

DIAPPOSITIVES DE LA CONFERENCE

SCRO – Montréal – Mai 2006

SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture des composites 3D en Carbone/Epoxy

Christiane EL Hage^a, Rafic Younès^b, Zoheir Aboura^c, Malk.L. Benzeggagh^a

^a Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval
^b Université Libanaise, Faculté de Génie, Beyrouth, Liban
^c L3M IUT de Tremblay-en-France Paris 8



Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Plan

- q Conception optimale des composites
- q Formulation du problème d'optimisation
- q Modèle analytique d'homogénéisation
- q Application 1 : Orthogonal 3D
- q Application 2 : Interlock 2.5D
- q Conclusions et perspectives

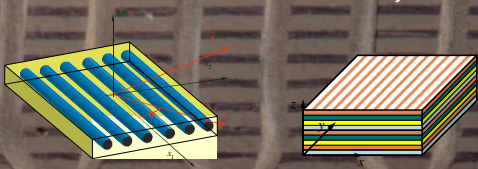
2 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

q **Conception optimale des composites**

- **Matrices:**
 - Résines époxydiques
 - Résines polyuréthanes
 - Résines polyamides
 - Résine phénoliques
- **Fibres:**
 - Verre
 - Carbone
 - Bore
 - Kevlar
 - béryllium

l'union fait la force



Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

q **Conception optimale des composites**

Critères de résistance:

Optimisation de la rigidité de membrane :


- 1- maximisation de $E1$
- 2 - Maximisation de $G12$

Optimisation des propriétés de flexion:

- 1 - Maximisation de la charge critique

Optimisation dynamique:

- 1 - Maximisation de la 1ere fréquence propre



Algorithmes génétiques
Méthode cellulaire

4 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

q Formulation du problème d'optimisation

Objectifs:

- 1- Prédiction des paramètres de tissage du composite résistant sous un cas de chargement imposé
 - a- Taux de fibre global
 - b- Proportion de fibre dans chaque direction
 - c- Type de renfort (Tex) et de résine
- 2- Prédiction des propriétés élastiques 3D

Les 9 constantes de l'ingénieur

En assurant le meilleur compromis coût - performance

5 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

q Formulation du problème d'optimisation

Les matériaux composites tissés 3D présentent en générale des architectures internes complexes. L'étude de leur comportement mécanique peut être réduite à l'étude d'un volume élémentaire pouvant représenter le motif interne (VER)

Diminuer la densité des plaques avec une meilleure performance

Recherche

Minimum du volume de VER résistant à un cas de chargement imposée

6 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

q Formulation du problème d'optimisation

Écriture mathématique du problème

Min $f(X)$

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

Sous contraintes

$h_i(X) = 0 \quad i = 1, \dots, m$

$g_j(X) < 0 \quad j = 1, \dots, p$

$f(x)$ la fonction objective

$f(x) = \text{Volume du VER}$

Tel que :

$x = (\text{les paramètres géométriques et les fractions volumiques des mèches})$

$h_i(x)$ les contraintes égalités

pour chaque mèche: chaîne, trame et verticale

$A_{mèche} \cdot V_{f_i/m} \cdot \rho_f - Tex = 0$

fraction volumique de fibre dans la mèche: V_{fm}

$g_j(x)$ les contraintes inégalités

$F_i \bar{\sigma}_i + F_{ij} \bar{\sigma}_i \bar{\sigma}_j - 1 < 0$

$V_{f_j \min} \leq V_{f_j/m} \leq V_{f_j \max}$

$\sigma_m - X_i \text{résine} < 0$

7 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

q Formulation du problème d'optimisation

La méthode de résolution numérique appliquée est celle de la Programmation Séquentielle Quadratique (SQP)

Min $\frac{1}{2} d^T \cdot H_k \cdot d + \nabla f(x_k)^T \cdot d$

$\nabla h_i(x_k) \cdot d^T + h_i(x_k) = 0 \quad i = 1, \dots, m$

$\nabla g_j(x_k) \cdot d^T + g_j(x_k) < 0 \quad j = 1, \dots, p$

dans lequel :

