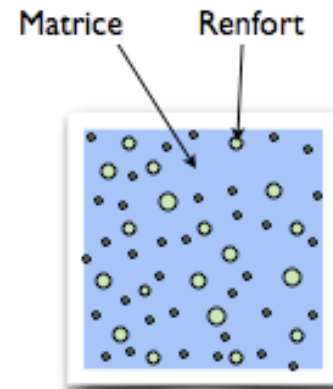
Composites: Renforts



(a)



(b)



(c)

Géométrie Des renforts

- a) longues
- b) courtes
- c) particules



(a)



(b)

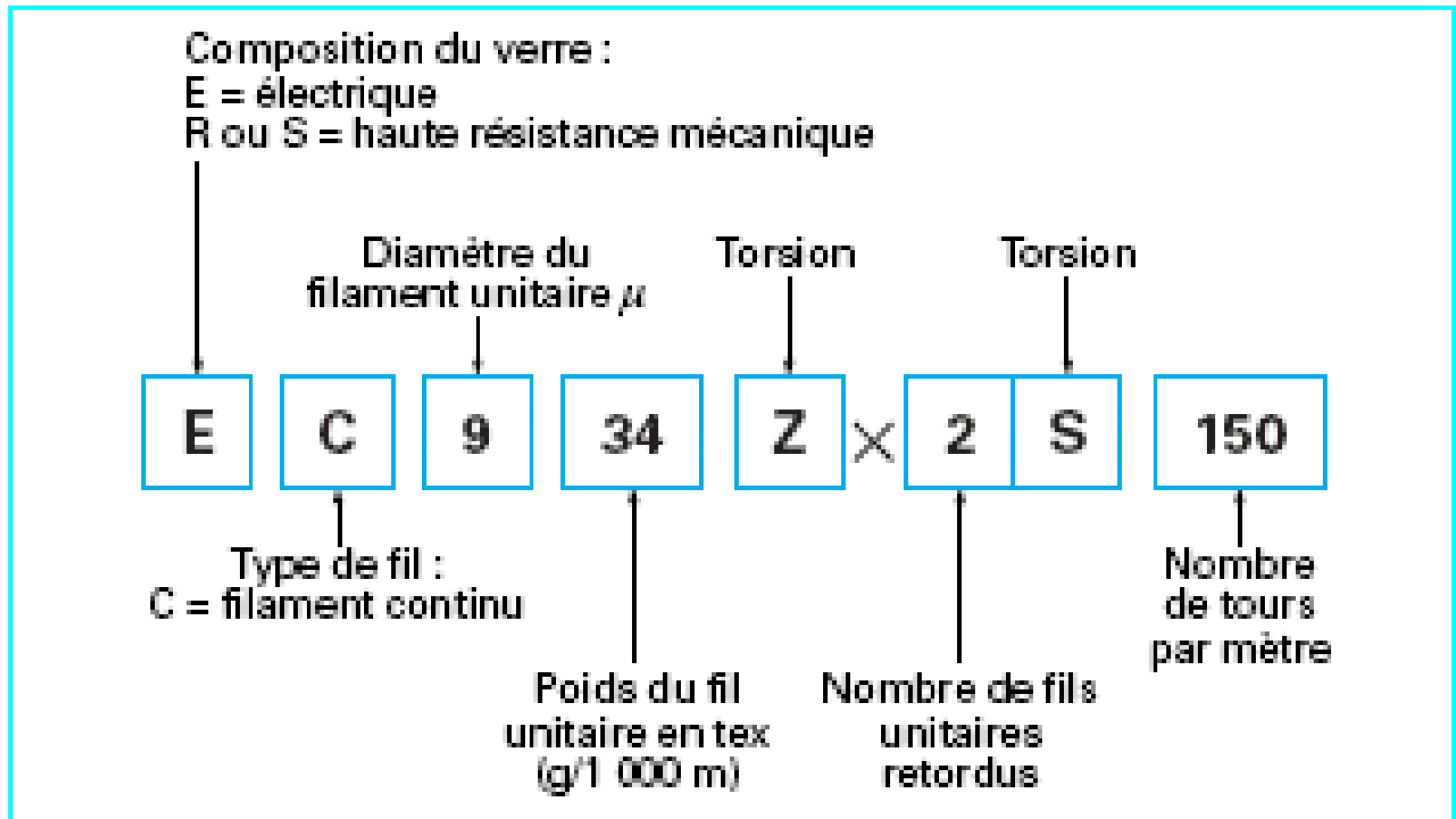


(c)

des renforts en verre

- a) micro-billes creuses
- b) fibres courtes
- c) fibres longues

Composites: Renforts



Désignation normalisée des fils de verre (d'après ISO 2078)

Composites: Renforts → fibres de verre

Les **fibres de verre** sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion à 1250°C à travers une filière en platine-rhodium ; après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues. Suivant les application auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en **trois qualités** :

- **fibres E** pour les composites grande diffusion (GD) ;
- **fibres D** pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés)
- **fibres R** pour les composites haute performance (HP).

Composites: Renforts → fibres de verre

	Composition verrière (% masse)	Propriétés spécifiques
Verre E	SiO_2 : 55 Al_2O_3 : 15 CaO : 18 MgO : 3 Na_2O : 0,8 B_2O_3 : 7 Fe_2O_3 : 0,3 K_2O : 0,2	Usage général
Verre D	SiO_2 : 73 B_2O_3 : 22 Al_2O_3 : 1 CaO : 1 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$: 2	Propriétés diélectriques renforcées
Verre AR	SiO_2 : 62 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$: 0,4 ZrO_2 : 16,8 $\text{CaO} + \text{MgO}$: 5,8 $\text{CaO} + \text{MgO}$: 5,8	Alcali-résistant
Verre R ou S (1)	SiO_2 : 60 Al_2O_3 : 25 CaO : 9 MgO : 6	Propriétés mécaniques renforcées

(1) Le nom change en fonction du producteur.

**Composition
moyenne de
différentes fibres
de verre**

Composites: Renforts → fibres de carbone

Les fibres de carbone comme renforts s'établissent à **3.000 tonnes/an.**

→ utilisées pour les composites « hautes performances » en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs.

