

Matériaux composite

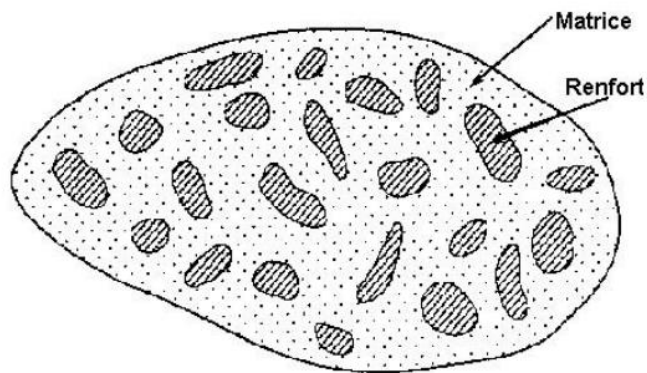
Fabrication des raquettes à neige

Contents

I. Introduction:	2
1. Différents matériaux utilisés pour la fabrication des raquettes à neige :	2
2. Dimensions de la raquette :	3
II. Choix du matériau pour la fabrication :	3
III. Type de fabrication :	6
1. Trois méthodes pour créer des pièces en fibre de carbone :	6
a. Drapage en voie humide :	7
b. Stratification de préimprégné:	7
c. Moulage par transfert de résine (RTM, Resin Transfer Molding) :	7
IV. Position des fibres:	7
1. 1 ^{er} cas :	7
2. 2 ^{ième} cas :	9
3. 3 ^{ième} cas :	10
V. Calcul de la masse:	11
VI. Etude d'un stratifié:	13

I. Introduction:

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice.



- ✚ Dans ce projet ; on va faire l'étude et la composition des matériaux composite présentant dans une raquette à neige.

1. Différents matériaux utilisés pour la fabrication des raquettes à neige :

Elles sont à l'origine des raquettes traditionnelles qui possèdent un cadre en bois léger et des attaches en cuir. Certaines raquettes modernes sont conçues sur le même principe, mais différent par leur matériau : métal léger (aluminium), structures à base de polymères fondus comme les plastiques, parfois thermodurcissables, et très souvent renforcés, notamment avec des matériaux composites résistants au choc et aux usages.



2. Dimensions de la raquette :

On choisit la raquette des dimensions :

Hauteur : 3 *cm*

Longueur : 58.42*cm*

Largeur : 45 *cm*

II. Choix du matériau pour la fabrication :

Ces raquettes de neige sont formées du bois et elles sont utilisées pour que les peuples peuvent marcher lorsque la neige couvrait la terre en CANADA (lieu de fabrication de la pièce).

Cette pièce, elle supporte une personne sur les deux raquettes, un pied par raquette. Donc la masse de la personne va être distribuée sur les deux raquettes par équivalence.

Pour le choix du renfort, nous avons 3 choix : la fibre de verre, de kevlar et de carbone. On ne peut pas choisir le verre car un de ces inconvénients est le vieillissement en contact avec l'eau. Et le Kevlar a une faible tenue à la compression, or les forces appliquées sont toutes des forces de compression. La fibre de carbone a une très bonne tenue en température, et à l'humidité. Donc on choisit la fibre de carbone HR.

Nous allons maintenant choisir le matériau qui a la faible masse avec une bonne rigidité :

On sait que la masse s'écrit : $M = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L$

$$\Rightarrow R^2 = \frac{M}{\rho \cdot \pi \cdot L}$$

La flèche est donnée par :

$$f = \frac{1}{48} * \frac{F * L^3}{E \cdot I}$$

$$\text{Avec } I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi R^4}{4}$$

Soit la rigidité est : $K = \frac{F}{f} = \text{const.}$

$$K = \frac{48 * E * \pi * M^2}{4 * L^3 * \rho^2 * \pi^2 * L^2} \Rightarrow M^2 \sim \frac{K * \rho^2}{K' * E} \Rightarrow M \sim \frac{\rho}{\sqrt{E}}$$

Un autre critère est adapté pour minimiser la masse a effort constant :

$$\sigma_{max} = \frac{M' \cdot R}{I} = \frac{\frac{F}{2} * \frac{L}{2} * R}{\frac{\pi}{4} * R^4} = \frac{L * F}{\pi * R^3} \leq Re$$

Où M' est le moment

$$\Rightarrow F \sim \frac{\pi * R^3 * Re}{L} = \text{const.}$$

D'après le critère précédent ; on a obtenu : $R^2 \sim \frac{M}{\rho \cdot \pi \cdot L}$

Par remplacement on aura :

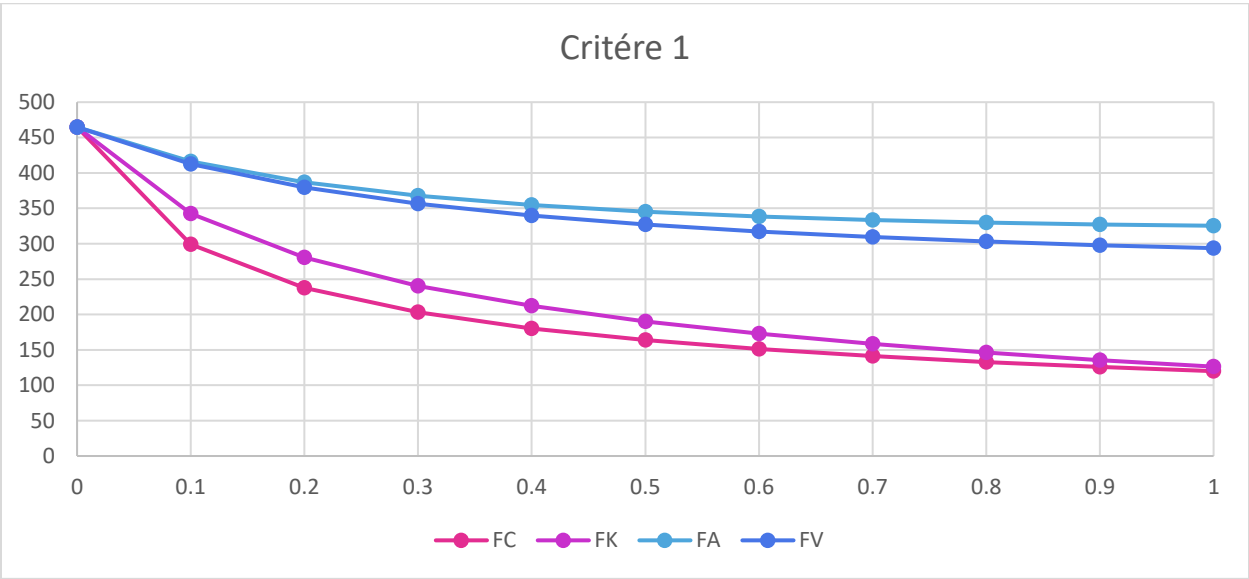
$$M \sim \frac{\rho}{\sqrt[3]{Re^2}}$$

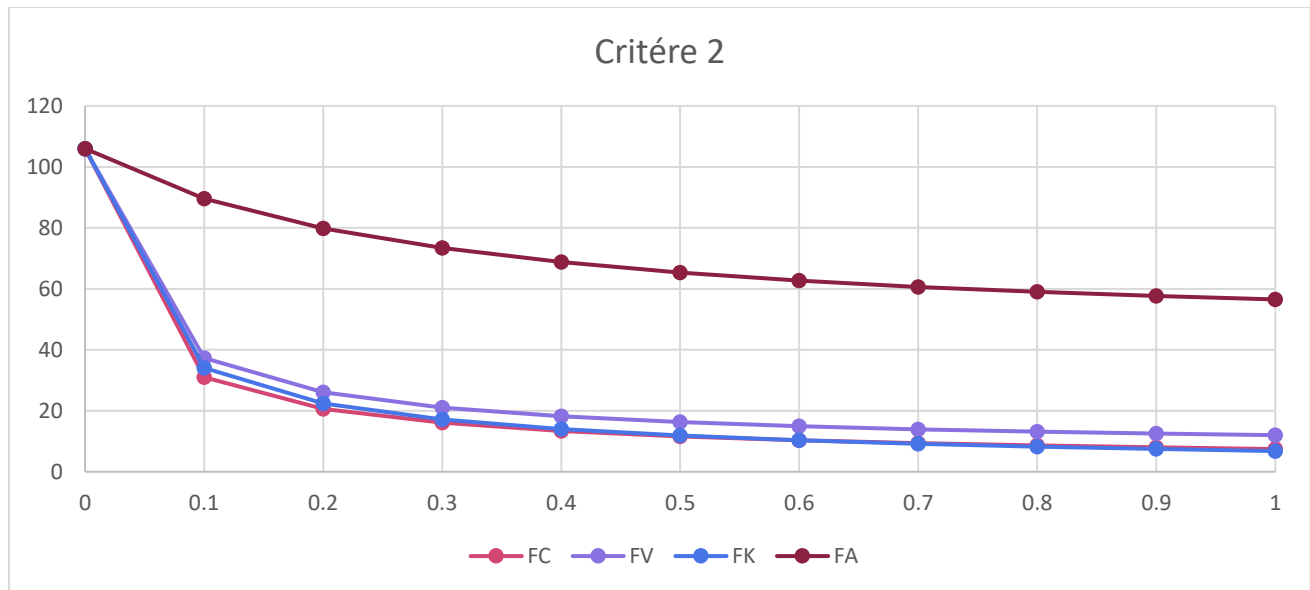
En utilisant Excel ; on obtient les résultats ci-dessous :

