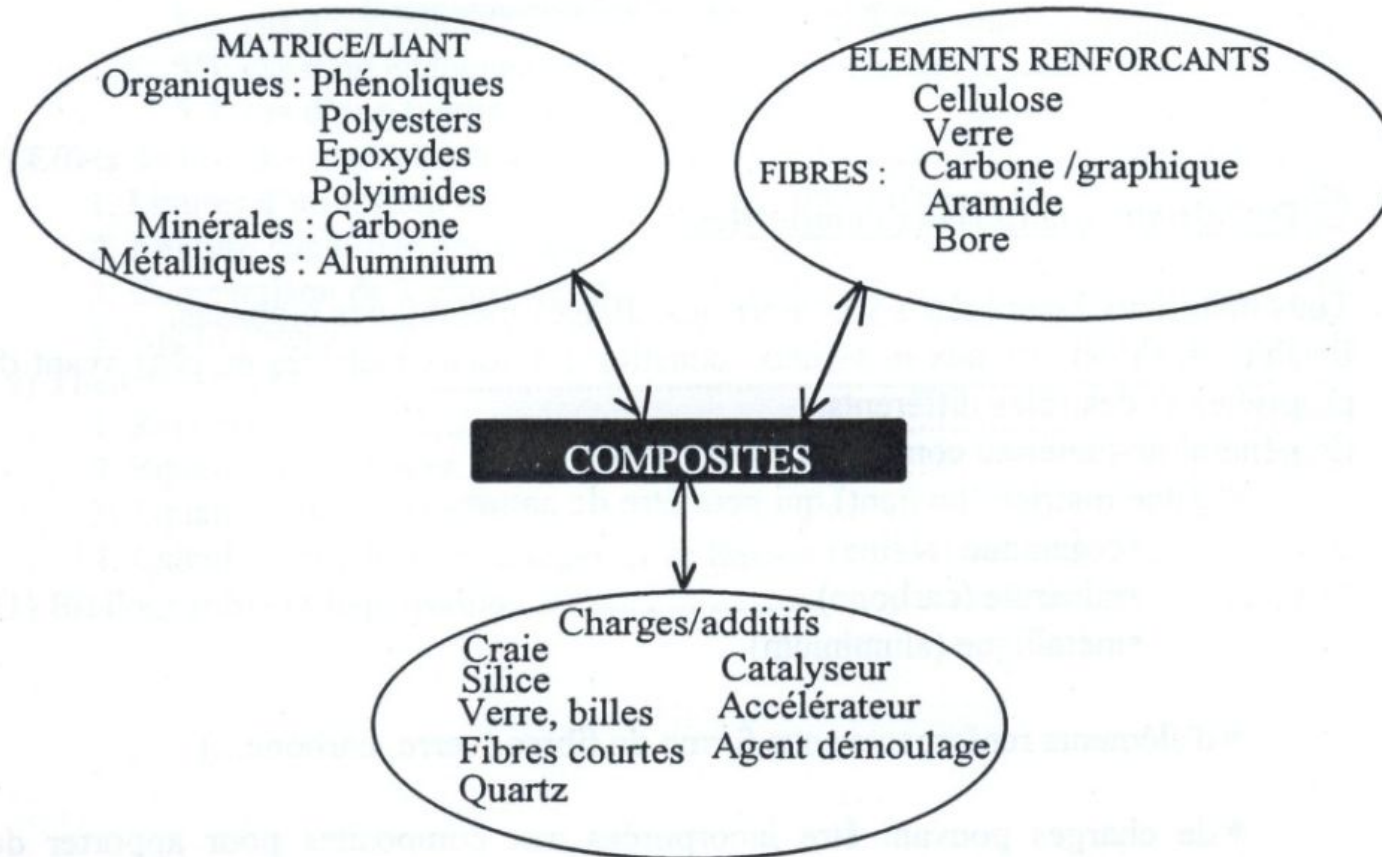
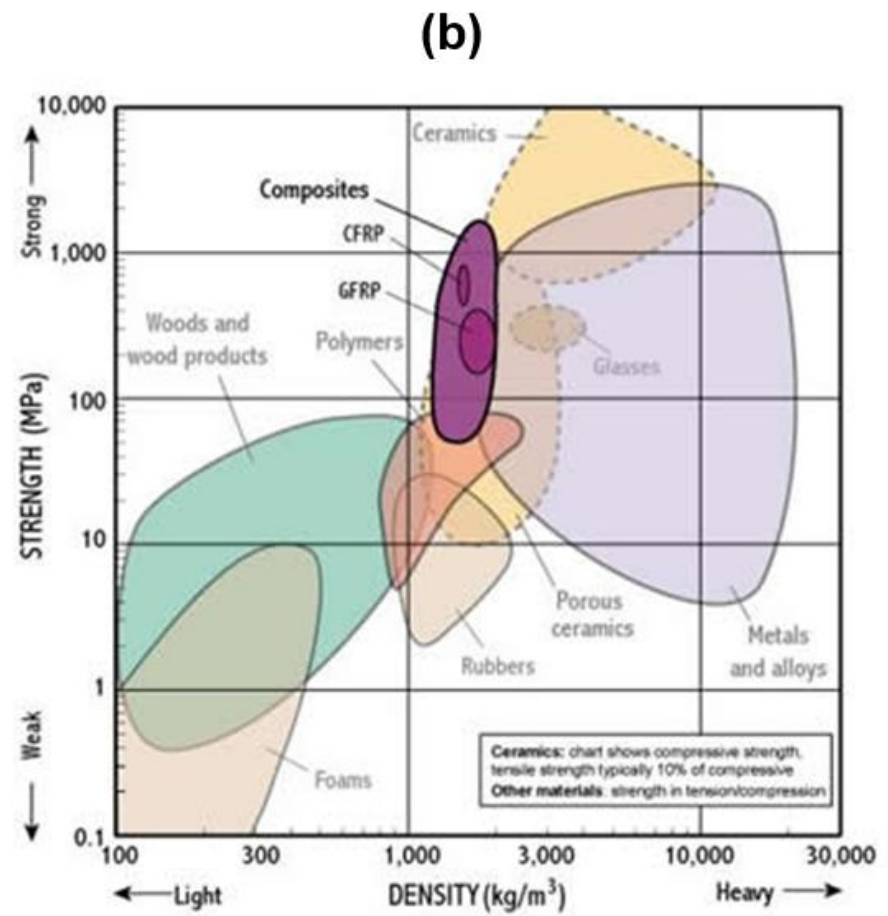
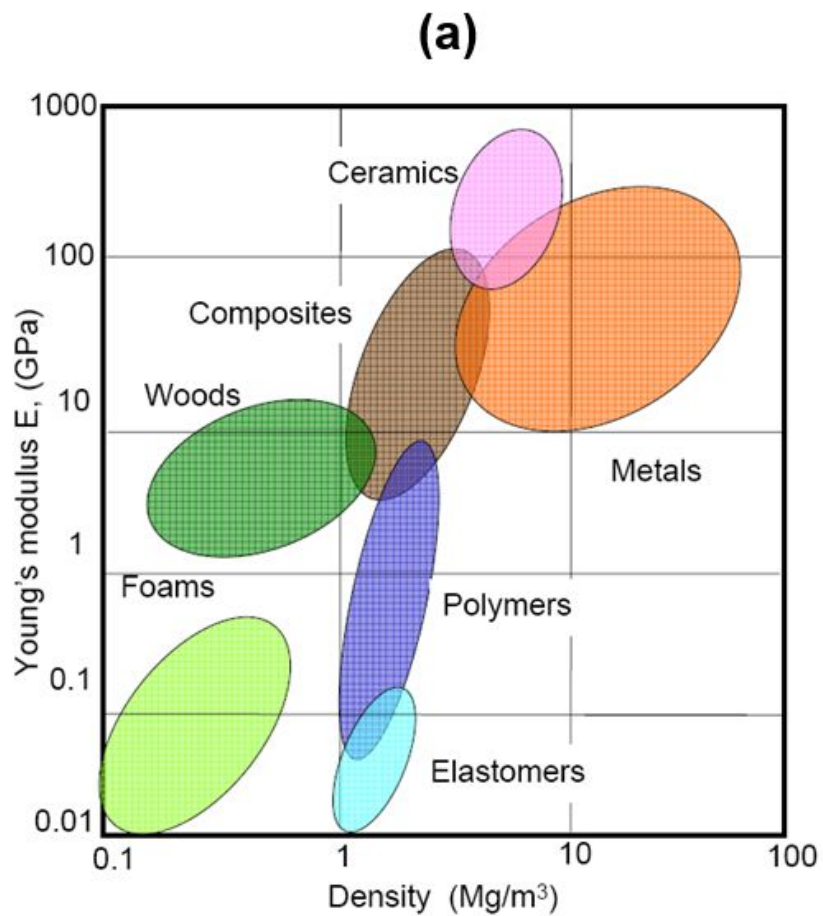


Représentation schématique d'un matériau composite [CAR04]

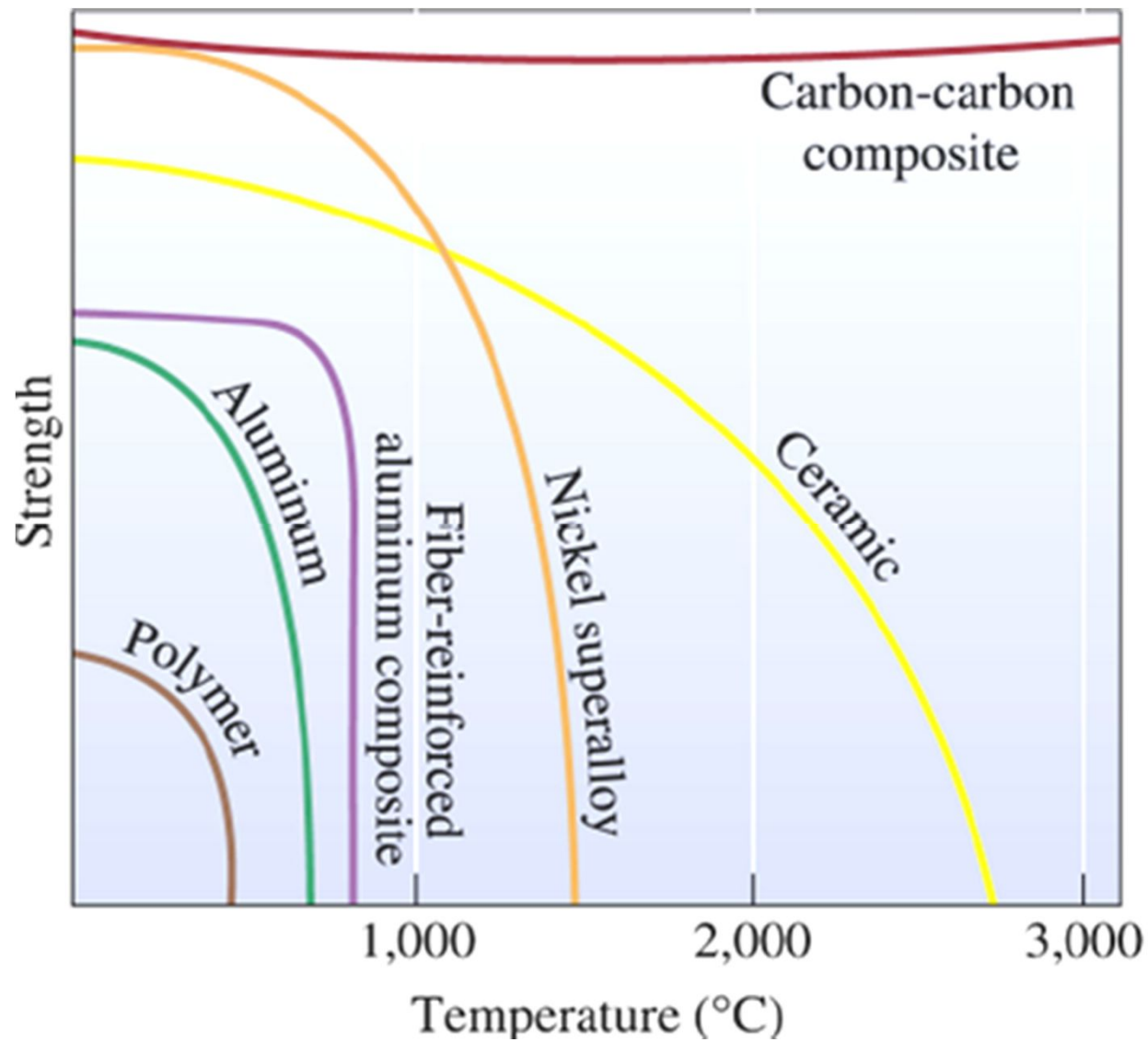


FONCTION	PRODUIT	CARACTERISTIQUES
Renfort mécanique	Microbulles (creuses) (verre, organique)	↘ densité
	Microbilles (pleines)	↗ densité, résistance à l'abrasion
	Ecailles de mica	↗ propriétés diélectriques, isolation thermique

Abaissement du coût	CaCO <sub>3</sub> (craie)	Stabilité thermique et dimensionnelle Meilleur aspect de surface Meilleure résistance à l'eau
	Talc	Epaississant, anti-poissant
	Kaolin, Silice	
Conduction électrique	Poudres et paillettes métalliques	conduction thermique ↗ densité, résistance aux chocs
	Noir de carbone	anti-UV
	Microbulles creuses métalliques	↘ densité ↗ résistance mécanique



Comparaison du module d'Young (a) et de la résistance (b) en fonction de la densité des composites avec les principaux matériaux

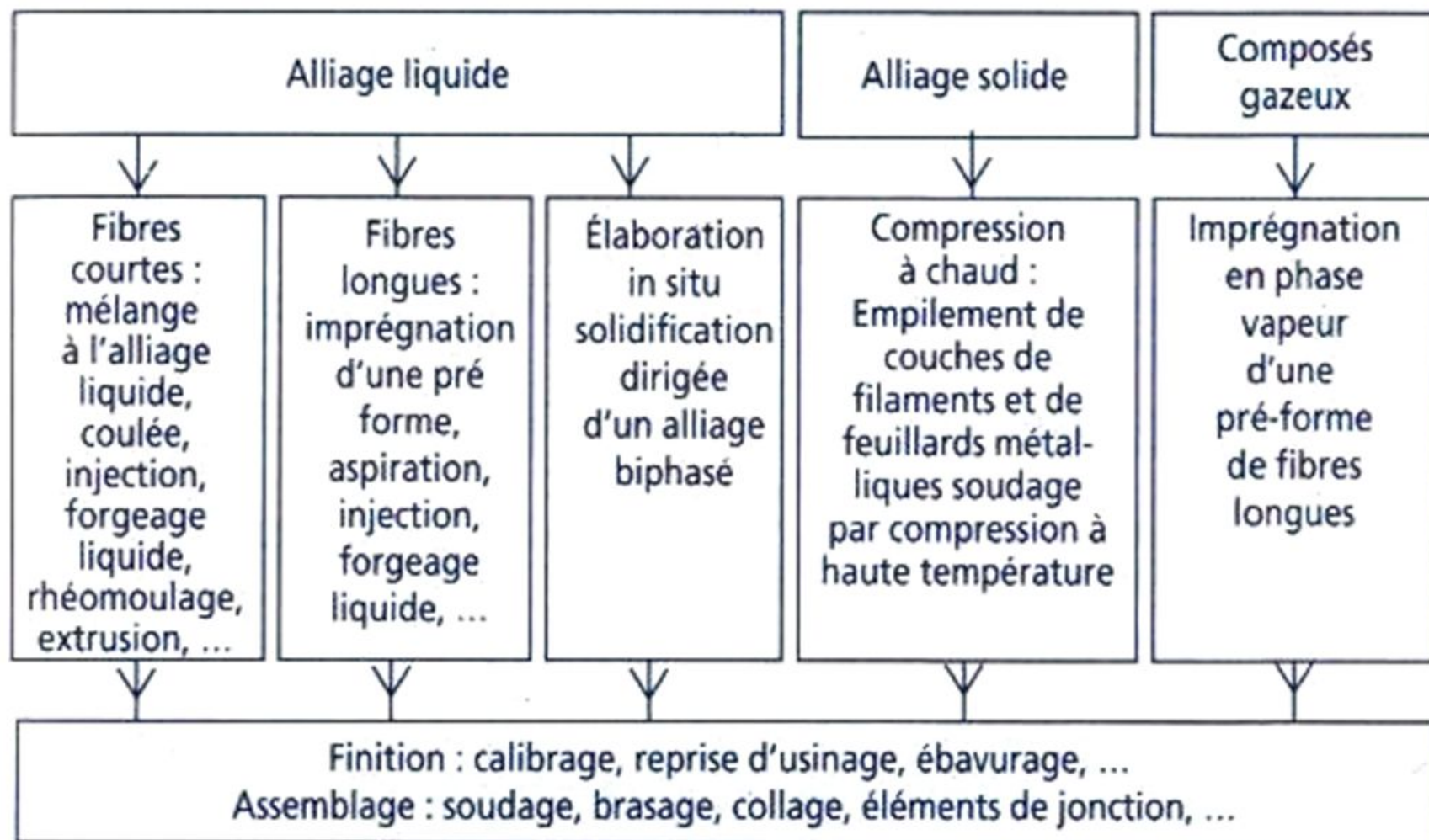


Tenue mécanique à hautes températures pour différents matériaux

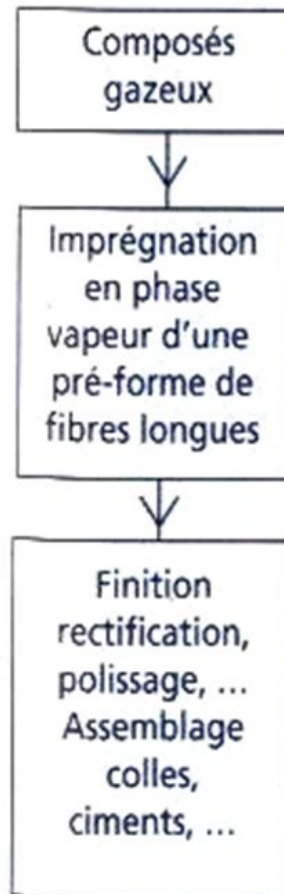
<b>Composites</b>		<b>Examples of Application</b>
Polymer Matrix	Thermoplastic Matrix	Mechanical components, protection screens
	Thermoset Matrix	Aerospace, sporting equipment
	Elastomer Matrix	Tires
Metal Matrix	Aluminum Matrix	Aerospace, sporting equipment, electronic packaging
	Titanium Matrix	Aerospace turbines
	Copper Matrix	High strength electrical conductors
Ceramic Matrix	Alumina Matrix	High temperature mechanical applications
	Cermets	Cutting tools, polishing materials

Classification des matériaux composites selon la nature de la matrice – Applications courantes