→ La production repose sur la maîtrise de la production des fibres acryliques de formule générique $(CH_2-CHCN)_n-(CH_2-CXY)_n$ (acrylonitrile + comonomère) par la voie classique du solvant. On opère par carbonisation de la fibre de polyacrylonitrile (**PAN**) sous atmosphère neutre d'azote dans des fours à pyrolyse et ne conserve que la chaîne carbonée.

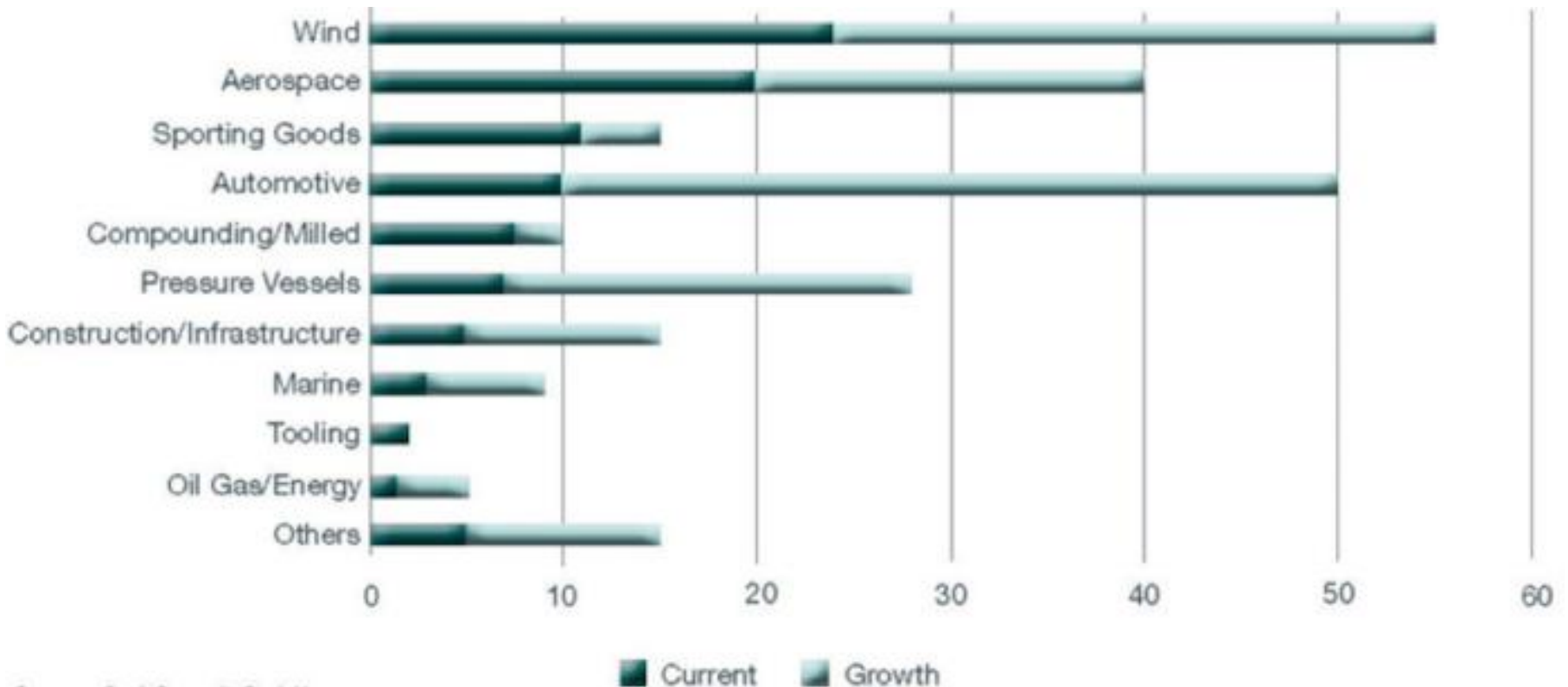
Composites: Renforts → fibres de carbone

Les fibres de carbone utilisées dans les composites représentent 10% à 15% de la consommation des fibres de carbone dans le monde, mais leur développement devrait suivre la même évolution que la consommation globale.



Demande mondiale de fibre de carbone de 2009 à 2021 : un marché en forte croissance.
(en milliers de tonnes)