Materiau	Module d'Young (Gpa) E	Contrainte maximale admissible (Mpa) Re	Mass volumique (Kg/m^3) ρ	Critère 1		Critère 2	
				ρ/(E)^0.5	classement	ρ/(Re)^(2/3)	classement
Bois	12.5	7	930	263.04372	3	254.1465714	6
Aluminium	62	345	2700	342.90034	4	54.88887978	3
Acier	210	1550	7850	541.70146	6	58.61136799	4
Resine epoxy+ silice(thermodurcissable)	15	70	1800	464.758	5	105.9759077	5
fibre de carbone isolee	230	3800	1760	116.05096	1	7.227536109	2
fibre de kevlar isolee	130	3100	1440	126.29635	2	6.77310845	1

	carbone			resine epoxy			Verre			Kevlar			Al		
vf	ρ	E	Re	ρ	E	Re	ρ	E	Re	ρ	E	Re	ρ	E	Re
0	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345
0.1	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345
0.2	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345
0.3	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345
0.4	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345
0.5	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345
0.6	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345
0.7	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345
0.8	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345
0.9	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345
1	1810	228	3800	1800	15	70	2440	69	2900	1440	130	3100	2780	73	345

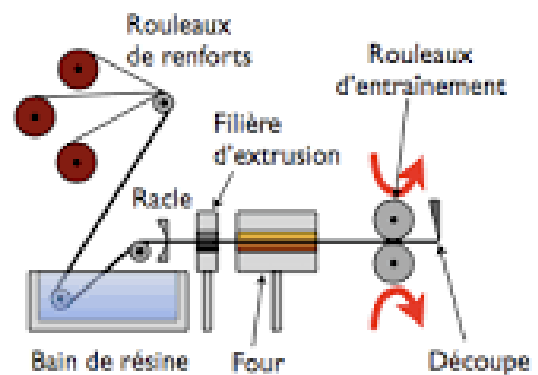
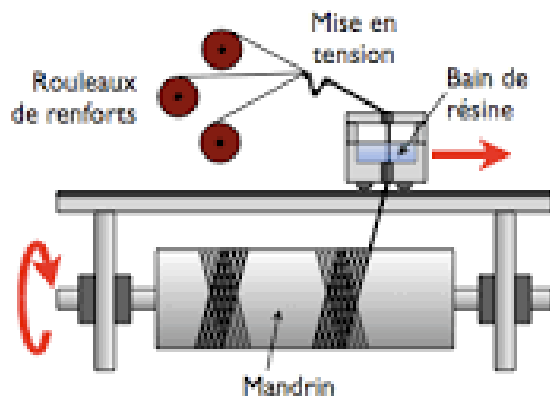
												Critere 1				Critere 2			
carbone/epoxy			Aluminium/epoxy			Kevlar/Epoxy			Verre/epoxy			ρ/(E)^0.5				ρ/(Re)^(2/3)			
ρ	E	Re	ρ	E	Re	ρ	E	Re	ρ	E	Re	FC	FV	FK	FA	FC	FV	FK	FA
1800	15	70	1800	15	70	1800	15	70	1800	15	70	465	465	465	465	106	106	106	106
1801	36.3	443	1898	20.8	97.5	1764	26.5	373	1864	20.4	353	299	413	343	416	31	37	34	90
1802	57.6	816	1996	26.6	125	1728	38	676	1928	25.8	636	237	380	280	387	21	26	22	80
1803	78.9	1189	2094	32.4	152.5	1692	49.5	979	1992	31.2	919	203	357	240	368	16	21	17	73
1804	100.2	1562	2192	38.2	180	1656	61	1282	2056	36.6	1202	180	340	212	355	13	18	14	69
1805	121.5	1935	2290	44	207.5	1620	72.5	1585	2120	42	1485	164	327	190	345	12	16	12	65
1806	142.8	2308	2388	49.8	235	1584	84	1888	2184	47.4	1768	151	317	173	338	10	15	10	63
1807	164.1	2681	2486	55.6	262.5	1548	95.5	2191	2248	52.8	2051	141	309	158	333	9	14	9	61
1808	185.4	3054	2584	61.4	290	1512	107	2494	2312	58.2	2334	133	303	146	330	9	13	8	59
1809	206.7	3427	2682	67.2	317.5	1476	118.5	2797	2376	63.6	2617	126	298	136	327	8	13	7	58
1810	228	3800	2780	73	345	1440	130	3100	2440	69	2900	120	294	126	325	7	12	7	57





III. Type de fabrication :

Les matériaux composites, tels que les plastiques renforcés par des fibres de carbone sont des matériaux extrêmement polyvalents et efficaces qui sont à la pointe de l'innovation sur des marchés tels que l'aérospatiale ou la santé. Ils surclassent les matériaux traditionnels tels que l'acier, l'aluminium, le bois ou le plastique et permettent de fabriquer des produits ultra-performants et légers.



1. Trois méthodes pour créer des pièces en fibre de carbone :

La fabrication de PRF tels que des pièces en fibre de carbone est un processus précis et nécessitant une main-d'œuvre importante utilisé dans la production en série comme dans la production ponctuelle. Les durées de cycle vont d'une à 150 heures en fonction de la taille et de la complexité de la pièce.

a. Drapage en voie humide :

Dans le drapage en voie humide, la fibre est découpée et disposée dans le moule, puis enduite de résine à la brosse, au rouleau ou au pistolet. C'est la méthode qui nécessite le plus de compétences pour créer des pièces de haute qualité, mais c'est également le processus de travail le moins coûteux.

b. Stratification de préimprégné:

Avec la stratification de préimprégné, la résine est préalablement injectée dans la fibre. Les feuilles préimprégnées sont stockées à basse température pour inhiber la polymérisation. Elles sont ensuite placées dans le moule, puis polymérisées en autoclave sous l'effet de la pression et de la chaleur. Cette technique est plus précise et reproductible que la précédente, car la quantité de résine est contrôlée, mais elle est aussi plus chère et n'est généralement utilisée que pour les applications haute performance.

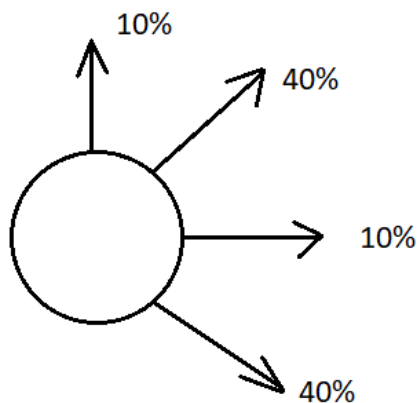
c. Moulage par transfert de résine (RTM, Resin Transfer Molding) :

Avec le moulage par transfert de résine, la fibre sèche est insérée dans un moule en deux parties. Le moule est refermé avant injection de la résine à haute pression dans la cavité. Cette technique est généralement automatisée et utilisée pour la fabrication à grande échelle.