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k \cdot q_k^T}{q_k^T \cdot s_k} - \frac{H_k^T \cdot s_k^T \cdot s_k \cdot H_k}{s_k^T \cdot H_k \cdot s_k}$$

avec: $s_k = x_{k+1} - x_k$

$q_k = \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k)$

$x_{k+1} = x_k + \alpha_k \cdot d$

8 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

q Modèle analytique d'homogénéisation

Connaissant:

- 1- Propriétés du tissage
 - Propriétés mécaniques des constituants fibre et Résine
 - Taux de fibre et proportion de fibre dans chaque direction
- 2- VER (Propriétés géométriques du tissage)
 - Volume des compartiments: mèches et block de résine

Par l'utilisation d'une technique d'homogénéisation périodique

$$C_{ij, Globale} = \frac{1}{V_t} \sum_{k=1}^n V_k \cdot C_{ij,k}$$

Prédiction des propriétés mécaniques 3D

9 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

q Modèle analytique d'homogénéisation

Extension du modèle à la prédiction des propriétés ultimes déterminées selon le critère 3D de rupture de Tsai-Wu écrit sous son écriture tensorielle

$$F_i \bar{\sigma}_i + F_{ij} \bar{\sigma}_i \bar{\sigma}_j = 1$$

avec:

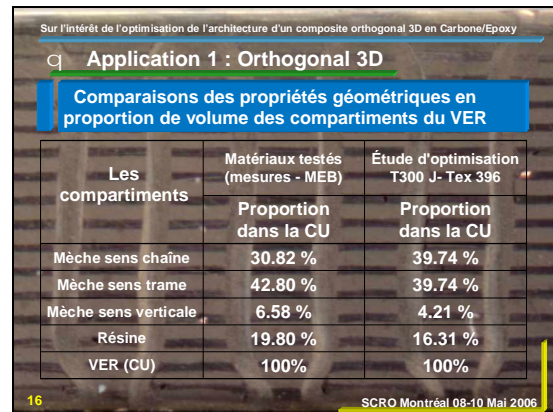
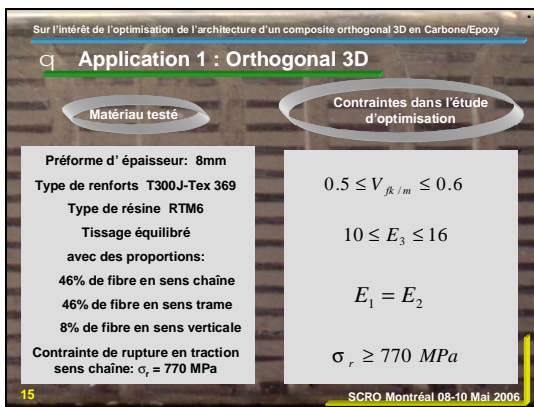
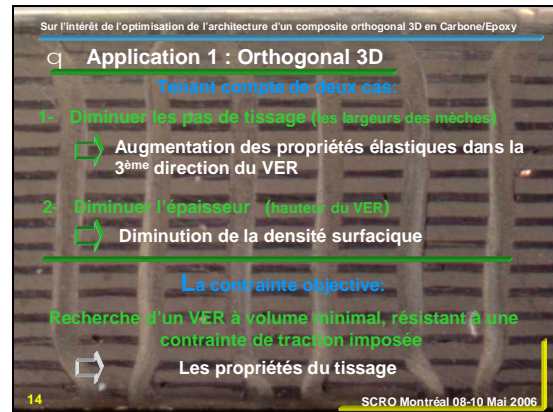
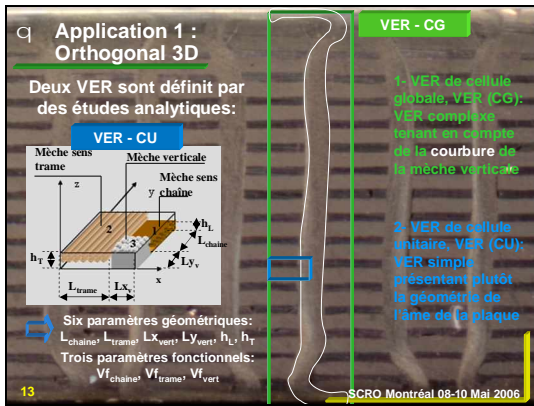
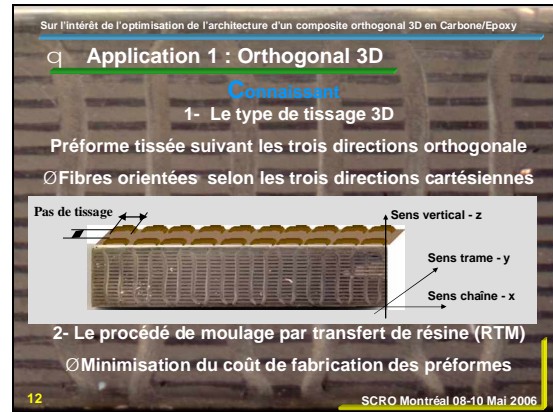
F_i, F_{ij}, F_{ij} déterminés par les relations analogiques de Von Mises,