Composites: Renforts → fibres de carbone



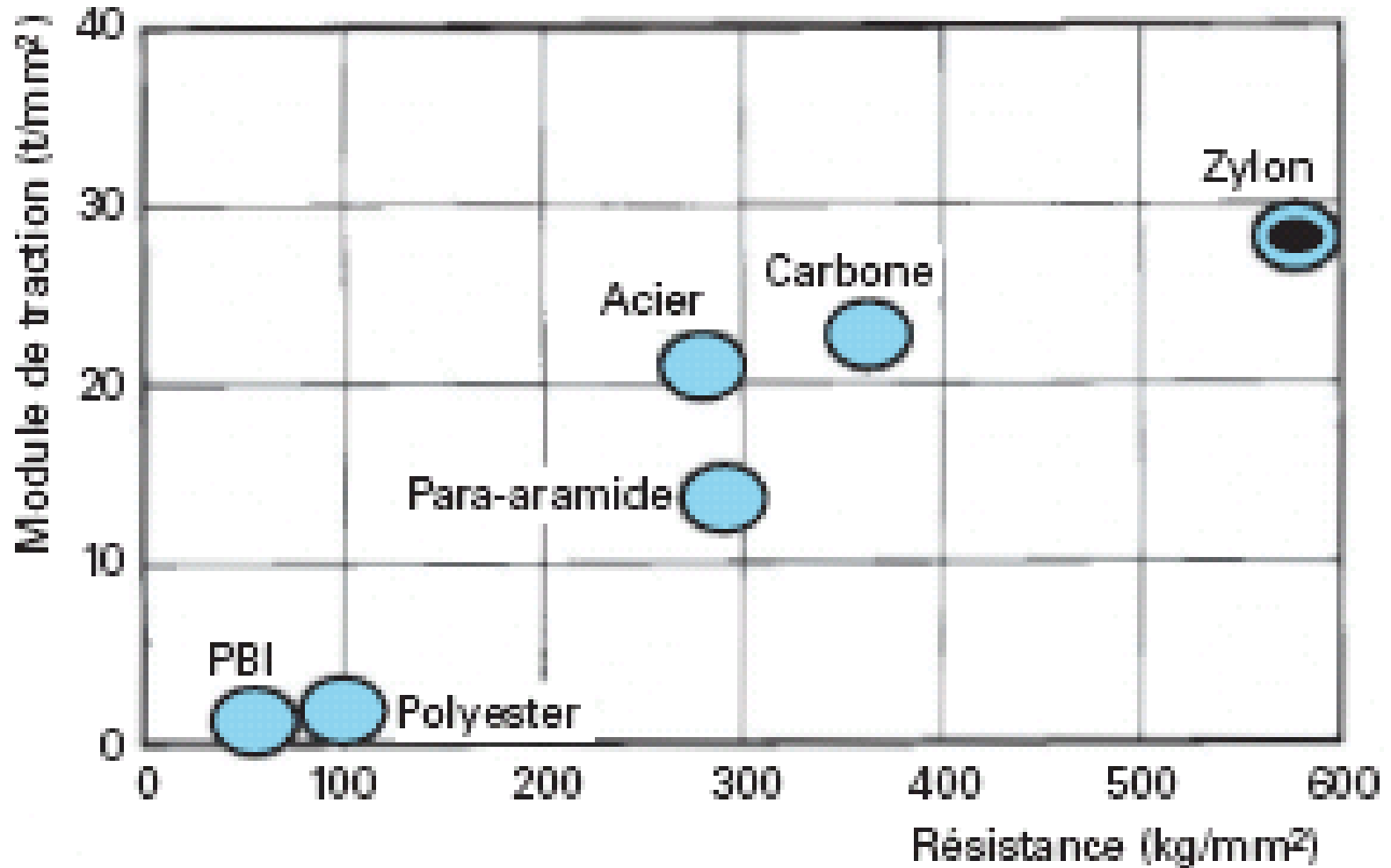
Demande mondiale de fibre de carbone par secteur industriel en 2019

Composites: Renforts → fibres aramide

La **fibre aramide** est issue de la chimie organique des polyamides aromatiques (ou polyaramide) par synthèse chimique à basse T°C ; ses propriétés diffèrent des polyamides aliphatiques classiques (type PA 6-6, dit «Nylon ») ; on la nomme «Kevlar».

La production mondiale de fibres d'aramide atteint **40.000** tonnes/an, dont seulement **4.000** tonnes sont utilisées dans les composites.

Composites: Renforts → fibres aramide



Propriétés mécaniques en traction de la fibre Zylon 35

Composites: Renforts → fibres aramide

	Zylon AS	Zylon HM	M5 (valeurs expérimentales)	M5 (objectif)
Masse volumique (g/cm ³)	1,54	1,56	1,7	1,7
Reprise en eau (%)	2	0,6	2	2
Résistance spécifique en traction (N/tex)	3,7	3,7	3,1	5,5
Module d'élasticité spécifique (N/tex)	115	172	206	250
Allongement à rupture (%)	3,5	2,5	1,4	> 2
Fusion	Pas	Pas	Pas	Pas
Température de début de décomposition dans l'air (°C)	550	550	530	530
Indice limite d'oxygène (%)	68	68	> 50	> 50
Voir le paragraphe 4 pour la définition des grandeurs et unités.				

Composites: Renforts → fibres PE haute ténacité

Les fibres de **PE haute ténacité** présentent les avantages suivants :

- légèreté ($d=0,95$ à comparer à celle de l'aramide $d=1,44$)
- haute capacité de conversion de l'énergie cinétique (par exemple celle d'un projectile) en énergie thermique.

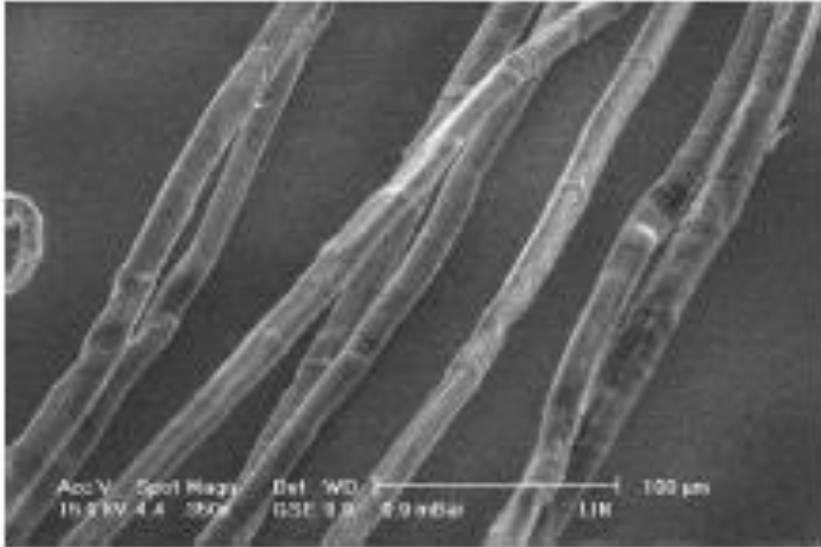
Les composites à **fibres de PE** restent marginaux ; ils se développent pour des applications **balistiques et de blindage** (gilets pare-balles de Arès, plaques de blindage, casques ONU).