## MATRICE METALLIQUE



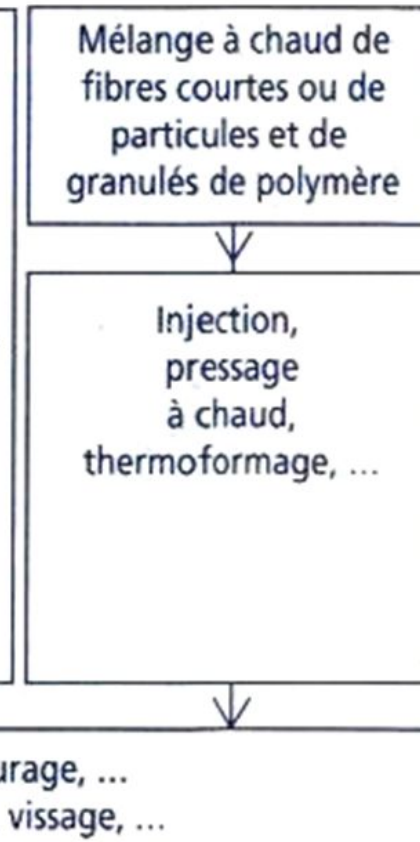
## MATRICE CERAMIQUE



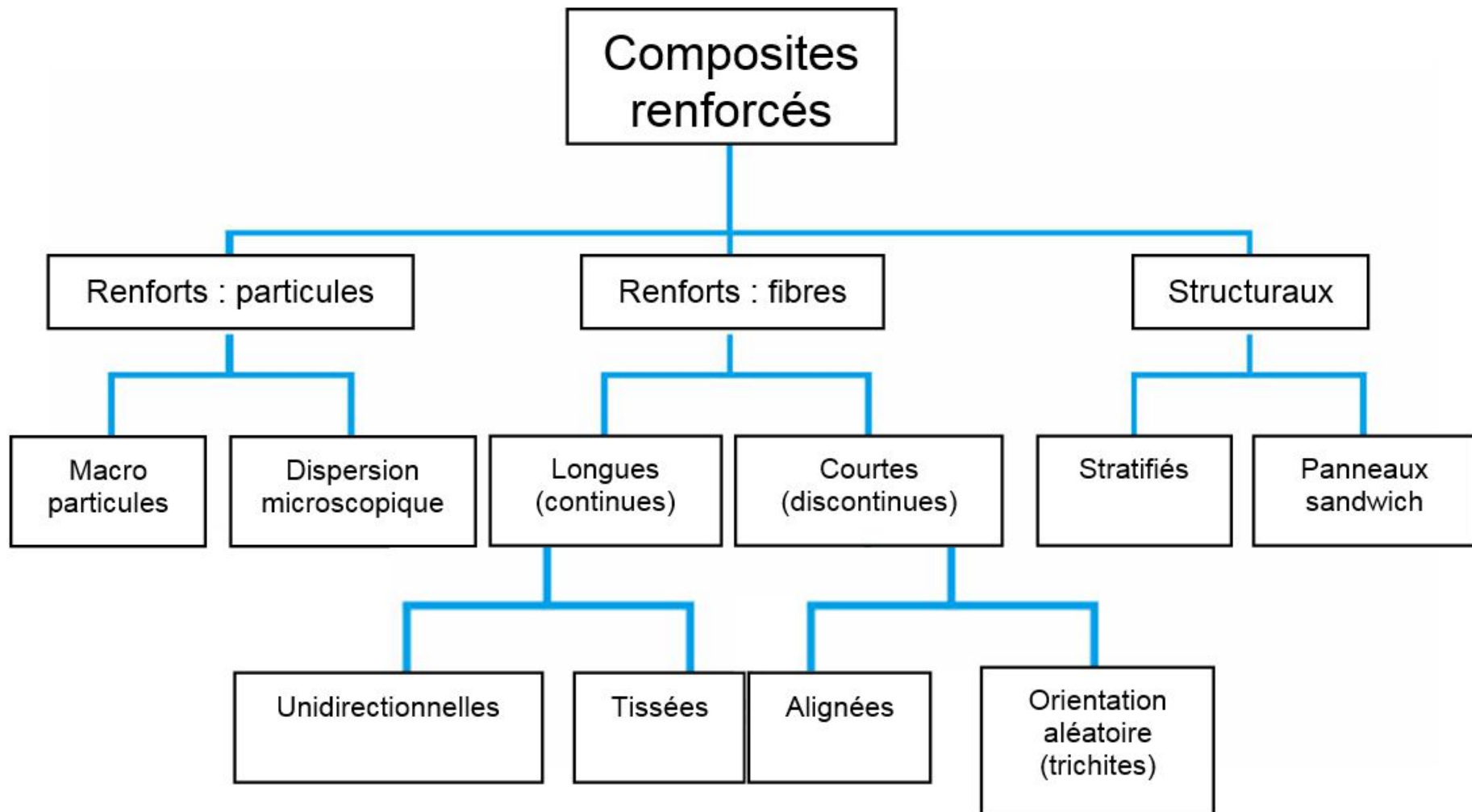
## MATRICE ORGANIQUE Thermodurcissables et élastomères



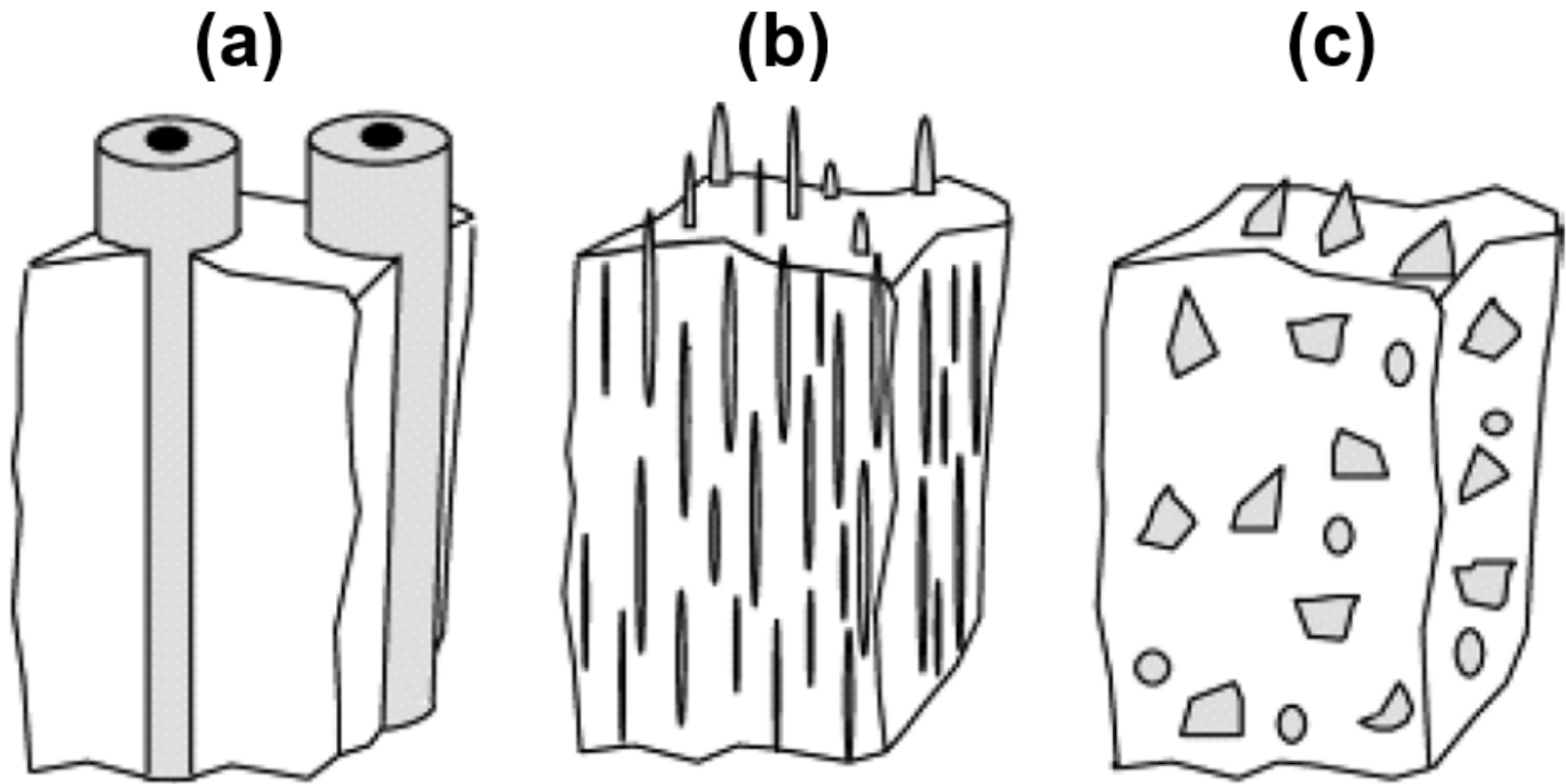
## MATRICE ORGANIQUE Thermoplastiques



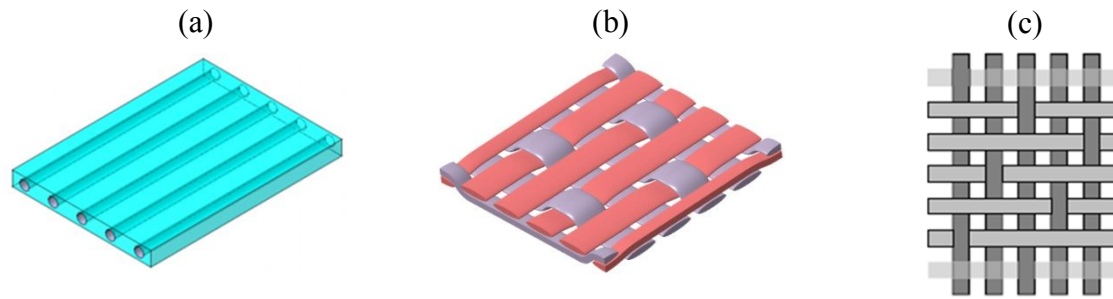




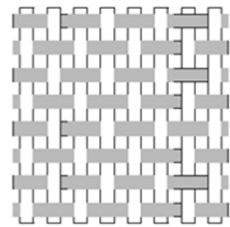
Architecture du renfort dans les composites renforcés



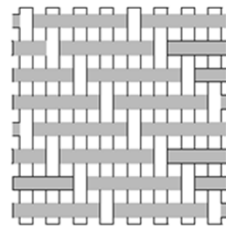
Composites renforcés : (a) fibres longues unidirectionnelles  
– (b) fibres courtes ou trichites – (c) particules



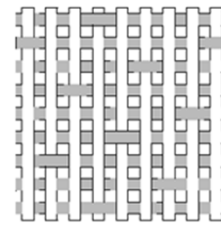
(a) Stratifié à plis UD – (b) Architecture d'un pli tissé (Warp : sens chaîne et Fill ou Weft : sens trame) – (c) Tissu satin de 5



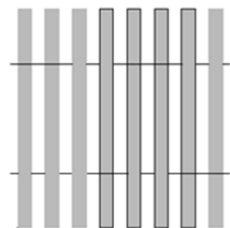
Taffetas



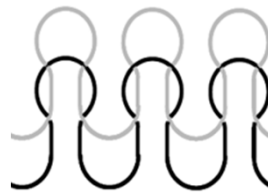
Sergé 3x1



Satin de 8



Unidirectionnel

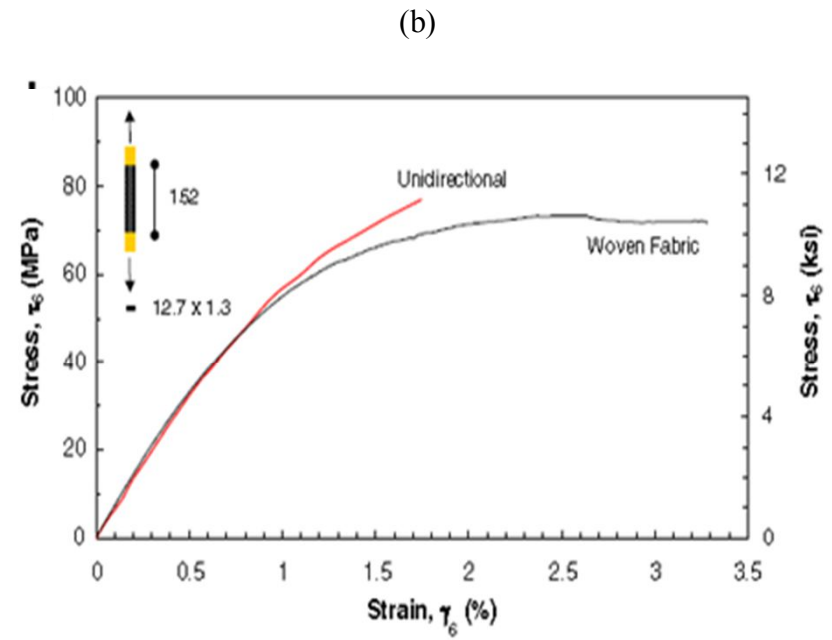
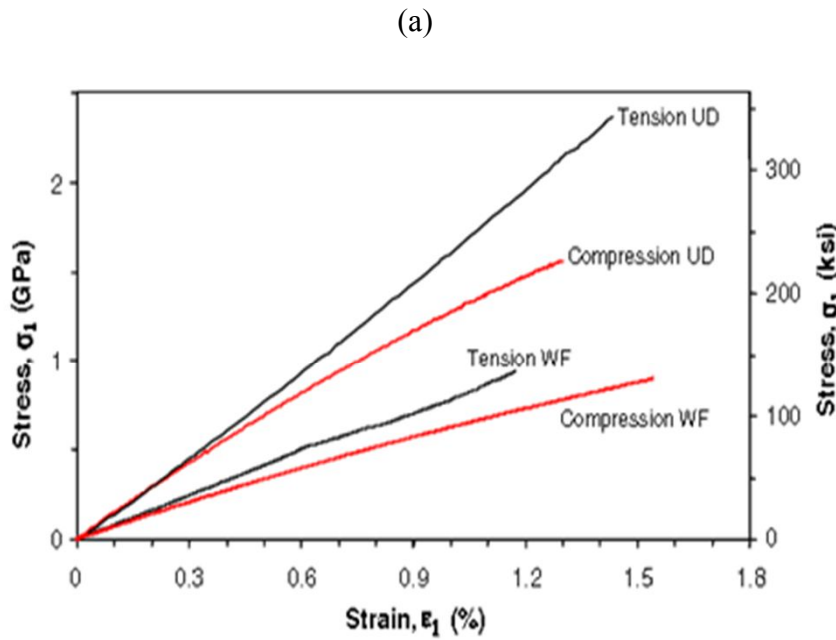


Tricot

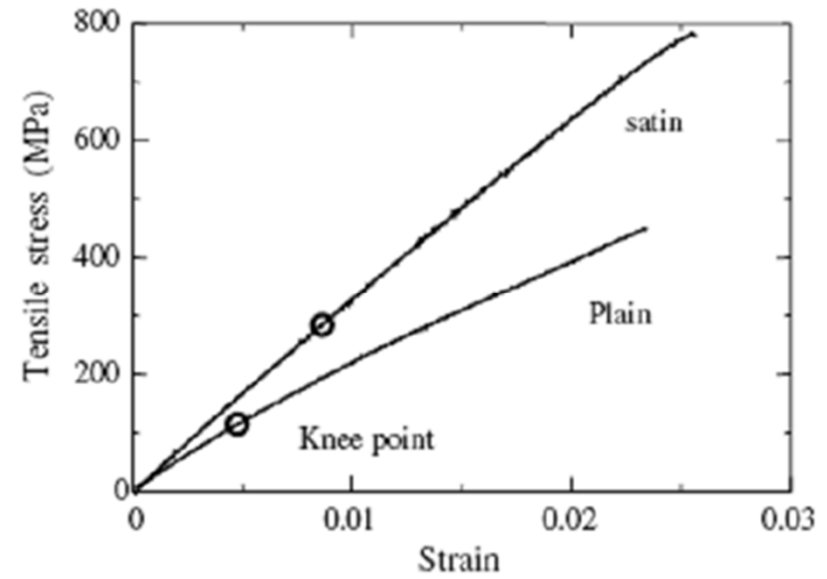
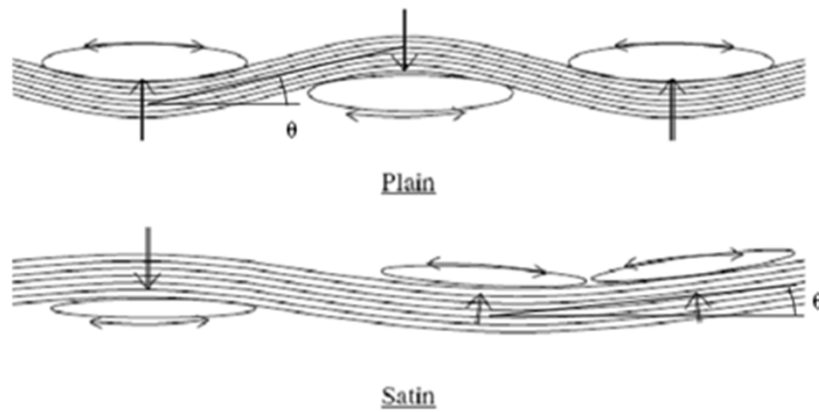


Multidirectionnel

Différents assemblages de mèches [AIM07]



Courbes contrainte-déformation de stratifiés carbone/époxy à plis UD ou à plis tissés [DAN08] :  
 (a) Traction/compression – (b) Cisaillement plan

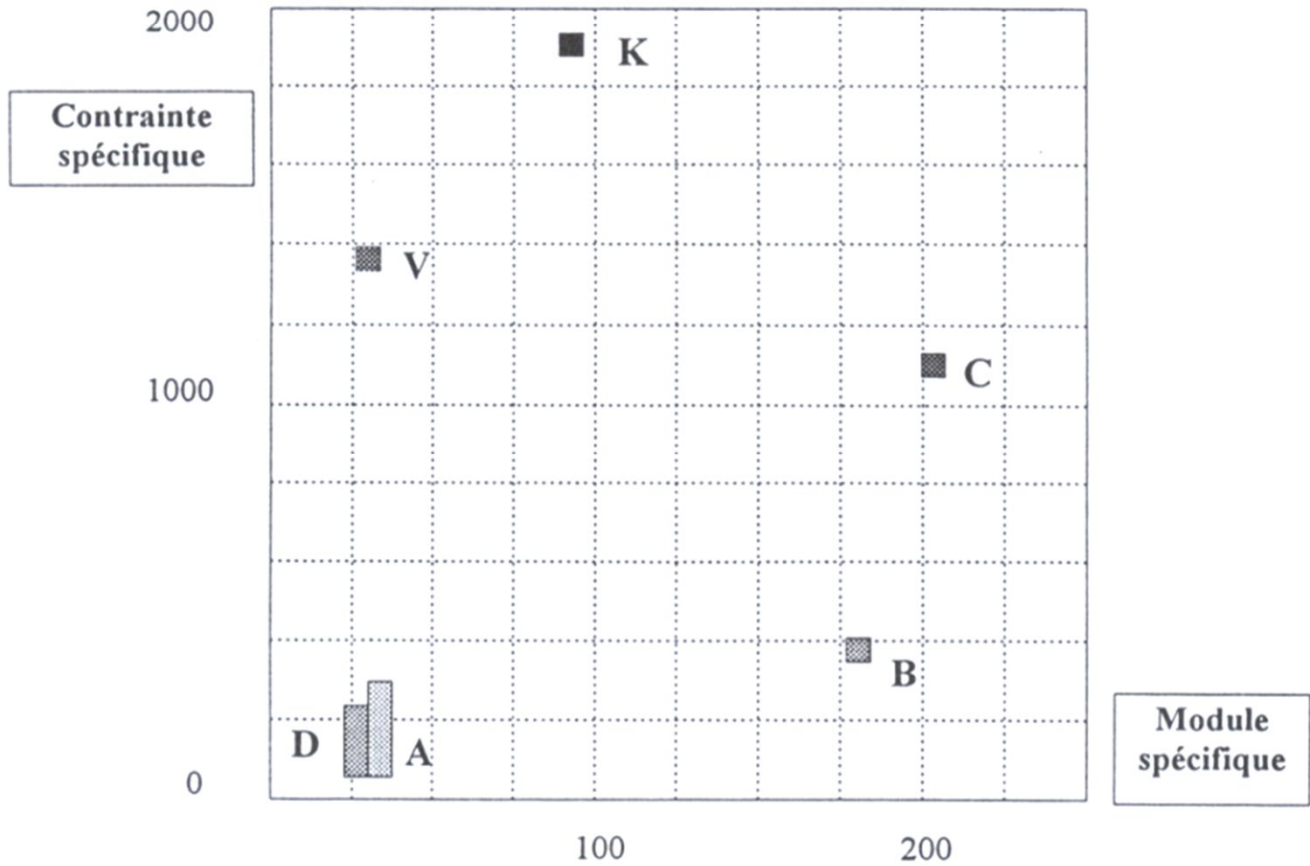


Influence du type d'armure sur  
l'endommagement dans les tissus sollicités en  
traction sens fibres [OSA03]