fonction des contraintes limites des fibres $X_+, X^-, Y_+, Y^-, Z_+, Z^-, S, R, Q$

Issus de la littérature et des travaux de Khellil¹

¹ Khellil K., 1993. « Évaluation expérimentale d'un critère de rupture tensoriel polynomial tridimensionnel pour matériaux composites », Thèse de Doctorat de l'Université de Compiègne.

10 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006



Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 1 : Orthogonal 3D

Comparaisons des propriétés de tissage

	Contrainte de rupture σ_f (MPa)	Taux de fibre V_f	Densité du composite ρ_c	Proportion de fibre dans les trois types de mèche		
				Mèche sens chaîne P_{f1} %	Mèche sens trame P_{f2} %	Mèche sens verticale P_{f3} %
				P_{f1} %	P_{f2} %	P_{f3} %
Études expérimentales	770	0.59		46	46	8
Étude d'optimisation	790	0.6	11410	47.969	47.364	5.269
Écart entre les deux études				+1.97%	+1.97%	-2.73%

Les résultats des modèles analytiques sont en accord avec les études expérimentales

17 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 1 : Orthogonal 3D

Comparaisons des propriétés mécaniques 3D

	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
Modèle CU	57.30	58.63	19.80	0.072	0.267	0.269	3.687	3.553	3.451
Modèle CG	57.46	58.94	15.66	0.067	0.367	0.370	4.307	4.114	3.960
Étude optimisation T300J Tex 396	58.65	58.65	16	0.062	0.307	0.307	3.324	3.154	3.154
Modèle ajusté CU puis CG	60.05	56.19	16.08	0.062	0.305	0.339	3.763	3.635	3.168
Étude Exp.	57.5 ±1.8	-	15.53 ±1.0	0.028	0.269	0.268	4.114 ±0.05	-	-

Les résultats des modèles analytiques sont en accord avec les études expérimentales

18 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 1 : Orthogonal 3D

Prédiction des propriétés 3D par optimisation pour : $E_3=16\text{GPa}$ et une contrainte de rupture visée à 770 MPa

Type de fibre / RTM6	σ_f (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
T300J-Tex 198	790	58.65	58.65	16	0.062	0.307	0.307	3.32	3.15	3.15
T300J-Tex 386	790	58.65	58.65	16	0.062	0.307	0.307	3.32	3.15	3.15
T400H-Tex 386	870	63.38	63.38	16	0.061	0.318	0.317	3.30	3.13	3.13
T600S-Tex 1750	870	58.65	58.65	16	0.062	0.307	0.307	3.32	3.15	3.15
T700S-Tex 1650	940	58.65	58.65	16	0.062	0.307	0.307	3.32	3.15	3.15
T700G-Tex 1650	940	60.93	60.93	16	0.060	0.307	0.308	3.31	3.14	3.14
T800H-Tex 223	1090	73.46	73.46	16	0.052	0.320	0.319	3.26	3.08	3.08

19 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 1 : Orthogonal 3D

Par comparaison entre les résultats d'optimisation et les études expérimentales, la fonction objective:

Minimiser le volume du VER

est validée sur le tissage orthogonal 3D

Application de la même méthodologie proposée dans cette étude sur un autre type de tissage

l'interlock 2.5D

20 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

Préforme tissée dans les deux directions chaîne et trame où les mèches sens chaîne interceptent les mèches sens trame sur plusieurs plis.

Le matériau testé: renforcé en fibre de carbone et injecté de résine par le procédé RTM.