IV. Position des fibres:

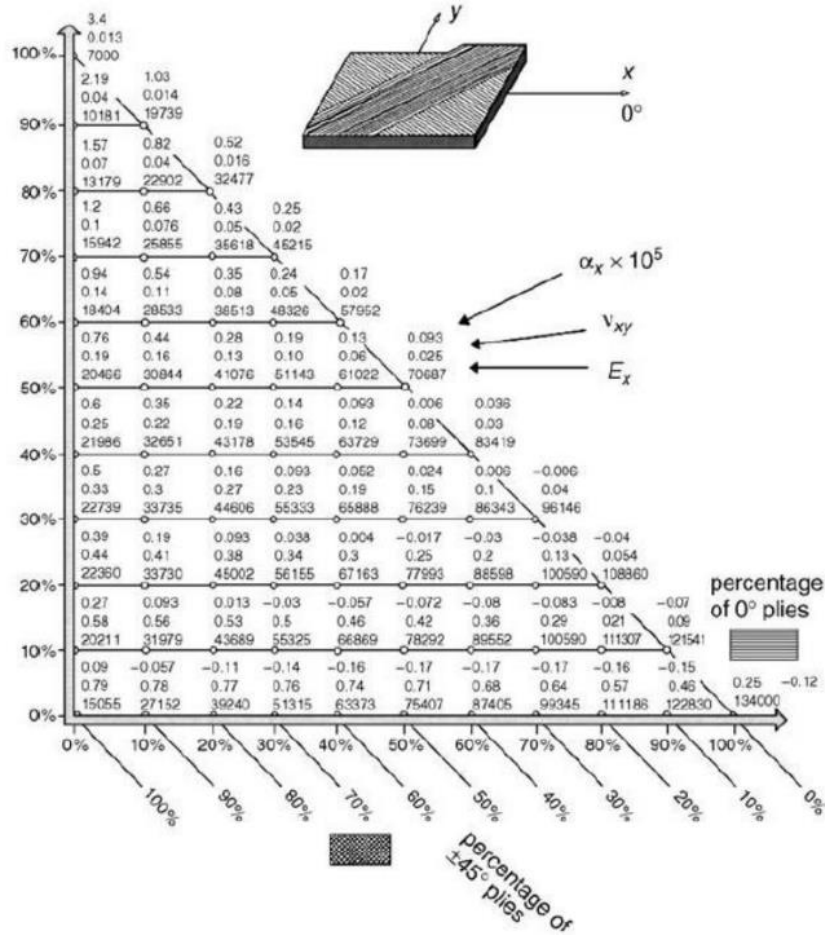
D'après les résultats obtenus dans le calcul précédent ; on va faire le suit du calcul en adoptant que le matériau est composé de « Carbone/Epoxy ».

1. 1^{er} cas :



$$E_x(\theta) = \frac{1}{\frac{C^4}{E_1} + \frac{S^4}{E_2} + C^2 S^2 \left(\frac{1}{G_{12}} - 2 \frac{v_{21}}{E_2} \right)}$$

D'après la planche 4 :



$$\begin{cases} E_1 = E_2 = 31979 \text{ MPa} \\ G_{12} = 28430 \text{ MPa} \\ v_{21} = v_{12} = 0.56 \\ \alpha_1 = 0.093 \times 10^{-5} \end{cases}$$

$$\Rightarrow E_x(\theta) = \frac{1}{\frac{C^4}{31979} + \frac{S^4}{31979} + C^2 S^2 \left(\frac{1}{28430} - 2 \frac{0.56}{31979} \right)}$$

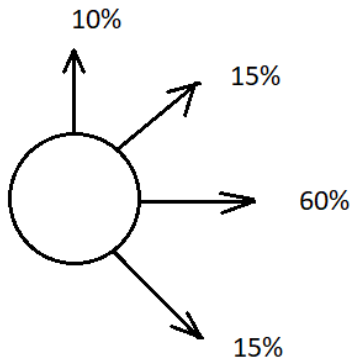
$$\Rightarrow E_x(\theta) = \frac{1}{\frac{C^4 + S^4}{31979} + C^2 S^2 * 1.5113 * 10^{-7}}$$

Pour $\theta=0$; $\Rightarrow E_x(0) = 31979 \text{ MPa}$

Pour $\theta=45^\circ$; $\Rightarrow E_x(45^\circ) = 63803.82 \text{ MPa}$

Pour $\theta=90^\circ$; $\Rightarrow E_x(90^\circ) = 31979 \text{ MPa}$

2. 2^{ième} cas :



D'après la planche 4 ci-dessus :

$$\begin{cases} E_1 = 89552 \text{ MPa} \\ E_2 = 28533 \text{ MPa} \\ G_{12} = 13286 \text{ MPa} \\ \nu_{12} = 0.36 \\ \nu_{21} = 0.11 \\ \alpha_1 = -0.08 * 10^{-5} \\ \alpha_2 = 0.54 * 10^{-5} \end{cases}$$

$$\Rightarrow E_x(\theta) = \frac{1}{\frac{C^4}{89552} + \frac{S^4}{28533} + C^2 S^2 \left(\frac{1}{13286} - 2 \frac{0.11}{28533} \right)}$$

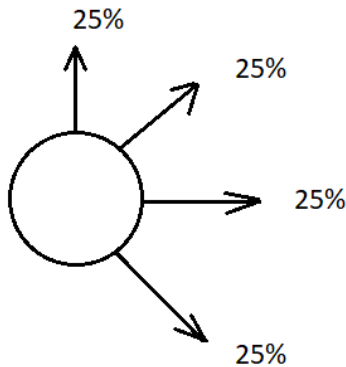
$$\Rightarrow E_x(\theta) = \frac{1}{\frac{C^4}{89552} + \frac{S^4}{28533} + C^2 S^2 * 6.756 * 10^{-5}}$$

Pour $\theta=0$; $\Rightarrow E_x(0) = 89552 \text{ MPa}$

Pour $\theta=45^\circ$; $\Rightarrow E_x(45^\circ) = 35157.47 \text{ MPa}$

Pour $\theta=90^\circ$; $\Rightarrow E_x(90^\circ) = 28533 \text{ MPa}$

3. 3^{ième} cas :



D'après la planche 4 ci-dessus :

$$\begin{cases} E_1 = E_2 = 31830 \text{ MPa} \\ G_{12} = 11980 \text{ MPa} \\ v_{12} = v_{21} = 0.335 \end{cases}$$

$$\Rightarrow E_x(\theta) = \frac{1}{\frac{C^4}{31830} + \frac{S^4}{31830} + C^2 S^2 \left(\frac{1}{11980} - 2 \frac{0.335}{31830} \right)}$$

$$\Rightarrow E_x(\theta) = \frac{1}{\frac{C^4 + S^4}{31830} + C^2 S^2 * 6.756 * 10^{-5}}$$

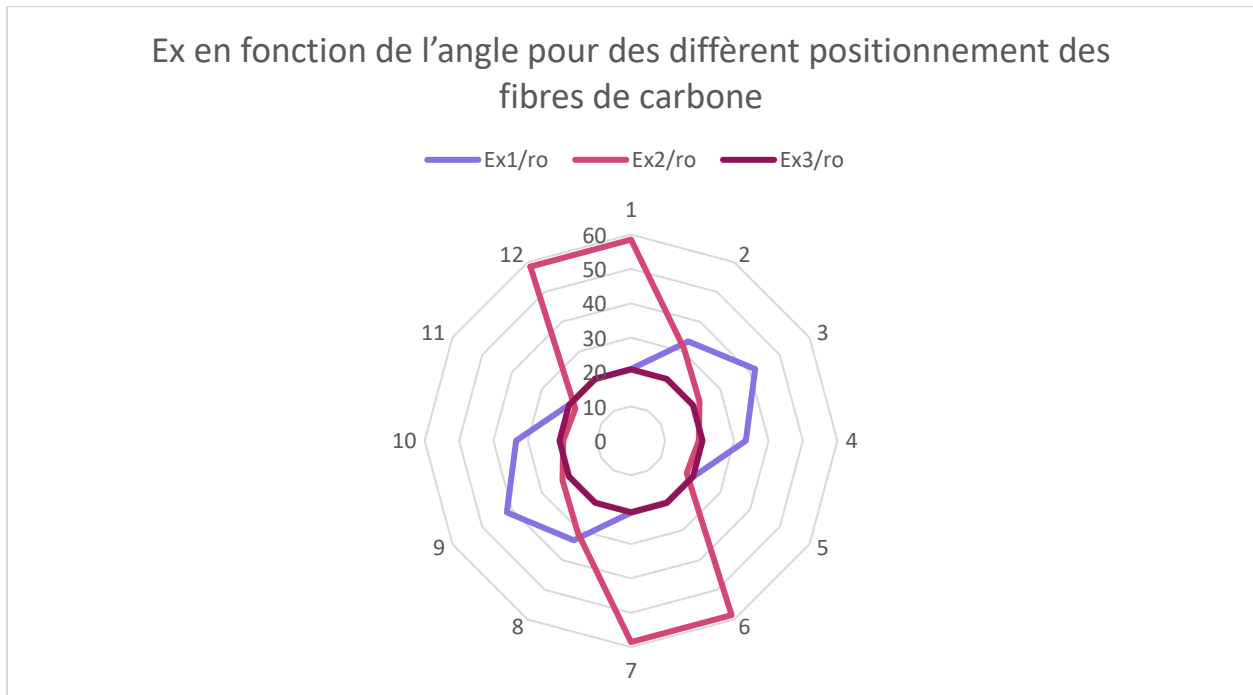
Pour $\theta=0$; $\Rightarrow E_x(0) = 31830 \text{ MPa}$

