



Propriétés Mécaniques des Métaux Usuels

température limite d'utilisation (°C)	T_{max} °C	800	350	700	650	900	900	1 300
capacité thermique massique (J/kg × °C)	c J/kg × °C	400 à 800	1 000	540	390	500	1 750 (20 °C) 3 000 (800 °C)	750 (20 °C) 1 200 (500 °C)
conductivité thermique à 20 °C (W/m × °C)	λ W/m × °C	20 à 100	140	17	380	70	150 (20 °C) 90 (800 °C)	1.4 (20 °C) 3 (1 200 °C)
coefficient de dilatation thermique à 20 °C (°C ⁻¹)	α °C ⁻¹	1.3×10^{-5}	2.2×10^{-5}	0.8×10^{-5}	1.7×10^{-5}		1.2×10^{-5}	
allongement à rupture (%)	A %	1.8 à 10	10	14				5
contrainte de rupture en traction (Mpa)	$\sigma_{rupture}$ Mpa	400 à 1 600	450	1 200	200 à 500	500 à 850	200	
coefficient de Poisson	ν	0.3	0.3	0.3	0.3		0.05	
module de cisaillement (Mpa)	G Mpa	79 000	29 000	40 300	48 000			
module d'élasticité longitudinal (Mpa)	E Mpa	205 000	75 000	105 000	125 000	220 000	294 000	95 000
masse volumique (kg/m ³)	ρ (kg/m ³)	7 800	2 800	4 400	8 800	8 900	1 800	2 200
MÉTAUX 		aciens	alliage d'aluminium AU 4G	alliage de titane TA 6V	cuivre	nickel	beryllium	silice
		aciens	AU 4G	TA 6V	cuivre	nickel	beryllium	silice

Propriétés Mécaniques des Fibres

	Ø µm	ρ kg/m ³	E Mpa	G Mpa	ν	σ _{rupture} Mpa	A %	α °C ⁻¹	λ W/m x °C	c J/Kg x °C	T _{max} °C	FF/kg 1985	
RENFORTS 	10	2 500	86 000		0.2	3 200	4	0.3×10^{-5}	1	800	700	60	
	16	2 600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	0.5×10^{-5}	1	800	700	14	
	12	1 450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	-0.2×10^{-5}	0.03	1 400		350	
	7	1 750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3	0.02×10^{-5}	200 (20 °C) 60 (800 °C)	800	> 1 500	350 ↓ 700	
	6.5	1 800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	0.08×10^{-5}	200 (20 °C) 60 (800 °C)	800	> 1 500		
	100	2 600	400 000			3 400	0.8	0.4×10^{-5}			500	2 500	
	20	3 700	380 000			1 400	0.4			900	> 1 000		
	10	2 600	200 000			3 000	1.5						
	14	2 550	200 000			2 800	1.3	0.5×10^{-5}				1 300	3 000
			960	100 000			3 000					150	

verre R =
(hautes performances)

verre E =
(applications courantes)

kevlar 49

graphite = HR =
(haute résistance)

graphite = HM =
(haut module)

bore

alumine

silicate d'alumine

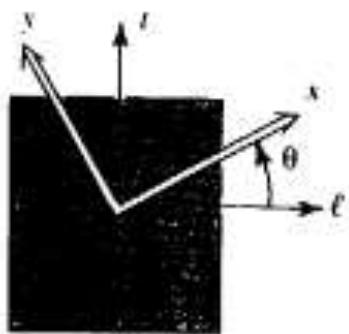
carbure
de silicium

polyéthylène

Propriétés Mécaniques des Matrices

matrices résineuses	P kg/m ³	E Mpa	G Mpa	v	$\sigma_{rupture}$ Mpa	A %	α °C ⁻¹	λ W/m x °C	c J/kg x °C	T_{max} °C	FF/kg
thermodurcissables											
époxyde	1 200	4 500	1 600	0.4	130	2 (100 °C) 6 (200 °C)	11×10^{-5}	0.2	1 000	90 à 200	30 à 100
phénolique	1 300	3 000	1 100	0.4	70	2.5	1×10^{-5}	0.3	1 000	120 à 200	
polyester	1 200	4 000	1 400	0.4	80	2.5	8×10^{-5}	0.2	1 400	60 à 200	12
polycarbonate	1 200	2 400		0.35	60		6×10^{-5}		1 200	120	
vinylester	1 150	3 300			75	4	5×10^{-5}			> 100°	20
silicone	1 100	2 200		0.5	35					100 à 350	
uréthane	1 100	700 à 7 000			30	100				100	20
polyimide	1 400	4 000 à 19 000	1 100	0.35	70	1	8×10^{-5}	0.2	1 000	250 à 300	
thermoplastiques											
polypropylène « pp »	900	1 200		0.4	30	20 à 400	9×10^{-5}		330	70 à 140	
polysulfure de phénylène « pps »	1 300	4 000			65	100	5×10^{-5}			130 à 250	
polyamide « pa »	1 100	2 000		0.35	70	200	8×10^{-5}		1 200	170	30
polyéther sulfone « pes »	1 350	3 000			85	60	6×10^{-5}			180	125
polyéther imide « pei »	1 250	3 500			105	60	6×10^{-5}	0.2		200	100
polyéther-éther-céone « peek »	1 300	4 000			90	50	5×10^{-5}	0.3		140 à 250	480
remplissages											
balsa	100 à 190	2 000 à 6 000	100 à 250		8 à 18			0.05			55
mousse de polyuréthane	30 à 70	25 à 60		0.4						75	
mousse de polystyrène	30 à 45	20 à 30		0.4	0.25 à 1.25					75	900
nids d'abeilles											
carton imprégné			50 à 350								
tissu de verre imprégné			100 à 600								
aluminium	15 à 130		130 à 910		0.2 à 8						
acier			550 à 1 250								
papier « Nomex »®	25 à 50		10 à 40		0.2 à 2.5						700