Les mèches sens chaîne interceptent les mèches sens trame en trois plis, sur deux plans verticaux consécutifs.

VER

Mèche sens trame

Mèche sens chaîne

21 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

Modélisation géométrique du VER

Section longitudinale du VER

Section transversale du VER

La mèche sens chaîne est modélisée en forme d'escalier

La mèche sens trame est modélisée en forme ondulatoire

Six paramètres géométriques: $a_L, c_L, a_T, c_T, h_L, h_T$

Deux paramètres fonctionnels: $V_{f,chaîne}, V_{f,trame}$

22 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

Matériau testé

Préforme d'épaisseur 8mm
Type de renforts T300J-Tex 369
Type de résine RTM6

Contrainte de rupture sous essai de traction uniaxial

En sens chaîne :
 $\sigma_c = 400$ MPa

En sens trame :
 $\sigma_t = 480$ MPa

Tissage avec les proportions:
35% de fibre en sens chaîne
65% de fibre en sens trame
Taux de fibre global 38%

Ce type de matériau n'est pas équilibré en pourcentage de fibre entre le sens chaîne et le sens trame

23 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

Mise en valeur de l'étude d'optimisation

Trois propositions de cas de tissage sont recherchés:

- 1- Résistance du matériau sous traction uniaxial dirigée selon le sens chaîne
⇒ Propriétés 3D fort dans le sens chaîne
- 2- Résistance du matériau sous traction uniaxial dirigée selon le sens trame
⇒ Propriétés 3D fort dans le sens trame
- 3- Résistance du matériau sous tensions biaxiales dans le plan de la plaque
⇒ Recherche de propriétés 3D d'un matériaux résistant dans les deux directions chaîne et trame
⇒ Comparaison avec les matériaux testés

24 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

1- Résistance du matériau sous traction uniaxial dirigée selon le sens chaîne:

Appliqué uniquement sur la mèche sens chaîne en sa partie linéaire
 $F_x \bar{\sigma}_x + F_y \bar{\sigma}_y \bar{\sigma}_z - 1 = 0$
contrainte imposée $\sigma_1(x_1, 0, 0, 0, 0)$
Limite imposée sur $E_3 = 13.5$ GPa

Contrainte de critère de rupture dans l'étude d'optimisation

Propriétés élastique 3D et proportions de fibre du tissage prédit par optimisation pour le cas de la T300J-Tex 396

Contrainte imposée σ_1 (MPa)	σ_c (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	Pf %	Pf ₁ %	Pf ₂ %
500 MPa	410	35.63	42.12	13.5	2.68	7.09	3.95	32.7	45.7	54.3
600 MPa	500	42.41	35.55	13.5	2.77	7.85	3.88	30.7	52.5	47.5
700 MPa	580	49.19	32.94	13.5	2.97	8.67	3.73	29.1	56.4	43.6

25 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

2- Résistance du matériau sous traction uniaxial dirigée selon le sens trame:

Appliqué uniquement sur la mèche ondulatoire sens trame
 $F_x \bar{\sigma}_x + F_y \bar{\sigma}_y \bar{\sigma}_z - 1 = 0$
Contrainte imposée $\sigma_2(0, x_2, 0, 0, 0)$
Limite imposée sur $E_3 = 13.5$ GPa

Contrainte de critère de rupture dans l'étude d'optimisation

Propriétés élastique 3D et proportions de fibre du tissage prédit par optimisation pour le cas de la T300J-Tex 396:

Contrainte imposée σ_2	σ_c (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	Pf %	Pf ₁ %	Pf ₂ %
500 MPa	490	39.54	38.25	13.5	2.73	7.51	3.93	31.7	49.7	50.3
600 MPa	520	36.72	46.05	13.5	2.86	7.22	4.14	34.1	42.7	57.3
700 MPa	640	34.48	54.27	13.5	3.06	6.99	4.33	36.4	36.3	63.7

26 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

3- Résistance du matériau sous tension biaxiale dans le plan de la plaque

Appliqué en même temps sur la mèche sens chaîne et sur la mèche ondulatoire sens trame
 $F_x \bar{\sigma}_x + F_y \bar{\sigma}_y \bar{\sigma}_z - 1 < 0$
contrainte imposée $\sigma_1(x_1, x_2, 0, 0, 0)$