Composites: Renforts → fibres naturelles

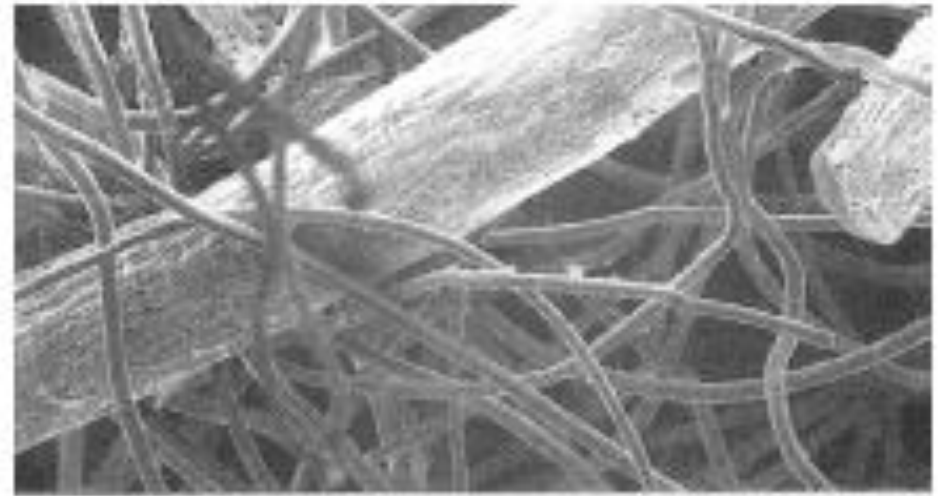
Les **fibres naturelles** constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur plus grande facilité de recyclage lorsque leurs propriétés physiques seront mieux appréhendées.

- leurs propriétés mécaniques pourraient atteindre celles des fibres de verre (module de Young) ;
- la fibre se travaille très facilement avec les technologies du textile (tissage).

Composites: Renforts → fibres naturelles



Fibres de lin vue au MEB



Fibres superabsorbantes vues au MEB montrant l'augmentation du diamètre d'une fibre d'un facteur 10 après absorption

Composites: Renforts → fibres naturelles

Fibres	E (GPa)	A (%)	σ_u (MPa)	Densité	Références
Fibres synthétiques					
Verre E Filament vierge	72 - 73	4,6 - 4,8	3 200 - 3 400	2,54	[4]
Filament industriel	72 - 73	3	2 000 - 2 400	2,54	
Carbone					
Toray T300	230	1,5	3 530	1,7 - 1,9	[5]
Thorneel P-120 S	825	0,3	2 350	1,87 - 2	
Aramide	124	2,9	3 620	1,44	[6]
Kevlar 49					
Fibres végétales					
Lin	12 - 85	1 - 4	600 - 2 000	1,54	[7] [8] [9] [10]
Lin : moyenne	58 ± 15	3,27 ± 0,84	1 339 ± 486	1,53	[11]
mini-maxi	27 - 91	1,6 - 5,9	531 - 3 282		
Ramie	61,4 - 128	1,2 - 3,8	400 - 938	1,56	[12]
	27	3,2	755		[13]
	65 ± 18		800 - 1 000		[14]
Chanvre	35	1,6	389	1,07	[15]
Jute	26,5	1,5 - 1,8	393 - 773	1,44	[16] [17]
Sisal	9 - 21	3 - 7	350 - 700	1,45	[18] [19]
Noix de coco	4 - 6	15 - 40	131 - 175	1,15	[20]
Coton	5,5 - 12,6	7 - 8	287 - 597	1,5 - 1,6	[16] [12]
Fibres animales					
Ver à soie <i>Attacus atlas</i>	5	18	200		[21]
Ver à soie <i>Bombyx mori</i>	16	15	650		[22]
Araignée <i>Argiope trifasciata</i>	7	30	600		[22] [23]

Propriétés en traction de différentes fibres naturelles

Composites: Renforts → fibres naturelles

Avantages	Inconvénients
Faible coût	Absorption d'eau
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Faible stabilité dimensionnelle
Biodégradabilité	Biodégradabilité
Non abrasif pour les outillages	Faible tenue thermique (200 à 230 °C max)
Neutre pour l'émission de CO ₂	Fibres anisotropes
Demande peu d'énergie pour être produite	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
Pas de résidus après incinération	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Renfort discontinu
Bonne isolation thermique et acoustique	
Ressource renouvelable	

Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales

Composites: Renforts → fibres biodégradable






Les polymères biodégradables à base d'acide **poly-lactique** (PLA) sont utilisés pour des composites à fibres et à matrice PLA (composites PLA/PLA) pour des applications médicales d'ostéosynthèse ; ils pourraient constituer de nouvelles alternatives aux fibres existantes.

Composites: Renforts → Fibres

Caractéristiques moyennes des principales fibres de renforts
(d'après Maurice Reyne)

Type de renfort	Diamètre mono filament (μ)	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance		Module d'allongement	
			Traction (Gpa)	Compression (Gpa)	Elasticité (Gpa)	Rupture (%)
Verre E	10 à 20	2,6	2,5	1 à 1,2	72	4,5
Verre R		2,5	3,5		85	5,2
Carbone HR	6 à 7	1,8	3 à 4	1,1 - 1,8	230-250	1,3
Carbone HM		1,9	2,7		400-500	0,5
Aramide	12	1,45	2,8 à 3	0,3 - 0,5	120-130	2,5
Polyéthylène haut module		0,96	3		100	

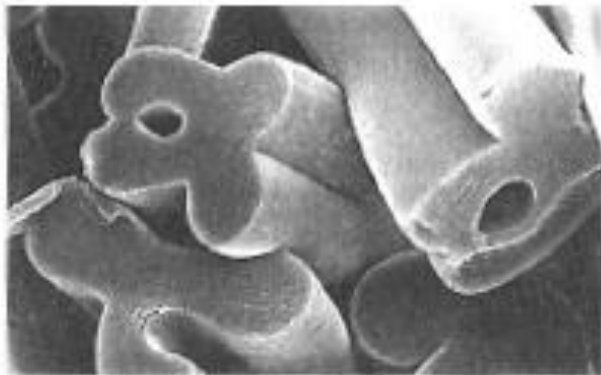
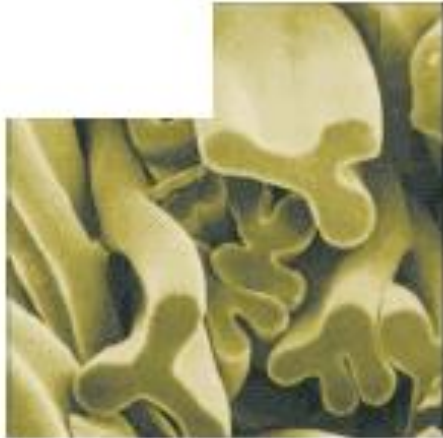
Composites: Renforts → Fibres

Fibres	PET PA	Aramide	Carbone	Al ₂ O ₃ SiC	Verre
Structure	 1D 2 phases	 1D 1 phase	 2D en couches	 3D isotrope	 3D isotrope
Liaison	covalente Van der Waals	covalente hydrogène Van der Waals	covalente Van der Waals	covalente	covalente
Cristallinité	faible	para (100 %) (1)	para (100 %) (1)	poly	amorphe
Orientation	faible	très élevée	élevée	aucune	aucune

(1) Paracristallinité : cristallinité particulière et forte de ces fibres.