Pour $\theta=90^\circ$; $\Rightarrow E_x(90^\circ) = 31830 \text{ MPa}$

En utilisant Excel ; on peut tracer E_x en fonction de l'angle pour des différents cas de positionnement des fibres de carbone.

theta	Ex1	Ex2	Ex3	Ex1/ρ	Ex2/ρ	Ex3/ρ
-6.283185307	31979	89552	31830	20.90131	58.53072	20.80392
-0.523598776	51092.32242	47306.78193	31830	33.39367	30.91947	20.80392
-0.785398163	63803.82053	35158.44855	31830	41.70184	22.97938	20.80392
-1.047197551	51092.32242	30230.80694	31830	33.39367	19.7587	20.80392
-1.570796327	31979	28533	31830	20.90131	18.64902	20.80392
-3.141592654	31979	89552	31830	20.90131	58.53072	20.80392
0	31979	89552	31830	20.90131	58.53072	20.80392
0.523598776	51092.32242	47306.78193	31830	33.39367	30.91947	20.80392
0.785398163	63803.82053	35158.44855	31830	41.70184	22.97938	20.80392
1.047197551	51092.32242	30230.80694	31830	33.39367	19.7587	20.80392
1.570796327	31979	28533	31830	20.90131	18.64902	20.80392
6.283185307	31979	89552	31830	20.90131	58.53072	20.80392

1er cas	2ieme cas	3ieme cas
E1=31979	E1=89552 Mpa	E1=31830 Mpa
E2=31979	E2=28533 Mpa	E2=31830 Mpa
G12=28430	G12=13286 Mpa	G12=11980 Mpa
v21=0.56	v21=0.11	v21=0.335



V. Calcul de la masse :

Supposons que la masse maximale que ce pair de raquettes peut supporter est de 200 Kg d'où chaque raquette supporte 100 Kg. Par suite, la force

$$F_1 = m * g = 100 * 9.81 = 981 \text{ N}$$

Supposons que la force du poids du personne est appliquée au centre du pied de la personne c.-à-d. sur le centre de la raquette.

Et la force de la neige sur la surface frontale de la raquette est la force sur la partie frontale de la raquette et sur les cotées, donc la force est une charge repartie sur les cotée et la partie frontale qui vaut : $P = 5 * 10^6 \text{ Pa}$

$$F_2 = P * A_T$$

$$\text{Avec } A_T = 2 * (58.42 * 3) + 45 * 3 = 485.52 \text{ cm}^2$$

$$F_2 = 242.76 \text{ KN}$$

En plus, sur le bas de la raquette il s'exerce une force dont la valeur est :

$$F_3 = 5 * 10^6 * 400 * 10^{-4} = 200 \text{ KN}$$

Les propriétés du renfort :

$$\begin{cases} E_{Lf} = 230 \text{ GPa} \\ E_{Tf} = 15 \text{ GPa} \\ G_{LTf} = 50 \text{ GPa} \\ \nu_{LT} = 0.3 \\ \rho_f = 1750 \text{ Kg/m}^3 \end{cases}$$

Les propriétés de la matrice :

$$\begin{cases} E_m = 4.5 \text{ GPa} \\ G_m = 1.6 \text{ GPa} \\ \nu_m = 0.4 \\ \rho_m = 1200 \text{ Kg/m}^3 \end{cases}$$

La masse volumique est :

$$\begin{aligned} \rho_L &= \nu_f * \rho_f + \nu_m * \rho_m = 0.6 * 1750 + 0.4 * 1200 \\ &\Rightarrow \rho_L = 1530 \text{ Kg/m}^3 \end{aligned}$$

Le module longitudinal est :

$$\begin{aligned} E_L &= \nu_f * E_{LT} + \nu_m * E_m = 0.6 * 230 + 0.4 * 4.5 \\ &\Rightarrow E_L = 139.8 \text{ GPa} \end{aligned}$$

Le module transversal est :

$$\frac{1}{E_T} = \frac{\nu_f}{E_{Tf}} + \frac{\nu_m}{E_m} = \frac{0.6}{15} + \frac{0.4}{4.5} \Rightarrow E_T = 7.7586 \text{ MPa}$$

Pour le stratifié :

$$E = \frac{3}{8} E_L + \frac{5}{8} E_T = 57.274 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0.3 \text{ et } G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = 22.028 \text{ GPa}$$

Maintenant on cherche à calculer la masse de la pièce en matériaux composite :

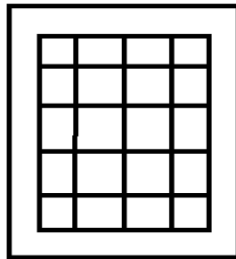
$$M = \rho.V$$

Avec ; le volume de la pièce est : $V = h.L.l = 3 * 58.42 * 45 = 7886.7 \text{ cm}^3$

$$\Rightarrow M = 1530 * 7886.7 * 10^{-6} = 12.067 \text{ Kg}$$

On remarque que la masse est grande, pour cela on va trouver une méthode pour la diminuer.

Les dimensions extérieures restent comme d'avant : $L=58.42 \text{ cm}$ et $l=45 \text{ cm}$



Pour une évacuation au centre, l'épaisseur $e=10 \text{ cm}$ avec une diminution de l'épaisseur de la pièce de 3 à 1.75 cm .

Le nouveau volume de la pièce sera :

$$V = (45 - (45 - 2 * 10)) * (58.42 - (58.42 - 2 * 10)) * 1.75 = 700 \text{ cm}^3$$

D'où la masse sera : $\Rightarrow M = 1530 * 700 * 10^{-6} = 1.071 \text{ Kg}$

VI. Etude d'un stratifié:

On va mettre plusieurs plies pour avoir cette pièce, on doit mettre 20 plies selon le premier cas déjà fait ci-dessus (16 plis suivant 45° , 2 suivant x et 2 suivants y) pour obtenir la raquette de ski en matériau composite (carbone/époxy).

On va supposer que l'épaisseur adaptée est correcte, on va alors calculer les contraintes :

$$\sigma_x = \frac{F_2}{S_x}$$

Où ; $S_x = (2 * 58.42 + 45) * 1.75 = 283.22 \text{ cm}^2$

$$\Rightarrow \sigma_x = \frac{242.76 * 10^3}{283.22 * 10^{-4}} = 857.143 \text{ MPa}$$

$$\sigma_y = \frac{F_1 + F_3}{S_y}$$

$$S_y = (58.42 - (58.42 - 2 * 5)) * (45 - (45 - 2 * 5)) = 200 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_y = \frac{981 + 200 * 10^3}{200 * 10^{-4}} = 10.05 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = 0$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{139.8} & -\frac{0.3}{139.8} & 0 \\ -\frac{0.3}{7.7586} & \frac{1}{7.7586} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{22.028} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 857.143 \\ 10.05 \\ 0 \end{pmatrix} * 10^{-3}$$

$$\varepsilon_1 = 6.109 * 10^{-3} \quad \varepsilon_2 = -0.03185 \quad \gamma_{12} = 0$$

On va utiliser MACLAM pour déterminer la matrice de rigidité en membrane A, la matrice de couplage membrane-flexion B et la matrice de rigidité en flexion-torsion D. Ensuite, représenter les contraintes et les déformations.