Contrainte de critère de rupture dans l'étude d'optimisation

Comparaison des propriétés de tissage: optimisation / test

	Contrainte de rupture σ_r (MPa)	Densité du composite ρ_c	Taux de fibre global P_f %	Proportion de fibre dans les mèches	
				Mèche sens chaîne P_{f1} %	Mèche sens trame P_{f2} %
Etudes expérimentales et propriétés du tissage	$x_1 = 400$ $x_2 = 480$		38	35	65
Etude d'optimisation T300J-Tex 396	$x_1 = 530$ $x_2 = 770$	1351.3	36.9	37.3	62.7

27 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

3- Résistance du matériau sous tension biaxiale dans le plan de la plaque avec la contrainte imposée $\sigma_1(x_1, x_2, 0, 0, 0)$

Comparaisons des propriétés géométriques en proportion de volume des compartiments du VER

	Matériaux testés (mesures- MEB)		Etude d'optimisation T300 J- Tex 396	
	Volume (mm ³)	Proportion	Volume (mm ³)	Proportion
Mèche sens chaîne	10.57	18.01 %	8.29	21.15 %
Mèche sens trame	26.18	44.58 %	15.29	39.01 %
Résine	21.98	37.41 %	15.62	39.84 %
Le VER	58.73	100 %	39.2	100 %

⇒ VER à volume minimal avec plus de proportion en résine, donc moins de fibre

28 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

3- Résistance du matériau sous tension biaxiale dans le plan de la plaque avec la contrainte imposée $\sigma_i(x_1, x_2, 0, 0, 0, 0)$

Comparaison des propriétés élastique mécanique 3D : optimisation / test

	σ_{r1} (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
Modèle analytique	570	53.43	62.42	13.42	0.064	0.608	0.237	4.11	6.66	4.55
Optimisation avec T300J-Tex 396	530	49.38	57.38	13.5	0.065	0.665	0.189	3.75	7.82	4.24
Études Exp.	392.01 $\pm 26.63^*$	53.31 ± 0.29	62.35 ± 1.34	-	0.080 ± 0.01	-	-	-	-	-

* la rupture est réalisée au niveau des talons

29 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

3- Résistance du matériau sous tension biaxiale dans le plan de la plaque avec la contrainte imposée $\sigma_i(x_1, x_2, 0, 0, 0, 0)$

Variation du type de fibre de carbone

Type de fibre / RTM6	Propriétés élastiques				Proportion de fibre			VER (mm ²)	densité ρ_c
	σ_{r1} (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	Pf	Pf ₁	Pf ₂		
T300J-Tex 198	510	49.38	57.85	13.5	37.33	37.608	62.392	13.09	1353.8
T300J-Tex 386	530	49.38	57.38	13.5	36.95	37.29	62.71	39.19	1351.3
T300J-Tex 800	540	49.41	57.07	13.5	36.65	37.04	62.96	102.91	1349.2
T400H-Tex 198	510	53.88	63.63	13.5	37.56	37.11	62.89	13.34	1362.9
T400H-Tex 386	530	53.81	63.09	13.5	37.76	36.76	63.24	35.35	1360.2
T700S-Tex 800	540	49.41	57.08	13.5	36.65	37.04	62.96	94.77	1356.5
T700S-Tex 1650	550	49.45	56.88	13.5	36.42	36.84	63.16	273.76	1354.9
T800H-Tex 223	520	62.61	71.68	13.5	36.88	37.45	62.55	15.68	1361.9

30 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

Variation du type de tissage de l'interlock 2.5D

Effet de la variation du nombre d'entrelacement (n_e) des mèches sens chaîne entre les plis des mèches sens trame, sur les propriétés élastique mécanique 3D et sur les propriétés du tissage

On propose dans cette étude quatre cas pour $n_e = 1 \dots 4$

Les propriétés élastiques pour chaque cas de n_e sont recherchés pour les trois cas de sollicitations:

- 1- Traction uniaxial dirigée dans le sens chaîne
- 2- Traction uniaxial dirigée dans le sens trame
- 3- Tension biaxiale dans le plan de la plaque

Avec le type de fibre : T300J-Tex 396

$0.5 < Vf < 0.7$

31 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

variation du nombre d'entrelacement (n_e)