Orientation comparative de différentes fibres

Composites: Renforts → Fibres

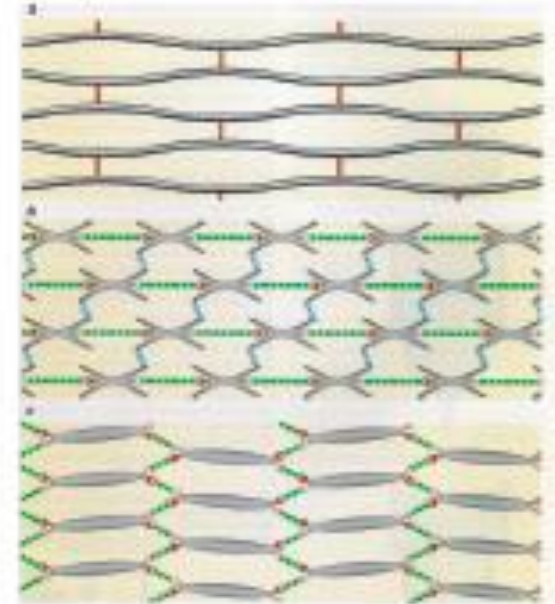


Fibres de copolyimide P84

(a) carbone

(b) aramide

(c) M5



— Liaison covalente

- - - Liaison de Van der Waals

..... Liaison hydrogène

Interactions entre les chaînes macromoléculaires pour des fibres à hautes performances