Matrix and fibre

Type of material: **Fibre**

List of materials and properties

Name	E (GPa)	Nu
PHENOLIQUE	8.9635	0.25
POLYESTER (RIGIDE)	2.41325	0.25
POLYESTER (SOUPLE)	0.241325	0.25
POLYIMIDE	4.20595	0.2
PVC (RIGIDE)	2.758	0.25
RESINE-EPOXY	4	0.25
RESINE-POLYESTER	30	0.25

Materials to be mixed:

Matrix: RESINE-EPOXY
Fibre: CARBONE-PANCT300

Add the material to the mixture

Edit the library of isotropic materials

Analyses and homogenization results

Elastic properties to be studied

ALL

Methods

- ☐ Rule of mixtures
☐ Halpin-Tsai formula
☐ Cylindrical assemblage
☐ Stress partitioning

Fibre volume fraction (f) 0.6

Size of the fibre (a) 0.13

Size of the fibre (b) 0.13

Analyze

Edit the results library



Mixture name carbon/epoxy

EL: 138.4 GPa Rule of mixtures

VTN:

 ET: 9.74359 GPa ☒ Rule of mixtures?
 19.874016 GPa ☐ Halpin-Tsai?

Do you want to save

 GLT: 3.901437 GPa ☒ Rule of mixtures?
 6.021302 GPa ☐ Cylindrical assemblage?
 6.021302 GPa ☐ Stress partitioning?

Do you want to save

 EN: 9.74359 GPa ☒ Rule of mixtures?
 19.874016 GPa ☐ Halpin-Tsai?

Do you want to save

 GLN: 3.901437 GPa ☒ Rule of mixtures?
 6.021302 GPa ☐ Cylindrical assemblage

Do you want to save

VLT: .22 Rule of mixtures

VLN: .22 Rule of mixtures

GTN: 5.432887 GPa Stress partitioning



Stacking sequence:

Layer:1 CARBON/EPOXY

EL=138.4 GPa ET=9.74359 GPa NuLT=0.22
GLT=3.901437 GPa GLN=3.901437 GPa GTN=5.432887 GPa
t=0.13 mm ANGLE=45°

Layer:2 CARBON/EPOXY

EL=138.4 GPa ET=9.74359 GPa NuLT=0.22
GLT=3.901437 GPa GLN=3.901437 GPa GTN=5.432887 GPa
t=0.13 mm ANGLE=45°

Layer:3 CARBON/EPOXY

EL=138.4 GPa ET=9.74359 GPa NuLT=0.22
GLT=3.901437 GPa GLN=3.901437 GPa GTN=5.432887 GPa
t=0.13 mm ANGLE=45°

Layer:4 CARBON/EPOXY

EL=138.4 GPa ET=9.74359 GPa NuLT=0.22
GLT=3.901437 GPa GLN=3.901437 GPa GTN=5.432887 GPa
t=0.13 mm ANGLE=45°

Layer:5 CARBON/EPOXY

EL=138.4 GPa ET=9.74359 GPa NuLT=0.22
GLT=3.901437 GPa GLN=3.901437 GPa GTN=5.432887 GPa
t=0.13 mm ANGLE=0°

Layer:6 CARBON/EPOXY

EL=138.4 GPa ET=9.74359 GPa NuLT=0.22
GLT=3.901437 GPa GLN=3.901437 GPa GTN=5.432887 GPa
t=0.13 mm ANGLE=90°

Layer:7 CARBON/EPOXY

EL=138.4 GPa ET=9.74359 GPa NuLT=0.22
GLT=3.901437 GPa GLN=3.901437 GPa GTN=5.432887 GPa
t=0.13 mm ANGLE=-45°

Layer:8 CARBON/EPOXY

EL=138.4 GPa ET=9.74359 GPa NuLT=0.22
GLT=3.901437 GPa GLN=3.901437 GPa GTN=5.432887 GPa
t=0.13 mm ANGLE=-45°



Layer:9 CARBON/EPOXY

EL=138.4 GPa ET=9.74359 GPa NuLT=0.22
GLT=3.901437 GPa GLN=3.901437 GPa GTN=5.432887 GPa
t=0.13 mm ANGLE=-45°

Layer:10 CARBON/EPOXY

EL=138.4 GPa ET=9.74359 GPa NuLT=0.22
GLT=3.901437 GPa GLN=3.901437 GPa GTN=5.432887 GPa
t=0.13 mm ANGLE=-45°

Q Matrices for each layer in GPa

layer 1 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00

layer 2 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00

layer 3 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00

layer 4 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00

layer 5 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00

layer 6 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00



MAC LAM

7/16/2021 4:49:43 PM

User: Safaa Moubayed

Page: 3

layer 7 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00

layer 8 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00

layer 9 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00

layer 10 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00

Q-bar matrices for each layer in GPa

layer 1 :

4.2139E+01	3.4337E+01	3.2274E+01
3.4337E+01	4.2139E+01	3.2274E+01
3.2274E+01	3.2274E+01	3.6087E+01

layer 2 :

4.2139E+01	3.4337E+01	3.2274E+01
3.4337E+01	4.2139E+01	3.2274E+01
3.2274E+01	3.2274E+01	3.6087E+01

layer 3 :

4.2139E+01	3.4337E+01	3.2274E+01
3.4337E+01	4.2139E+01	3.2274E+01
3.2274E+01	3.2274E+01	3.6087E+01

layer 4 :

4.2139E+01	3.4337E+01	3.2274E+01
3.4337E+01	4.2139E+01	3.2274E+01
3.2274E+01	3.2274E+01	3.6087E+01



layer 5 :

1.3887E+02	2.1509E+00	0.0000E+00
2.1509E+00	9.7769E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	3.9014E+00

layer 6 :

9.7769E+00	2.1509E+00	-3.6280E-11
2.1509E+00	1.3887E+02	-2.6442E-08
-3.6280E-11	-2.6442E-08	3.9014E+00

layer 7 :

4.2139E+01	3.4337E+01	-3.2274E+01
3.4337E+01	4.2139E+01	-3.2274E+01
-3.2274E+01	-3.2274E+01	3.6087E+01

layer 8 :

4.2139E+01	3.4337E+01	-3.2274E+01
3.4337E+01	4.2139E+01	-3.2274E+01
-3.2274E+01	-3.2274E+01	3.6087E+01

layer 9 :

4.2139E+01	3.4337E+01	-3.2274E+01
3.4337E+01	4.2139E+01	-3.2274E+01
-3.2274E+01	-3.2274E+01	3.6087E+01

layer 10 :

4.2139E+01	3.4337E+01	-3.2274E+01
3.4337E+01	4.2139E+01	-3.2274E+01
-3.2274E+01	-3.2274E+01	3.6087E+01

S matrices for each layer in 1/GPa

layer 1 :

7.2254E-03	-1.5896E-03	0.0000E+00
-1.5896E-03	1.0263E-01	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	2.5632E-01

layer 2 :

7.2254E-03	-1.5896E-03	0.0000E+00
-1.5896E-03	1.0263E-01	0.0000E+00



MAC LAM

7/16/2021 4:49:43 PM

User: Safia Moubayed

Page: 5

0.0000E+00 0.0000E+00 2.5632E-01

layer 3 :

7.2254E-03 -1.5896E-03 0.0000E+00

-1.5896E-03 1.0263E-01 0.0000E+00

0.0000E+00 0.0000E+00 2.5632E-01

layer 4 :

7.2254E-03 -1.5896E-03 0.0000E+00

-1.5896E-03 1.0263E-01 0.0000E+00

0.0000E+00 0.0000E+00 2.5632E-01

layer 5 :

7.2254E-03 -1.5896E-03 0.0000E+00

-1.5896E-03 1.0263E-01 0.0000E+00

0.0000E+00 0.0000E+00 2.5632E-01

layer 6 :

7.2254E-03 -1.5896E-03 0.0000E+00

-1.5896E-03 1.0263E-01 0.0000E+00

0.0000E+00 0.0000E+00 2.5632E-01

layer 7 :

7.2254E-03 -1.5896E-03 0.0000E+00

-1.5896E-03 1.0263E-01 0.0000E+00

0.0000E+00 0.0000E+00 2.5632E-01

layer 8 :