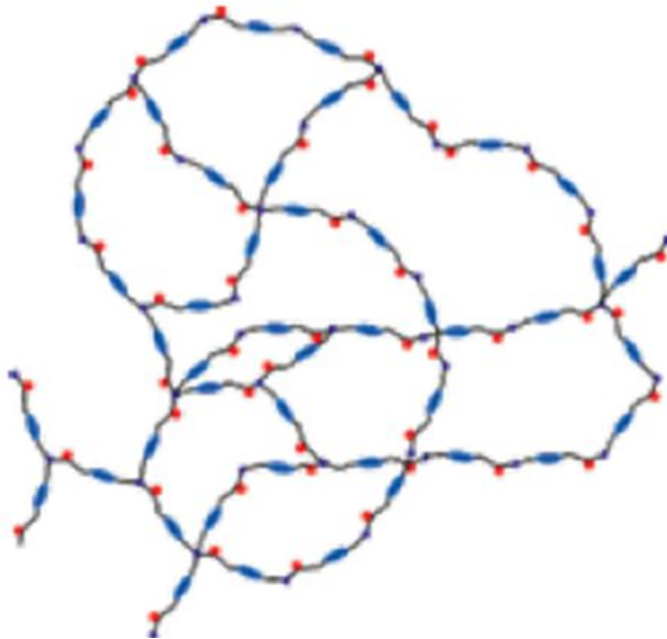
### PROPRIETES MECANIQUES

FIBRES	Aspect	Propriété principale	$\phi$ ( $\mu$ ) du filament élémentaire	Densité	Charge de rupture en traction (MPa)	Module d'élasticité (MPa)
Verre E	soyeux blanc	Prix / performance	3 à 30	2.54	3400	73000
Verre R S	"	Résistance en traction	"	2.48	4400	86000
Verre C	"	Résistance aux acides	"	2.5	2800	70000
Silice	"	Tenue thermique	9	2.2	3500	68000
Aramide bas module	soyeux jaune	Résistance en traction	12	1,45	3100	70000
Aramide haut module	"	Résistance et module en traction	12	1,45	3100	130000
Carbone Haute Ténacité	soyeux noir	tenue en traction et compression	8	1,78	2800	200000
Carbone Haut Module	"	Haut module	8	1,80	2200	400000
Carbone GY 70	"	Très haut module	8	1,95	1800	530000
Carbure de Bore	métal gris	Tenue mécanique	100 à 200	2,6	3900	400000
Carbure de Silicium	"	Haute Température	"	3,45	3300	450000

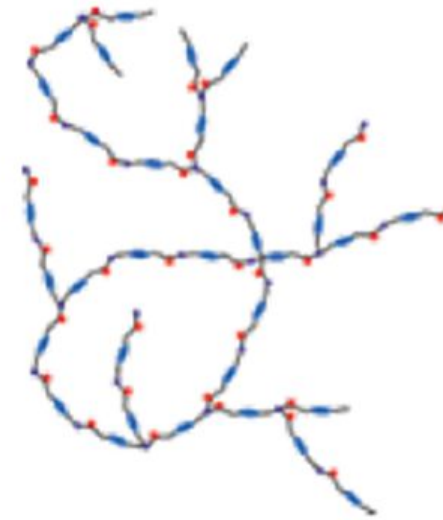
		Module E (MPa)	Contrainte à Rupture $\sigma_u$ (Mpa)	Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Module spécifique (kNm/kg)	Contrainte spécifique (kNm/kg)
Acier	A	210 000	340-2100	7 800	26,9	43-270
Alliage alu	D	70 000	140-620	2700	25,9	52-230
Béryllium	B	300 000	700	1830	164	380
Verre	V	73 000	3 500	2 540	28,5	1 380
Carbone HM	C	390 000	2 100	1 900	205	1 100
Kevlar	K	130 000	2 800	1 500	87	1 870



(a) Thermodurcissable



(b) Thermoplastique



Polymères à structure : (a) réticulée – (b) ramifiée



<b>Matrices</b>	<b>TD</b>	<b>TP</b>
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	Bonne	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques [REY]

Type de polymère	Masse vol. (Mg/m <sup>3</sup> )	Temp. de trans. vitreuse (°C)	Temp. de fusion (°C)	Condu. therm. (W/m · K)	Permit. relative
<b>Polyoléfines</b>					
PEbd	0,92 à 0,95	- 110 à -100	115	0,35	2,25 à 2,35
PEhd	0,95 à 0,98	- 110 à -100	130	0,52	2,3 à 2,4
PP	0,90	- 30 à -10	170	0,2	2,2 à 2,6
<b>Polyvinyliques</b>					
PVC	1,4	75 à 105	160	0,15	2,7 à 3,3
<b>Polystyréniques</b>					
PS	1,1	90	-	0,1 à 0,15	2,4 à 3,1
ABS	1,03 à 1,08	110	-	0,14 à 0,22	2,4 à 2,9
<b>Polyacryliques</b>					
PMMA	1,2	120	225	0,2	2,6 à 3,2
<b>Polymères fluorés</b>					
PTFE	2,2	125	330	0,25	2,0 à 2,1
<b>Polyoxyméthylènes</b>					
POM	1,41	- 50	170	0,22 à 0,35	3,6 à 4
<b>Polyamides</b>					
PA6-6	1,14	70	250	0,2 à 0,25	3,3 à 3,6
<b>Polyesters saturés</b>					
PETP	1,32 à 1,38	70	255	0,15 à 0,34	3 à 3,6
<b>Polycarbonates</b>					
PC	1,24	150	230	0,18 à 0,22	2,9 à 3,1
<b>Polysulfones</b>					
PSU	1,24	190	-	0,19 à 0,27	3,1 à 3,2
<b>Cellulosiques</b>					
CA	1,26	120	-	0,17 à 0,32	5 à 5,5

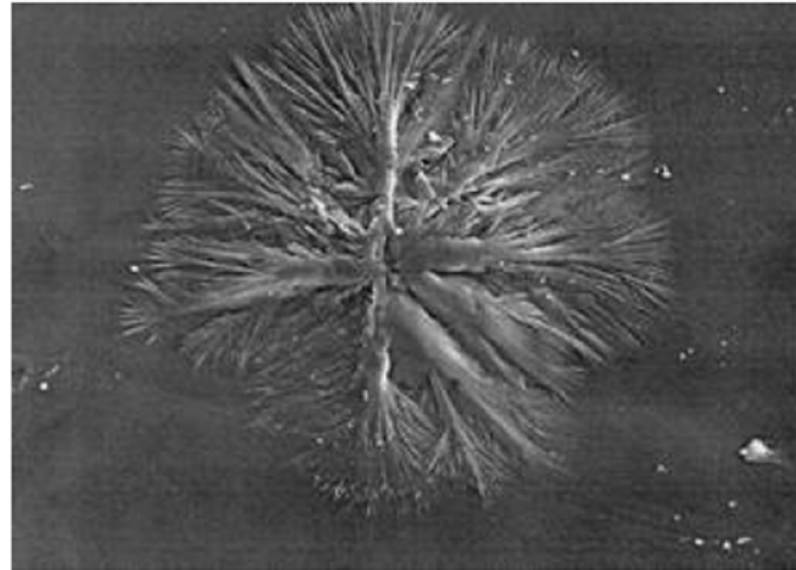
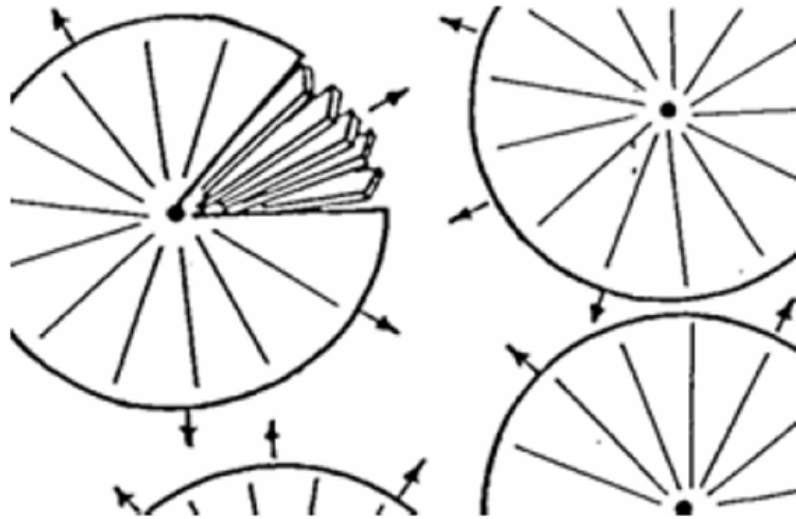
Coeff. de dilat. linéaire (10 <sup>-6</sup> /K)	Module de Young à 20 °C, 100s (GPa)	Résist. à la traction à 20 °C (MPa)	Allong. à la rupture à 20 °C (%)	Ténacité à 20 °C (MPa · m <sup>1/2</sup> )
<b>Polyoléfines</b>				
160 à 190	0,15 à 0,24	7 à 17	400 à 800	1 à 2
150 à 300	0,55 à 1	20 à 37	700 à 1 000	2 à 5
100 à 300	1,2 à 1,7	20 à 70	200 à 1 000	3,5
<b>Polyvinyliques</b>				
50 à 70	2,4 à 3	40 à 60	10 à 50	2,4
<b>Polystyréniques</b>				
70 à 100	3,0 à 3,3	35 à 68	4 à 5	2
70 à 95	1,8 à 2,7	30 à 60	20 à 60	3 à 4
<b>Polyacryliques</b>				
54 à 72	3,3	65 à 90	4 à 5	1,0 à 1,6
<b>Polymères fluorés</b>				
70 à 100	0,35 à 0,75	15 à 40	250 à 500	2,5 à 3
<b>Polyoxyméthylènes</b>				
75 à 200	3,5	70	65	2 à 4
<b>Polyamides</b>				
80 à 95	2 à 3,5	60 à 110	60	0,5
<b>Polyesters saturés</b>				
50 à 80	2,0 à 3,5	50 à 80	65 à 300	1,2 à 2
<b>Polycarbonates</b>				
60 à 75	2,3 à 2,8	55 à 75	90 à 130	2,6 à 3,2
<b>Polysulfones</b>				
56 à 58	2,4 à 2,7	65 à 100	25 à 80	1,4 à 1,9
<b>Cellulosiques</b>				
80 à 170	1 à 2,9	25 à 50	3 à 70	1,2 à 2

Propriétés de quelques résines thermoplastiques  
[DUP01]

Type de polymère	Masse vol. (Mg/m <sup>3</sup> )	Temp. maximale d'utilisation (°C)	Condu. therm. (W/m · K)	Permit. relative
<b>Phénoplastes</b>				
Résine formolphénolique (PF)	1,2 à 1,3	80	0,16 à 0,36	7 à 9
<b>Aminoplastes</b>				
Urée formaldéhyde (UF)	1,4 à 1,5	80	0,08 à 0,4	6,7 à 6,9
Mélatamine formaldéhyde (MF)	1,5 à 2	110 à 140	0,17 à 0,55	5,2 à 7,9
<b>Polyesters insaturés</b>				
Polyester rigide (UP)	1,28 à 1,35	75 à 200	0,2 à 0,7	4,0 à 4,1
Polyester souple (UP)	1 à 1,2	120 à 125	0,15 à 0,2	5,5 à 5,6
<b>Polyépoxydes</b>				
Résine époxyde (EP)	1,17 à 1,33	125 à 170	0,18 à 0,22	3,3 à 3,6
<b>Polyimides</b>				
Polyimide (PI)	1,33 à 1,43	250	0,19 à 0,42	3,4 à 3,7
<b>Silicones</b>				
Silicone rigide (SIL)	1,4 à 1,9	240 à 270	0,15 à 0,3	2,8 à 4

Coeff. de dilat. linéaire (10 <sup>-6</sup> /K)	Module de Young à 20 °C, 100s (GPa)	Résist. à la traction à 20 °C (MPa)	Allong. à la rupture à 20 °C (%)	Ténacité à 20 °C (MPa · m <sup>1/2</sup> )
<b>Phénoplastes</b>				
30 à 44	3 à 9	35 à 60	1,5 à 2	0,8 à 1,3
<b>Aminoplastes</b>				
39 à 65	7 à 10	40 à 90	0,5 à 1	1,5 à 2
40 à 60	6 à 10	40 à 60	0,6 à 1	0,3 à 0,5
<b>Polyesters insaturés</b>				
100 à 180	2 à 4,5	30 à 70	1 à 2	0,5 à 1
115 à 125	0,1 à 0,8	5 à 20	20 à 200	0,7 à 1,1
<b>Polyépoxydes</b>				
35 à 60	2,5 à 4	25 à 80	3 à 10	0,7 à 1,4
<b>Polyimides</b>				
32 à 65	2,5 à 4,8	70 à 100	3 à 8	1,5 à 2,5
<b>Silicones</b>				
55 à 70	3 à 8	25 à 45	1 à 3	0,6 à 1,3

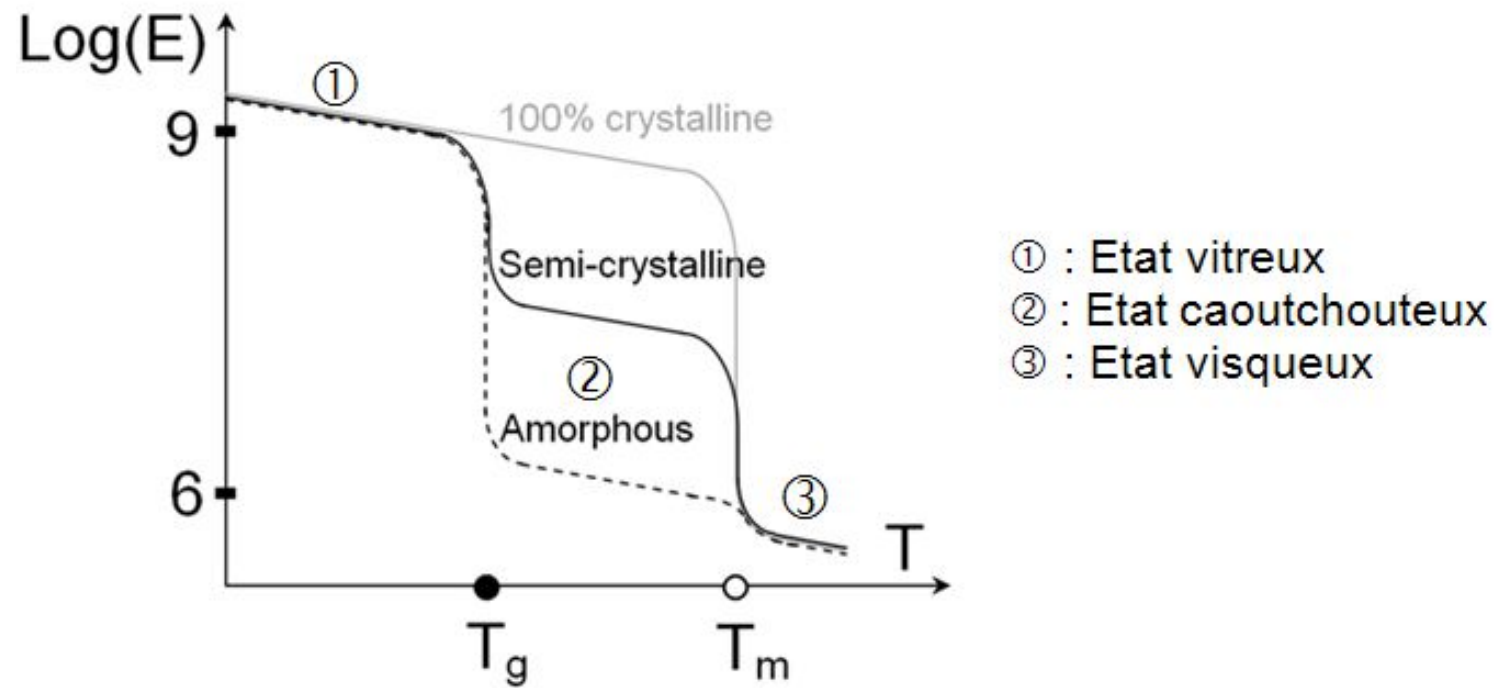
Propriétés de quelques résines thermodurcissables [DUP01]