Loi de comportement dans le plan pour un pli dans le repère global



$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & \bar{E}_{13} \\ \bar{E}_{21} & \bar{E}_{22} & \bar{E}_{23} \\ \bar{E}_{31} & \bar{E}_{32} & \bar{E}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

avec :

$$\bar{E}_{11}(\theta) = c^4 \bar{E}_l + s^4 \bar{E}_t + 2c^2 s^2 (v_{tl} \bar{E}_l + 2G_{lt})$$

$$\bar{E}_{22}(\theta) = s^4 \bar{E}_l + c^4 \bar{E}_t + 2c^2 s^2 (v_{tl} \bar{E}_l + 2G_{lt})$$

$$\bar{E}_{33}(\theta) = c^2 s^2 (\bar{E}_l + \bar{E}_t - 2v_{tl} \bar{E}_l) + (c^2 - s^2)^2 G_{lt}$$

[11.8]

$$\bar{E}_{12}(\theta) = c^2 s^2 (\bar{E}_l + \bar{E}_t - 4G_{lt}) + (c^4 + s^4) v_{tl} \bar{E}_l$$

$$\bar{E}_{13}(\theta) = -cs \{ c^2 \bar{E}_l - s^2 \bar{E}_t - (c^2 - s^2) (v_{tl} \bar{E}_l + 2G_{lt}) \}$$

$$\bar{E}_{23}(\theta) = -cs \{ s^2 \bar{E}_l - c^2 \bar{E}_t + (c^2 - s^2) (v_{tl} \bar{E}_l + 2G_{lt}) \}$$

expressions dans lesquelles :

$$\bar{E}_l = E_l / (1 - v_{tl} v_{lt}) ; \bar{E}_t = E_t / (1 - v_{tl} v_{lt})$$

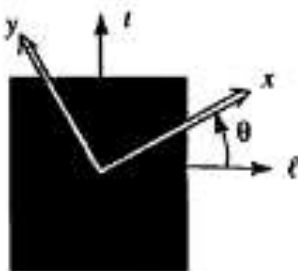
L'allure des variations en fonction de l'angle θ des coefficients de raideur \bar{E}_{ij} précédents est représentée ci-après pour un pli caractérisé par des modules E_l et E_t très différents ; c'est par exemple le cas des unidirectionnels fibre/résine (*).

On retrouve dans la première partie du second membre la matrice dont les termes sont détaillés en [11.8]. La seconde partie du second membre se développe comme suit :

$$-\Delta T \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & (c^2 - s^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{E}_\ell \alpha_\ell + v_{t\ell} \bar{E}_t \alpha_t \\ v_{\ell t} \bar{E}_t \alpha_\ell + \bar{E}_t \alpha_t \\ 0 \end{Bmatrix} = \dots$$

$$\dots -\Delta T \begin{Bmatrix} c^2 \bar{E}_\ell (\alpha_\ell + v_{t\ell} \alpha_t) + s^2 \bar{E}_t (v_{\ell t} \alpha_\ell + \alpha_t) \\ s^2 \bar{E}_\ell (\alpha_\ell + v_{t\ell} \alpha_t) + c^2 \bar{E}_t (v_{\ell t} \alpha_\ell + \alpha_t) \\ cs [\bar{E}_t (v_{\ell t} \alpha_\ell + \alpha_t) - \bar{E}_\ell (\alpha_\ell + v_{t\ell} \alpha_t)] \end{Bmatrix}$$

En résumé, le comportement thermoélastique de l'unidirectionnel peut se décrire sous la forme suivante dans des axes x, y autres que les axes d'orthotropie ℓ, t du pli :



$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & \bar{E}_{13} \\ \bar{E}_{21} & \bar{E}_{22} & \bar{E}_{23} \\ \bar{E}_{31} & \bar{E}_{32} & \bar{E}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \Delta T \begin{Bmatrix} \bar{\alpha E}_1 \\ \bar{\alpha E}_2 \\ \bar{\alpha E}_3 \end{Bmatrix}$$

[11.10]

$\bar{E}_{11} \quad \bar{E}_{22} \quad \bar{E}_{33} \quad \bar{E}_{12} \quad \bar{E}_{13} \quad \bar{E}_{23}$ sont donnés par les relations [11.8]

$$\bar{\alpha E}_1 = c^2 \bar{E}_\ell (\alpha_\ell + v_{t\ell} \alpha_t) + s^2 \bar{E}_t (v_{\ell t} \alpha_\ell + \alpha_t)$$

$$\bar{\alpha E}_2 = s^2 \bar{E}_\ell (\alpha_\ell + v_{t\ell} \alpha_t) + c^2 \bar{E}_t (v_{\ell t} \alpha_\ell + \alpha_t)$$

$$\bar{\alpha E}_3 = cs [\bar{E}_t (v_{\ell t} \alpha_\ell + \alpha_t) - \bar{E}_\ell (\alpha_\ell + v_{t\ell} \alpha_t)]$$

$$c = \cos \theta \quad ; \quad s = \sin \theta$$

$$\bar{E}_\ell = E_\ell / (1 - v_{\ell t} v_{t\ell})$$

$$\bar{E}_t = E_t / (1 - v_{\ell t} v_{t\ell})$$