7.2254E-03 -1.5896E-03 0.0000E+00

-1.5896E-03 1.0263E-01 0.0000E+00

0.0000E+00 0.0000E+00 2.5632E-01

layer 9 :

7.2254E-03 -1.5896E-03 0.0000E+00

-1.5896E-03 1.0263E-01 0.0000E+00

0.0000E+00 0.0000E+00 2.5632E-01

layer 10 :

7.2254E-03 -1.5896E-03 0.0000E+00

-1.5896E-03 1.0263E-01 0.0000E+00

0.0000E+00 0.0000E+00 2.5632E-01



S-bar matrices for each layer in 1/GPa

layer 1 :

9.0748E-02	-3.7409E-02	-4.7703E-02
-3.7409E-02	9.0748E-02	-4.7703E-02
-4.7703E-02	-4.7703E-02	1.1304E-01

layer 2 :

9.0748E-02	-3.7409E-02	-4.7703E-02
-3.7409E-02	9.0748E-02	-4.7703E-02
-4.7703E-02	-4.7703E-02	1.1304E-01

layer 3 :

9.0748E-02	-3.7409E-02	-4.7703E-02
-3.7409E-02	9.0748E-02	-4.7703E-02
-4.7703E-02	-4.7703E-02	1.1304E-01

layer 4 :

9.0748E-02	-3.7409E-02	-4.7703E-02
-3.7409E-02	9.0748E-02	-4.7703E-02
-4.7703E-02	-4.7703E-02	1.1304E-01

layer 5 :

7.2254E-03	-1.5896E-03	0.0000E+00
-1.5896E-03	1.0263E-01	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	2.5632E-01

layer 6 :

1.0263E-01	-1.5896E-03	-9.8190E-12
-1.5896E-03	7.2254E-03	4.8955E-11
-9.8190E-12	4.8955E-11	2.5632E-01

layer 7 :

9.0748E-02	-3.7409E-02	4.7703E-02
-3.7409E-02	9.0748E-02	4.7703E-02
4.7703E-02	4.7703E-02	1.1304E-01

layer 8 :

9.0748E-02	-3.7409E-02	4.7703E-02
-3.7409E-02	9.0748E-02	4.7703E-02



4.7703E-02 4.7703E-02 1.1304E-01

layer 9 :

9.0748E-02 -3.7409E-02 4.7703E-02

-3.7409E-02 9.0748E-02 4.7703E-02

4.7703E-02 4.7703E-02 1.1304E-01

layer 10 :

9.0748E-02 -3.7409E-02 4.7703E-02

-3.7409E-02 9.0748E-02 4.7703E-02

4.7703E-02 4.7703E-02 1.1304E-01

Apparent Young's Moduli:

on the X-direction: $E_X = 3.2553E+01$ GPa

on the Y-direction: $E_Y = 3.2553E+01$ GPa

Apparent shear modulus:

$G_{XY} = 2.9650E+01$ GPa

Apparent flexural moduli:

corresponding to the moment M_X : $E_{XB} = 2.6359E+01$ GPa

corresponding to the moment M_Y : $E_{YB} = 2.3134E+01$ GPa

Apparent Poisson ratios

corresponding to a tensile load along X-axis: $\nu_{XY} = 5.7434E-01$

corresponding to a tensile load along Y-axis: $\nu_{YX} = 5.7434E-01$

ABBD matrix (A in $N/m * 10^6$; B in $N * 10^3$; D in Nm)

1.2630E+02	7.2538E+01	-9.4320E-12	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
7.2538E+01	1.2630E+02	-6.8749E-09	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
-9.4320E-12	-6.8749E-09	7.7090E+01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	7.1722E+01	4.3126E+01	3.4035E+01
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	4.3126E+01	6.6049E+01	3.4035E+01
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.4035E+01	3.4035E+01	4.5690E+01



MAC LAM

7/16/2021 4:49:43 PM

User: Safia Moubayed

Page: 8

ABBD inverse matrix $A'B'B'D'$

(A' in $mN \cdot 10^{-6}$; B' in $N^{-1} \cdot 10^{-3}$; D' in $N^{-1} \cdot m^{-1}$)

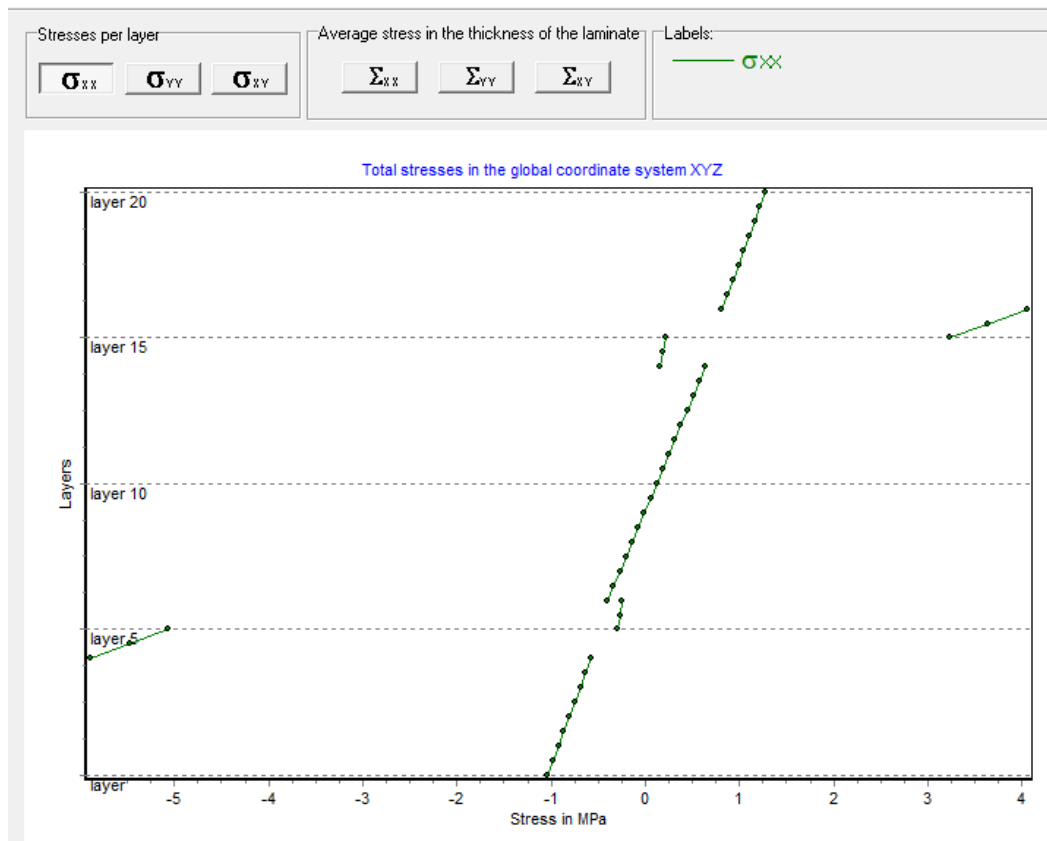
1.1815E-02	-6.7859E-03	-6.0372E-13	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
-6.7859E-03	1.1815E-02	1.0528E-12	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
-6.0372E-13	1.0528E-12	1.2972E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	2.5902E-02	-1.1312E-02	-1.0868E-02
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-1.1312E-02	2.9512E-02	-1.3558E-02
0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-1.0868E-02	-1.3558E-02	4.0082E-02