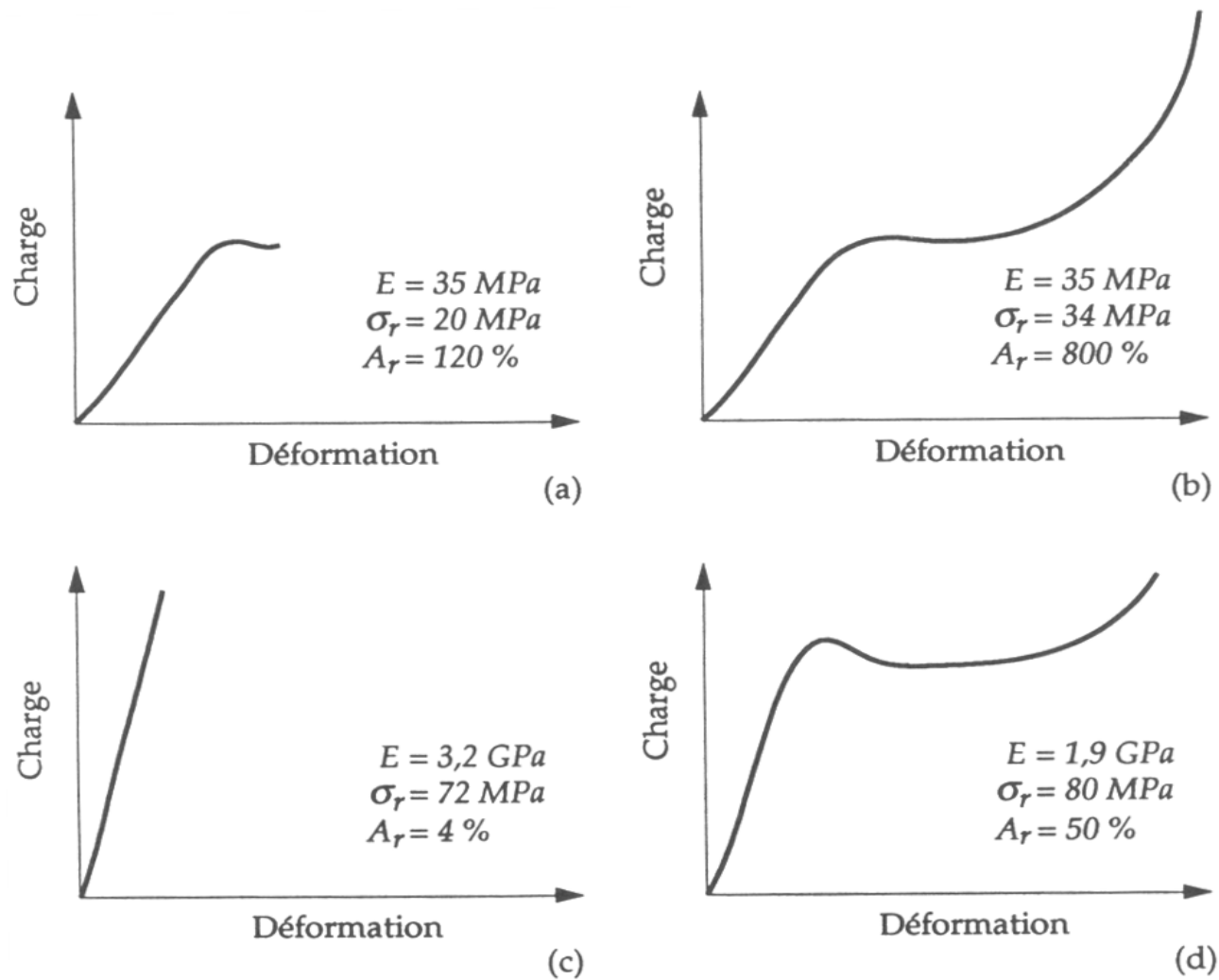
Formations des sphérolites dans les polymères semi-cristallins [CHE08]

<b>Pourcentage hautement cristallin</b>	<b>Pourcentage hautement amorphe</b>
Grande résistance à la chaleur	Faible résistance à la chaleur
Point de fusion précis	Point de fusion graduel
Plus opaque	Plus transparent
Plus de contraction au refroidissement	Moins de contraction au refroidissement
Endurance réduite à basse température	Endurance accrue à basse température
Stabilité dimensionnelle supérieure	Stabilité dimensionnelle inférieure
Moins de déformation	Plus de déformation

Principales différences entre les polymères cristallins et amorphes [REY]

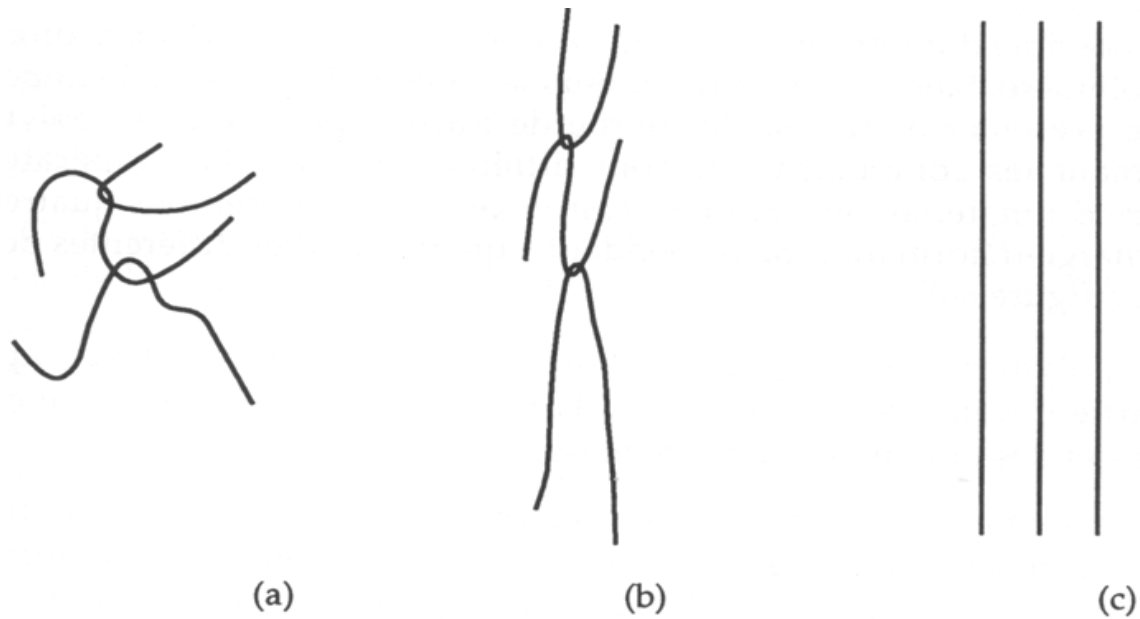


Evolution du module d'Young des polymères en fonction de la température et de leur taux de cristallinité



Courbes charge -déformation pour différents polymères [EHR00] :

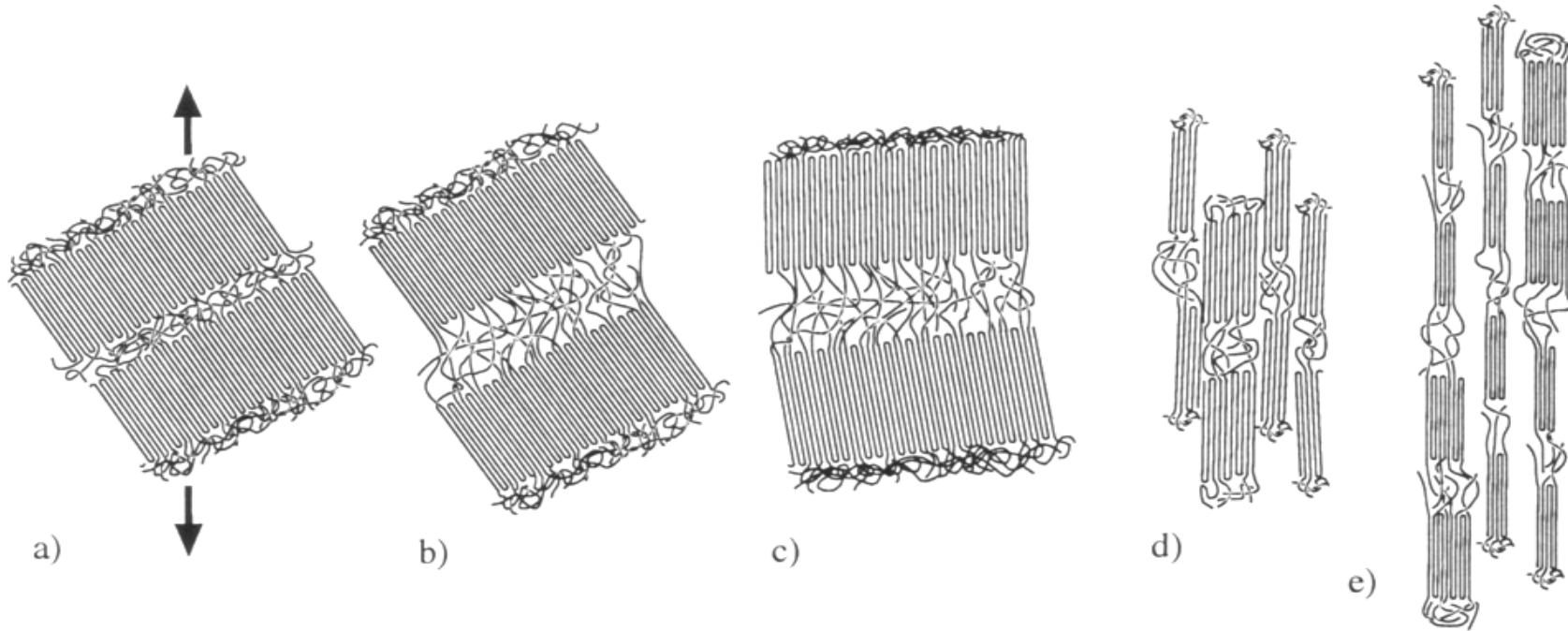
- (a) souple et peu résistant
- (b) souple et ductile
- (c) rigide et fragile
- (d) rigide et ductile



Mécanisme de déformation des polymères amorphes lors d'une sollicitation unidirectionnelle [EHR00] :

- (a) état libre de contraintes
- (b) déformation limitée par l'enchevêtrement
- (c) structure paracrystalline parfaitement alignée

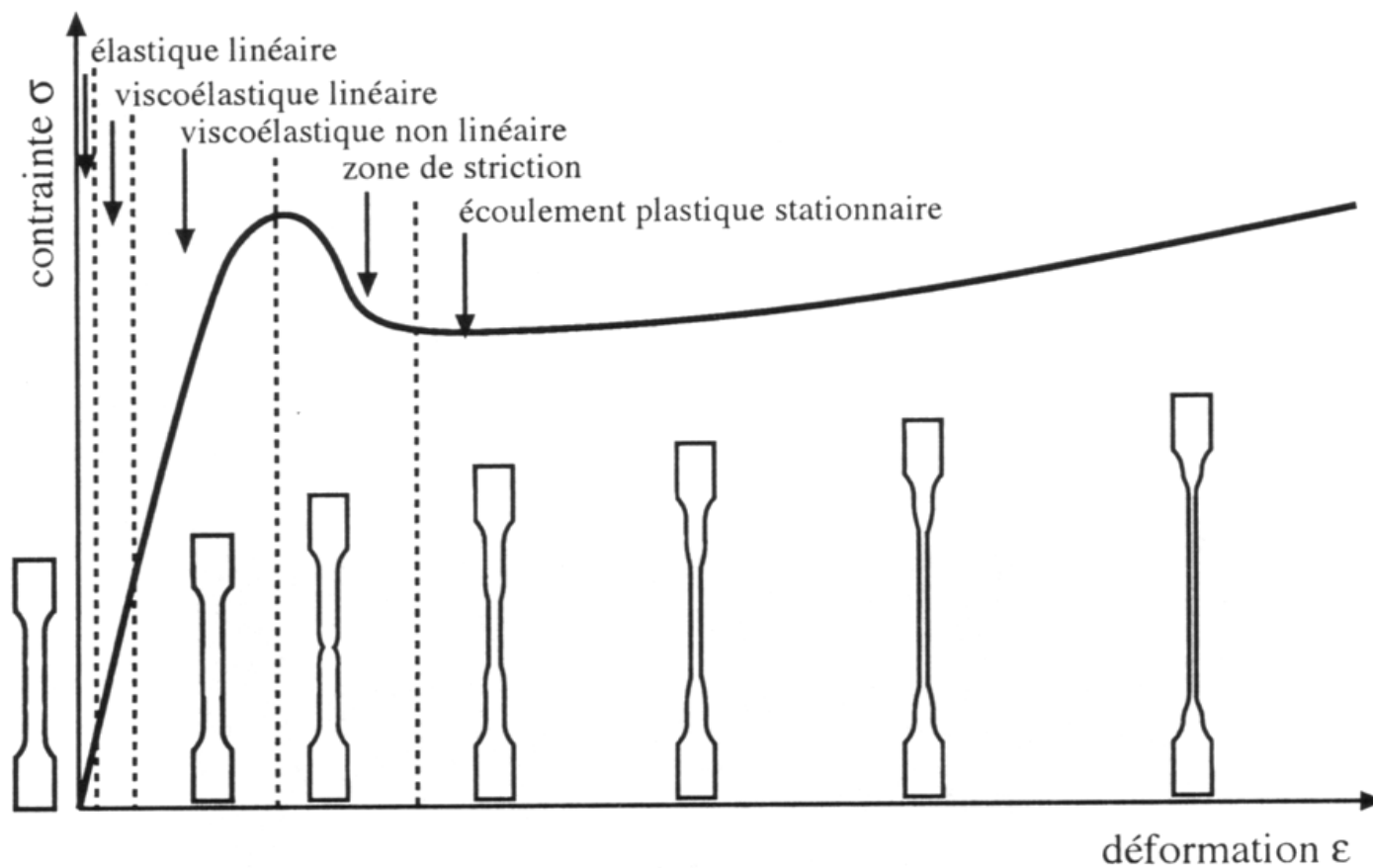




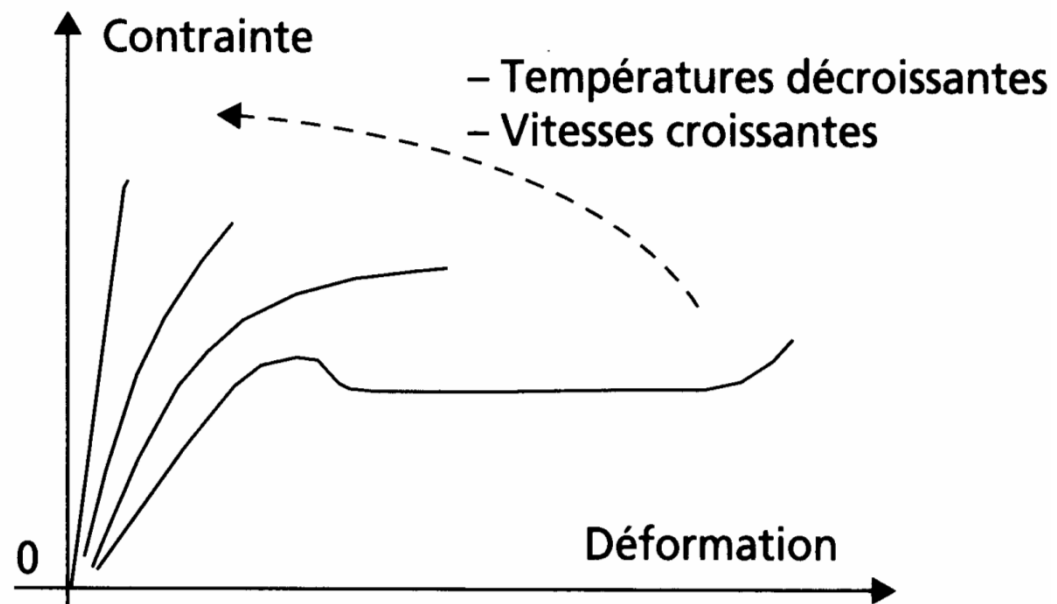
a) état initial  
 b) étirage des zones amorphes

c) rotation (décalage) des lamelles cristallines  
 d) séparation en différents domaines cristallins  
 e) formation de microfibrilles individuelles

Mécanisme de déformation des polymères  
 semi-cristallins lors d'une sollicitation  
 unidirectionnelle [OUD94]



Réponse caractéristique en traction d'un polymère thermoplastique semi-cristallin et évolution de la forme de l'éprouvette [OUD94]



Mise en évidence du comportement  
viscoplastique des polymères  
[DUP02]

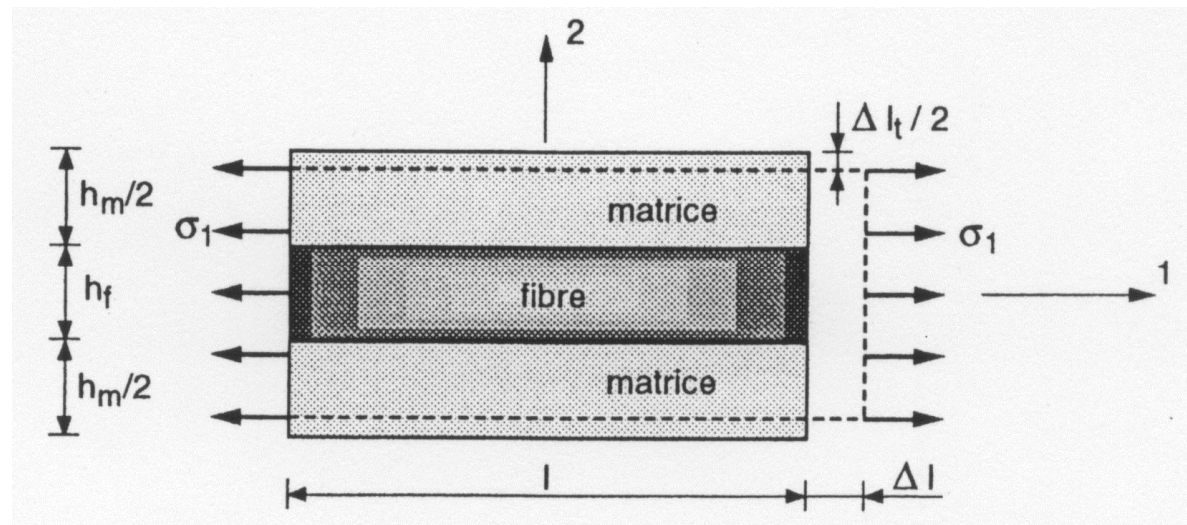


Schéma par couches d'une traction longitudinale [BER02]

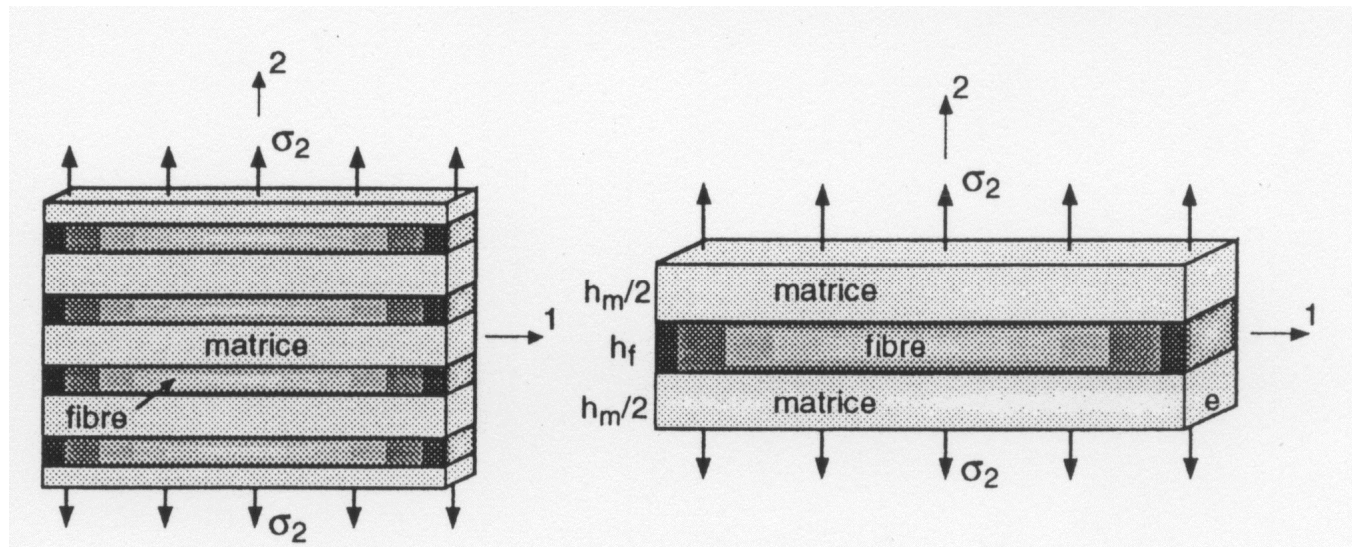


Schéma par couches d'une traction transversale [BER02]