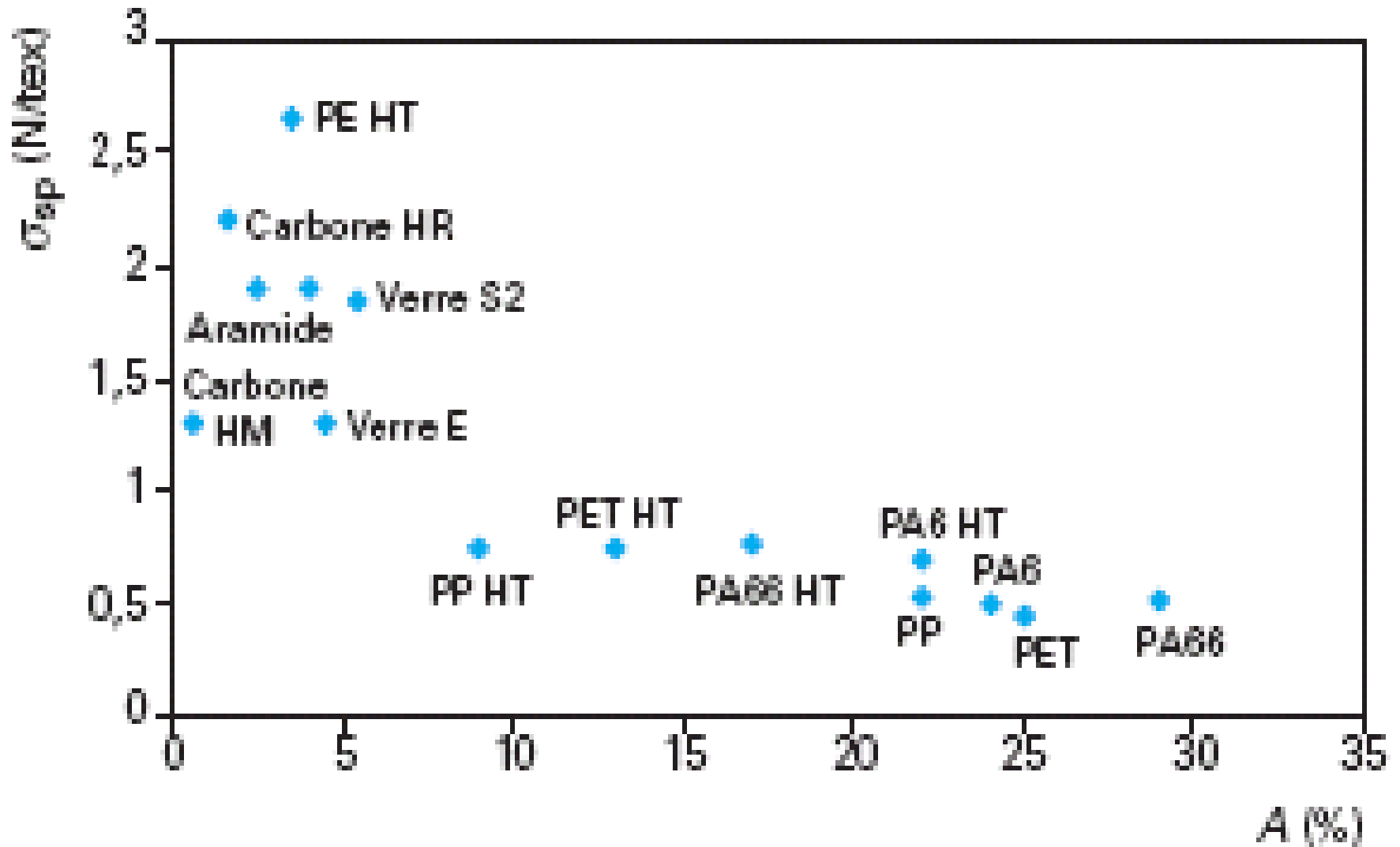
Composites: Renforts → Fibres

Fibres	ρ (g/cm ³)	E (GPa)	σ (MPa)	A (1) (%)	E_{sp} (N/tex)	σ_{sp} (N/tex)
Organiques						
PP HT	0,91	6,4	736	15,5	7	0,8
Viscose HT	1,46	19	730	8	13	0,5
PA66 HT	1,14	6	960	20	5,3	0,84
PET HT	1,38	13,8	970	16	10	0,7
PVA HT	1,3	30	1 200	7	23,1	0,9
PE HT	0,97	90	2 700	3,5	92,8	2,78
Para-aramide	1,44	60	2 900	3,8	41,7	2,01
Para-aramide HM	1,45	120	2 900	1,9	82,8	2
PBO HM	1,56	270	5 800	2,5	172	3,7
Inorganiques						
Acier	7,8	200	2 800	1,8	25,6	0,36
Carbone HM (M40)	1,81	392	2 740	0,7	216,6	1,51
Carbone HT (T300)	1,76	230	3 530	1,5	256,5	2,01
Carbure de silicium	2,55	200	2 900	1,5	78,4	1,14
Silice	2,2	78	3 540		35,5	1,61
Verre E	2,6	73	2 500	3,5	28,1	0,96
Verre R	2,53	86	3 300	3,3	34	1,30

(1) Allongement à la rupture.

**Propriétés
mécaniques en
traction de quelques
fibres à usage
technique**

Composites: Renforts → Fibres



Résistance en traction de fibres à usage technique

Composites: Renforts → Fibres

Nature	Module d'élasticité (GPa)	Résistance en traction (GPa)	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance en compression (GPa)
PBO	360	5,7	1,58	0,2 à 0,4
Para-aramide	185	3,4	1,47	0,32 à 0,46
Polyéthylène HT	170	3	0,97	0,17
Verre S (1)	90	4,5	2,46	1,1
Verre E (1)	75	3,5	2,58	0,81
Bore	415	3,5	2,55	5,87
Carbure de silicium	200	2,8	2,8	3,1
Carbone HR	235	3,2	1,76	2,88

Propriétés de fibres à hautes performances mécaniques

(1) Concernant les verres, certaines valeurs peuvent différer d'un tableau à l'autre (tableaux 5, 6 et 7). Cette dispersion est due aux provenances des fibres et aux essais qui varient d'une source à l'autre. (Les essais de traction sont effectués sur fils imprégnés ou sur fibre unitaire.)

Composites: Renforts → *Architectures de renforcement*

* **unidirectionnelle** : les fibres parallèles peuvent se présenter sous deux formes :

- sans liaison particulière (**roving**) ;
- reliées par un fil (nappes).

* **multidirectionnelle aléatoire** :

- fibres coupées et broyées, sans arrangement particulier ;
- feutre de fibres agglomérées par un liant : le **mat** peut être à fibres courtes (longueur inférieure à 50 mm), sans orientation particulière ou à fibres continues.

Composites: Renforts → *Architectures de renforcement*

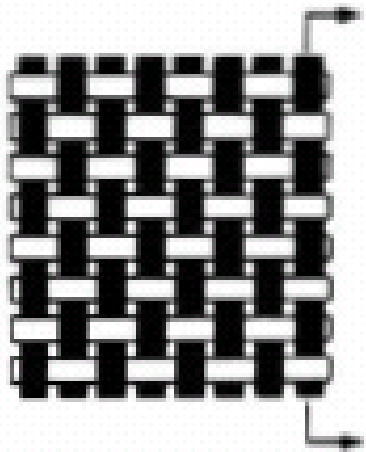
* **orientée** : le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles) ; suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile, un sergé ou un satin.

* on réalise également, pour des applications particulières (aérospatial, défense), des armatures de **renforcements bi- ou tridimensionnelles**.

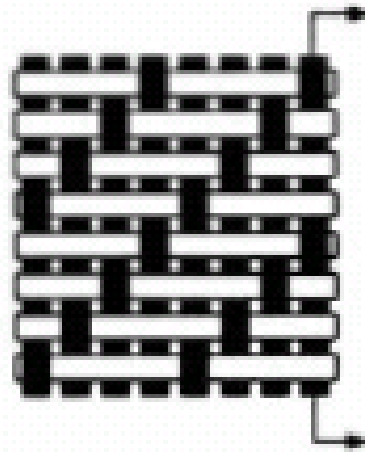
Composites: Renforts → *Architectures de renforcement*



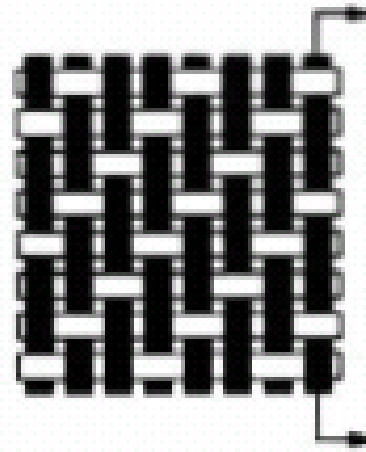
Composites: Renforts → Architectures de renforcement



(a) taffetas
(ou toile 1/1)