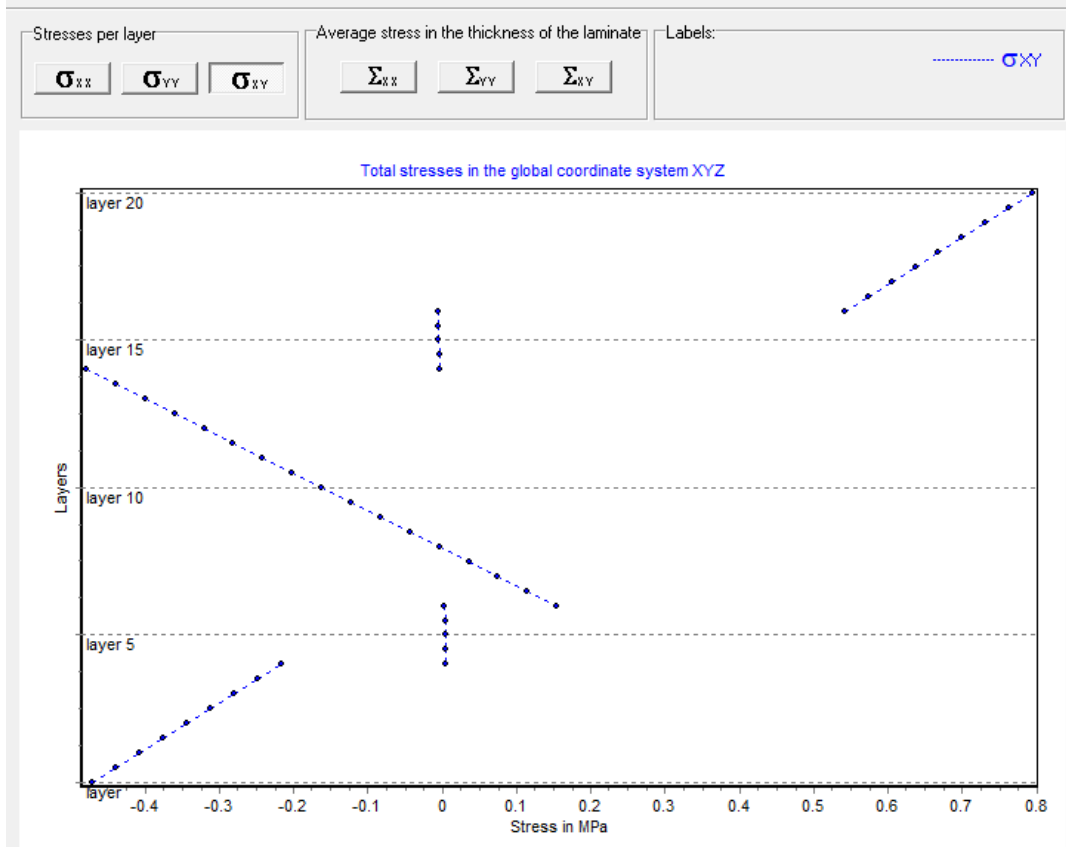
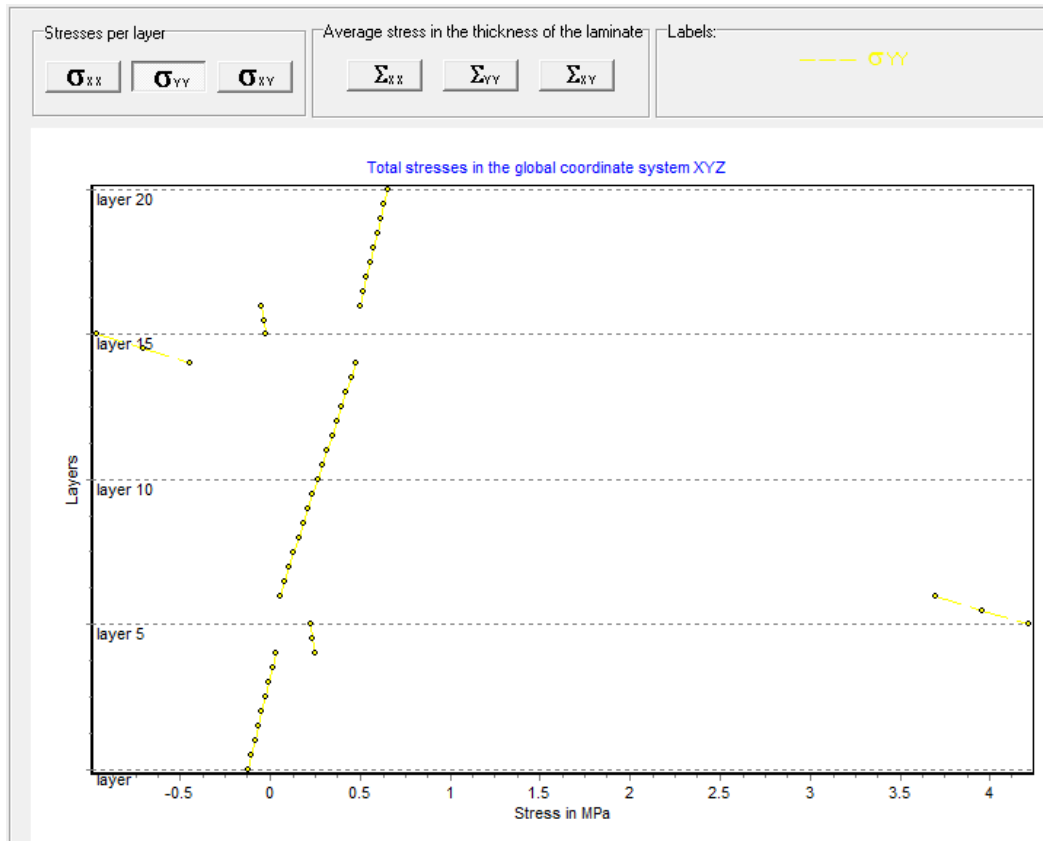
F matrix (in $N/m \cdot 10^{-6}$)

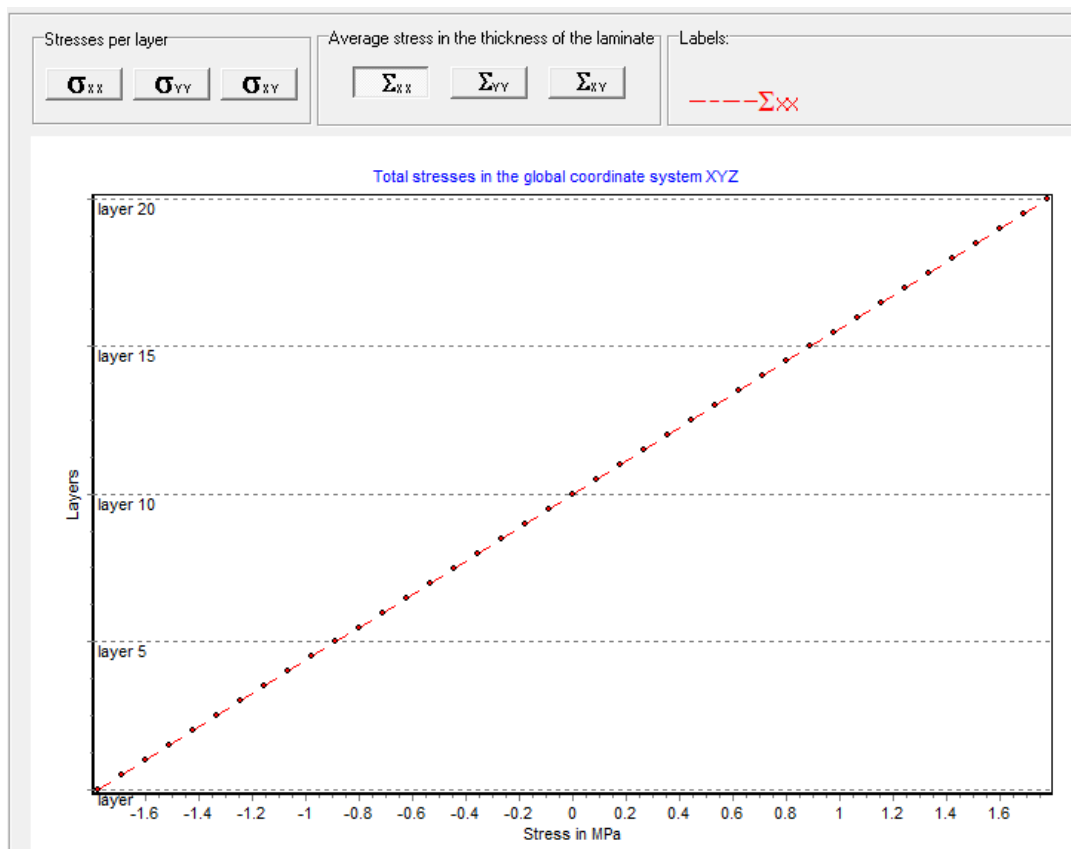
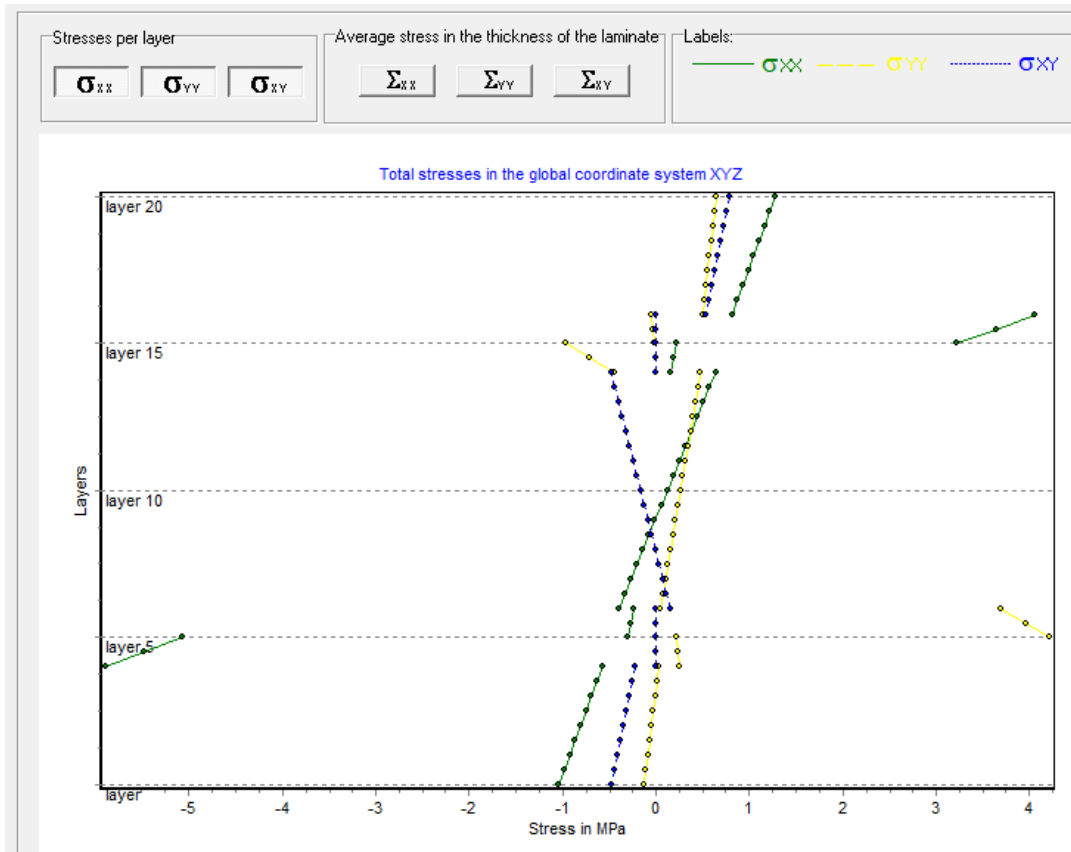
1.1808E+01	1.5894E-10
1.5894E-10	1.1808E+01