Cas des matériaux testés

32 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

Variation du type de tissage de l'interlock 2.5D

1- Traction uniaxial dirigée dans le sens chaîne: $\sigma_i(x_1, 0, 0, 0, 0, 0)$

n_e	σ_r (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{13} (GPa)	Pf	Pf ₁	Pf ₂	VER (mm ²)	ρ_c
1	270	49.20	45.47	13.5	11.19	41.8	57.8	42.2	8.5	1384.3
2	580	49.19	32.93	13.5	8.66	29.1	56.4	43.6	13.2	1298.2
3	900	49.31	30.17	13.5	7.14	25.4	52.8	47.2	65.1	1273.1
4	1210	49.51	30.43	13.5	6.35	23.6	47.9	52.1	111.8	1261

Pour des modules longitudinales sensiblement les mêmes :

Avantages \Rightarrow Augmentation lisible des contraintes de rupture σ_r
Diminution du pourcentage de fibre global P_f
Diminution de la densité du composite ρ_c

Désavantages \Rightarrow Diminution du module de cisaillement G_{13}

33 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

Variation du type de tissage de l'interlock 2.5D

2- Traction uniaxial dirigée dans le sens trame: $\sigma_i(0, x_2, 0, 0, 0, 0)$

n_e	σ_r (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{13} (GPa)	Pf	Pf ₁	Pf ₂	VER (mm ²)	ρ_c
1	730	49.67	55.44	13.5	10.52	45.1	50.9	49.1	8.9	1406.5
2	740	34.48	54.27	13.5	6.993	36.4	36.3	63.7	30.9	1347.3
3	750	33.61	54.50	13.5	5.90	33.9	29.1	70.9	65.4	1330.4
4	760	32.13	54.61	13.5	5.27	32.4	24.2	75.8	113.3	1320.6

Pour des contraintes de rupture sensiblement les mêmes :

Conclusions \Rightarrow Diminution lisible des modules longitudinales E_1
Diminution du module de cisaillement G_{13}
Diminution du pourcentage de fibre global P_f
Diminution de la densité du composite ρ_c

34 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Application 2 : Interlock 2.5D

Variation du type de tissage de l'interlock 2.5D

3- Tension biaxial dirigée dans le plan de la plaque: $(x_1, x_2, 0, 0, 0)$

n_0	σ_{f1} (MPa)	σ_{f2} (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{13} (GPa)	P_f	P_{f1}	P_{f2}	ρ_c
1	260	760	49.22	57.22	13.5	10.37	45.4	49.6	50.4	1409.1
2	530	770	49.38	57.38	13.5	7.82	36.9	37.3	62.7	1351.3
3	830	760	49.64	56.95	13.5	6.82	33.1	30.7	69.3	1325.2
4	1150	760	49.89	56.72	13.5	6.24	30.9	26.1	73.9	1310.2

Pour des modules longitudinaux sensiblement les mêmes :

Avantages \Rightarrow Augmentation lisible des contraintes de rupture σ_{r1}
 Diminution du pourcentage de fibre global P_f
 Diminution de la densité du composite ρ_c

Désavantages \Rightarrow Diminution du module de cisaillement G_{13}

35 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Conclusions et perspectives

1- La fonction objective, minimiser le VER en utilisant le modèle analytique d'homogénéisation et le critère de rupture 3D de Tsai-Wu, prédit les propriétés du tissage 3D, sous traction uniaxial et biaxiale de type: orthogonal 3D et Interlock 2.5D suivi des propriétés élastiques mécaniques 3D

Les résultats sont validés par les études expérimentales

36 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

Conclusions et perspectives

2- Les études d'optimisation sur d'autre types d'Interlock 2.5D, sont en cours, par l'application de la même méthodologie sous sollicitation uniaxiale et biaxiale

3- Les études d'optimisations permettrons par la suite de développer un logiciel de prédiction de tissage et du comportement élastique endommageable des matériaux composites sous forme de préforme tissée 3D, sous sollicitation uniaxiale et biaxiale

4- Suite à ces études, l'optimisation des structure 3D seront attaquées sous autre type de sollicitation

37 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

38 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006

Sur l'intérêt de l'optimisation de l'architecture d'un composite orthogonal 3D en Carbone/Epoxy

39 SCRO Montréal 08-10 Mai 2006