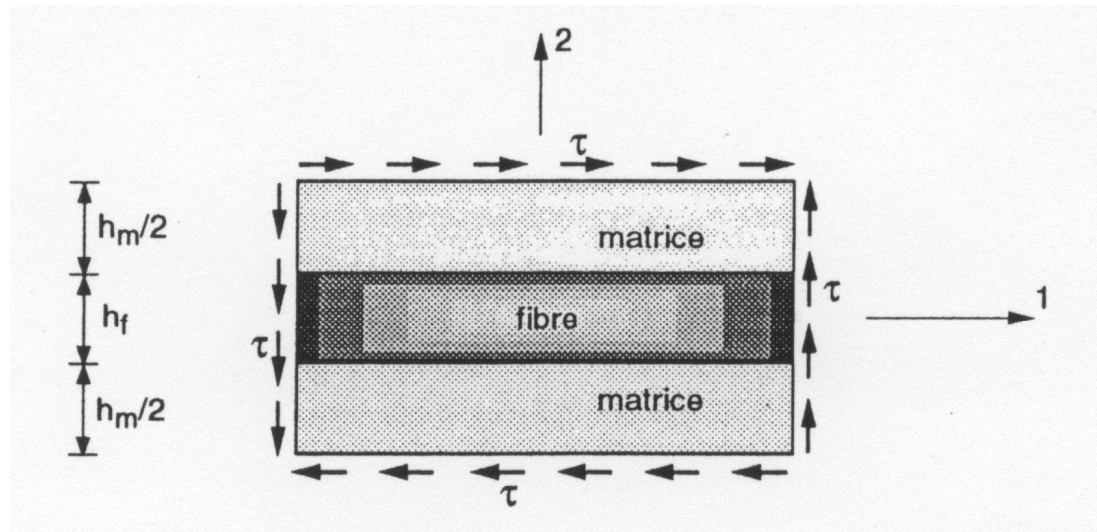
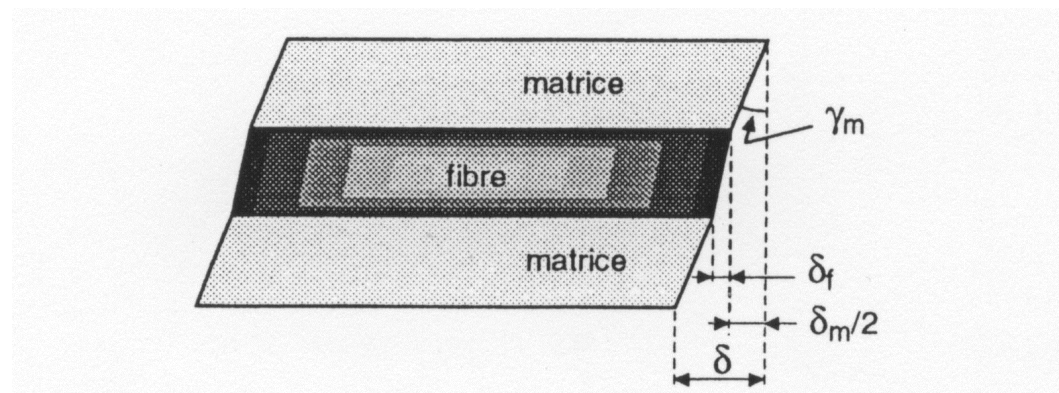


Schéma par couches d'un essai de cisaillement [BER02]



Déformations en cisaillement de la matrice et de la fibre [BER02]

Type de composite	Masse vol. (Mg/m <sup>3</sup> )	Temp. maximale d'utilisation (°C)	Coeff. de dilat. linéaire (10 <sup>-6</sup> /K)
<b>Composites à matrice polymère</b>			
EP ou UP + fibres de carbone unidirec. (fib. longues)	1,48 à 1,55	110 à 230	0,1 à 1
EP ou UP + fibres de carbone stratifié multidirec. (fib. longues)	1,5 à 1,6	110 à 230	5 à 20
EP ou UP + fibres de verre unidirec. (fib. longues)	1,6 à 1,95	110 à 230	8,5 à 25
EP ou UP + fibres de verre stratifié multidirec. (fib. longues)	1,5 à 2	110 à 230	12 à 25
EP ou UP + fibres de verre (fib. courtes)	1,1 à 2,2	110 à 230	15 à 40
<b>Composites à matrice minérale</b>			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + particules ou fibres courtes minérales	3,2 à 4,3	1 440 à 1 850	5,2 à 7,8
Carbone + fibres de carbone	1,4 à 1,7	200 à 2 050	0,2 à 8,4
<b>Composites à matrice métallique</b>			
Al + particules de SiC	2,9 à 3,1	230 à 370	6 à 22
<b>Composites naturels</b>			
Bois, parallèlement aux fibres	0,09 à 1,4	120 à 140	2 à 11
Bois, perpendiculairement aux fibres	0,09 à 1,4	120 à 140	20 à 60
Contreplaqué	0,4 à 1,3	120 à 140	10 à 15
Os	1,8 à 2,1	110 à 130	10 à 30
<b>Matériaux homogènes de référence</b>			
Acier au carbone	7,8	170 à 360	10 à 14
Alliage d'aluminium corroyé	2,5 à 2,8	80 à 180	22 à 24
Alumine	3 à 4	1 100 à 1 900	4,5 à 11
Polyéthylène	0,93	60 à 70	160 à 180

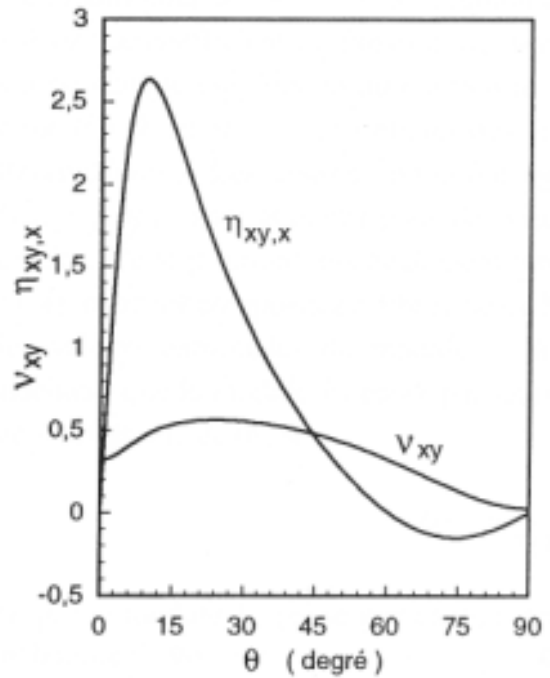
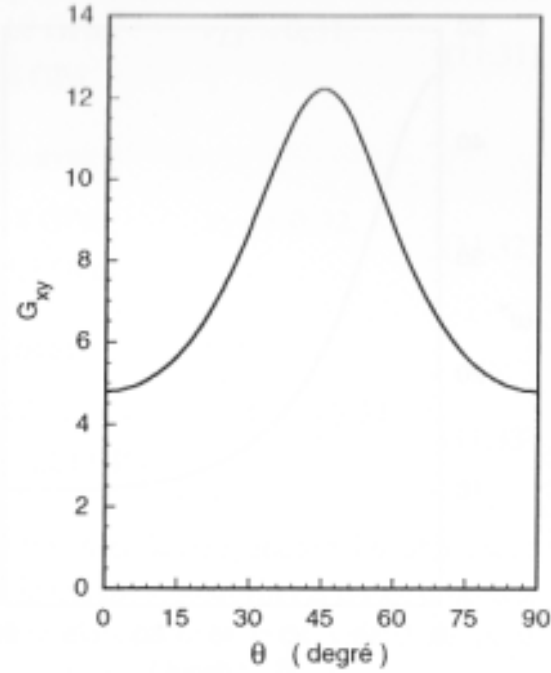
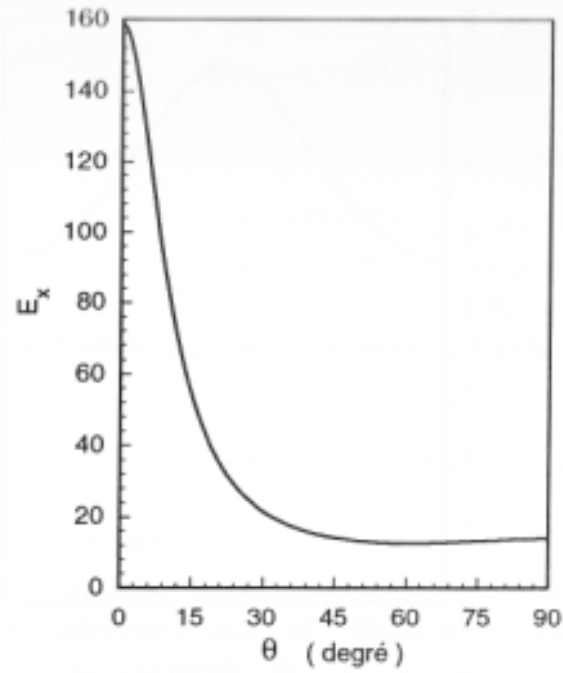
Module de Young (GPa)	Résist. à la traction (MPa)	Allong. à la rupture (%)	Ténacité (MPa · m <sup>1/2</sup> )	Résistance spécifique $R_m/\rho$	Module spécif. $E/\rho$
<b>Composites à matrice polymère</b>					
200 à 240	500 à 1 600	1 à 2	30 à 35	330 à 1 060	130 à 170
60 à 160	300 à 800	2 à 3	30 à 45	190 à 510	40 à 110
35 à 45	300 à 1 100	2 à 3	35 à 40	170 à 590	20 à 30
15 à 45	150 à 750	2 à 4	20 à 40	85 à 440	8 à 30
15 à 40	50 à 200	2 à 5	2 à 12	30 à 140	4 à 14
<b>Composites à matrice minérale</b>					
345 à 415	280 à 660	0,1	3 à 5	70 à 180	85 à 125
8,3 à 100	7 à 35	0,1	5 à 6	4 à 20	5 à 65
<b>Composites à matrice métallique</b>					
80 à 110	300 à 525	0,5 à 7	10 à 22	100 à 175	25 à 40
<b>Composites naturels</b>					
3,7 à 34	25 à 300	0,3 à 1,5	1,4 à 20	70 à 310	8 à 50
0,1 à 18	1 à 12	0,3 à 1,5	0,1 à 1,6	2,3 à 17	0,3 à 18
0,6 à 3	5 à 25	0,2 à 2	1 à 2	46 à 108	5 à 15
17 à 22	120 à 160	3 à 7	3,5 à 7	60 à 83	8 à 12
<b>Matériaux homogènes de référence</b>					
200 à 210	400 à 2 000	4 à 40	12 à 90	50 à 270	24 à 28
68 à 82	60 à 600	1 à 45	30 à 40	20 à 225	25 à 30
215 à 413	70 à 660	0,1 à 0,2	3 à 5	20 à 190	60 à 130
0,45 à 0,5	12 à 15	100 à 150	2 à 2,2	12 à 17	0,5

Propriétés de quelques matériaux composites [DUP01]

Matériau	verre-époxy				carbone-époxy			
$E_f$ (GPa)	70				$E_L=234$ $E_T=15$			
$\nu_f$	0,17				0,2			
$E_m$ (GPa)	2,85				3,8			
$\nu_m$	0,33				0,33			
$V_f$	0,66				0,6			
Méthode	$E_L$	$E_T$	$G_{LT}$	$\nu_{LT}$	$E_L$	$E_T$	$G_{LT}$	$\nu_{LT}$
Loi des mélanges	47	7.7	2.95	0.22	141	9.2/6.8	3.5	0.25
LM modifiée		13	5			12.6 /7.2	4.7	
Pabiot		15.5	6.4			19	7.3	
Halpin-Tsai $\eta=0,52$		11.6	4.5			14	5.4	
Halpin-Tsai $\eta=0,28$		17.6	6.85			23	8.8	
Expérience	49.4	18	7.8	0.22	151	9,3/12.6	6.2	0.32

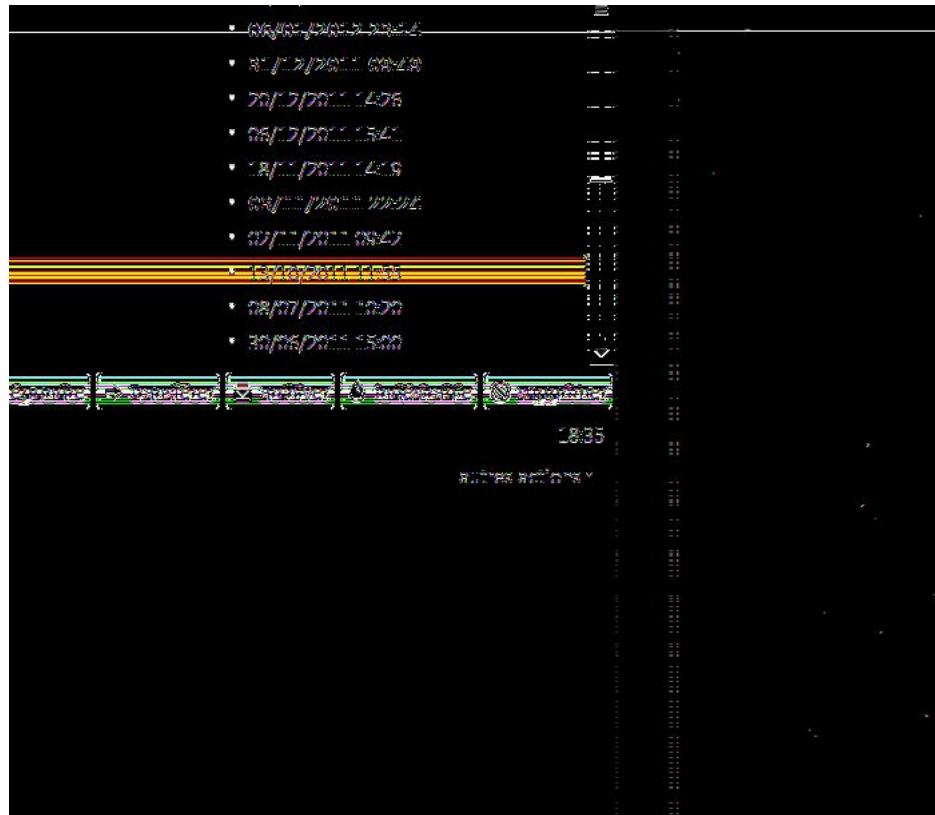
Calcul de la rigidité des matériaux composites à partir des propriétés des éléments constitutifs par différentes méthodes





Variation des modules d'élasticité dans le cas d'un composite UD C/Epoxy

Différentes réponses contrainte-déformation d'un composite UD C/Epoxy sollicité selon différents angles



## Exemple d'application d'un composite UD sollicité hors-axes

Une couche unidirectionnelle est soumise dans l'un de ses plans ( $x, y$ ) (figure 11.5) à l'état de déformations suivant :

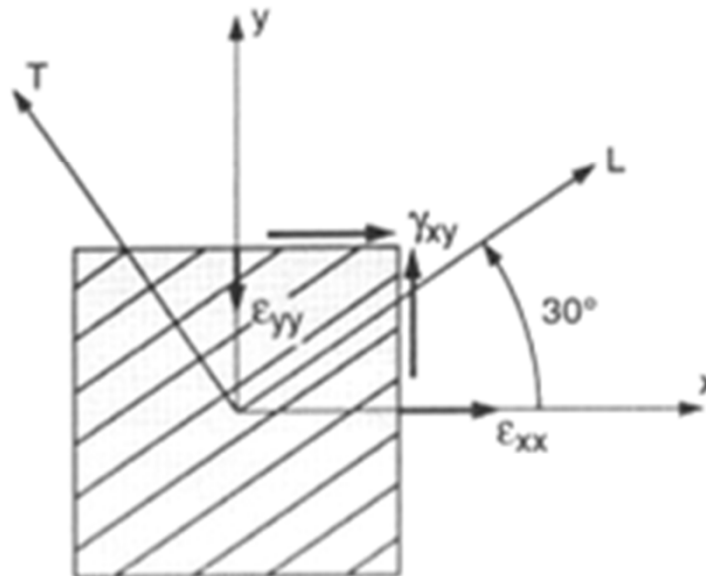
$$\varepsilon_{xx} = 1 \% = 10^{-2},$$

$$\varepsilon_{yy} = -0,5 \% = -5 \times 10^{-3},$$

$$\gamma_{xy} = 2 \% = 2 \times 10^{-2}.$$

La direction des fibres fait un angle de  $30^\circ$  avec la direction  $x$ . Les constantes élastiques du matériau composite sont :

$$E_L = 40 \text{ GPa}, \quad E_T = 10 \text{ GPa}, \quad \nu_{LT} = 0,32, \quad G_{LT} = 4,5 \text{ GPa}.$$



En considérant que la couche est dans un état de contraintes planes, déterminer :

1. les contraintes  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{xy}$  dans le système d'axes  $(x, y)$  ;
2. les contraintes dans les axes principaux  $(L, T)$  de la couche.