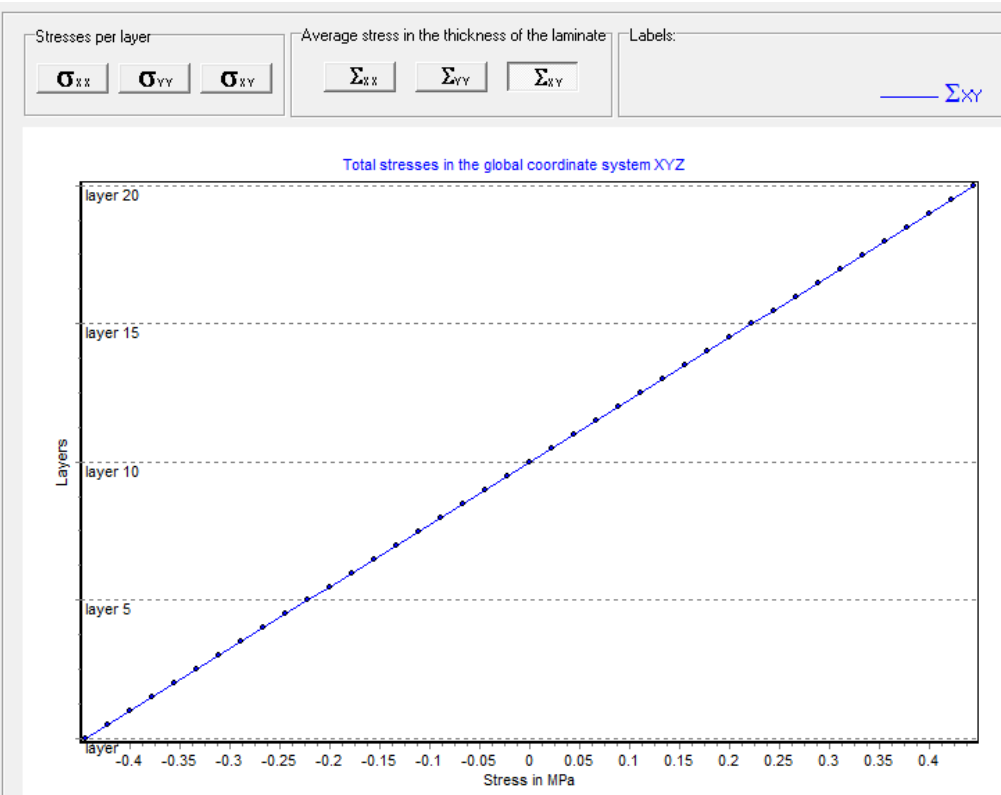
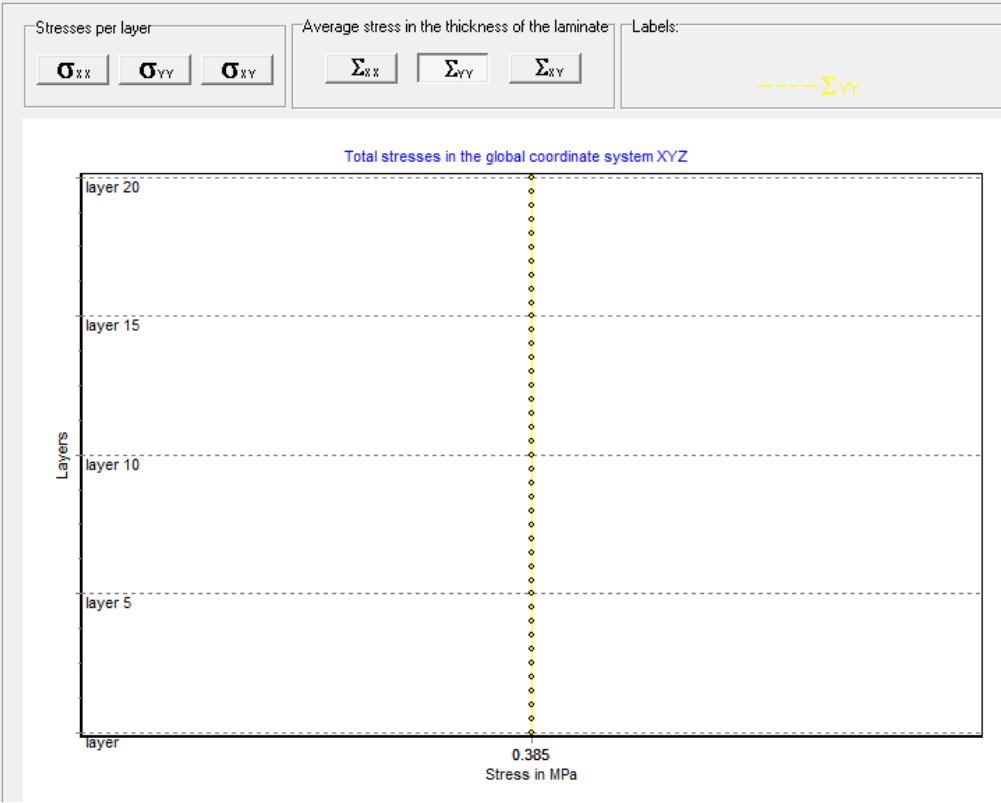
F inverse matrix (in $mN \cdot 10^{-6}$)

8.4688E-02	-1.1399E-12
-1.1399E-12	8.4688E-02









Stresses per layer

σ_{xx}

σ_{yy}

σ_{xy}

Average stress in the thickness of the laminate

Σ_{xx}

Σ_{yy}

Σ_{xy}

Labels:

--- Σ_{xx}

--- Σ_{yy}

--- Σ_{xy}