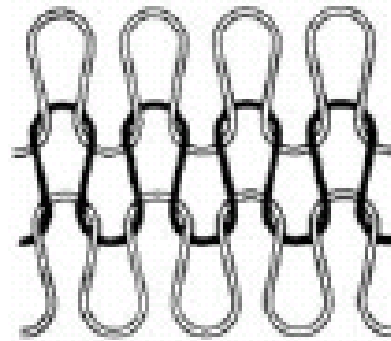
(b) sergé 2/2



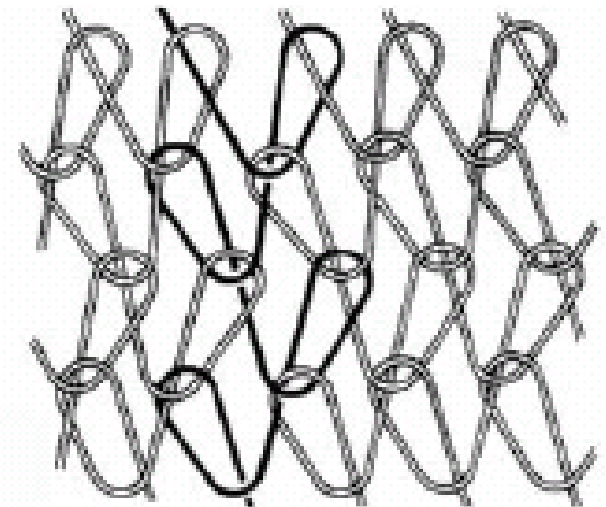
(c) satin

**Différents types
d'armures**

**Différents modes
de tricotage**

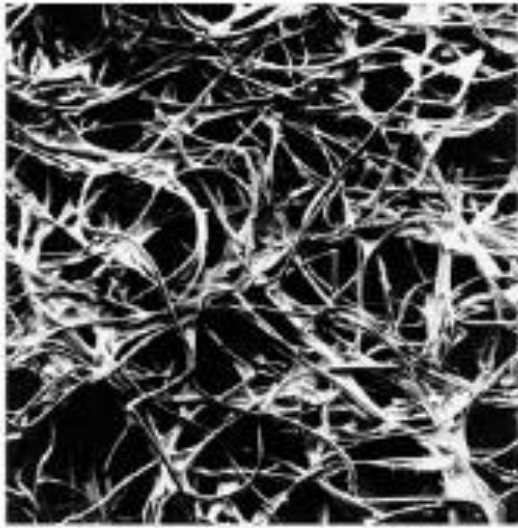


(a) tricot trame



(b) tricot chaîne

Composites: Renforts → Architectures de renforcement



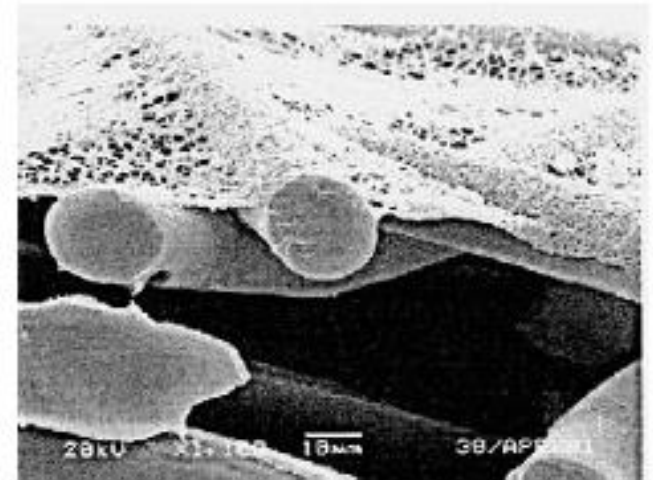
(a) fibres synthétiques liées thermiquement



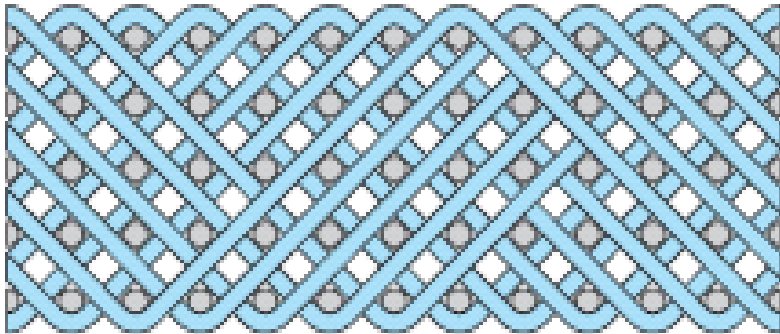
(b) fibres synthétiques et naturelles liées par aiguilletage

Surfaces textiles de non-tissés

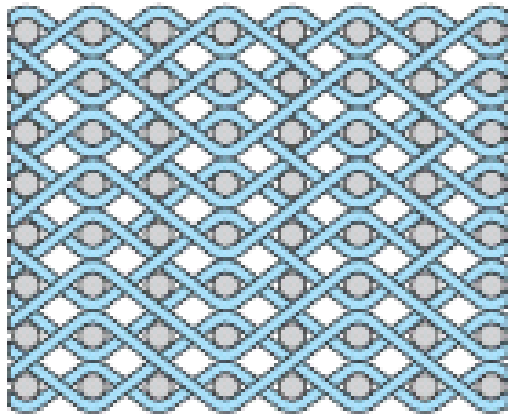
Voile de nanofibres obtenues par *electrospinning* déposées sur un non-tissé *spunbond*



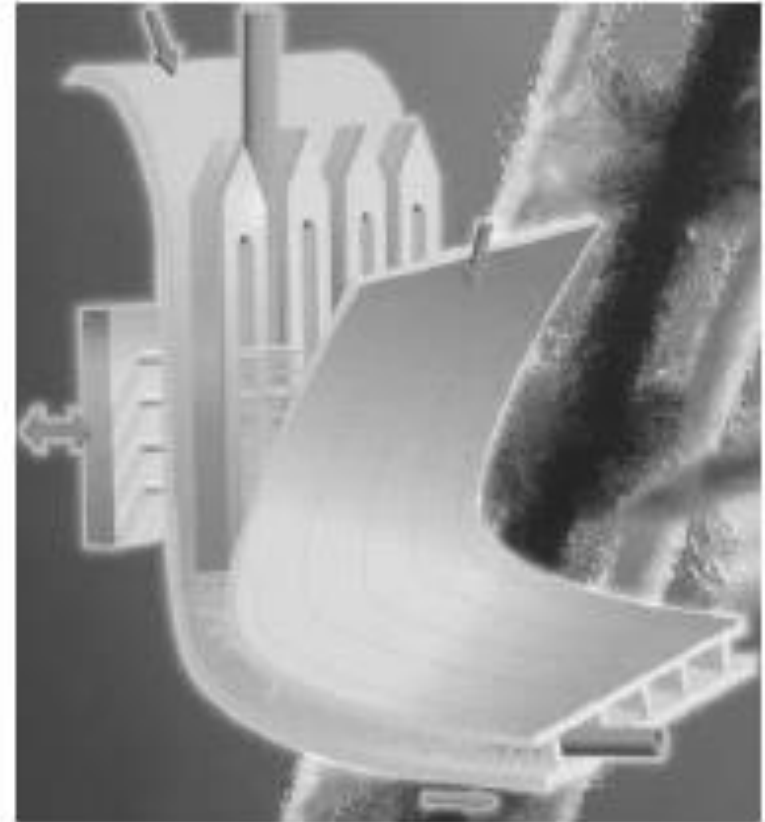
Composites: Renforts → Architectures de renforcement