### 1. Détermination des contraintes $\sigma_{xx}$ , $\sigma_{yy}$ et $\sigma_{xy}$

Il faut déterminer au préalable la matrice de rigidité réduite rapportée aux axes principaux :

$$Q_{11} = \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}^2 \frac{E_T}{E_L}} = 41,051 \text{ GPa},$$

$$Q_{22} = \frac{E_T}{E_L} Q_{11} = 10,263 \text{ GPa},$$

$$Q_{12} = \nu_{LT} Q_{22} = 3,284 \text{ GPa},$$

$$Q_{66} = G_{LT} = 4,5 \text{ GPa}.$$

D'où la matrice de rigidité réduite exprimée dans les axes principaux :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 41,051 & 3,284 & 0 \\ 3,284 & 10,263 & 0 \\ 0 & 0 & 4,5 \end{bmatrix} \text{ GPa} .$$

La matrice de rigidité réduite, rapportée aux axes  $(x, y)$ , est ensuite calculée à partir des expressions du tableau 11.6 :

$$Q'_{11} = 41,051 \times \frac{9}{16} + 10,263 \times \frac{1}{16} + 2(3,284 + 2 \times 4,5) \frac{3}{4} \frac{1}{4} = 28,339 \text{ GPa},$$

$$Q'_{12} = (41,051 + 10,263 - 4 \times 4,5) \frac{3}{4} \frac{1}{4} + 3,284 \times \left( \frac{9}{16} + \frac{1}{16} \right) = 8,299 \text{ GPa},$$

$$Q'_{16} = (41,051 - 3,284 - 2 \times 4,5) \frac{1}{2} \frac{3\sqrt{3}}{8} + (3,284 - 10,263 + 2 \times 4,5) \frac{1}{8} \frac{\sqrt{3}}{2} \\ = 9,561 \text{ GPa},$$

$$Q'_{22} = 41,051 \times \frac{1}{16} + 10,263 \times \frac{9}{16} + 2(3,284 + 2 \times 4,5) \frac{3}{4} \frac{1}{4} = 12,945 \text{ GPa},$$

$$Q'_{26} = (41,051 - 3,284 - 2 \times 4,5) \frac{1}{8} \frac{\sqrt{3}}{2} + (3,284 - 10,263 + 2 \times 4,5) \frac{3\sqrt{3}}{8} \frac{1}{2} \\ = 3,770 \text{ GPa},$$

$$Q'_{66} = \left[ 41,051 + 10,263 - 2(3,284 + 4,5) \right] \frac{1}{4} \frac{3}{4} + 4,5 \left( \frac{9}{16} + \frac{1}{16} \right) \\ = 9,515 \text{ GPa}.$$

D'où la matrice de rigidité réduite dans les axes  $(x, y)$  :

$$\mathbf{Q}' = \begin{bmatrix} 28,339 & 8,299 & 9,561 \\ 8,299 & 12,945 & 3,770 \\ 9,561 & 3,770 & 9,515 \end{bmatrix} \text{ GPa.}$$

Les contraintes dans les axes  $(x, y)$  sont ensuite calculées à partir de (11.43) :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 28,339 & 8,299 & 9,561 \\ 8,299 & 12,945 & 3,770 \\ 9,561 & 3,770 & 9,515 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \begin{bmatrix} 10 \\ -5 \\ 20 \end{bmatrix} \times 10^{-3}.$$

Soit :

$$\sigma_{xx} = 433 \text{ MPa,}$$

$$\sigma_{yy} = 94 \text{ MPa,}$$

$$\sigma_{xy} = 267 \text{ MPa.}$$

## 2. Détermination des contraintes dans les axes principaux

Les contraintes dans les axes principaux s'obtiennent à partir de la relation générale (5.44). Dans le cas de contraintes planes, cette relation est limitée aux trois contraintes dans le plan et s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}, \quad (11.53)$$

où  $\theta$  est l'angle de la direction des fibres avec la direction  $x$  de référence. Dans le cas présent, cette expression s'écrit :

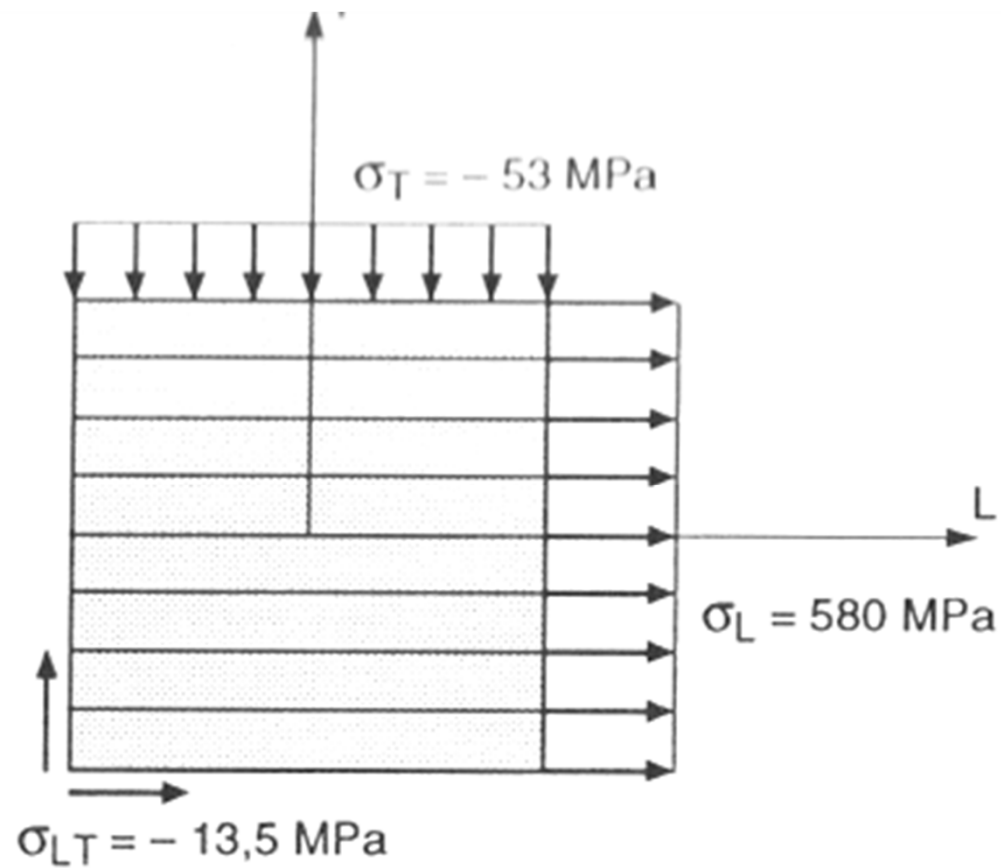
$$\begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2}\sqrt{3} \\ \frac{1}{4} & \frac{3}{4} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \\ -\frac{1}{4}\sqrt{3} & \frac{1}{4}\sqrt{3} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 433 \\ 94 \\ 267 \end{bmatrix} \text{ MPa} .$$

Soit :

$$\sigma_L = 580 \text{ MPa,}$$

$$\sigma_T = -53 \text{ MPa,}$$

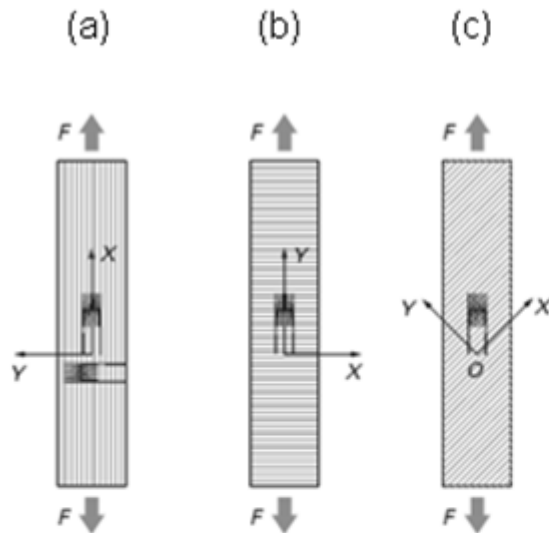
$$\sigma_{LT} = -13,5 \text{ MPa.}$$



*Figure 11.6. Contraintes dans les axes principaux.*



## Détermination expérimentale des modules d'élasticité

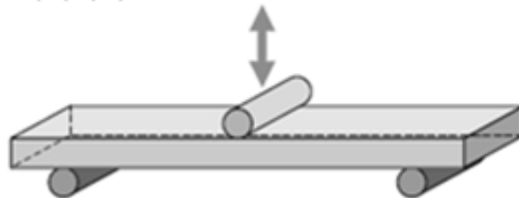


(a) essai de traction sens longitudinal  
 $\rightarrow E_{XX}$  et  $\nu_{XY} - \sigma_X$

(b) essai de traction sens transversal  
 $\rightarrow E_{YY} - \sigma_Y$

(c) essai de traction hors axes  
 $\rightarrow G_{XY} - \sigma_{XY}$

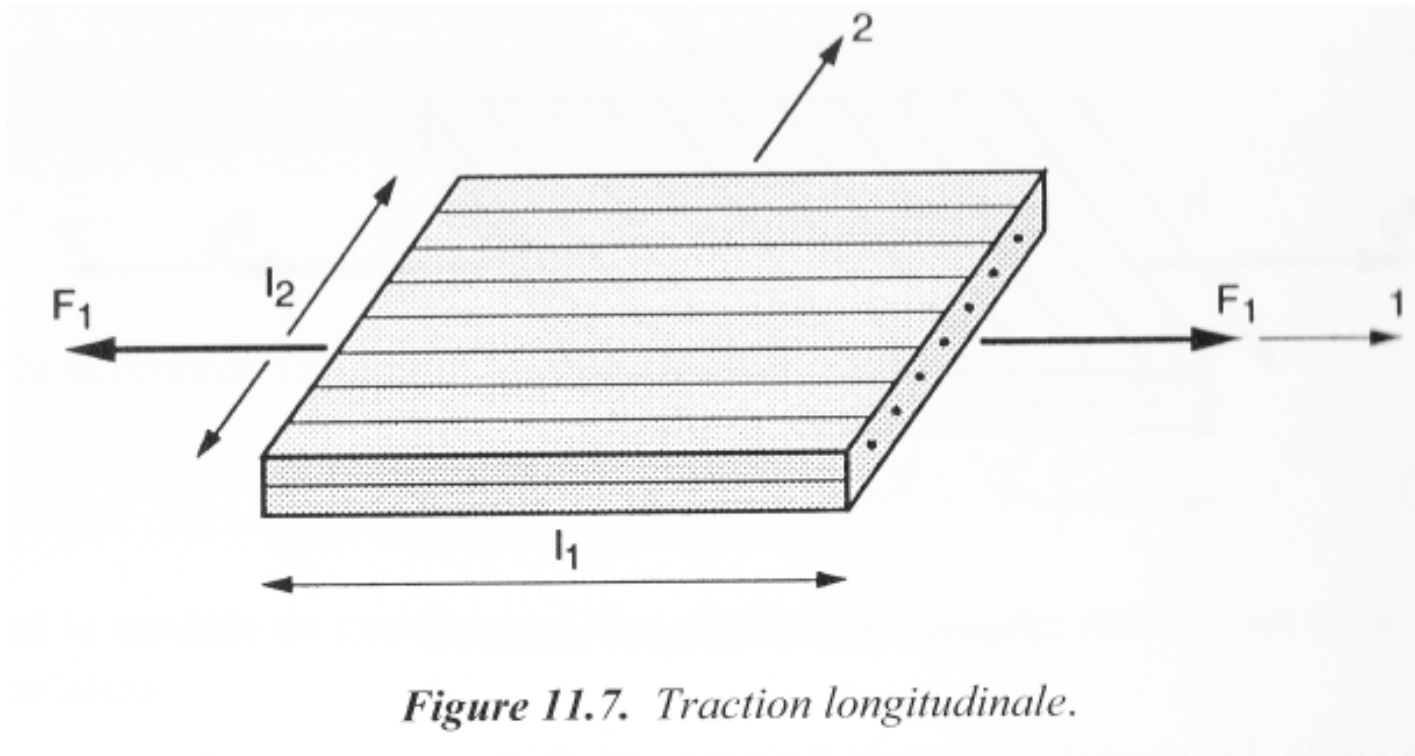
(d)-(e)



(d) essai de flexion sens longitudinal  
 $\rightarrow G_{XZ} - \sigma_{XZ}$

(e) essai de flexion sens transversal  
 $\rightarrow G_{YZ} - \sigma_{YZ}$

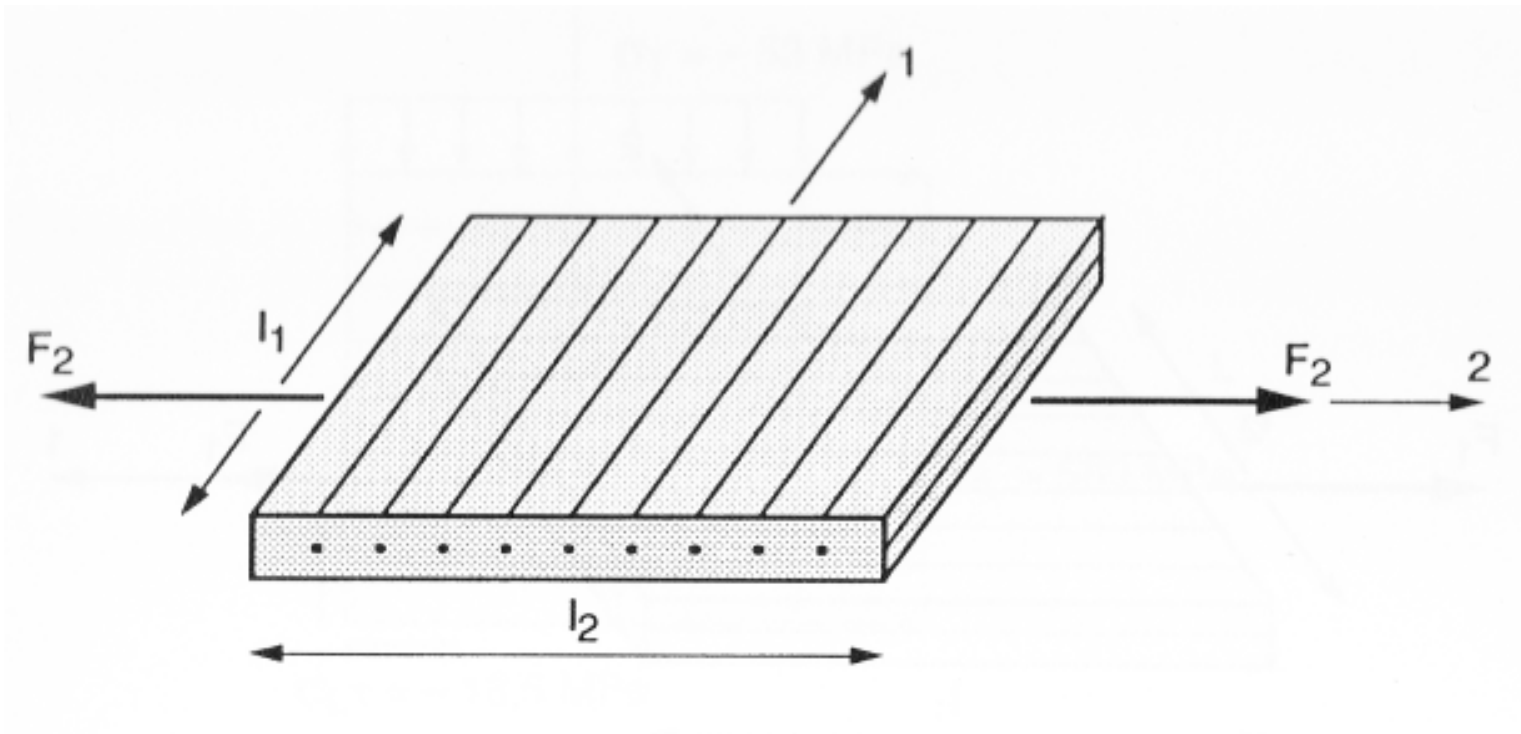
## Détermination expérimentale des modules d'élasticité



*Figure 11.7. Traction longitudinale.*

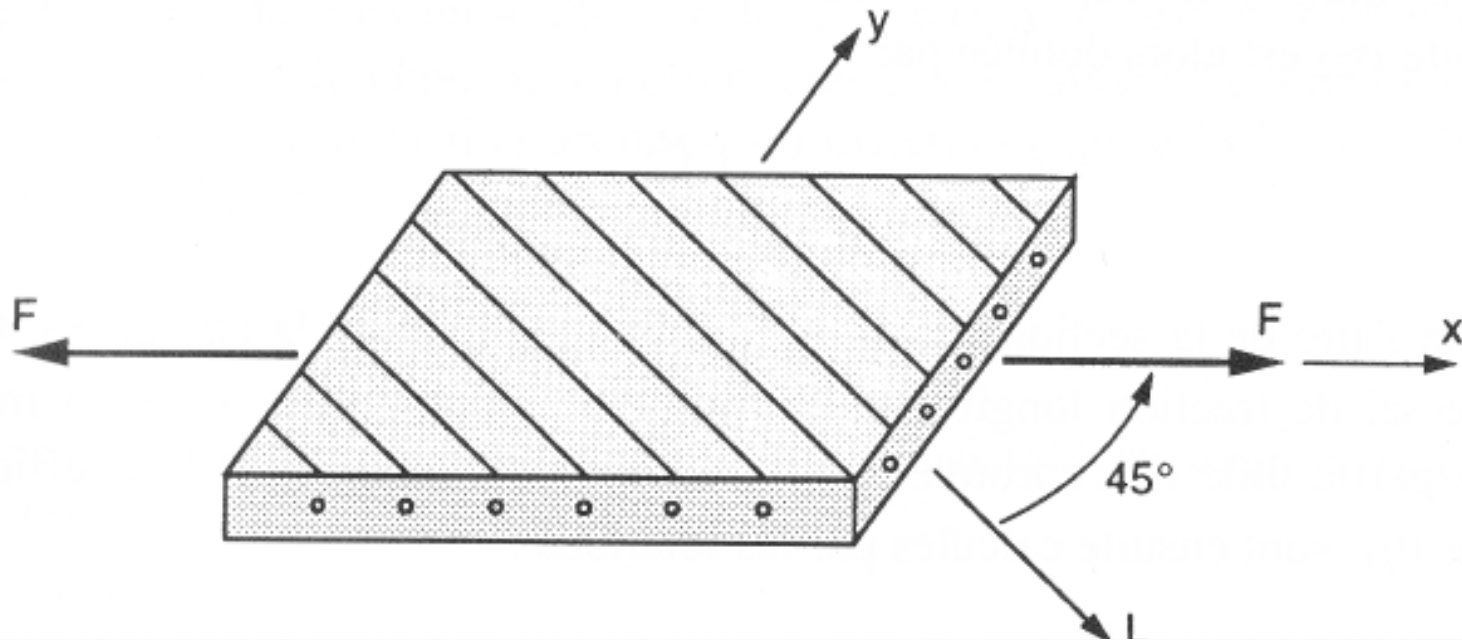
Le module longitudinal  $E_L$  et le coefficient de Poisson  $\nu_{LT}$  sont partir des expressions :

$$E_L = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \quad \text{et} \quad \nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} .$$



*Figure 11.8. Traction transverse.*

$$E_T = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}} \quad \text{et} \quad \nu_{TL} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}}$$



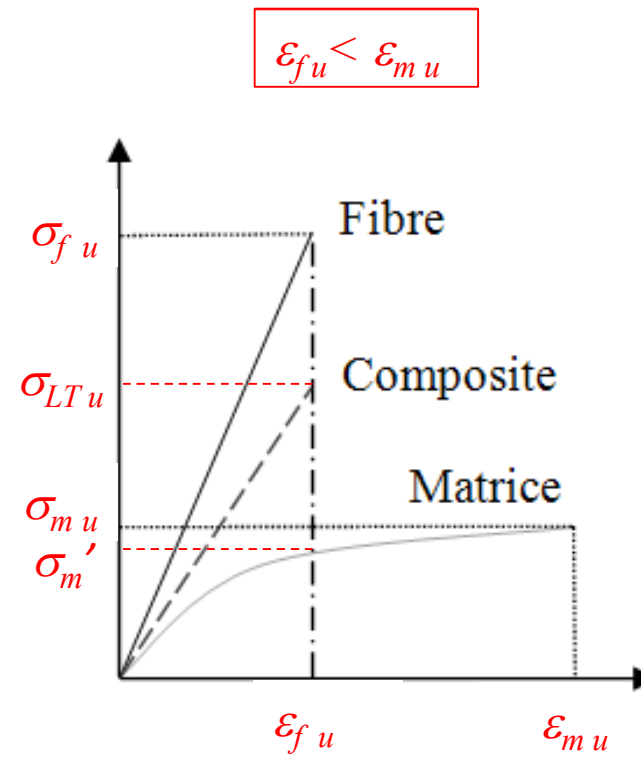
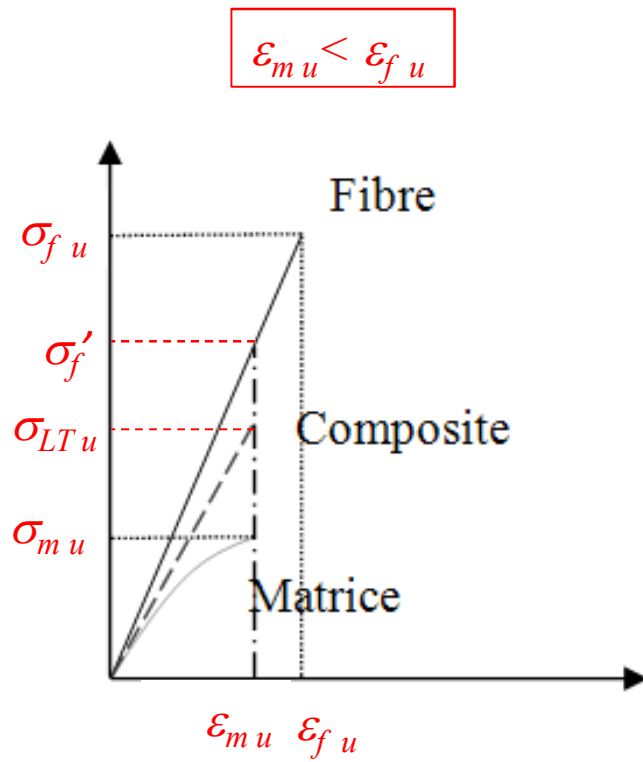
$$E_{45} = \frac{\sigma_{45}}{\varepsilon_{45}}. \quad (11.60)$$

D'après la relation (11.9), ce module s'exprime par :

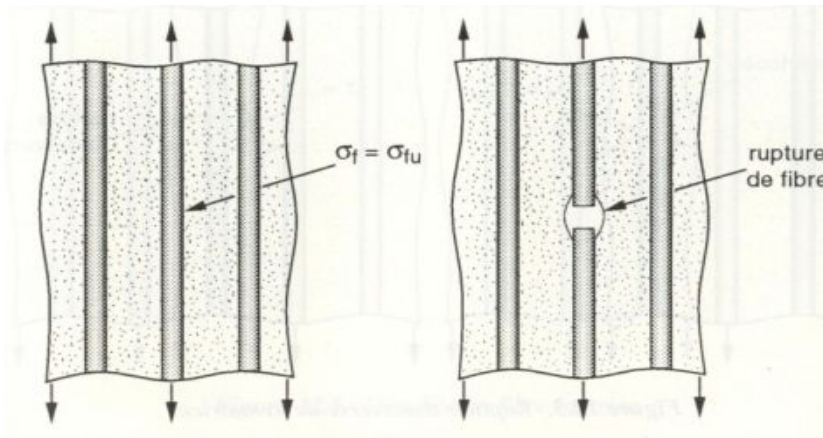
$$\frac{1}{E_{45}} = \frac{1}{4} \left( \frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{1}{G_{LT}} - 2 \frac{\nu_{LT}}{E_L} \right), \quad (11.61)$$

où seul le module de cisaillement  $G_{LT}$  n'est pas connu. Ce module est donc déduit de la relation :

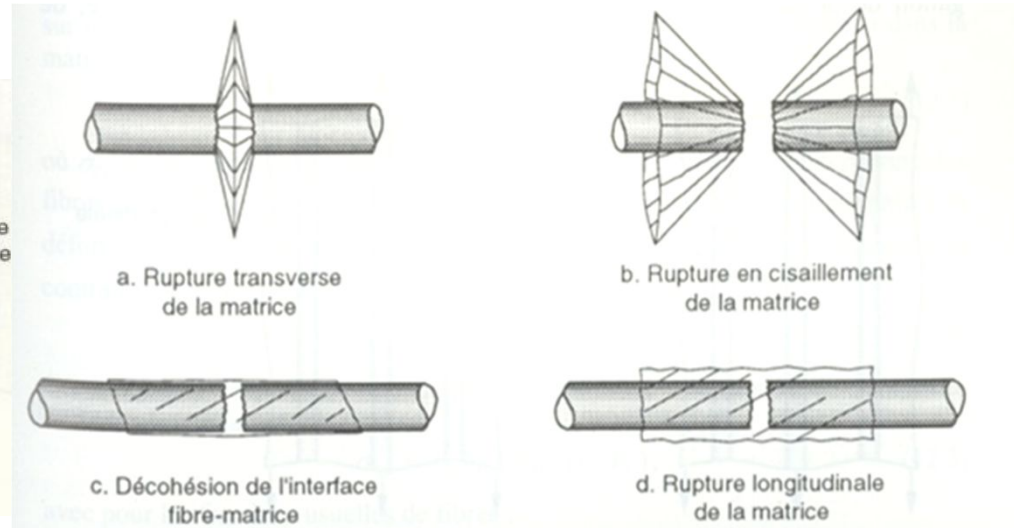
$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} + 2 \frac{\nu_{LT}}{E_L}. \quad (11.62)$$



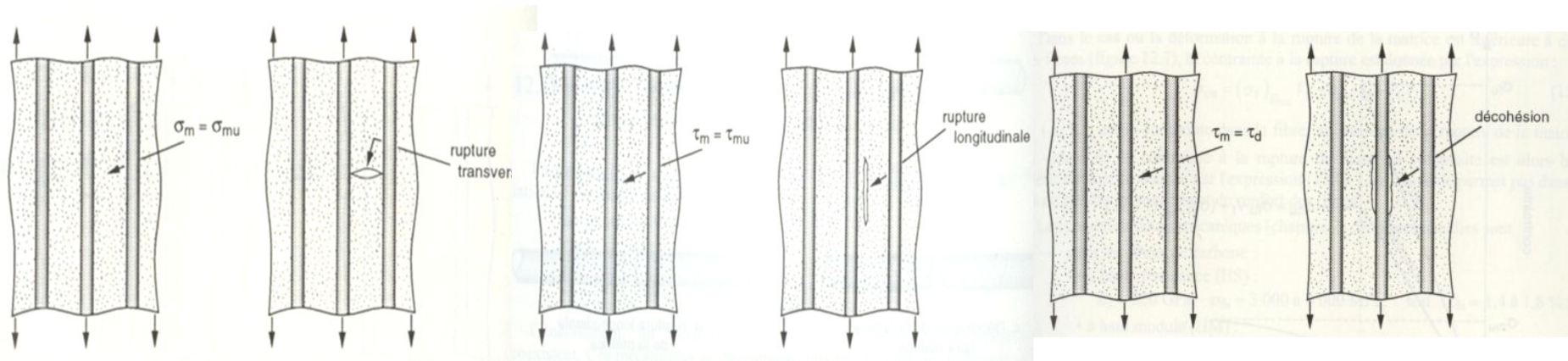
Contrainte à rupture  $\sigma_{LT u}$  d'un composite renforcé de fibres UD sollicité dans le sens des fibres



Rupture de fibres [BER05]



Différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture des fibres [BER05]



Rupture transverse

Rupture longitudinale

Décohésion fibre/matrice

Différents mécanismes d'endommagement de la matrice [BER05]

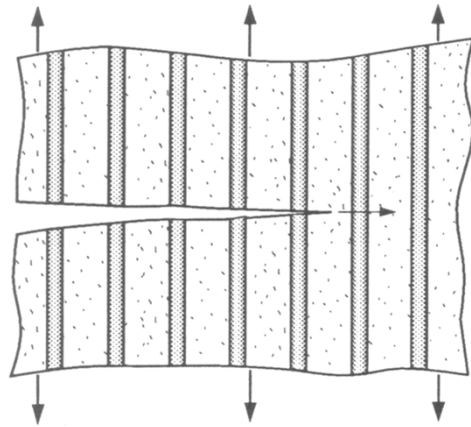


fig.12.8.1

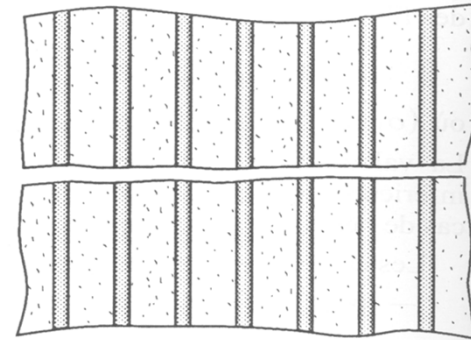


fig. 12.8.2

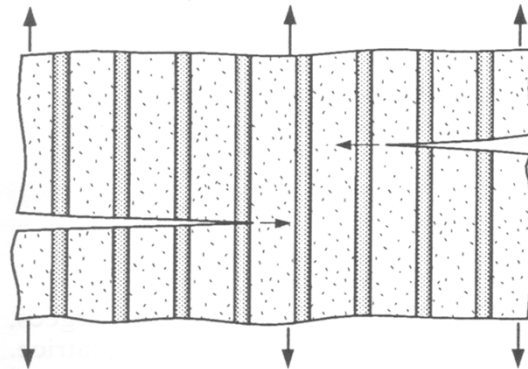


fig. 12.8.3

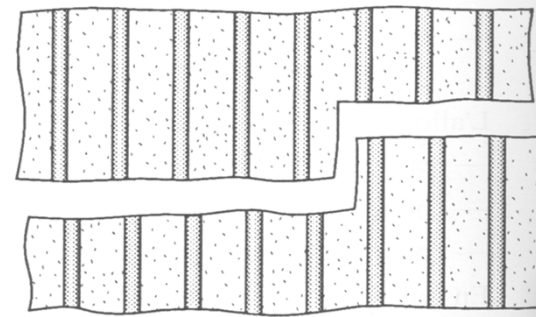
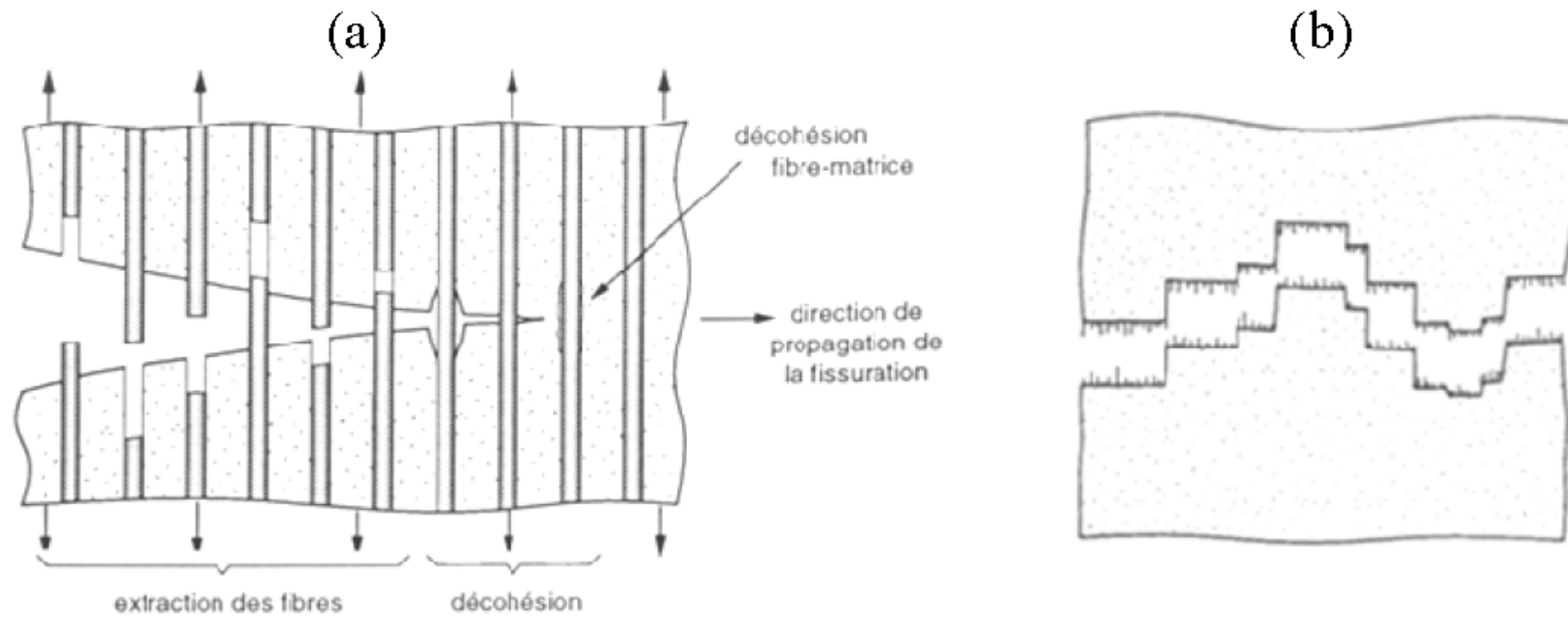


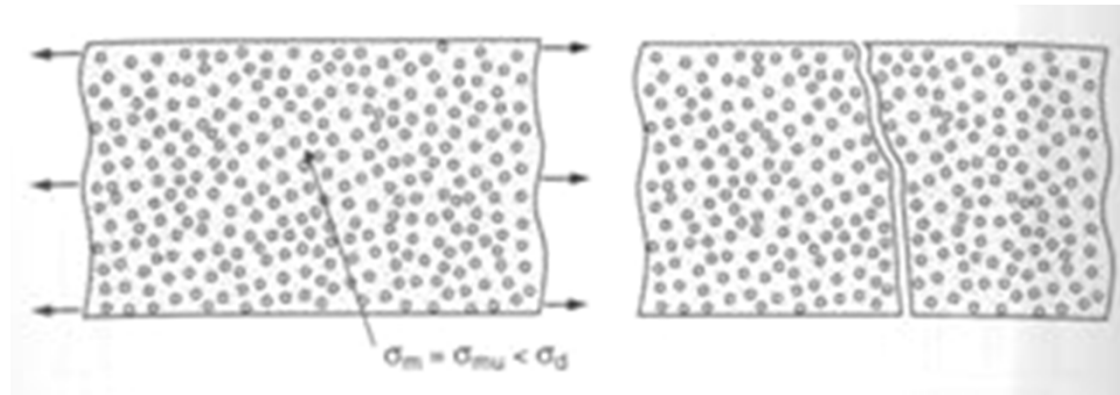
fig. 12.8.4

Mécanismes d'endommagement dans le cas d'une forte adhésion fibre-matrice [BER05]

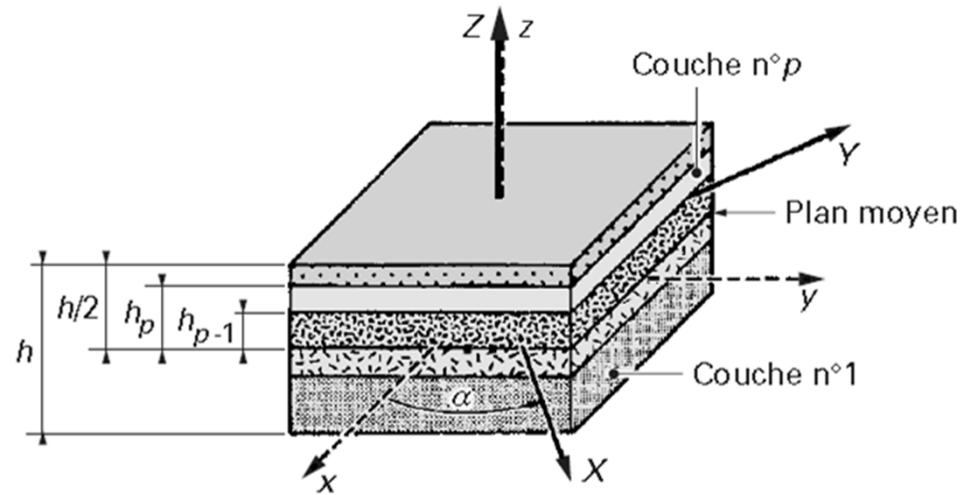
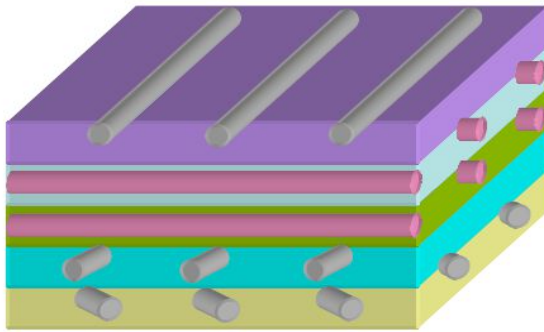


Faible adhésion fibre-matrice [BER05] :  
(a) Mécanismes d'endommagement – (b) Surface de rupture



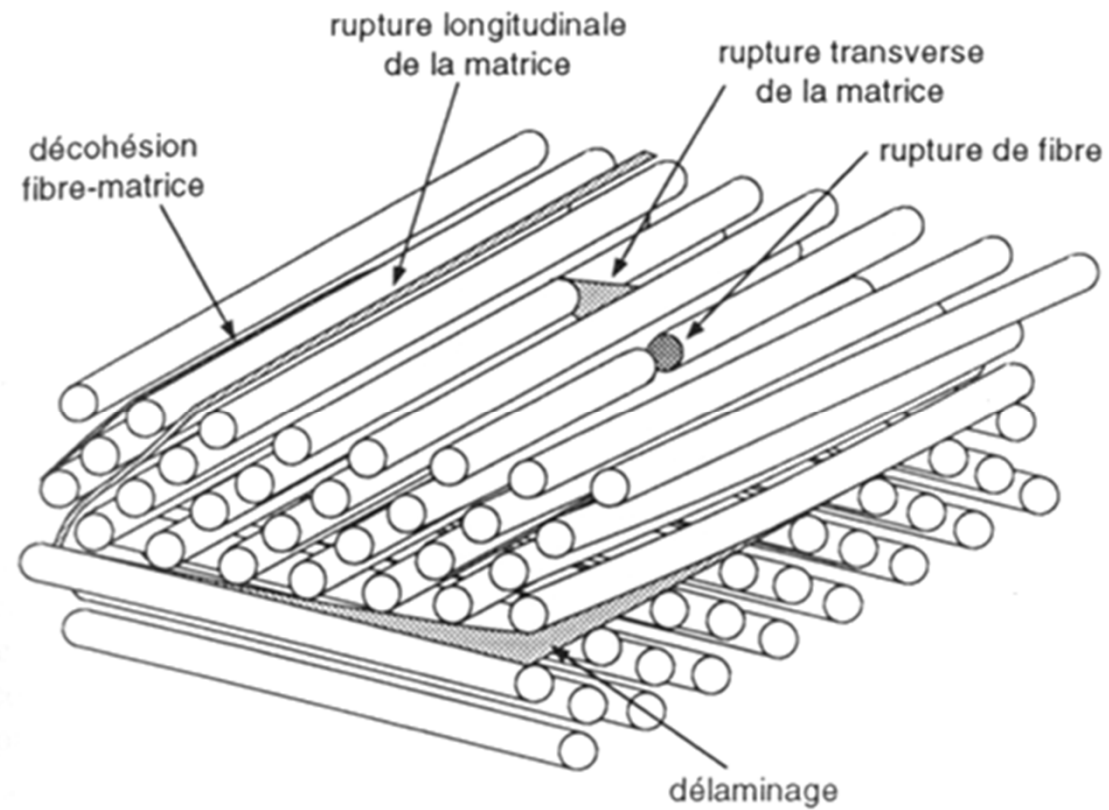


Rupture d'un composite UD soumis à une traction transverse [BER05]

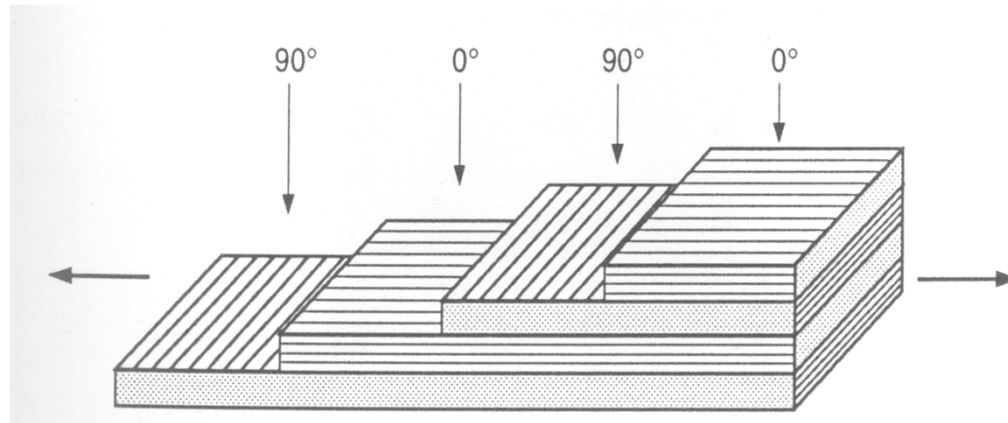


$\{O, xyz\}$  repère de la plaque  
 $\{O, XYZ\}$  repère d'orthotropie de la couche

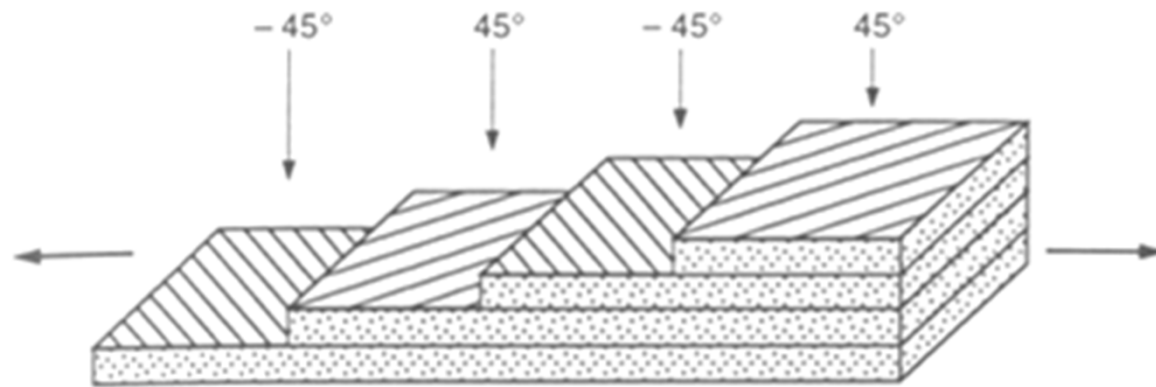
Plaque composite stratifiée multi-couches [BAR]



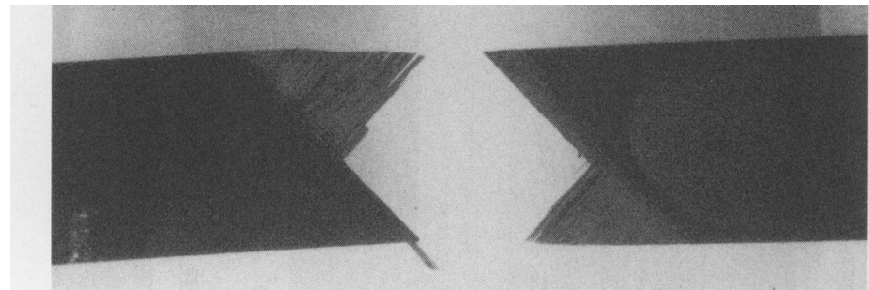
Représentation schématique des principaux mécanismes d'endommagement dans les stratifiés UD [BER05]



Stratifié orthotrope [0/90°] soumis à une traction longitudinale[BER05]

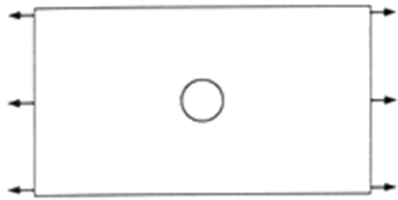


Stratifié à plis croisés  $[+/-45^\circ]$  soumis à une traction longitudinale[BER05]

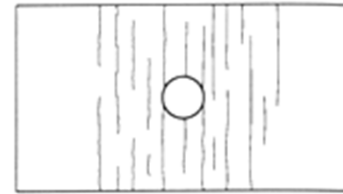


Faciès de rupture correspondant

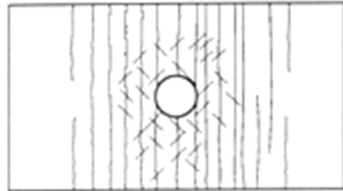
Plaque trouée sollicitée en traction



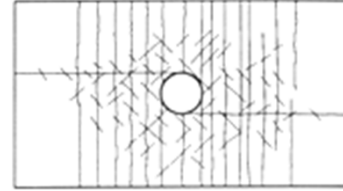
Fissuration des plis à 90°



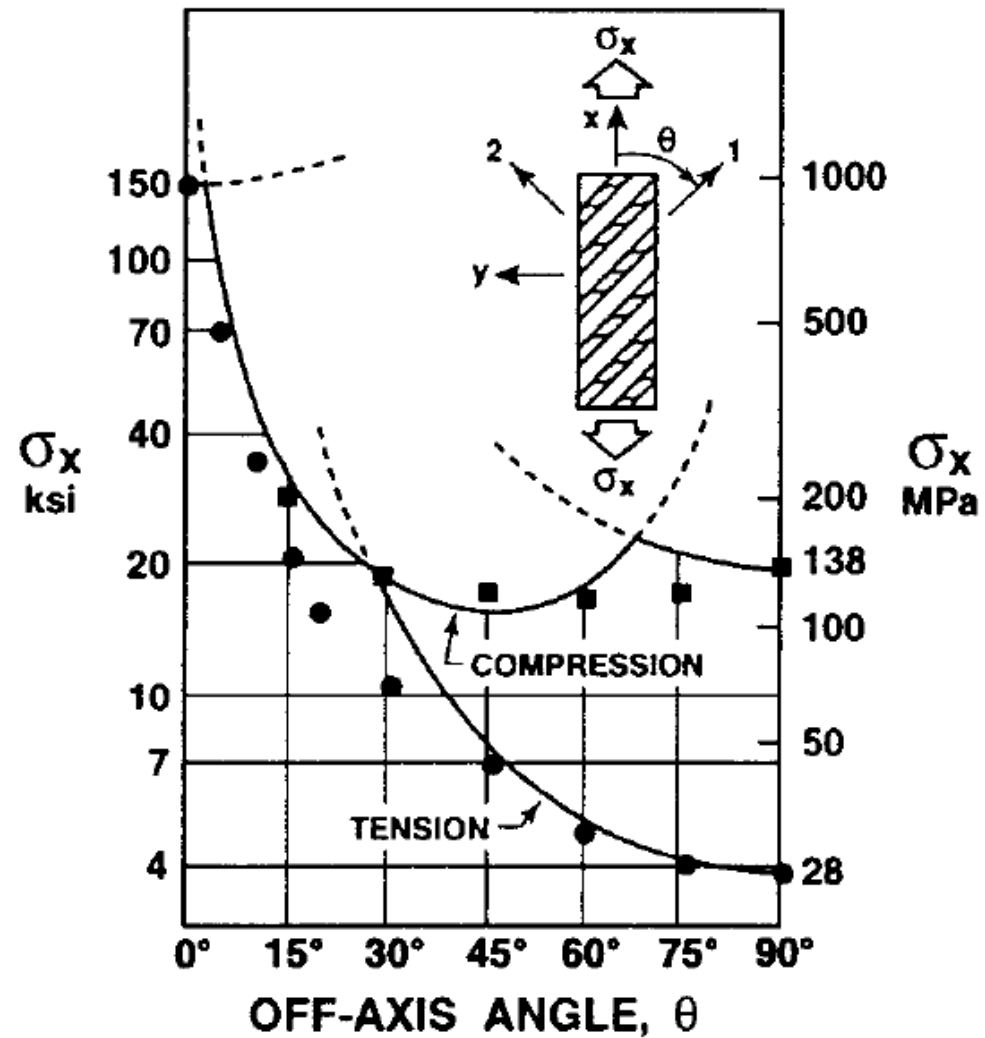
Fissuration des plis à  $\pm 45^\circ$



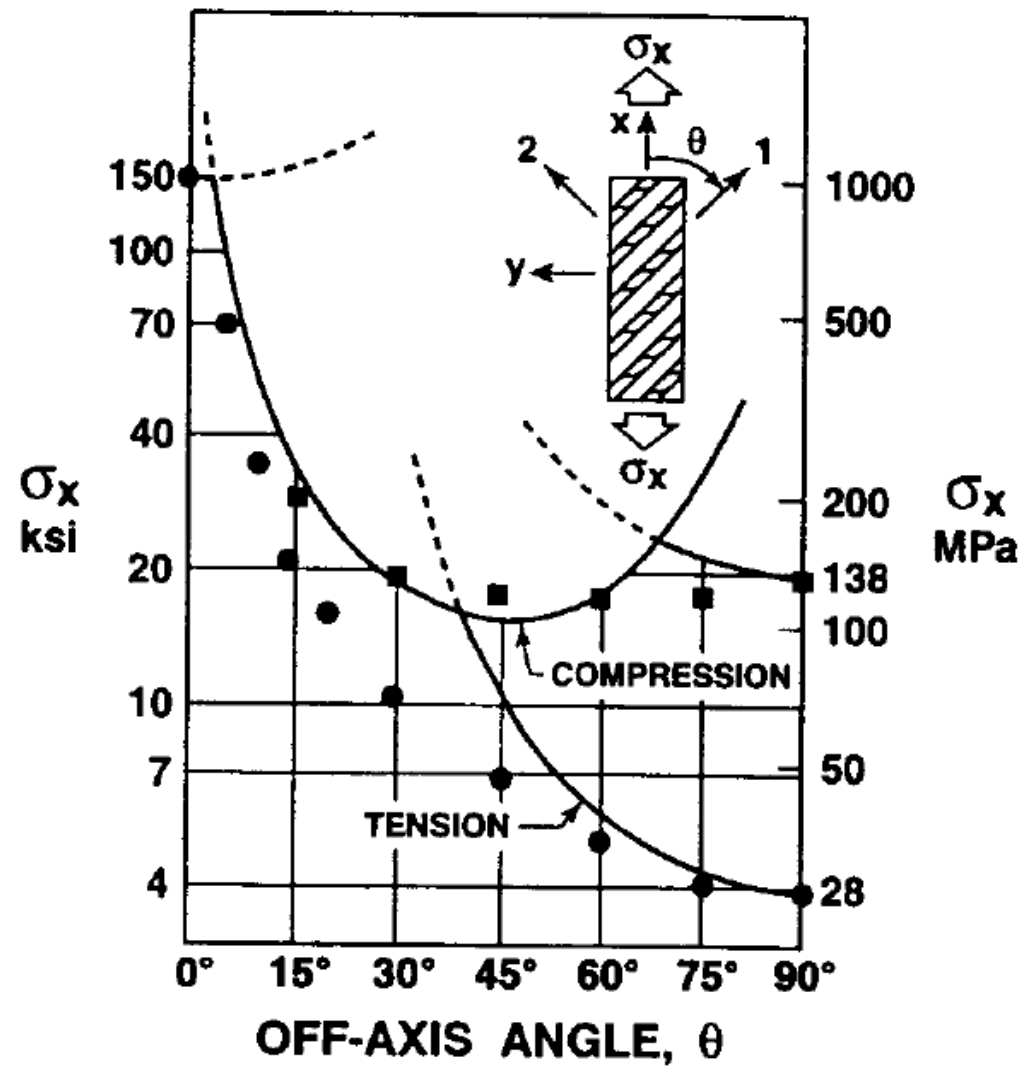
Fissuration des plis à 0° et délaminage



Représentation schématique des différentes phases d'endommagement dans un stratifié troué quasi-isotrope à plis UD  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_s$  [BER05]

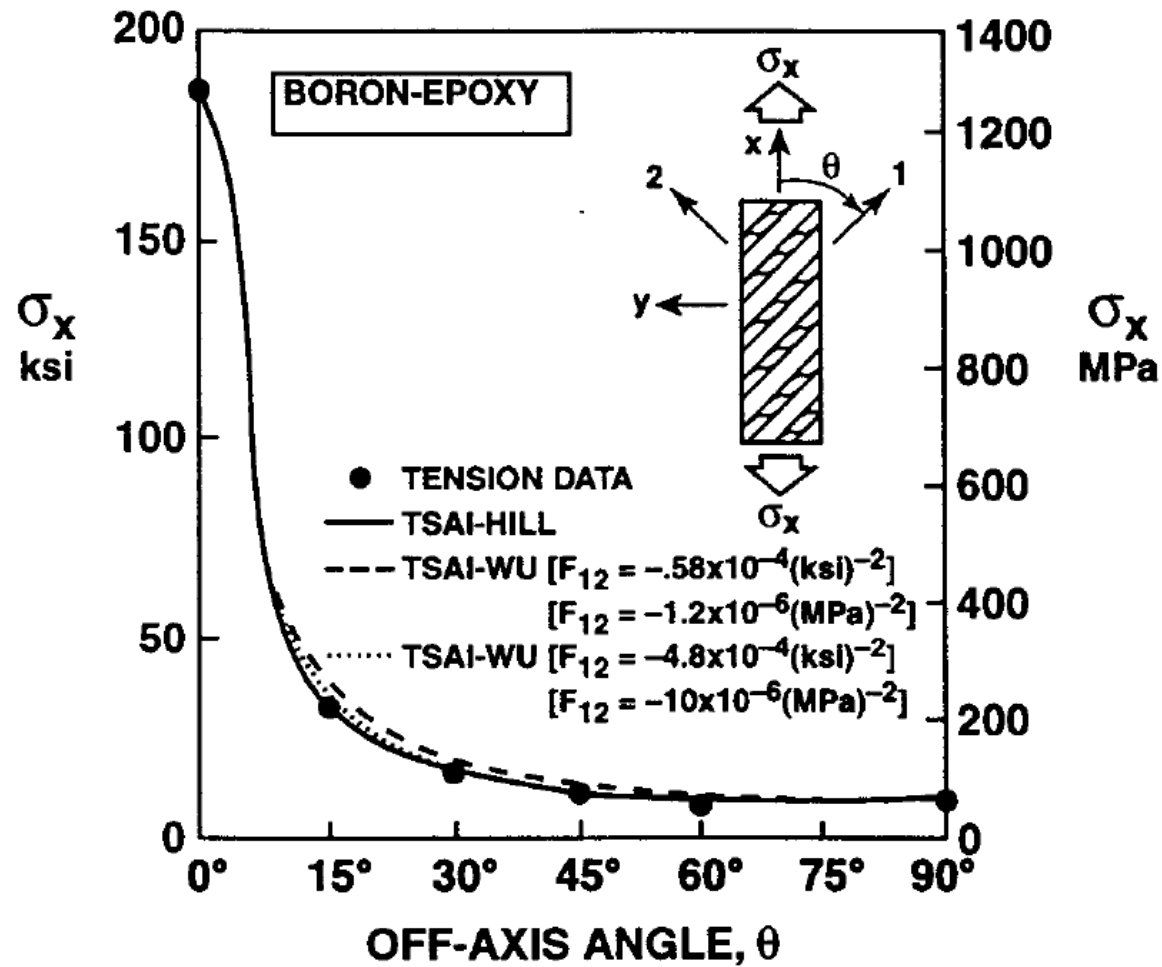


Critère de rupture de contrainte maximale (cas du verre/epoxy) [MEC99]

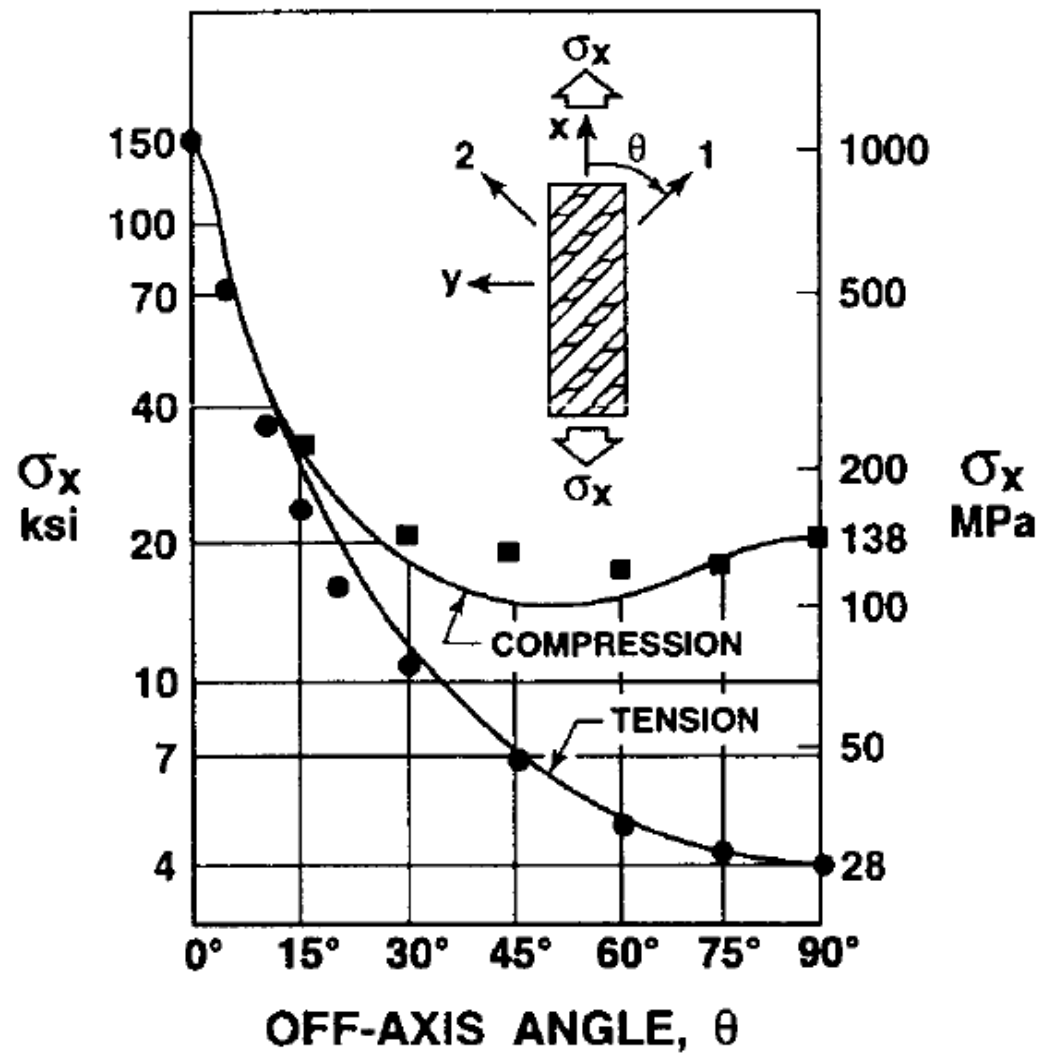


Critère de rupture de déformation maximale [MEC99]





Critère de rupture de Tsai-Wu [MEC99]



Critère de rupture de Tsai-Hill [MEC99]