(a) tissu à entrelacement d'angle



(b) tissu à entrelacement multicouche



Représentation du procédé Napco et exemple de non-tissé 3D

Tissus à entrelacement pour 3D

Composites: Renforts → Architectures de renforcement

Performances comparées des différents types d'architecture

Architecture des fibres	Comportement mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximal de renfort	Type de fibres
Fibres coupées et broyées	Moyen	quelconque	30%	verre
Mats fibres coupées	Moyen	quelconque	30%	verre ou carbone
Mats fibres continues	Moyen	orientée	30%	verre
Fibres continues	Intermédiaire	unidirectionnelle	50 à 70%	toutes
Tissu	Fort	bi ou tri directionnelle	30 à 70%	toutes
Nappe	Très fort	Unidirectionnelle (Bi-directionnelle si superposition)	50 à 85%	toutes

Certains composites haute performance (HP) utilisent des structures de fibres à orientation maîtrisée pour des performances mécaniques élevées.

Composites: Renforts → Trichites (whiskers)

- monocristaux de 1 à 50 μm de diamètre et de 1 à 5 cm de longueur.
- Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , MgO , TiO_2 , BeO , SiC , ...
- Prix élevé.
- Comportement élastique fragile.
- Résistance bien plus grande que beaucoup de polycristallins.

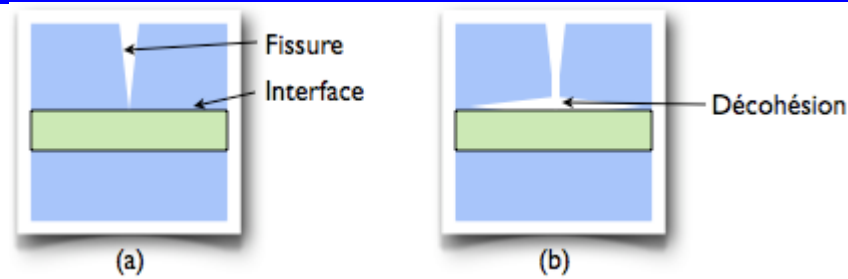
	P	E (GPa)	R (MPa)
Al_2O_3	3.97	1 200 / 2 200	22 000/15 000
SiC	3.2	480	20 000
Graphite	1.8	1 000	20 000
Fer	7.8	300	13 000

- Problèmes aux niveaux : manipulation, compatibilité chimique, mouillage.

Composites: Renforts → Interfaces

L'utilisation d'une couche d'interface (sizing) de quelques micromètres permet d'assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice.

Les fibres destinées à la fabrication des composites reçoivent un apprêt spécifique comportant un agent collant qui permet de coller les filaments pour en faire des fils et assure, en outre, une fonction de lubrification (pour le protéger contre l'abrasion due au frottement entre fibres).



Composites: Matrices

La matrice a pour rôle de :

- lier les fibres de renforts,
- répartir les contraintes,
- apporter la tenue chimique de la structure,
- donner la forme désirée au produit final.

Composites: Matrices

Principales différences entre matrices TP et TD

(d'après Maurice Reyne)

Matrices	TD	TP
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

Composites: Matrices - Résines thermodurcissables

Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Module de flexion (Gpa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
Polyester (UP)	1,2	50-65	3	120
Vinyl-ester	1,15	70-80	3,5	140
Phénolique	1,2	40-50	3	120-150
Epoxyde	1,1-1,4	50-90	3	120-200
Polyuréthane (PU)	1,1-1,5	20-50	1	100-120
Poly-imide	1,3-1,4	30-40	4	250-300

Composites: Matrices -Résines thermoplastiques

Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques (**TP**) non renforcées (M. Reyne)

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Module de flexion (Gpa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
Polypropylène (PP)	1,1-1,2	20-30	1-1,6	85-115
Polytéréphtalate butylénique (PBT)	1,5	45-55	2,2-2,6	120
Polytéréphtalate éthylénique (PET)	1,6	55-75	2-2,2	105-120
Polyoxide de phénylène (PPO -)	1,3	55-65	2,4-2,6	80-105
Polyoxyméthylène (POM)	1,6	60-70	7-9	95-105
Polyamides (PA)	1,3-1,4	60-90	6-9	80-120
Polyamide-imide (PAI)	1,3-1,4	195	4,9	275
Polyéther-imide (PEI)	1,5	105	3	170
Polyéther-sulfone (PES)	1,6	85	2,6	180
Polyéther-éther-cétone (PEEK).	1,5	100	3,7	>240

Composites: Principales combinaisons résine /renforts

Tableau de synthèse de l'utilisation des résines et renforts

Résines		Fibres de renfort				
		Verre E	Verre D	Verre R	Carbone	Aramide
Thermodurcissables <u>TD</u>	Polyesters	GD	GD			
	Phénoliques	GD				
	Polyuréthannes	GD				
	Epoxy		HP	HP	HP	HP
Thermoplastiques <u>TP</u>	Polypropylènes	GD				
	PA 6 et 6-6	GD		HP		
	PA 12, PEEK			HP	HP	HP

les composites « hautes performances » (HP) se distinguent des composites « grande diffusion » (GD) par leurs meilleures propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la traction) et, corollairement, par leur coût plus élevé.

Composites: Principales combinaisons résine /renforts

Pour les composites, on construit sa structure à la demande :

- la nature, la texture et la forme du renfort
- le taux de renforcement
- la nature de la résine et des charges ou additifs
- la qualité de l'interface renfort-matrice
- la géométrie de la pièce à réaliser
- le procédé de mise en œuvre utilisé

Avantage des matériaux composites :

- grande résistance à la fatigue
- faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf alu-carbone)
- insensibles aux produits comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole