

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire

De Fin D'études

En vue de l'obtention du diplôme

MASTER ACADEMIQUE en GENIE MECANIQUE Option : CONSTRUCTION MECANIQUE

Thème

Influence de défaut de cisaillement lors de la mise en forme sur le comportement mécanique d'un stratifier

Proposé et dirigé par :

Mr. KACIMI B

Réalisé par : SI AMMOUR Amar SADOU Said

2019

Remerciements

Nos vifs remerciements à monsieur KACIMI Bachir pour avoir bien voulus nous encadrer.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner et de juger le présent travail.

Nous tenons aussi à remercier vivement monsieur le directeur général de l'entreprise AZEFFOUN MARINE pour son aide, fourniture de la matière première, afin d'élaborer les matériaux utilisés dans notre travail.

Nos remerciements les plus Sincères sont à tous ceux qui ont contribués à la réussite de ce mémoire.

- Ar ar ar ar ar ar ar

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma chère mère (Bahia), qui mas été la source d'encouragements et d'assurance.

A la mémoire de mon père(Ahecen) que dieux l'accueil dans son vaste paradis.

A mon seul et chaire frère Rachid.

A ma grande mère (Dehbia) à qui je souhaite une longue vie.

A mes tontes et mes oncles.

A mes cousins et mes cousines.

A mon binôme (Said) avec qui J'ai partagé ce travail.

A tous mes amis en particulier (Mamouh, Ghiles) et à toute ma promotion.

A tous ceux qui m'ont soutenu durant mes études.

the she she she she she

Dédicaces

AVE AVE AVE

A mon père(Mohamed) qui ma accompagner tout le long de mon parcoure.

Je dédie ce travail à ma chère mère (Sabiha), qui mas été la source d'encouragements et d'assurance.

A mes deux frères Oussama et Abed Raouf

A ma sœur fatma.

A mes grands-parents à qui je souhaite une longue vie.

A mes tontes et mes oncles.

A mes cousins et mes cousines.

A mon binôme (Amar) avec qui J'ai partagé ce travail.

A tous mes amis en particulier (Mamouh, Ghiles) et à toute ma promotion.

A tous ceux qui m'ont soutenu durant mes études.

ale ale ale ale ale ale ale ale

Liste des figures

Figure I-1 : Structure d'un matériau composite
Figure I-2 : Constituants d'un matériau composite4
Figure I-3 : Les types de résines5
Figure I-4 : Les types de renfort10
Figure I-5 : Fibre de verre10
Figure I-6 : Fibre de carbone
Figure I-7 : Armure de tissu13
Figure I-8 : Embuvage d'une mèche14
Figure I-9 :différent échelles des tissus15
Figure I-10 : Tissu mats16
Figure I-11 : Différent tissus18
Figure I-12 : Tissage 3D / tissage 4D19
Figure I-13 : Les charges (a) les microbilles de verre ;(b) le noir de carbone ;(c)poudre de silice
Figure I-14 : Moulage par le procédé RTM22
Figure I-15 : Moulage par compression à froid23
Figure I-16 : Moulage par compression à chaud24
Figure I-17 : Moulage au contact25
Figure I-18 : Moulage par projection simultanée
Figure I-19 : Moulage sous vide
Figure I-20 : Les domaines d'utilisation des matériaux composites
Figure II-1 : Exemple de mise en forme par un poinçon en forme tétraédrique
Figure II-2 : Différente forme de poinçon
Figure II-3 : Apparence des défauts de boucle
Figure II-4 : Apparence des défauts de glissement (décohésion)

Figure II-5 : Apparence des défauts de plis	36
Figure II-6 : Apparence des défauts d'ondulation	37
Figure II-7 : les différents défauts de perçage	38
Figure II-8 : Les différents outils pour l'usinage des matériaux composites	39
Figure III-1 : Essai de traction longitudinale	42
Figure III-2 : Essai de traction transversale	42
Figure III-3 : Essai de hors axes	43
Figure III-4 : Essai de compression	44
Figure III-5 : Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points	45
Figure III-6 : Courbe de contrainte-déformation : 1) matériau fragile ;	46
Figure III-7 : Essai de flexion à quatre points	47
Figure III-8 : Schéma de principe de l'essai de flambement	47
Figure III-9 : Essai de Charpy	49
Figure III-10 : Essai de Dureté ROCKWELL	50
Figure III-11 : Essai de dureté BRINELL	51
Figure III-12 : Essai de dureté Vickers	51
Figure III-13 : Essai de dureté KNOOP	52
Figure IV-1 : Schéma des différents endommagements dans les stratifiés	53
Figure IV-2 : Rupture des fibres	54
Figure IV-3 : Le phénomène des microfissures	55
Figure IV-4 : Fissure matricielle formée à partir de la coalescence des décohésions microfissures matricielles.	et 55
Figure IV-5 : Microdélaminage et délaminage diffus	56
Figure IV-6 : Le macro-délaminage	57
Figure IV-7: Décohésion entre la fibre et la matrice	57
Figure IV-8 : Les porosités	58

Figure IV-9 : L'excès de résine	59
Figure IV-10 : Pollution de surface	. 59
Figure V-1 : Domaine d'utilisation du matériau composite	. 61
Figure V-4 : Procédé de moulage au contact.	. 63
Figure V-7 : Scie à disque diamanté	. 64
Figure V-8: Géométrie des éprouvettes pour l'essai de flexion trois points	. 65
Figure V-9 : Machine de flexion zwick roell 2.5KN avec dispositif de flexion	. 66
Figure V-10 : Courbes contrainte/déformation du lot ACe	. 67
Figure V-11 : Courbes contrainte/déformation du lot ACi	68
Figure V-12 : Courbes contrainte/déformation du lot ATe	69
Figure V-13 : Courbes contrainte/déformation du lot ATi	69
Figure V-14 : Courbes contrainte/déformation du lot BC	71
Figure V-15 : Courbes contrainte/déformation du lot BT	72
Figure V-16 : Courbes contrainte/déformation du lot CS10°	73
Figure V-17 : Courbes contrainte/déformation du lot CS20°	74
Figure V-18 : Courbes contrainte/déformation du lot CS30°	74
Figure V-19 : Eprouvettes rompues du lot A	76
Figure V-20 : Eprouvettes rompues du lot B	76
Figure V-21 : Eprouvettes rompues du lot C	76
Figure V-22 : Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture pour le lot A	77
Figure V-23 : Influence de l'anisotropie sur le module d'élasticité pour le lot A	. 77
Figure V-24 : Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture pour le lot B	. 78
Figure V-25 : Influence de l'anisotropie sur le module d'élasticité E pour le lot B	78
Figure V-26 : Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture pour le lot A CS	. et 79
Figure V-27 : Influence de l'anisotropie sur le module d'élasticité pour le lot A et C	CS.

Figure V-28 : Géométrie des éprouvettes d'usinage	1
Figure V-29 : Fraiseuse verticale semi-automatique	2
Figure V-30 : Les différents diamètres des forets utilisés	2
Figure V-31 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 250tr/min	3
Figure V-32 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 500tr/min	3
Figure V-33 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min	3
Figure V-34 : Perçage avec vitesse d'avance de 160mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min	4
Figure V-35 : Perçage avec vitesse d'avance de 250mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min	4
Figure V-36 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 250tr/min	4
Figure V-37 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 500tr/min	5
Figure V-38 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min	5
Figure V-39 : Perçage avec vitesse d'avance de 160mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min	5
Figure V-40 : Perçage avec vitesse d'avance =250mm/min et vitesse de coupe =710tr/min	5
Figure V-41 : Perçage avec vitesse d'avance =250mm/min et vitesse de coupe =710tr/min	6
Figure V-42 : Perçage avec vitesse d'avance de 250mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min	6
Figure V-43 : Perçage avec vitesse d'avance =250mm/min et vitesse de coupe =710tr/min	7
Figure V-44 : Apparence des coupeaux sous forme de petit grain	7

Figure V-45: Apparence des coupeaux sous forme de fils	. 88
Figure V-46 : Déchaussement des fibres de lot CS30°	. 88
Figure V-47 : Bonne qualité des trous usinés.	. 89

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Les caractéristiques des résines polyesters	6
Tableau I-2 : Les différents types de verres1	1
Tableau I-3 : Propriétés mécaniques des fibres de verre type E et R 1	.1
Tableau III-1 : Caractéristique de l'essai de traction longitudinale	42
Tableau III-2 : Caractéristique de l'essai de traction transversal	43
Tableau III-3 : Caractéristique de l'essai de traction hors axes	43
Tableau IV-1 : Types d'endommagement dans les composites stratifiés	54
Tableau V-1 : Différents lots d'éprouvettes d'essais.	62
Tableau V-2 : Caractéristiques mécaniques du lot ACe en flexion	67
Tableau V-3 : Caractéristiques mécaniques du lot ACi en flexion	68
Tableau V-4 : Caractéristiques mécaniques du lot ATe en flexion	68
Tableau V-5 : Caractéristiques mécaniques du lot ATi en flexion	69
Tableau V-6 : Caractéristiques mécaniques du lot BC en flexion	71
Tableau V-7 : Caractéristiques mécaniques du lot BT en flexion	71
Tableau V-8 : Caractéristiques mécaniques du lot CS10° en flexion	73
Tableau V-9 : Caractéristiques mécaniques du lot CS20° en flexion	73
Tableau V-10 : Caractéristiques mécaniques du lot CS30° en flexion	74

Table des matières

I.	Int	rodu	ction	.3
I.1 Définition d'		Déf	finition d'un matériaux composite	.3
	I.2	Тур	pes de matériaux composites	.3
	I.3	Les	s constituants d'un matériaux composite	.4
	I.4	Les	s résines	.5
	I.4.	.1	Les résines thermodurcissables	.5
	I.4.	.2	Les résines de condensation	.7
	I.4.	.3	Les résines époxydes	. 8
	I.4.	.4	Les résines thermoplastiques	. 8
	I.4.	.5	Les résines thermostables	. 8
	I.4.	.6	Les résines métalliques	.9
	I.4.	.7	Les résines céramiques	.9
	I.5	Les	s renforts	.9
	I.5.	.1	Fibre de verre1	0
	I.5.	.2	Fibre de carbone1	1
	I.5.	.3	Les fibres de bore1	2
	I.5.	.4	Les fibres métalliques1	2
	I.5.	.5	Les fibres aramides 1	3
	I.5.	.6	Les fibres synthétiques thermostables1	3
	I.6	Car	ractéristiques des tissus1	3
	I.6.	.1	Notions sur les tissus1	3
	I.6.	.2	Les échelles des tissus 1	4
	I.7	Arc	chitectures des tissus 1	5
	I.7.	.1	Forme linéiques1	6
	I.7.	.2	Formes surfaciques 1	6
	I.7.	.3	Formes multidirectionnelles 1	8
	I.8	Les	s charges et additifs 1	9
	I.8.	.1	Les charges	20

I.8	.2	Les additifs	
I.9	Les	s procédés de mise en forme des matériaux composite21	
I.10	Mo	pulage par compression	
I.1	0.1	Moulage par injection de résine (RTM)	
I.1	0.2	Moulage par compression à froid23	
I.1	0.3	Moulage par compression à chaud24	
I.1	0.4	Moulages sans pression	
I.1	0.5	Moulage par projection simultanée	
I.1	0.6	Moulage sous vide	
I.11	Les	s domaines d'utilisation des matériaux composites27	
I.1	1.1	Construction aéronautique	
I.1	1.2	Construction automobile	
I.1	1.3	Secteur du bâtiment	
I.1	1.4	Loisirs et sports	
I.1	1.5	Autres domaines d'utilisation des composites	
I.12	Les	s avantages et les inconvénients	
I.13	Co	nclusion	
II. Int	rodu	ction	32
II.1	Pro	cédé de mise en forme	32
II.1	1.1	Les paramètres de mise en forme	33
II.2	Les	s principaux défauts de mise en forme	34
II.2	2.1	Déformation hors plan : défaut de boucle	34
II.2	2.2	Décohésion des fibres (glissement des fibres)	35
II.2	2.3	Défaut de plis	36
II.2	2.4	Ondulation dans le plan	37
II.3	L'u	sinage des matériaux composites	37
II.3	3.1	Introduction	37
II.3	3.2	Les défauts de perçage	38
II.3	3.3	Influence de la géométrie des outils sur l'usinage	38

II.3.4	4 Influence des défauts de perçage	
II.4	Conclusion	
III. In	troduction	41
III.1	Essais statiques	41
III.1	.1 Essai de traction	41
III.1	.2 Essai de compression	
III.1	.3 Essai de flexion	
III.1	.4 Essai de cisaillement	
III.2	Essais dynamique	
III.2	.1 Essai de résilience	
III.2	.2 Fatigue et endurance	
III.3	Essais de dureté	
III.3	.1 Dureté Rockwell et Rockwell superficiel (symbole HR)	
III.3	.2 Dureté Brinell (symbole HB)	
III.3	.3 Dureté Vickers (HV)	51
III.3	.4 Dureté Knoop (symbole HK)	
III.4	Conclusion	
IV. In	troduction	53
IV.1	Mécanismes d'endommagements	53
IV.1	.1 La rupture des fibres	54
IV.1	.2 Micro-fissuration	54
IV.1	.3 Fissuration matricielle	
IV.1	.4 Le délaminage	
IV.1	.5 Décohésion fibre/matrice	
IV.1	.6 Autre type d'engagement	
IV.2	Les différentes échelle d'observation	59
IV.2	.1 A l'échelle microscopique	59
IV.2	.2 A l'échelle mésoscopique	59
IV.2	.3 A l'échelle macroscopique	

IV.3 Co	onclusion	
V. Introdu	uction	61
V.1 M	atériaux utilise	61
V.1.1 Co	onstituants des matériaux	61
V.1.2 Pr	éparation des échantillons	
V.1.4]	Découpage des éprouvettes	
V.2 Es	sais mécanique	
V.2.1	Géométrie des éprouvettes de flexion trois points	
V.2.1	Machine de flexion utilisée :	
V.2.2	Résultats des essais de flexion	
V.3 Us	sinage des composites	
V.3.1	Matériaux utilisés	
V.3.2	Géométrie des éprouvettes d'usinage	
V.3.3	Machine utilisée pour l'usinage	
V.3.4	Les forets utiliser	
V.3.5	Les conditions d'usinage	
V.4 co	nclusion	

Liste des figures

Figure I-1 : Structure d'un matériau composite
Figure I-2 : Constituants d'un matériau composite4
Figure I-3 : Les types de résines5
Figure I-4 : Les types de renfort10
Figure I-5 : Fibre de verre10
Figure I-6 : Fibre de carbone
Figure I-7 : Armure de tissu13
Figure I-8 : Embuvage d'une mèche14
Figure I-9 :différent échelles des tissus15
Figure I-10 : Tissu mats16
Figure I-11 : Différent tissus18
Figure I-12 : Tissage 3D / tissage 4D19
Figure I-13 : Les charges (a) les microbilles de verre ;(b) le noir de carbone ;(c)poudre de silice
Figure I-14 : Moulage par le procédé RTM22
Figure I-15 : Moulage par compression à froid23
Figure I-16 : Moulage par compression à chaud24
Figure I-17 : Moulage au contact25
Figure I-18 : Moulage par projection simultanée
Figure I-19 : Moulage sous vide
Figure I-20 : Les domaines d'utilisation des matériaux composites
Figure II-1 : Exemple de mise en forme par un poinçon en forme tétraédrique
Figure II-2 : Différente forme de poinçon
Figure II-3 : Apparence des défauts de boucle
Figure II-4 : Apparence des défauts de glissement (décohésion)

Figure II-5 : Apparence des défauts de plis	36
Figure II-6 : Apparence des défauts d'ondulation	37
Figure II-7 : les différents défauts de perçage	38
Figure II-8 : Les différents outils pour l'usinage des matériaux composites	39
Figure III-1 : Essai de traction longitudinale	42
Figure III-2 : Essai de traction transversale	42
Figure III-3 : Essai de hors axes	43
Figure III-4 : Essai de compression	44
Figure III-5 : Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points	45
Figure III-6 : Courbe de contrainte-déformation : 1) matériau fragile ;	46
Figure III-7 : Essai de flexion à quatre points	47
Figure III-8 : Schéma de principe de l'essai de flambement	47
Figure III-9 : Essai de Charpy	49
Figure III-10 : Essai de Dureté ROCKWELL	50
Figure III-11 : Essai de dureté BRINELL	51
Figure III-12 : Essai de dureté Vickers	51
Figure III-13 : Essai de dureté KNOOP	52
Figure IV-1 : Schéma des différents endommagements dans les stratifiés	53
Figure IV-2 : Rupture des fibres	54
Figure IV-3 : Le phénomène des microfissures	55
Figure IV-4 : Fissure matricielle formée à partir de la coalescence des décohésions microfissures matricielles.	et 55
Figure IV-5 : Microdélaminage et délaminage diffus	56
Figure IV-6 : Le macro-délaminage	57
Figure IV-7: Décohésion entre la fibre et la matrice	57
Figure IV-8 : Les porosités	58

Figure IV-9 : L'excès de résine	59
Figure IV-10 : Pollution de surface	59
Figure V-1 : Domaine d'utilisation du matériau composite	61
Figure V-4 : Procédé de moulage au contact.	63
Figure V-7 : Scie à disque diamanté	64
Figure V-8: Géométrie des éprouvettes pour l'essai de flexion trois points	65
Figure V-9 : Machine de flexion zwick roell 2.5KN avec dispositif de flexion	66
Figure V-10 : Courbes contrainte/déformation du lot ACe	67
Figure V-11 : Courbes contrainte/déformation du lot ACi	68
Figure V-12 : Courbes contrainte/déformation du lot ATe	69
Figure V-13 : Courbes contrainte/déformation du lot ATi	69
Figure V-14 : Courbes contrainte/déformation du lot BC	71
Figure V-15 : Courbes contrainte/déformation du lot BT	72
Figure V-16 : Courbes contrainte/déformation du lot CS10°	73
Figure V-17 : Courbes contrainte/déformation du lot CS20°	74
Figure V-18 : Courbes contrainte/déformation du lot CS30°	74
Figure V-19 : Eprouvettes rompues du lot A	76
Figure V-20 : Eprouvettes rompues du lot B	76
Figure V-21 : Eprouvettes rompues du lot C	76
Figure V-22 : Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture pour le lot A	\ .77
Figure V-23 : Influence de l'anisotropie sur le module d'élasticité pour le lot A	77
Figure V-24 : Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture pour le lot E	3 .78
Figure V-25 : Influence de l'anisotropie sur le module d'élasticité E pour le lot B	78
Figure V-26 : Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture pour le lot A CS	4 et 79
Figure V-27 : Influence de l'anisotropie sur le module d'élasticité pour le lot A et G	CS.
	00

Figure V-28 : Géométrie des éprouvettes d'usinage81
Figure V-29 : Fraiseuse verticale semi-automatique
Figure V-30 : Les différents diamètres des forets utilisés
Figure V-31 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 250tr/min
Figure V-32 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 500tr/min
Figure V-33 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min
Figure V-34 : Perçage avec vitesse d'avance de 160mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min
Figure V-35 : Perçage avec vitesse d'avance de 250mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min
Figure V-36 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 250tr/min
Figure V-37 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 500tr/min
Figure V-38 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min
Figure V-39 : Perçage avec vitesse d'avance de 160mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min
Figure V-40 : Perçage avec vitesse d'avance =250mm/min et vitesse de coupe =710tr/min
Figure V-41 : Perçage avec vitesse d'avance =250mm/min et vitesse de coupe =710tr/min
Figure V-42 : Perçage avec vitesse d'avance de 250mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min
Figure V-43 : Perçage avec vitesse d'avance =250mm/min et vitesse de coupe =710tr/min
Figure V-44 : Apparence des coupeaux sous forme de petit grain

Figure V-45: Apparence des coupeaux sous forme de fils	88
Figure V-46 : Déchaussement des fibres de lot CS30°	88
Figure V-47 : Bonne qualité des trous usinés.	89

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Les caractéristiques des résines polyesters	6
Tableau I-2 : Les différents types de verres	11
Tableau I-3 : Propriétés mécaniques des fibres de verre type E et R	11
Tableau III-1 : Caractéristique de l'essai de traction longitudinale	
Tableau III-2 : Caractéristique de l'essai de traction transversal	
Tableau III-3 : Caractéristique de l'essai de traction hors axes	
Tableau IV-1 : Types d'endommagement dans les composites stratifiés	
Tableau V-1 : Différents lots d'éprouvettes d'essais.	
Tableau V-2 : Caractéristiques mécaniques du lot ACe en flexion	
Tableau V-3 : Caractéristiques mécaniques du lot ACi en flexion	
Tableau V-4 : Caractéristiques mécaniques du lot ATe en flexion	
Tableau V-5 : Caractéristiques mécaniques du lot ATi en flexion	
Tableau V-6 : Caractéristiques mécaniques du lot BC en flexion	
Tableau V-7 : Caractéristiques mécaniques du lot BT en flexion	
Tableau V-8 : Caractéristiques mécaniques du lot CS10° en flexion	
Tableau V-9 : Caractéristiques mécaniques du lot CS20° en flexion	
Tableau V-10 : Caractéristiques mécaniques du lot CS30° en flexion	74

Liste de symbole

- E : Module de Young d'une poutre. [MPa]
- σ_r : Contrainte de traction. [MPa]
- **E**_{tr}: Module en traction. [MPa]
- σ_e : Limite élastique. [MPa]
- El: Module de Young longitudinal. [MPa]
- **E**_T: Module de Young transversale. [MPa]
- **V**_{LT}: Coefficient de poisson.
- σ_{XX} : Contrainte normale. [MPa]
- σ_r : Charge à la rupture. [N]
- σ_f : Contrainte normale en flexion. [MPa]
- τ : Contrainte de cisaillement. [MPa]
- **F**: Charge appliquée. [N]
- W : Flèche de l'axe neutre. [mm]
- U : Energie absorbée par la rupture de l'éprouvette. [J]
- Acu : Résistance au choc Charpy. [KJ/m2]
- Mf : Taux massique des fibres. [%]
- Mm : Taux massique de la matrice. [%]
- **E** : Déformation relative.
- f : Flèche mesurée au cours de l'essai pour chaque charge. [mm]
- **P** : Charge. [N]

Introduction générale

La part des composites à renfort en fibres longues ne cesse de croitre dans les applications aéronautiques et. automobiles. Cet attrait est essentiellement motivé par les performances massiques élevées Cette dernière caractéristique, combinée à la conjoncture énergétique et environnementale actuelle, place les matériaux composites comme une solution incontournable dans la problématique d'allègement de pièces structurales, notamment dans les transports. Le développement des composites reste cependant freiné à l'heure actuelle car les performances et la maîtrise des procédés de fabrication sont loin d'avoir atteint le niveau de maturité de ceux des matériaux métalliques par exemple. Le triptyque Qualité/Coût/Cadence doit notamment être significativement.

L'étude et la maîtrise de l'élaboration des pièces composites fait l'objet d'intenses recherches Pour des applications à hautes performances, les renforts à fibres continues, par exemple tissés, sont très largement utilisés pour leur très bonne formabilité et la possibilité d'obtenir des pièces de forme complexe. Lors de la fabrication d'une pièce renforcée par des fibres en particulier, le renfort est d'abord mis en forme avant qu'une résine ne vienne figer la structure de la pièce. Si les études sur les matériaux composites finis sont assez nombreuses, celles sur les renforts secs et le préformage le sont beaucoup moins. Pourtant leur comportement est très particulier et les caractéristiques mécaniques des pièces finales ou le succès de la mise en œuvre en dépendent largement. La phase de préformage peut faire apparaître des défauts majeurs qui altèrent la qualité de la pièce finale, comme des plis voire des ruptures de mèches. L'orientation finale des fibres dans la pièce dépend de cette même première phase du procédé. La maîtrise de la mise en forme des renforts fibreux nécessite donc de connaître leur comportement mécanique et leurs mécanismes de déformation. A l'échelle macroscopique, les renforts présentent une forte raideur en tension dans le plan et c'est leur grande aptitude à se déformer de façon importante en cisaillement et en flexion qui permet leur mise en forme. Cependant, pour de fortes déformations, les rigidités correspondantes peuvent devenir importantes et entraîner l'apparition de défauts.

Le présent travail est axé sur l'élaboration et la caractérisation du comportement mécanique de matériaux composites à base de fibres de verre et de résine polyester. Des éprouvettes saines sans défauts ont été élaborées, ainsi que des éprouvettes avec défauts calibrés (cisaillement de renfort) pour but d'évaluer l'effet de ces défauts sur les propriétés induites du composite finale. La génération de cisaillement de renfort s'est faite sur le tissu taffetas avec des angles de cisaillement de 10°, 20° et 30°. Des essais de flexion trois points, ainsi que des opérations d'usinage (perçage) à différents paramètres de coupe ont été menés sur les différents matériaux. Les mécanismes d'endommagements engendrés et la qualité des perçages obtenue sont discutés et analyser

Pour bien présentée notre travail nous l'avons répartie comme suite, une partie théorique constituée de quatre chapitres ; le premier est consacré à une présentation générale des matériaux composites. Le second concerne les défauts de mise en forme des matériaux composite ainsi un bref aperçu sur l'opération d'usinage des composites. A travers le troisième chapitre nous expliquons les essais mécaniques qui nous permettent de déterminer les propriétés mécaniques dans chaque type de composites. Les mécanismes d'endommagement seront présentés au quatrième chapitre.

La deuxième partie est consacrée à une étude expérimentale axé initialement sur l'élaboration d'un composite stratifié à matrice polyester et fibres de verre de type E sous différentes architectures ensuite l'étude de leurs comportements aux sollicitations statiques par le biais des essais de caractérisations en flexion trois points. La réalisation des éléments en composites nécessitent des opérations d'usinage. Pour cela nous avons réalisé des perçages sur ces matériaux avec différentes paramètres d'usinage afin de voir la qualité des perçages pour ces matériaux. Nous terminons cette étude par une conclusion générale

I. INTRODUCTION

Les matériaux composites ont été utilisés depuis des décennies. Leurs avantages par rapport aux matériaux classiques résident dans leurs performances et leur légèreté. Ces atouts ont attiré de nombreuses industries comme l'aérospatial, l'automobile, les infrastructures, le sport...etc. Le développement des matériaux composites s'est fait de façon évolutive mais aussi révolutionnaire.

I.1 DEFINITION D'UN MATERIAUX COMPOSITE

Un matériau composite est par définition un matériau constitué de plusieurs matériaux non miscibles et avec une forte capacité d'adhésion (figureI-1). Le matériau possède des propriétés mécaniques que ses composants n'auraient pas eues indépendamment les uns les autre, Ils sont dans la plupart des cas constitués d'une ossature, appelé renfort qui assure la tenue mécanique de par sa plus grande rigidité par rapport à la matrice qui l'enrobe et assure la cohésion de l'ensemble [1].



Figure I-1 : Structure d'un matériau composite

I.2 TYPES DE MATERIAUX COMPOSITES

On distingue deux types de composite : les composite à grande diffusion et les composite à haute performance.

• Grande diffusion : Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes

(sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration du matériau (moulage par contact, SMC et injection). [2]

• Hautes performances : Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%. Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes : Drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM, beaucoup de procédés encore manuels, CMM, CMC. [2]

I.3 LES CONSTITUANTS D'UN MATERIAUX COMPOSITE

Un matériau composite est constitué d'une matrice et d'un renfort(figureI-2). La matrice est elle-même composée d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique, l'ensemble résine charges se comporte comme un matériau homogène. Le renfort constitué de fibres apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.



Figure I-2 : Constituants d'un matériau composite

Le type d'association matrice-renfort dépend des contraintes imposées au concepteur : caractéristiques mécaniques élevées, tenue en température, coût, résistance à la corrosion, etc.

I.4 LES RESINES

Il existe divers types de résines (figure I-3) :



Figure I-3 : Les types de résines

I.4.1 Les résines thermodurcissables

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites [3] sont par ordre décroissant en tonnage :

- Les résines polyesters insaturées : polyesters condensés, vinylester, dérivés allyliques.
- Les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furaniques.
- Les résines époxydes.
- Les résines polyesters

Les résines polyesters insaturées viennent de très loin en tête dans la mise en œuvre des matériaux composites. Leur développement est le résultat :

- D'un faible coût de production,
- De leur diversité offrant de multiples possibilités,
- D'une adaptation à des procédés de fabrication faciles à mettre en œuvre et à automatiser.

Nous retiendrons pour ces résines durcies les caractéristiques (tableau I-1) :

Chapitre I :

Masse volumique	1200 kg/m3
Module d'élasticité en traction	2,8 à 3,5 GPa
Module d'élasticité en flexion	3 à 4,5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	50 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	90 à 130 MPa
Allongement à la rupture en traction	2 à 5 %
Allongement à la rupture en flexion	7à9%
Résistance en compression	90 à 200 MPa
Résistance au cisaillement	10 à 20 MPa
Température de fléchissement sous charge	60 à 100 °C

Tableau I-1 : Les caractéristiques des résines polyesters

Parmi les avantages des polyesters insaturés, nous retiendrons :

- > Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé,
- > Une bonne stabilité dimensionnelle et la mouillabilité des fibres et des tissus,
- Une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température ambiante, etc.

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- > Une tenue médiocre en température : inférieure à 120 °C en service continu,
- > Une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs,

- Un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résines polyesters d'une couche de "gel-coat" de manière à les rendre étanches,
- > Une dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets,
- Une inflammabilité. [3]

I.4.2 Les résines de condensation

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques.

 Les résines phénoliques : sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite. Les caractéristiques de ces résines sont les suivantes :

Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance aux agents chimiques. [3]

- Les résines aminoplastes : ces caractéristiques sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :

La possibilité d'utilisations alimentaires ;

La possibilité de colorer les résines.

- Les résines furaniques : sont assez peu utilisées à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyesters. Parmi leurs avantages :

Un durcissement plus rapide que les résines phénoliques ;

Une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs.

Cette dernière caractéristique conduit à utiliser les résines furaniques dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques : citernes, tuyaux, bacs, etc. [3].

I.4.3 Les résines époxydes

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters) [3].

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

I.4.4 Les résines thermoplastiques

La famille des résines thermoplastiques est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou techno polymères). Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc. Les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection. Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide, le polycarbonate [3].

I.4.5 Les résines thermostables

Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200°C. Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi les résines thermostables, les résines bismaléimides et polyamides sont les plus utilisées. Les résines bismaléimides sont des résines dont le réseau est élaboré à des températures de 180 à 200°C. Les procédés de moulage sont identiques à ceux des composites à matrice thermodurcissable de type polyester ou époxyde. Les résines polyimides sont apparues sur le marché vers 1970. Ce sont des résines à haute résistance thermique, mais de prix très élevé. Ces résines permettent

d'obtenir des composites de résistance supérieure, à 250 °C, à la résistance de l'aluminium.

I.4.6 Les résines métalliques

La température maximale d'utilisation des polymères étant peu élevée, et le carbone risquant de s'oxyder à plus de 500°C, il faut parfois envisager d'utiliser des matrices dont l'inertie chimique est meilleure à plus haute température. Puisque certains métaux ou alliages métalliques peuvent éventuellement satisfaire à cette exigence, on a donc recours à ces matrices dans des conditions pareilles [4], et elles présentent des avantages :

- Des propriétés mécaniques supérieures ;
- Tenue en température élevée ;
- Résistance à l'attaque de certains solvants.

I.4.7 Les résines céramiques

Grâce à leurs propriétés intrinsèques (réfractaire, rigidité, résistance et bonne stabilité chimique), les céramiques sont potentiellement des matériaux capables de bien jouer le rôle de matrice dans des matériaux composites ; dans ce cas, les fibres de renfort ont principalement pour but d'améliorer la ténacité de telles matrices, ainsi que leur résistance aux chocs thermiques [4].

I.5 LES RENFORTS

Les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc. Toutefois, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées. Il existe divers types de fibres utilisées pour des applications particulières. Parmi ces fibres (figure I-4).



Figure I-4 : Les types de renfort

I.5.1 Fibre de verre

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètres), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie (figure I-5). Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites [3].



Figure I-5 : Fibre de verre

Différents types de verres filables

types	Caractéristiques générales
Е	à usages général ,bonne propriété électriques
D	hautes propriétés diélectriques
A	haute teneur en alcali
С	bonne résistance chimique
R ,S	haute résistance mécanique

Tableau I-2 : Les différents types de verres

Propriétés mécaniques des fibres de verre :

Les fibres de verre de type E et R sont les plus utilisés, leur caractéristique sont données dans le tableau I-3 :

Caractéristiques	Verre E	Verre R
Masse volumique ρ [kg/m3]	2600	2550
Module d'Young E _f [GPa]	73	86
Contrainte à la rupture σ_R [MPa]	3400	4400
Allongement à la rupture ε_R [%]	4.4	5.2
Coefficient de Poisson v	0.22	-

Tableau I-3 : Propriétés mécaniques des fibres de verre type E et R

I.5.2 Fibre de carbone

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres précurseurs utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylinitrique (figure I-6). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitassions. Le brai qui est un

Chapitre I :

résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone. Quelques exemples de fibres de carbone classiquement rencontrées : T300, T800, MR40, TR50, IM6, IM7, GY, M55J [5].



Figure I-6 : Fibre de carbone

I.5.3 Les fibres de bore

Diverses fibres de matériaux réfractaires ou céramiques peuvent être élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Actuellement, les fibres obtenues par ce procédé, et faisant l'objet d'une production, sont :

- Les fibres de bore (B) ;
- Les fibres de bore (B)-carbure de bore (B4C) ;
- Les fibres de bore-carbure de silicium, appelées BorSiC [5].

I.5.4 Les fibres métalliques

Comme les fibres d'acier, de cuivre, d'aluminium. Ces fibres sont utilisées avec des matrices métalliques pour leurs bonnes conductibilités thermique et électrique et leurs caractéristiques thermomécaniques élevées. Parmi leurs avantages :

- Produits à bas prix de revient ;
- Produits à haute isolation thermique ;
- Produits à bonne conductibilité thermique ou électrique ;
- Produits à haute absorption acoustique [5].

I.5.5 Les fibres aramides

Elles sont généralement connues sous le nom de Kevlar. Elles ont une bonne résistance aux chocs, à l'impact et à l'abrasion, mais leur utilisation est limitée par leur : faible résistance à la compression, à la flexion, au flambement, et elles sont sensibles au cisaillement inter laminaire (l'adhérence entre matrice et fibre est mauvaise où moyenne) [5].

I.5.6 Les fibres synthétiques thermostables

Les fibres synthétiques thermostables sont des fibres organiques obtenues par synthèse, et qui conservent leurs caractéristiques mécaniques à températures élevées. Associées à des résines thermostables, elles permettent d'obtenir des matériaux dont les caractéristiques mécaniques en température sont conservées. Les caractéristiques mécaniques de ces fibres sont toutefois nettement plus faibles que celles des fibres usuelles. Elles sont utilisées dans les isolants électriques et thermiques, les protections thermiques : boucliers de missiles, cônes de rentrée de véhicule spatial, etc.

I.6 CARACTERISTIQUES DES TISSUS

I.6.1 Notions sur les tissus

L'armure du tissu (figure I-7) résulte de l'entrecroisement de fils disposés dans le sens de la chaîne et de fils dans le sens de la trame.



Figure I-7 : Armure de tissu

Chaîne : ensemble des fils parallèles au sens d'avancement du tissu en cours de fabrication.

Trame : ensemble des fils perpendiculaires aux fils de chaîne, nommé aussi duites.

Suivant l'armure considérée, on définit un rapport d'armure qui constitue le plus petit motif répétitif dans le tissu (nombre de trames x nombre de chaînes).

Dans le cas des structures tissées les mèches présentent une ondulation. Cette ondulation est quantifiée par l'embuvage et le retrait exprimé en pourcentage et calculé à partir des longueurs de mèches et de tissu suivant l'équation.

 $embuvage ou \ retrait = \frac{longueur \ de \ la \ meche - longueur \ de \ tissu \times 100}{la \ longueur \ de \ tissu}$

Embuvage : différence entre la longueur de fil de chaîne extrait du tissu à l'état tendu et la longueur de ce même fil inséré dans le tissu (figureI.8).

Retrait : différence entre la longueur de fil de trame extrait du tissu à l'état tendu et la longueur de la même trame insérée dans le tissu.



Figure I-8 : Embuvage d'une mèche

L'embuvage et le retrait seront d'autant plus élevés que l'état d'ondulation du tissu sera important. Ce phénomène entraîne une modification du comportement du tissu comparativement à celles des fils constitutifs.

I.6.2 Les échelles des tissus

La compréhension du comportement des renforts de matériaux composites s'appuie sur des phénomènes physiques à des échelles très différentes(figureI.9).



Figure I-9 :différent échelles des tissus

> Une échelle microscopique : celle des fibres ($\approx 10\mu m$) qui tient compte de leurs mouvements et de leurs interactions mutuelles.

Une échelle mésoscopique : celle des mèches qui tient compte de leurs mouvements et des interactions entre les fils constituants la mèche. Une mèche est un assemblage de plusieurs milliers de fibres.

> Une échelle macroscopique : celle de la pièce.

La nature de cette pièce ou renfort peut être : \rightarrow A fibres courtes (0.1-1mm) : fibres sans orientations préférentielles pour des applications à faibles sollicitations mécaniques.

 \rightarrow A fibres longues (1-50mm) : fibres avec orientations préférentielles adaptées pour répondre à des sollicitations plus importantes.

Le comportement des fibres (rigidité forte en traction et faible en flexion), assemblées sous forme de mèches (alignement plus ou moins vérifié, interactions fibre-fibre), qui vont ensuite constituer la préforme (par tissage, tressage ou tricotage) de renfort (interactions mèche), va conditionner le comportement du matériau à l'échelle macroscopique. La différenciation entre ces différentes échelles est alors essentielle. La thèse s'inscrit sur une approche macroscopique des renforts pour composites.

I.7 ARCHITECTURES DES TISSUS

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- Sous forme linéique (fils, mèches, etc.) ;
- Sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats, etc.) ;
Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

I.7.1 Forme linéiques

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelques micromètres, et ne peuvent par conséquent pas être utilisées sous forme unitaire. Pour leur utilisation pratique, ces fibres sont réunies en fils ou en mèches de différentes formes. La fibre unitaire est généralement appelée filament élémentaire ou mono filament. Les mono filament sont ensuite réunis en fils ou mèches. Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique ou titre. Cette masse linéique est une mesure de la finesse des fils, et elle dépend du diamètre et du nombre de mono filaments [3].

I.7.2 Formes surfaciques

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types :

- \succ Les mats.
- Les tissus ou rubans.

I.7.2.1 Les mats

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle (figureI.10). Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines, suivant la mise en œuvre. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.



Figure I-10 : Tissu mats

La différence entre les mats à fils coupés et les mats à fils continus se situe essentiellement au niveau de leur propriété de déformabilité. Les premiers sont peu déformables alors que les seconds permettent d'obtenir des "emboutis" profonds par un allongement régulier du mat dans toutes les directions. Une des principales applications des mats à fils continus est le moulage entre moule et contre-moule, de pièces pouvant avoir des formes complexes, par compression, injection ou moulage sous vide.

I.7.2.2 Les tissus ou rubans

Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser (figureI-11). Il est constitué :

D'une chaîne, ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu.

D'une trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne.

Les tissus diffèrent par le type de fils utilisés (fils simples, mèches, etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et des fils de trame.

Les armures classiques utilisées :

- ➢ Toile ou taffetas.
- ➢ Sergé.
- ➤ Satin.
- Armure croisée.
- Armure unidirectionnelle [3].



Figure I-11 : Différent tissus

Taffetas : dans l'armure taffetas, les fils de chaîne et de trame s'entrecroisent alternativement, conduisant à un tissu très plat, stable, mais peu déformable.

Sergé : pour l'armure sergé, le nombre de fils chaîne et de fils trame qui s'entrecroisent peut varier, Ce type d'entrecroisement conduit à un motif répétitif du tissu sous forme de nervures diagonales.

Satin : l'armure satin est assez semblable à celle du sergé, mais le nombre de fils chaîne et de fils trame qui passent les uns sur les autres avant de s'entrecroiser est plus élevé.

Tissu croisé sans entrecroisement : dans un tissu croisé, deux nappes de fils sont superposées sans entrecroisement des fils, et réunies par une chaîne et une trame de fils fins, n'intervenant pratiquement pas sur les performances mécaniques du tissu. L'absence d'entrecroisement supprime les effets de cisaillement et donne un tissu très performant mais coûteux.

Tissu à armure unidirectionnelle : dans un tissu unidirectionnel, les fils sont alignés parallèlement à la direction chaîne, et ils sont réunis par un fil fin dans la direction trame. Ainsi, le tissu est unidirectionnel avec des performances élevées dans la direction chaîne.

I.7.3 Formes multidirectionnelles

Tresses et préformes

Chapitre I :

Il est possible de réaliser des tresses ou préformes par tissage cylindrique ou conique d'un tissu tubulaire. Les fils s'entrecroisent en hélice, dont la variation du pas permet d'ajuster la tresse à la forme qu'elle doit recouvrir. Il est ainsi possible de réaliser une pièce de révolution ayant un diamètre variable le long de son arc. Par ce procédé, divers tissus peuvent être obtenus en forme de "chaussettes" coniques, ogivales ou hémisphériques, utilisées pour satisfaire aux besoins de la construction aéronautique (cône de rentrée, tuyères, etc.).

Tissus multidirectionnels

Des tissages volumiques sont également utilisés, et caractérisés par le nombre de directions de tissage : 3D, 4D, etc. La structure la plus simple est celle du tissage 3D, où les fils sont disposés suivant 3 directions orthogonales. Dans un tissage 4D, les fils sont disposés suivant 4 directions (figure I-12). L'objectif est d'obtenir des matériaux composites isotropes.



Figure I-12 : Tissage 3D / tissage 4D

I.8 LES CHARGES ET ADDITIFS

Les charges et additifs sont ajoutés au composite afin de lui conférer de nouvelles propriétés et, ainsi, de lui permettre de remplir davantage de fonctions techniques. De manière générale, les charges et additifs jouent un rôle essentiel dans l'obtention des propriétés des polymères, qu'ils soient utilisés seuls ou comme matrices de composites ; il en existe de très nombreux types.

I.8.1 Les charges

Sont des particules solides que l'on disperse au sein de la matrice. Elles peuvent être minérales, organiques (végétales ou synthétiques) ou métalliques, et s'utilisent grosso modo de la même façon que dans les plastiques « traditionnels ». On peut par exemple rencontrer :

- Des microbilles de verre creuses, ajoutées en plus des renforts principaux, qui améliorent la tenue en compression tout en allégeant la matrice ;
- Du noir de carbone utilisé à la fois comme pigment noir, comme barrière anti-UV et comme antioxydant ;
- Des particules de silice pour rendre la matrice plus isolante (thermiquement, électriquement et acoustiquement), diminuer son retrait au moulage (figureI-13) ;
- Des poudres ou paillettes métalliques pour rendre la matrice conductrice de l'électricité et de la chaleur, pour améliorer son usinabilité, sa résistance aux chocs ou à l'abrasion...;
- Des billes thermoplastiques ajoutées dans les matrices thermodurcissables, pour améliorer leur ductilité et donc leur résistance à la fissuration... [6].



Figure I-13 : Les charges (a) les microbilles de verre ;(b) le noir de carbone ;(c)poudre de silice

I.8.2 Les additifs

Sont encore plus nombreux. Une classe d'additifs que l'on rencontre systématiquement est celle des agents d'interface, que l'on dépose sur les fibres pour les faire adhérer à la matrice. On rencontre également :

- Des stabilisants, qui retardent les dégradations dues à l'oxygène, aux UV ou encore à l'ozone
- Des ignifugeants ou retardateurs de flamme (la plupart des polymères sont inflammables !)
- Des agents de démoulage
- Des colorants...

Il est ainsi possible de conférer de nombreuses fonctions techniques au composite, et d'adapter finement ses propriétés aux besoins du concepteur. [6]

I.9 LES PROCEDES DE MISE EN FORME DES MATERIAUX COMPOSITE

Plusieurs techniques de fabrication sont disponibles pour mettre en œuvre des matériaux composite les principaux sont :

I.10 MOULAGE PAR COMPRESSION

I.10.1 Moulage par injection de résine (RTM)

Le procédé RTM est une méthode de mise en forme qui permet de fabriquer des pièces de forme complexe. La préforme en fibres de verre ou de carbone est placée dans le moule fermé, puis la résine est injectée sous une pression modérée (de l'ordre de 2 à 6 bars). La viscosité de la résine (thermodurcissable ou thermoplastique) doit rester faible pour que le polymère à l'état liquide imprègne correctement la préforme. La pièce polymérise dans le moule puis est démoulée. Il est également possible d'ajouter un système de chauffage afin de faciliter les phases d'injection et de cuisson. Les différentes étapes de fabrication sont visibles sur la figure (I-14).



Figure I-14 : Moulage par le procédé RTM

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées.

Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées [3].

Le procédé RTM attire depuis une dizaine d'années l'attention des industries automobile et aérospatiale. Le développement de cette nouvelle approche s'est accéléré dans les dernières années grâce à un effort de recherche important tant sur le plan académique que technologique. Il présente des avantages certains tels qu'une aptitude accrue à l'automatisation des cycles. C'est également un procédé permettant la réalisation de pièces de géométrie complexe grâce aux inserts et autres parties mobiles qui peuvent être incorporés aux moules. L'utilisation de moules rigides donne également une bonne reproductibilité en comparaison avec les autres procédés de mise en forme et le travail en moule fermé réduit de façon significative les émissions de gaz (VOCs). Enfin, la qualité du fini de surface est meilleure qu'avec les autres procédés. L'optimisation de la conception du moule a une influence importante sur la qualité de la pièce finale. L'imprégnation est difficile à assurer sur l'ensemble de la préforme lors de l'injection.

Chapitre I :

Finalement, le contrôle thermique du cycle de fabrication apporte aussi une part d'incertitude en raison de sa complexité.

Les outils nécessaires sont au nombre de trois :

1. un poinçon, contre-moule ayant la forme intérieure de la pièce finale à fabriquer ;

2. une matrice, constituant le moule et ayant la forme extérieure de la préforme composite ;

3. un serre-flan, dont la fonction est d'autoriser un glissement limité du tissu sur la matrice en le maintenant sur les bords.

Les résines époxydes sont les plus utilisées en RTM.

I.10.2 Moulage par compression à froid

Le moulage est effectué à basse pression (< 5 bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exo thermie de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70°C, en fonctionnement permanent. Le moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gel-Coat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contre-moule est fermé, puis pressé (Figure I-15).



Figure I-15 : Moulage par compression à froid

Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production. Ce procédé de moulage est adapté

à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est Inférieure au moulage à la presse à chaud [3].

I.10.3 Moulage par compression à chaud

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants. Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre moule (Figure I-16).



Figure I-16 : Moulage par compression à chaud

Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée. Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50 bars, la température des moules de l'ordre de 80 à 150 °C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule [3].

I.10.4 Moulages sans pression

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement.

I.10.4.1 Moulage au contact

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée "gel-Coat". Le moulage (Figure I-17) est ensuite effectué selon les opérations suivantes :



Figure I-17 : Moulage au contact

Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau. Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer. Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un déballage est effectué avec un rouleau cannelé. Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc. Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résine et de la température (de l'ordre de 10 heures). La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10

heures, aux environs de 80 °C) Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc. [3].

I.10.5 Moulage par projection simultanée

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule (Figure I-18). L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifier et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé [8].



Figure I-18 : Moulage par projection simultanée

I.10.6 Moulage sous vide

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique (Figure I-19). Après enduction de gel-Coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et débulle la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité.



Figure I-19 : Moulage sous vide

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre- moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes [3].

I.11 LES DOMAINES D'UTILISATION DES MATERIAUX COMPOSITES

Les composites sont largement utilisés dans l'industrie, parce qu'ils présentent de bonnes caractéristiques telles la rigidité, légèreté et résistance à des contraintes d'origine mécanique ainsi qu'à celles d'origine thermique [7]. Voici quel que domaines d'utilisation(figureI-20) :



Figure I-20 : Les domaines d'utilisation des matériaux composites

I.11.1 Construction aéronautique

Les composites de haute performance ont été longtemps confinés dans l'aéronautique civile à des pièces de structure secondaire (habillage intérieur, volets), plus rarement primaire et jamais à la voilure, car il se posait deux difficultés :

Coûts élevés par rapport à l'aluminium,

Risques de délaminage interdisant le vol sur les structures aérodynamiques chargées.

L'utilisation des matériaux composites dans les constructions aéronautiques entraîne un gain de poids substantiel. Leur emploi permet, à performances égales, des gains de masse variant de 10% à 20%. Les matériaux composites sont essentiellement utilisés pour la conception et réalisation des propulseurs à poudre des lanceurs de satellites et de leur tuyère d'éjection des gaz de propulsion, obtenue par bobinage de fibres de verre, de kevlar ou de carbone, afin de résister à la pression interne résultant de la combustion du propergol solide et aux efforts de lancement qui, dans certain cas, se traduisent par des chocs et des vibrations. Sur les avions commerciaux, les premiers appareils produits industriellement en grande série utilisaient essentiellement des alliages d'aluminium, de l'acier et du titane, aujourd'hui ; les avions commerciaux les plus récents utilisent en

masse encore 54% d'alliage d'aluminium, mais 20% de matériaux composites ont été introduits dans la structure, 13% d'acier, 6% de titane et 7% de matériaux divers. [7]

I.11.2 Construction automobile

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes, mais ne s'est généralisé que très récemment, chez les grands constructeurs, cette utilisation a permis de réduire substantiellement sa consommation de carburant grâce à l'économie du poids obtenue en remplaçant des pièces conventionnelles par de nouveaux éléments moulés en une seule pièce renforcée de fibre à haute résistance. Les composites sont choisis pour la conception de ressorts à lames pour des grands camions. Ce sont des pièces de suspension routières très sollicitées, utilisées par les véhicules de gros tonnage et dont la lame secondaire, assurant 80% de la fonction suspension en évitant des ruptures brutales. [7]

I.11.3 Secteur du bâtiment

Les composites ont relativement peu pénétré le secteur du bâtiment notamment du fait :

- D'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels.
- D'une relative méconnaissance des architectes et bureaux d'études vis-à-vis des composites.
- D'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité).
- Les qualités des composites (légèreté, résistance au feu, résistance mécanique et chimique), permettent de prévoir un développement prometteur. [7]

I.11.4 Loisirs et sports

De pars leur légèreté, leur bonne tenue à la fatigue statique et dynamique et leur stabilité dimensionnelle, les matériaux composites sont des matériaux idéaux pour la fabrication et la conception de très nombreux articles de sports et de loisirs tel que les raquettes de tennis, les cannes à pêche et de hockey...., Les constructeurs de matériels de sport et loisirs ont depuis longtemps adopté les composites, ces nouveaux matériaux leur ont permis de faire preuve d'une grande créativité, tout en présentant des propriétés mécaniques intéressantes qui ont, dans une large mesure, été à l'origine du développement récent des sports de glisse modernes. [7]

I.11.5 Autres domaines d'utilisation des composites

L'adaptation de composites, dans l'industrie maritime, permet de diminuer le poids des structures de bateaux rapides (patrouilleurs, bateaux d'intervention ou de service) tout en ayant une résistance suffisante afin d'avoir pour résultat soit une augmentation de la vitesse pour une puissance donnée, soit une meilleure rentabilité pour la même vitesse ou soit l'utilisation d'une motrice moins puissante et moins onéreuse. L'équipement industriel (boîtes de stockage, isolation) et l'équipement électronique, représentent déjà 26% du marché des composites à matrice organique. En électronique, les boîtiers céramiques pour microprocesseurs d'Egide, récemment introduits au Nouveau Marché, sont utilisés dans le monde entier. [7]

I.12 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à leur :

- Légèreté.
- Résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- Insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit [8].

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.
- L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que

- La maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène.
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous-entend une très bonne connaissance des constituants mis en place.
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites. De plus, dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très couteux et fournissent une matière de faible qualité.

Ces inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs à orienter leurs recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables [8].

I.13 CONCLUSION

Ce chapitre a fait l'objet de généralités sur les matériaux composites, leurs propriétés physiques et mécaniques. L'utilisation des matériaux composite a connus une croissance rapide ses dernières années dans plusieurs secteurs (aviation, automobile ...etc.). Malgré tous les avantages qu'on a cité sur les matériaux composites, On recentre plusieurs défauts pendant la mise en forme et l'usinage de ses Matériaux. Ces défauts feront l'objet de notre travail dans le prochain chapitre.

II. INTRODUCTION

L'étude sur la faisabilité de mettre en œuvre des renforts secs pour composites à base de fibres de verre a mis en évidence un certains nombres de défauts, liés à la fois aux caractéristiques du renfort (architecture, composition, matière) mais également aux paramètres de mise en forme (pressions, orientation de renfort et géométrie du poinçon). Ces défauts posent des interrogations sur l'intégrité des pièces finales. Ces défauts peuvent être en partie observés et corrigés en agissant sur les paramètres procédés comme les pressions appliquées [9].

Le processus de mise en forme d'un matériau composite conduit à l'apparition de défauts locaux irréversibles. Les composites présentent toujours les mêmes défauts. Ces derniers ne sont pas présents uniformément dans la structure. Ils dépendent du type de sollicitation, mais aussi de l'orientation et de la proportion des renforts, du fait de l'hétérogénéité de leur structure, il n'existe pas de mécanisme unique mais plusieurs types de dégradations différentes par leur nature et leur mode de développement.

II.1 PROCEDE DE MISE EN FORME

Le poinçon est mis en mouvement ascendant vertical par un vérin électrique ou pneumatique dont la vitesse peut être paramétrée. Cette mise en mouvement se fait en général à vitesse faible pour maintenir au maximum l'intégrité du renfort. Le poinçon vient ensuite imposer sa forme au renfort, maintenu tout le long de cette phase de préformage par serres-flan (figureII-1). La configuration des serres-flan est adaptée à chaque type de poinçon afin de maintenir au mieux leurs contours.



Figure II-1 : Exemple de mise en forme par un poinçon en forme tétraédrique

Chapitre II :

Les poinçons disponibles peuvent être considérés comme ayant une géométrie complexe. Le tétraèdre, le prisme et la boîte en font partie (figureII-2). La complexité vient du fait que ces géométries imposent au renfort des modifications conséquentes d'orientation de par les courbures induites par les différentes arêtes. Les points triples (points de jonction de trois arêtes) génèrent également des difficultés de préformage.



Figure II-2 : Différente forme de poinçon

Or, il n'est pas rare qu'un certain nombre de défauts, observables visuellement, soient générés au cours de l'emboutissage. Certain de ces défauts sont connus et en plus de ne pas être spécifiques aux renforts, n'ont pas forcément été caractérisés.

II.1.1 Les paramètres de mise en forme

La mise en forme des renforts fibreux est un procédé complexe à mettre en œuvre car la qualité de la pièce finale est fortement influencée à la fois par les paramètres matière et procédé. Ces paramètres sont multiples et sont, à un certain degré, maîtrisable :

Matière :

- Armure du renfort (taffetas, satin, sergé)
- Architecture des mèches (ruban, torsadées...)
- Dimensions des mèches (épaisseur, largeur)
- Composition des mèches (100%, comêlé, traitements)
- Masse linéique (nombre de tex), surfacique
- Caractéristiques mécaniques de la mèche (tension, cisaillement...)
- Equilibrage et taux d'embuvage du renfort

Procédé :

- Orientation des fibres par rapport au poinçon
- > Géométrie du poinçon (courbes, arêtes, points triples, ...)

- Dimensions du poinçon (mm, cm, m)
- Vitesse d'emboutissage
- Pressions des serre-flans (uniforme ou non)
- Profondeur de préformage
- Positions, dimensions et géométrie des serres-flan
- ➢ Forme initiale du flan

II.2 LES PRINCIPAUX DEFAUTS DE MISE EN FORME

Ces défauts ce manifeste sous plusieurs formes :

II.2.1 Déformation hors plan : défaut de boucle

Localement, des surépaisseurs de matière apparaissent au centre de certaines faces et le long de certaines arêtes qui s'assimile à du flambement hors plan des mèches qui constituent le renfort, et demeure très difficile à supprimer (FigureII.3). Ce phénomène crée alors une inhomogénéité en épaisseur de la préforme. Des mesures manuelles ont évalué des hauteurs de boucles de l'ordre de quelques millimètres (relevés maximums à 3mm).



Figure II-3 : Apparence des défauts de boucle

Ces défauts proviennent probablement de l'architecture des mèches qui constituent les renforts. En simplifiant l'apparition du phénomène, les boucles apparaissent au niveau des points de flexion des mèches qui subissent ce défaut. A proprement parler, l'apparition des

boucles semble liée aux écartements entre mèches. Lorsque les trames sont verticales, le mouvement des chaînes est restreint par le serrage dans le sens trame (peu d'espace entre les mèches), ce qui empêche la formation des boucles. Dans le cas contraire les espacements entre chaînes favorisent la mobilité des trames qui bouclent. L'architecture du renfort et notamment le contrôle du serrage du renfort est un point clé dans l'apparition du défaut. En se basant sur les observations faîtes précédemment, un renfort sans espacements entre mèches dans les deux directions contribuerait à la réduction voire la suppression du bouclage. Enfin les boucles apparaissent lorsqu'une courbure des mèches est observée.

Ce type de défaut ne doit pas être négligé car il apparaît dans la zone utile de la préforme et ses conséquences sont encore inconnues sur le comportement final du composite. De plus des essais d'emboutissages ont par la suite été effectués sur d'autres architectures de renfort telles que des sergés 2x2 [CAP12] ou des taffetas équilibrés géométriquement et sans espacements entre mèches dans le cadre de la thèse débutée en 2012, au laboratoire PRISME d'Orléans, par Emilie Capelle. Il est apparu que le sergé favorisait la création du défaut et que les taffetas optimisés contribuent à l'annihilation des boucles [9].

II.2.2 Décohésion des fibres (glissement des fibres)

C'est un autre phénomène observé lors du préformage des renforts se rapporte aux glissements entre les réseaux de mèches. Il est observé à différents endroits de la préforme (figureII-4).



Figure II-4 : Apparence des défauts de glissement (décohésion).

A noter que ce défaut correspond à une modification irréversible de la structure tissée. Il n'est évidemment pas acceptable pour la conformité de la pièce finale, créant des zones sans fibres difficilement injectable. Ces glissements du réseau de mèches ont été observés sur plusieurs géométries et pour des renforts à base de fibres de verre. Traités comme une perte de cohésion du tissage, leur apparition est la cause de fortes tensions dans les mèches et de la faible cohésion du renfort [9].

II.2.3 Défaut de plis

Le défaut de plissement est également un défaut issu des procédés de fabrication. Il est définer comme étant des ondulations hors plan, ou dans le plan, d'un ou plusieurs plis du composite. Cette ondulation est caractérisée essentiellement par des paramètres géométriques qui sont l'amplitude A, la largeur L et l'angle de désalignement maximum θ (figureII-5).



Figure II-5 : Apparence des défauts de plis.

Le défaut de plissement est également qualifié de désalignement des fibres dans un pli par rapport à leur orientation initiale. Ce type de défaut est devenu assez commun dans les procédés utilisant des techniques d'infusion qui permettent de fabriquer des grandes pièces.

Il existe 3 types de plissements [10] comme le précise Hallander et al. [Hallander et al., 2013] : le « wrinkle », le « waviness » et le « in-plane waviness ».

Le plissement dit « wrinkle » est un plissement hors-plan des plis qui touche plusieurs plis dont un des plis extérieurs et il a ecte donc le stratifié dans l'épaisseur mais aussi en surface.

Le plissement dit « waviness » est aussi un plissement hors-plan des plis qui touche un ou plusieurs plis mais seulement confinés dans l'épaisseur du stratifié (les deux plis extérieurs ne sont donc pas a ectés).

Le dernier type de plissement est le plissement « in-plane waviness » qui correspond à un plissement « waviness » mais dans le plan des plis.

Cependant, il est à noter que le type de plissement le plus commun dans la fabrication est le plissement hors-plan « wrinkle ». Le défaut dépolissement peut être causé par déférents

facteurs, et les mécanismes impliqués dans sa formation dépendent du procédé de fabrication. Cela peut être la conséquence d'un léger excès de renfort dans un ou plusieurs plis par rapport à la surface disponible mais aussi d'un mauvais placement des plis lors de la phase de drapage surtout dans la fabrication de pièces qui demandent un drapage manuel.

II.2.4 Ondulation dans le plan

Le défaut d'ondulation est également un défaut issu des procédés de fabrication. Il est défini comme étant des ondulations dans le plan, d'un ou plusieurs plis du composite [10] voir si dessous (figureII-6).



Figure II-6 : Apparence des défauts d'ondulation

II.3 L'USINAGE DES MATERIAUX COMPOSITES

II.3.1 Introduction

Le domaine de la fabrication des matériaux composite nécessite d'effectuer des opérations de perçage pour diverses utilisations, pour se là nous somme intéresser à étudier les phénomènes qui se produit lors de cette opération. L'opération d'usinage en perçage est la plus utilisée comme opération de parachèvement des structures en matériaux composites. Elle permet entre autres de réaliser des orifices nécessaires à l'assemblage des éléments, ou permettant le passage de câbles. Percer signifie couper des fibres, ce qui diminue la résistance mécanique du matériau, et de plus, peut apporter des endommagements au voisinage de la zone usinée (arrachement de fibres, délaminage extérieur ou interne - séparation de couches).

II.3.2 Les défauts de perçage

L'utilisation de forets pour percer des matériaux composites à fibres longues crée des dommages spécifiques à l'entrée du trou, sur la paroi du trou et à la sortie du trou(figureII-7). Ces différents dommages, plus particulièrement les délaminages, nuisent à la durée de vie des

Chapitre II :

assemblages. Ces défauts sont directement liés au caractère anisotrope du matériau, à la géométrie de l'outil et aux conditions de coupe [18].



Figure II-7 : les différents défauts de perçage

Le défaut situé en entrée de trou

A l'entrée du foret dans la matière, l'angle d'hélice du foret et l'angle de coupe tendent à arracher le premier pli, pouvant occasionner un délaminage en entrée du trou. Ce défaut est considéré comme l'un des défauts majeurs de perçage.

Le défaut situé sur la paroi du trou

On relève qu'il existe plusieurs défauts remarquables sur la paroi inter de trou : le défaut de circularité ; le défaut de rugosité ; les arrachements localisés de la matrice ; les arrachements de fibres ; la dégradation thermique de la matrice.

Le défaut situé en sortie de trou

Le délaminage en sortie de trou est le défaut généralement considéré comme le plus important lors du perçage de composites. Ce phénomène résulte du fait que les derniers plis ne sont plus capables de résister à l'effort de poussée du foret.

II.3.3 Influence de la géométrie des outils sur l'usinage

Dans le cas du détourage, on a constaté la présence d'un nombre considérable de géométries d'outil. Ces géométries développées initialement pour l'usinage des matériaux métalliques et/ou bois, semblent donner des résultats acceptables lors de l'usinage des matériaux composites sous couvert d'y apporter quelques modifications.



Figure II-8 : Les différents outils pour l'usinage des matériaux composites

Sur la figure II-8, on montre quelques outils préconisés pour le détourage des matériaux composites. L'outil avec un angle d'hélice droit (figure II.8-a) permet d'assurer un usinage de très bonne qualité (pour la finition). Cependant avec un angle d'hélice nul, il ne dispose d'aucune possibilité pour évacuer les copeaux, ce qui conduit à une rupture prématurée de ce type de fraise. Les outils représentés sur les figures II-8-b et II-8-c se caractérisent par un angle d'hélice montant ou descendant. Ces derniers génèrent des forces de poussées suivant l'axe de l'outil, dont le sens est piloté par la direction de l'angle de l'hélice. Dans ce cas, les efforts de coupe provoquent l'apparition du phénomène de délaminage sur les bords libres. Ce phénomène peut être évité en utilisant un outil à double hélice représenté (figure II-8-d). On note que les outils limes (figures II-8-e et II-8-f) sont largement utilisés pour le détourage des matériaux composites. En effet, les pointes coupantes sont disposées de telle sorte d'éviter les stries d'usinage. L'inconvénient d'une telle géométrie reste la rupture prématurée des pointes et le colmatage facile entre les différentes pointes. Toutefois, on peut pallier ces deux problèmes en utilisant des faibles profondeurs de passe [12].

II.3.4 Influence des défauts de perçage

Le mode de perçage des trous peut générer dans les plaques stratifiées des défauts comme par exemple : arrachements de fibres et de la matrice en bord de trou, délaminages, rugosités sur la paroi du trou, dégradations thermiques dans la résine. Ces défauts peuvent entraîner la diminution de la résistance mécanique des stratifiés sollicités en matage. A montré l'influence des dommages dus au perçage sur la tenue en statique et en fatigue des stratifiés [13].

II.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a observés que les défauts génèrent des modifications irréversibles de la structure de la préforme. Les glissements conduisent à la formation de zones étendues sans renfort. Ces zones, qui ne peuvent pas être comblées par l'imprégnation, contribuent à l'affaiblissement de la structure du composite.

L'architecture de la mèche joue également un rôle sur le défaut de boucles. Les mèches plates présentent une forte rigidité en flexion qui leur impose de se déformer hors plan, contrairement aux mèches retordues.

III. INTRODUCTION

Pour mieux comprendre le comportement d'un matériau composite en service, il est nécessaire de connaitre les caractéristiques mécaniques de ce matériau ; afin de caractériser celui-ci dans des conditions bien précises, nous avons recours à un certain nombre d'essais. Car toute conception d'une nouvelle structure nécessite une connaissance du comportement mécanique des matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés mécaniques. Les propriétés mécaniques sont mesurées par des essais mécaniques normalisées à l'aide d'éprouvette standard soumis à des conditions de mise en charge bien définie. Une éprouvette d'essais est prélevée dans le matériau a caractérisé et usiné a des dimensions normalisées. Les essais mécaniques sont nombreux, voisez quelque type les plus utilisées :

III.1 ESSAIS STATIQUES

III.1.1 Essai de traction

L'essai de traction permet à lui seul de définir les caractéristiques mécaniques courantes des matériaux. La seule connaissance des paramètres de l'essai de traction permet de prévoir le comportement d'une pièce sollicitée en cisaillement, traction, compression et flexion [20]. Cet essai permet de déterminer le comportement mécanique d'un matériau :

- la limite élastique σ_e .

- la contrainte à la rupture σ_r .

-le module de Young E.

-le coefficient de Poisson v.

-ainsi que la contrainte maximale de traction $\sigma_{tr max}$).

Il consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture.

III.1.1 Traction longitudinale

La charge F_1 est exercée suivant la direction des fibres (composite unidirectionnel) ou suivant la direction de chaîne (composite tissu) sur la section droite S1 du matériau (figure III-1) [21].



Figure III-1 : Essai de traction longitudinale

La contrainte normale :	$\sigma_1 = \frac{F_1}{S_2}$
Les déformations longitudinales :	$\boldsymbol{\epsilon_{11}} = \frac{\Delta \mathbf{l_1}}{\mathbf{l_1}}$
Les déformations transversales	$\varepsilon_{22} = \frac{\Delta L_2}{l_2}$
Le module longitudinal :	$\mathbf{E}_{\mathbf{l}} = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}}$
Le coefficient de poisson :	$V_{lt} = \frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}}$

Tableau III-1 : Caractéristique de l'essai de traction longitudinale

III.1.1.2 Traction transversale

Dans le cas d'une traction transversale (figureIII-2), la charge F2 est exercée suivant la direction transverse aux fibres ou suivant le sens trame sur la section droite du matériau.



Figure III-2 : Essai de traction transversale

La contrainte normale	$\sigma_{22} = \frac{F_2}{S_2}$
Le module de Young transversal	$\mathbf{E}_{\mathrm{T}} = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}}$
coefficient de poisson	$V_{LT} = \frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_{22}}$

Tableau III-2 : Caractéristique de l'essai de traction transversal

III.1.1.3 Traction hors axes

L'essai de traction hors axes usuellement utilise pour mesurer le module de cisaillement, est un essai effectue à 45° de la direction des fibres (figureIII-3). La charge F est exercée suivant la direction X sur la section du matériau [22].



Figure III-3 : Essai de hors axes

Lors d'un essai de traction hors axes sur composites unidirectionnels, le matériau subit un état de contraintes planes (contraintes longitudinales, transversales et de cisaillements).

Les caractéristiques sont données dans le tableau III-3 :

La contrainte normale	$\sigma_{XX} = \frac{F}{S}$
Le module de Young dans la direction x	$\mathbf{E_{45}} = \mathbf{E_{XX}} = \frac{\sigma_{XX}}{\varepsilon_{XX}}$
Le module de cisaillement longitudinal	$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} + 2\frac{V_{LT}}{E_L}$

Tableau III-3 : Caractéristique de l'essai de traction hors axes

III.1.2 Essai de compression

L'essai consiste à appliquer à vitesse constante un effort de compression sur une éprouvette disposée verticalement (figureIII-4). Il détermine la contrainte à la rupture en compression. Mais pour cet essai la résistance du matériau composite unidirectionnel dépend

de multiples facteurs tels que la fibre, la matrice, la résistance interfaciale et le taux de vide [23].



Figure III-4 : Essai de compression

L'essai de compression détermine la contrainte à la rupture en compression qui est définie par la formule suivante :

$$\sigma_{\rm r} = \frac{F_{\rm r}}{Lh}$$

Avec :

Fr : charge à la rupture.

L : longueur de l'éprouvette.

h : épaisseur de l'éprouvette

III.1.3 Essai de flexion

L'essai de flexion est le plus employé pour déterminer les caractéristiques mécaniques et le comportement des matériaux composites est en fait la flexion. Ce choix correspond souvent aux sollicitations auxquelles sont soumises les pièces réelles, mais surtout offre l'avantage de diminuer considérablement les difficultés de réalisation de l'essai par l'utilisation d'éprouvettes simples sans avoir la difficulté du collage des étalons ni le problème rencontré lors du serrage des mors dans le cas des essais de traction (sur contraintes locales conduisant à des ruptures prématurées de l'éprouvette). De plus, selon que l'opérateur travaillera en flexion 3 points ou 4 points ou par flambement et, suivant la distance entre appuis, il pourra privilégier un mode de rupture en traction-compression ou en cisaillement, les essais de flexion sur les composites sont réalisés suivant les normes T57- 105, T 57-302,

ASTM D 790, JIS K 7074 ou futures normes EN ISO 14125. Ces essais sont largement utilisés dans les milieux industriels en raison de leur simplicité [23].

III.1.3.1 Essai de flexion trois points

L'essai de flexion est un test mécanique qui consiste à placer une barre rectangulaire sur deux appuis et d'appliquer un effort ponctuel au centre, comme illustré à la figure (III-5)



Figure III-5 : Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points.

Avec :

- F : charge appliquée.
- r_1 : rayon de cylindre de la panne (=5mm).
- r₂ : rayon des cylindres d'appuis (=2,5mm).
- L : longueur entre appuis.
- l : longueur totale de l'éprouvette.
- h : hauteur de la poutre.
- b : largeur de la poutre.

L'essai de flexion trois points sollicite de façon symétrique, une face de l'éprouvette soumise à une contrainte de traction et l'autre face à une contrainte de compression. Il existe aussi une troisième contrainte de cisaillement, sa valeur maximale est située au niveau de la ligne neutre, et qu'en fonction de la géométrie de l'éprouvette d'essai, il y a compétition entre une rupture en flexion et une rupture en cisaillement, et la courbe de contrainte – déformation est donnée par la (figure III-6).



Figure III-6 : Courbe de contrainte-déformation : 1) matériau fragile 2) matériau Ductile

La variation de la contrainte normale σ_f est donnée par la relation :

$$\sigma_{\rm f} = \frac{+3 Fl}{2bh^2}$$

Et la contrainte de cisaillement inter laminaire τ est donnée par la relation :

$$t = \frac{3\sigma}{4bh}$$

Pour la raison de symétrie, les réactions aux appuis sont :

$$RA = RB = F/2$$

La flèche est maximale au centre de la poutre, c'est-à-dire pour la valeur :

$$F_{max} = FL^3 / 48EI$$

L'expression de la déformation :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{6Fh}{L^2}$$

III.1.3.2 Essai de flexion quatre points

L'essai de flexion à quarte points consiste à exercer entre les appuis deux points d'applications de la charge, distants de L, (figureIII-7) où l'effort tranchant est nul dans la zone des contraintes maximales [24].



Figure III-7 : Essai de flexion à quatre points

Le module de flexion :

La contrainte de flexion s'exprime :

$$\sigma_{fl} = \frac{4FL}{4bh^2}$$
$$E_{fl} = \frac{11L^3F}{64bh^3f}$$

III.1.3.3 Essai de flexion par flambement

L'essai de flexion par flambement, est de plus en plus utilisé pour la caractérisation du comportement en flexion des matériaux composites (unidirectionnels, stratifiés, tissés.). Par rapport à l'essai de flexion trois ou quatre points, Il présente l'avantage de ne pas impliquer de contact dans les zones où la flexion est maximale. Il permet ainsi de s'affranchir des dégradations Parasites, discutées plus haut, provenant de la concentration de contrainte au contact. (La figureIII-8) montre le schéma de principe de l'essai de flexion par flambement postcritique.



Figure III-8 : Schéma de principe de l'essai de flambement

L'essai consiste à imposer à une éprouvette parallélépipédique articulée à ses deux extrémités une sollicitation de compression axiale. Pour une éprouvette élancée, une instabilité élastique se produit bien avant qu'une dégradation sous l'effet des contraintes de Compression n'apparaisse. Cette instabilité se traduit par un fléchissement de grande amplitude au-delà d'un seuil caractérisé par la charge critique. L'analyse de la répartition des efforts intérieurs, montre clairement les avantages de l'utilisation de cette méthode :

- la section centrale de l'éprouvette est la plus fortement sollicitée en flexion. Elle est exemptée de sollicitation de cisaillement liée à l'effort tranchant,

- le moment de flexion est nul aux extrémités de l'éprouvette. Il n'y a donc pas de risque de rupture liée à un moment d'encastrement.

III.1.4 Essai de cisaillement

Les essais de cisaillement utilisés pour l'étude des matériaux composites permettent de connaitre le comportement au cisaillement (contrainte et module de cisaillement) soit selon une sollicitation dans le plan des couches (cisaillement inter laminaire), soit selon une sollicitation perpendiculaire aux couches.

L'essai s'effectue sur une éprouvette placée dans un bâti de cisaillement constitué de deux demi boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi boîtes constitue un plan de glissement préférentiel correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette [25].

III.2 ESSAIS DYNAMIQUE

III.2.1 Essai de résilience

L'essai de résilience a pour objet de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture. Pour la détermination de cette énergie, on a le choix entre plusieurs types d'essais dont le plus utilisé est celui de Charpy qui présente des avantages comme la simplicité de sa mise en œuvre(figureIII-9). L'essai de résilience a pour objet de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture. Pour la détermination de cette énergie, on a le choix entre plusieurs types d'essais dont le plus utilisé est celui de Charpy qui présente des avantages comme la simplicité de sa matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture. Pour la détermination de cette énergie, on a le choix entre plusieurs types d'essais dont le plus utilisé est celui de Charpy qui présente des avantages comme la simplicité de sa mise en œuvre [26].



Figure III-9 : Essai de Charpy

Au cours de cet essai, l'éprouvette est rompue par choc sous l'effet d'une masse pendulaire (mouton pendule), la différence (h0-h1) caractérise l'énergie absorbée par la rupture de l'éprouvette. Cette énergie est appelée résilience du matériau et s'exprime en Joules/cm² ou tout simplement en Joules lorsque l'éprouvette est normalisée.

III.2.2 Fatigue et endurance

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue, la modification des propriétés des matériaux dû à l'application de cycle d'effort dont la répétition peut conduire à la rupture [27]. L'étude de phénomène est d'une grande importance car la contrainte de rupture en fatigue est très inférieure à celle de la rupture en traction, pour certains matériaux cette contrainte peut même être inférieure à leur limite élastique. Il y a trois types d'essais de fatigue : traction compression, torsion alternée et flexion alternée (le plus classique) et flexion pure alternée M_F .

Dans l'essai de flexion alternée on a :

- L'amplitude maximale de la contrainte σ_a et de la déformation moyenne ε_a .

- La valeur moyenne de la contrainte σ_m et de la déformation moyenne ε_m .

- Le rapport des contraintes maximale et minimale et le paramètre (R) :

$$\sigma_{a} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$
$$\sigma_{m} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

III.3 Essais de durete

Le contrôle de dureté peut paraître pour certains comme abstrait et d'un abord difficile. Maîtriser le vocabulaire et savoir lire une valeur de dureté permet de démystifier le sujet. Avant de développer les différents principes d'essai, ROCKWELL, BRINELL, VICKERS, SHORE et LEEB, il est important de savoir définir un essai de dureté pour comprendre et être compris de son interlocuteur [28].

III.3.1 Dureté Rockwell et Rockwell superficiel (symbole HR)

Charges : 15 à 150 Kgf (147 à 1471 N) – Norme DIN EN ISO 6508.- ASTM E18 C'est l'essai le plus utilisé car le plus simple à mettre en œuvre. Il s'agit de mesurer à l'aide d'un comparateur analogique ou à lecture digitale, la différence de pénétration entre une précharge et une charge d'un pénétrateur en diamant cône à 120° ou d'une bille diamètre : 1/16'' - 1/8'' - 1/4''(figureIII-10) [28].



Figure III-10 : Essai de Dureté ROCKWELL

III.3.2 Dureté Brinell (symbole HB)

Charges les plus courantes : 15.6 à 3000 Kgf (153.2 à 29430 N) - Norme DIN EN ISO 6506.

L'essai Brinell est principalement utilisé pour contrôler la dureté des aciers non traités, les fontes, l'aluminium, le cuivre, etc...

L'essai consiste à appliquer une charge pendant un temps déterminé sur une bille, et de mesurer à l'aide d'une loupe graduée le diamètre de l'empreinte(figureIII-11). Le nombre Brinell est le résultat du rapport de la charge appliquée et de la surface de la calotte sphérique de l'empreinte. Les diamètres des billes les plus utilisées sont 2.5 - 5 - 10 mm Des tables de conversion entre le diamètre de la bille, le diamètre de l'empreinte, et la charge, permettent de déterminer directement la dureté Brinell [28].



Figure III-11 : Essai de dureté BRINELL

III.3.3 Dureté Vickers (HV)

Charges : quelques grammes à 120 Kgf (1177 N) – Norme DIN EN ISO 6507.

Comme pour l'essai Brinell on calcule la surface de l'empreinte. Dans le cas de l'essai Vickers on utilise un seul pénétrateur en diamant de forme pyramidale avec un angle de 136°. Il s'agit après application d'une charge, de mesurer à l'aide d'un microscope gradué les deux diagonales de l'empreinte et d'en faire la moyenne, ensuite on se rapporte à une table de conversion(figureIII-12). La méthode Vickers peut être utilisée pour contrôler tous les métaux, des plus durs aux plus tendres, et grâce aux très faibles charges possibles, c'est la seule méthode qui permet de contrôler des échantillons très minces ou de très petites tailles. C'est à notre avis l'essai le plus précis [28].



Figure III-12 : Essai de dureté Vickers

III.3.4 Dureté Knoop (symbole HK)

C'est une variante de la dureté Vickers. Son pénétrateur (de forme pyramidale a base losange), crée une empreinte plus allongée(figureIII-13)


Figure III-13 : Essai de dureté KNOOP.

III.4 CONCLUSION

La caractérisation d'un matériau composite doit tenir compte de toutes les conditions et considérations afin de mieux définir désormais, son rôle et ses performances. On réalisera des essais mécaniques destinés, non seulement à mesurer les propriétés mécaniques, mais aussi à déterminer les caractéristiques locales des interfaces. Pour l'étude du son comportement et pouvoir ainsi établir ces propriétés, d'autres paramètres peuvent intervenir comme l'endommagement de ces constituants de base. Ces endommagements seront l'objet de notre travail dans le quatrième chapitre.

IV. INTRODUCTION

Les principales dégradations des matériaux composites proviennent des actions mécaniques qu'ils subissent. En effet, le réseau d'interfaces structurées des stratifiés (surtout à fibre longue) est particulièrement exposé aux dégradations car ces interfaces sont situées entre des constituants ayant des propriétés mécaniques différentes. Lors de contraintes, les endommagements ont ainsi tendance à suivre ce réseau de fibres. Des phénomènes différentes peuvent aussi se produire dans les plis de ce réseau en fonction du sens de sollicitation de l'effort parallèle aux fibres ou non.

IV.1 MECANISMES D'ENDOMMAGEMENTS

La ruine des matériaux composites est un phénomène très complexe où plusieurs mécanismes d'endommagement différents apparaissent et interagissent. Ces phénomènes prennent naissance à l'échelle microscopique (micro–fissuration matricielle, apparition de micro–vides) et conduisent à des mécanismes macroscopiques (délaminage, macro– fissures matricielles, décohésion fibre–matrice, rupture des fibres). Chaque constituant (fibre, matrice) ou interface peut être affecté par un mécanisme d'endommagement Ces phénomènes sont schématisés sur la figure IV-1 :



Figure IV-1 : Schéma des différents endommagements dans les stratifiés

De nombreux facteurs ont une influence sur l'apparition puis l'évolution des différents mécanisme d'endommagement. Ces facteurs peuvent être le type de sollicitation (statique/fatigue), la direction du chargement, le type d'empilement, la température, l'humidité...La suite de cette section passe en revue d'une manière plus détaillée les différents modes d'endommagement représentée dans le tableau ci-dessous(tableau) :

fibre		matrice		interface					
				Inter-pli		Fibre-1	natrice		
• Ruj	pture des	•	Micro	•	Délaminage	•	Décohésion		
fibi	res		fissuration				fibre /matrice		
		•	Micro vide						
		•	Macro						
			fissuration						

Tableau IV-1 : Types d'endommagement dans les composites stratifiés

IV.1.1 La rupture des fibres

La rupture des fibres survient par la force d'un impact ou par un effort conséquent. Chaque fibre rompt si elle subit une contrainte supérieure à sa résistance elle se brise une à une face à ces efforts(figureIV-2). Le stratifié perd très rapidement l'essentiel de sa rigidité dans la direction concernée [15].



Figure IV-2 : Rupture des fibres

IV.1.2 Micro-fissuration

Les micro – fissuration sont les premiers endommagements qui apparaissent si la matrice subit un chargement important. Ce défaut à l'échelle microscopique est le lieu privilégié pour l'amorçage des endommagements à l'échelle supérieure, notamment des macrofissures par coalescence [14], (Figure IV-3).



Sources : Science de l'ingénieur + Sjögren et Berglund, 2000

Figure IV-3 : Le phénomène des microfissures

IV.1.3 Fissuration matricielle

La fissuration matricielle est la principale cause de ruine de la matrice, dans la mesure où, sans être le mécanisme directement le plus nocif, il peut être à l'origine d'autres phénomènes plus endommageant. Ce mode de dégradation consiste en l'apparition progressive de fissures (figure IV-4). L'orientation de la fissuration est fortement liée à l'architecture du matériau et à sa forte anisotropie.



Figure IV-4 : Fissure matricielle formée à partir de la coalescence des décohésions et microfissures matricielles.

Un état de fissuration peut être provoqué par un chargement mécanique monotone, il est important de noter que d'autres types de sollicitation peuvent conduire à l'apparition de ce type d'endommagement. A titre d'exemple, le cyclage thermique peut causer lui-même des fissures dans le matériau. La température favorise également le phénomène d'oxydation, qui dégrade la matrice en favorisant l'amorçage des macro fissures. La fissuration matricielle est un mécanisme complexe dont l'apparition et l'évolution ne dépendent pas seulement du chargement, mais également de la géométrie et de l'architecture du composite [15].

IV.1.4 Le délaminage

La fissuration matricielle, déjà assez complexe, interagit avec un autre type d'endommagement : le délaminage. On peut définir le délaminage comme la rupture des interfaces existant entre des plis différents. On distingue trois types de délaminage :

- ➢ Le micro−délaminage.
- Le délaminage diffus.
- ➢ Le macro−délaminage.

* Le micro-délaminage et délaminage diffus

Le micro-délaminage naît à partir des fissures matricielles qui sont stoppées à l'interface entre deux plis. Ce micro-délaminage est le responsable de l'état saturé de la fissuration matricielle et son apparition annonce la rupture finale par localisation des endommagements [24]. Les contraintes inter laminaires peuvent également être à l'origine de l'apparition et de la propagation du délaminage, notamment à partir des bords libres qui induisent des singularités. Le développement de cet endommagement entraîne la diminution de la rigidité du matériau [25]. L'augmentation de la densité de fissuration matricielle provoque la coalescence des micro-délaminages en formant des macro-délaminages qui affecteront d'une façon très importante l'intégrité structurelle, notamment sous chargements hors- plan. A une échelle inférieure, on trouve le délaminage diffus qui, avec la microfissuration matricielle et la décohésion fibre–matrice, fait partie de l'endommagement diffus typique des états de cisaillement. Cet endommagement est provoqué par l'apparition de micro-vides et de décohésions dans les zones riches en matrice présentes dans l'interface inter–pli. On peut voir dans la figure (IV- 4) :



Figure IV-5 : Microdélaminage et délaminage diffus

✤ Le macro-délaminage

Le macro délaminage a une étendue beaucoup plus importante que le micro délaminage décrit préalablement. Il peut être provoqué par la coalescence des micro délaminages [27] formés par les fissures matricielles stoppées à l'interface du pli, par un chargement de type hors–plan ou, sur un bord libre, par les différences de coefficients de Poisson dans les plis (figureIV-6). Cet endommagement induit une perte de rigidité dans la structure qui sera plus ou moins importante selon le type de chargement.



Figure IV-6 : Le macro-délaminage

IV.1.5 Décohésion fibre/matrice

C'est dans la zone de l'interface où s'effectue le transfert de charges de la matrice vers le renfort. Après initiation, la propagation de la rupture change suivant la nature de l'adhésion fibre-matrice. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres (figure IV-7).



Figure IV-7: Décohésion entre la fibre et la matrice

On peut distinguer les cas suivant :

- Cas d'une interface très forte : si l'adhérence entre fibres et matrice est très forte, on aura une propagation de la fissure initiée soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle, la rupture observée sera de type fragile.

- Cas d'une interface très faible : la fissuration matricielle est déviée à l'interface, la décohésion fibre-matrice s'étend sur une très grande distance.

- Cas d'une interface ayant des propriétés intermédiaires : la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface [16].

IV.1.6 Autre type d'engagement

D'autres défauts peuvent apparaître lors de la fabrication des composites. En voici quelquesuns :

Les porosités

Les porosités peuvent être de deux sortes : ouvertes ou fermées. Les porosités ouvertes débouchent sur la surface du matériau tandis que les porosités fermées sont isolées à l'intérieur(figureIV-8). Ce sont des microcavités dues à l'emprisonnement de gaz (air, solvants...) dans la matrice d'un stratifié, qui réduisent les propriétés mécaniques du matériau.



Figure IV-8 : Les porosités

L'excès de résine

L'excès de résine laisse apparaître une tache de couleur différente, légèrement plus blanchâtre, du fait de la surabondance de produit sur une zone localisée(figureIV-9).



Figure IV-9 : L'excès de résine

Pollution de surface

De multiples et diverses impuretés peuvent se trouver à la surface d'un composite tels que des poussières ou autres corps étrangers(figureIV-10).

La pollution de surface peut être aussi causée par les fibres qui dépassent de la matrice.



Figure IV-10 : Pollution de surface

IV.2 LES DIFFERENTES ECHELLE D'OBSERVATION

Il existe généralement plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée de plis unidirectionnels ou tissés qui se révèlent à différentes échelles d'observation [13]. Les plus significatifs sont les suivants :

IV.2.1 A l'échelle microscopique

Apparaissent les ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice : c'est le phénomène de décohésion fibre/matrice ; ces dégradations, qui peuvent se produire sous l'effet de l'eau.

IV.2.2 A l'échelle mésoscopique

Ou échelle du pli : on observe l'apparition de nombreuses fissures intra-laminaires mais également la rupture de fibres qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau ;

IV.2.3 A l'échelle macroscopique

On observe le phénomène de décollement inter pli : c'est le délaminage qui s'amorce généralement aux bords libres de la structure.

IV.3 CONCLUSION

La connaissance de l'état d'endommagement d'une structure travaillante en matériaux composites est une nécessité largement reconnue, et ce tant pour raisons de fiabilité, et par conséquent de sécurité. Si on considère le cycle de vie d'un matériau, on s'aperçoit qu'à chaque étape de sa vie, il est soumis obligatoirement à différentes conditions d'exposition au cours de laquelle ce matériau voit ses propriétés initiales décroitre ou sa durabilité.

L'endommagement désigne toute altération des propriétés d'un matériau au cours du temps, ces propriétés peuvent être des caractéristiques mécaniques, physico-chimiques, de surface, ...

V. INTRODUCTION

Le travail présenté dans ce chapitre est l'élaboration et la caractérisation du comportement mécanique de matériaux composites à base de fibres de verre et de résine polyester. Des éprouvettes saines sans défauts ont été élaborées, ainsi que des éprouvettes avec défauts calibrés (cisaillement de renfort) pour but d'évaluer l'effet de ces défauts sur les propriétés induites du composite finale. La génération de cisaillement de renfort s'est faite sur le tissu taffetas avec des angles de cisaillement de 10°, 20° et 30°. Des essais de flexion trois points, ainsi que des opérations d'usinage (perçage) à différents paramètres de coupe ont été menés sur les différents matériaux. Les mécanismes d'endommagements engendrés et la qualité des perçages obtenue sont discutés et analyser.

I.1 MATERIAUX UTILISE

Les matériaux composites utilisés dans cette étude, proviennent de l'entreprise AZEFFOUN MARINE. Ils sont principalement destinés à la fabrication des bateaux de pêche et de plaisance (figure V-1).



Figure V-1 : Domaine d'utilisation du matériau composite.

II.1 V.1.1 CONSTITUANTS DES MATERIAUX

- Matrice : nous avons utilisé une matrice polyester insaturée Polylite[®]440-800.
- **Renforts** : le type de renforts qui interviennent dans la fabrication des stratifiés utilisés sont des fibres de verre de type E. Ils sont sous forme de Mats et de tissus fabriquer par le groupe Jushi (figure V-2). Les mats utilisés sont de masse surfacique de 300g/m² et de 450g/m² avec de fibres courtes de 3 à 8 cm. Le tissu taffetas a les propriétés suivantes : un poids de 800g/m², tissu non équilibré, pas d'espacement entre les chaines, par contre, un vide de 1,80mm sépare les trames.



Figure V-2 : Les différents renforts utilisés : a) Mat 300g/m²; b) Mat 450g/m² ; c) Taffetas $800g/m^2$

La mise en évidence de la contribution des différents renforts nous a conduits à l'élaboration des différents stratifiés qui sont montrés au tableau V-1. Pour produire des plaques sans défauts, nous avons respecté la disposition d'empilement d'une stratification de 4 couches utilisée pour la fabrication de coques et de ponts d'un bateau de pêche de 4,80m (figure V-3).

Lots	Ordre des plis
Lot A	Mat300+Mat450+Taffetas800+Mat300
Lot B	Quatre couches de Taffetas800
Lot CS	Mat300+Mat450+Taffetas800+Mat300 avec défaut calibré de cisaillement de renfort taffetas (10°, 20° et 30°)

Tableau V-1 : Différents lots d'éprouvettes d'essais.



Figure V-3: Ordre des plis de stratifié de référence (Lot A).

III.1 V.1.2 PREPARATION DES ECHANTILLONS

Pour l'élaboration des éprouvettes, nous avons préparé des plaques 500mm*500mm (figure V-4) par le procédé de moulage au contact. Le procédé est manuel, il consiste à nettoyer d'abord une plaque lisse (moule) avec de la cire qui sert d'un agent de démoulage puis, on procède à l'empilement des différentes couches imbibées de résine (mélangée à 1.5% du durcisseur) et les compactées manuellement à l'aide d'un rouleau ébulleur pour chasser les

bulles d'air, jusqu'à obtention de la séquence désirée. Après conditionnement à température ambiante pendant 24 heures les plaques sont ensuite démoulées.



Figure V-4: Procédé de moulage au contact.

V.1.3 Réalisation d'éprouvettes calibrées

Des plaques présentant des défauts calibrés ont été élaboré en respectant la disposition d'empilement de stratifié de référence. Les défauts sont générés seulement sur le tissu taffetas. Pour reproduire le défaut de boucles, le principe du parallélogramme déformable a été adopté. La génération des défauts s'est faite de façon à reproduire l'état et les amplitudes observés dans le cadre d'une étude de faisabilité d'une pièce complexe et non développable pour application nautique. Ainsi, les plis ont été réalisés avec des angles de cisaillement de (10°, 20° et 30°) $\pm 1°$ sur chacune des zones délimitant la bande de boucles (figure V-5, figure V-6). Une augmentation locale de taux massique de fibres de tissu sec cisaillé en d'hors de défaut de boucles est estimée à 15 %, 6% et 1,5% respectivement pour les angles de cisaillement de 30°, 20° et 10° (FigureV-5).



Figure V-5 : Evolution de défaut de boucles en fonction de l'angle de cisaillement



Figure V-6 : Protocole de réalisation d'éprouvettes calibrées

V.1.4 Découpage des éprouvettes

Les éprouvettes soumises aux essais de flexion trois points sont découpées dans les plaques de dimensions (500x500) mm² à l'aide d'une scie à disque diamanté sous un jet d'eau (figureV-7) suivant les deux directions principales relativement à la direction des chaines et des trames.



Figure V-7 : Scie à disque diamanté

Chapitre V :

IV.1 ESSAIS MECANIQUE

La connaissance du comportement d'un matériau en général, est indispensable en vue de son utilisation dans des conditions optimales. Cependant, dans le cas des matériaux composite, la connaissance du comportement des différents constituants ne permet de prévoir les propriétés du composites, et de donner des indications d'endommagements. La caractérisation passe donc par des essais sur chaque type de composite utilisé. Dans notre étude nous avons effectué des essais statiques en flexions trois points.

V.2.1 Géométrie des éprouvettes de flexion trois points

Les dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais de flexion trois points (figure V-8) ont été choisies selon la norme NF EN ISO 178, ASTMD 790 [24], c'est à-dire :

 $L_{tot} = 16h + 20 (\pm 1) mm$

 $10 < b \le 15 \text{ mm}$ pour $h \le 5 \text{ mm}$

- L_{tot}: longueur totale de l'éprouvette.
- b : largeur de l'éprouvette.
- h : épaisseur de l'éprouvette.





V.1.1 Machine de flexion utilisée :

Les essais de flexion sont réalisés sur une machine de flexion Zwick roell (figureV-9). C'est une machine universelle qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion, elle est dotée d'une cellule de charge d'une capacité de 2.5 KN, accompagnée par des vitesses de chargement qui varient de 1 à 300 mm/min contrôlées automatiquement. Elle est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe et d'une traverse supérieure mobile entraînée par une vis sans fin, mis en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment supérieur sur laquelle se trouvent les capteurs servant à mesurer la force appliquée sur l'éprouvette ainsi que le déplacement au cours de l'essai qui seront projetées directement sur l'écran d'un ordinateur lié à la machine. Sur chacune des traverses se trouve des mors permettant de fixer l'éprouvette.

Nous avons effectué des essais de flexion à une même vitesse qui est de 2 mm/min et à une température de 25°C pour tous les lots.



Figure V-9 : Machine de flexion zwick roell 2.5KN avec dispositif de flexion

V.1.2 Résultats des essais de flexion

Pour une représentation plus cohérente des résultats des essais, nous avons utilisé les formules de passage suivantes données par la théorie des poutres :

$$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{V-1}$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{6hf}{L^2} \tag{V-2}$$

 $\boldsymbol{\sigma}$: contrainte normale.

L : longueur entre appuis.

E : déformation relative.

f : flèche mesurée au cours de l'essai pour chaque charge.

• Résultats de lot de référence (Lot A)

Dans les tableaux qui suivent nous présentons les dimensions des éprouvettes utilisées et les caractéristiques mécaniques intrinsèques. La désignation des éprouvettes du lot A suivant la direction de découpe et de sollicitation est donnée comme suit :

- ACi : éprouvette découpée suivant la direction des chaines et sollicité sur la face intérieure (figure V-3).
- ACe : éprouvette découpée suivant la direction des chaines et sollicité sur la face extérieure (figure V-3).
- ATi : éprouvette découpée suivant la direction des trames et sollicité sur la face intérieure (figure V-3).
- ATe : éprouvette découpée suivant la direction des chaines et sollicité sur la face extérieure (figure V-3).

Le tableau V-2 représente les caractéristiques mécaniques intrinsèques des éprouvettes ACe obtenue par l'essai de flexion.

Lot ACe	h (mm)	b (mm)	$f_r(mm)$	$\mathbf{F}_{\mathbf{r}}\left(\mathbf{N}\right)$	E max	σ _{max} (MPa)	E(MPa)
ACe1	3,51	15,58	8,62	391	0,03	220	7138
ACe2	3,96	15,40	8,76	508	0,04	227	6274
ACe3	3,33	15,38	11.5	413	0,04	264	7407
moyenne	3,60±0.32	15,45±0.11	9,62±1.60	437±62	0.003±0.004	237±24	6940±592

Tableau V-2 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes ACe en flexion



Figure V-10 : Courbes contrainte/déformation des éprouvettes ACe

Le tableau V-3 représente les caractéristiques mécaniques intrinsèques des éprouvettes ACi obtenue par l'essai de flexion.

Lot ACi	h (mm)	b (mm)	$\mathbf{f}_{\mathbf{r}}\left(\mathbf{mm}\right)$	$\mathbf{F_{r}}\left(\mathbf{N}\right)$	E max	σ _{max} (MPa)	E(MPa)
AC1i	3,61	15,85	7,87	313	0,03	164	5135
AC2i	3,6	15,74	6,56	313	0,02	165	6191
AC3i	3,59	15,62	6,48	307	0,02	164	6276
moyenne	3,60±0.01	15,73±0.11	6,96±0.77	311±3	$0,02{\pm}0.002$	165±0.73	5867±635

Tableau V-3 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes ACi en flexion



Figure V-11 : Courbes contrainte/déformation des éprouvettes ACi

Le tableau V-4 représente les caractéristiques mécaniques intrinsèques des éprouvettes ATe obtenue par l'essai de flexion.

Lot ATe	h (mm)	b (mm)	f _r (mm)	$\mathbf{F}_{\mathbf{r}}\left(\mathbf{N}\right)$	E max	σ _{max} (MPa)	E(MPa)
AT1e	3,49	15,52	8,92	337	0,03	192	5784
AT2e	3,76	15,63	9,68	378	0,04	184	4999
AT3e	3,93	15,68	9,36	436	0,04	194	5249
moyenne	3,72±0.22	15,61±0.08	9,32±0.38	383±49	0,04±0.003	190±5	5344±400

Tableau V-4 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes ATe en flexion



Figure V-12 : Courbes contrainte/déformation des éprouvettes ATe

Le tableau V-5 représente les caractéristiques mécaniques intrinsèques des éprouvettes ATi obtenue par l'essai de flexion.

Lot ATi	h (mm)	b (mm)	f _r (mm)	$\mathbf{F}_{\mathbf{r}}\left(\mathbf{N}\right)$	E max	σ _{max} (MPa)	E(MPa)
AT1i	3,9	15,68	6,77	332	0,03	150	4947
AT2i	4,06	15,61	7,40	386	0,03	161	4811
AT3i	4.00	15,86	6,75	316	0,03	134	4574
moyenne	3,98±0.08	15,71±0.21	6,97±0.36	344±36	0,03±0.001	148±13	4777±188

Tableau V-5 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes ATi en flexion



Figure V-13 : Courbes contrainte/déformation des éprouvettes ATi

V.2.3 Interprétation des résultats pour le stratifié de référence (Lot A)

D'après les figures V-10 et V-12, nous relevons que les courbes du comportement à rupture en flexion obtenues sur les éprouvettes sollicitées sur la face extérieure (lots ACe et ATe) pour les deux directions (chaines et trames), nous permettent de distinguer trois zones; une zone linéaire correspondant au comportement élastique de matériau, puis une zone non linéaire associée à l'apparition de premiers endommagements de la matrice et des fibres suivi d'une chute successive de l'effort qui correspond à la rupture totale du matériau. Par contre, les courbes d'évolution contraintes déformations des éprouvettes sollicitées sur la face intérieure (lots ACi et ATi) présentent un comportement fragile (figures V-11 et V-13) avec un petit plateau non linéaire qui précède la rupture. Les caractéristiques mécaniques calculées, montrent que le procédé utilisé génère une certaine anisotropie du matériau.

Toutes les éprouvettes présentent un comportement similaire pour le même lot avec une légère dispersion de la contrainte à rupture, ceci est dû principalement à l'existence de défauts (bulles d'air) qui influencent considérablement la résistance à la rupture. Cette dernière est plus importante pour les lots d'éprouvettes qui sont découpée suivant les chaînes pour la même face de sollicitation. Ce qui montre que la résistance à la rupture est dépendante de la direction de sollicitations. De même pour les modules d'élasticité, Cela est dû à l'architecture du renfort (tissu taffetas).

Les éprouvettes sollicitées sur la face extérieure présentent des caractéristiques mécaniques plus importantes par rapport à ceux sollicitées sur la face intérieure (tableaux V-2, V-3, V-4 et V-5). Cela est dû au fait que pendant l'essai, dans le cas de sollicitation sur la face extérieure, c'est la moitié du matériau où se trouvant le tissu taffetas qui travail en traction (partie supérieur figure V-3). Par contre, dans le cas de sollicitation sur la face intérieure, c'est la moitié du matériau où se trouvant le mat 450 qui travail en traction (partie inférieur figure V-3). Cela justifie le choix de l'entreprise de la séquence d'empilement de matériau (lot A) par rapport à la disposition du tissu taffetas qui supporte l'essentiel du chargement en service pour un bateau de pêche de 4,80m.

• Résultat du Lot B

Le lot B qui est constitué de quatre couches de taffetas 800g/m² Les éprouvettes BC sont découpées suivant la direction des chaines. Les éprouvettes BT sont découpées suivant la direction des trames. Le tableau V-6 représente les caractéristiques mécaniques intrinsèques des éprouvettes BC obtenue par l'essai de flexion

Lot BC	h (mm)	b (mm)	$\mathbf{f}_{\mathbf{r}}\left(\mathbf{mm}\right)$	$\mathbf{F_{r}}(\mathbf{N})$	E max	$\sigma_{max}(MPa)$	E(MPa)
BC1	3,71	15,63	10.00	442	0,04	221	10358
BC2	3,7	15,73	9,29	420	0,03	210	10285
BC3	3,86	15,81	6,7	441	0,02	202	10807
moyenne	3,75±0.08	15,72±0.09	8,66±1.73	434±12	0,03±0.006	211±9	10483±282

Tableau V-6 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes BC en flexion



Figure V-14 : Courbes contrainte/déformation des éprouvettes BC

Le tableau V-7 représente les caractéristiques mécaniques intrinsèques des éprouvettes BT obtenue par l'essais de flexion

Lot BT	h (mm)	b (mm)	$\mathbf{f}_{\mathbf{r}}\left(\mathbf{mm} ight)$	$\mathbf{F_{r}}\left(\mathbf{N}\right)$	E max	σ _{max} (MPa)	E(MPa)
BT1	3,9	15,66	6,94	407	0,03	184	10289
BT2	3,88	15,71	4,97	383	0,02	174	9980
BT3	3,85	16,13	6,38	419	0,02	189	9469
moyenne	3,87±0.02	15,83±0.25	6,09±1.01	403±18	0,02±0.004	182±7	9912±414

Tableau V-7 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes BT en flexion



Figure V-15 : Courbes contrainte/déformation des éprouvettes BT

V.2.4 Interprétation des résultats pour lot B

Comme le montre les figures V-14 et V-15, le comportement à rupture en flexion des composites BC et BT, nous permettent de distinguer trois zones ; une zone linéaire correspondant au comportement élastique de matériau, puis une zone non linéaire associée à l'apparition de premiers endommagements dans le matériau suivi d'une chute de l'effort qui correspond à la rupture successive de plis et au délaminage interplis jusqu'à rupture totale du matériau. Les éprouvettes du lot B présentent un plateau non linéaire (pseudoplastique) plus important par rapport au matériau de référence (lot A). Les caractéristiques mécaniques calculées (tableaux V-6 et V-7), montrent que le procédé utilisé génère une certaine anisotropie du matériau. En effet, Ces caractéristiques sont plus importantes pour le lot d'éprouvettes qui sont découpée suivant les chaînes (BC) par rapport à ceux découpées suivants les trames.

Toutes les éprouvettes présentent un comportement similaire pour le même lot avec une légère dispersion de la contrainte à rupture, ceci est dû principalement à l'existence de défauts lors de l'élaboration qui influencent considérablement la résistance à la rupture.

• Résultats du Lot CS (éprouvettes avec cisaillement de renfort)

Après avoir caractérisé le comportement du composite sain, des essais de flexion ont été mené afin de caractériser les propriétés induites par la déformation de cisaillement du renfort (échantillons CS). Cet effet a été caractérisé à 3 niveaux d'amplitude correspondant à des cisaillements de 10°, 20° et 30°. Cette comparaison se fera avec les mêmes conditions d'essai

que le lot ATe. Le tableau V-8 représente les caractéristiques mécaniques intrinsèques des
éprouvettes CS/10° obtenus par l'essai de flexion.

Lot CS/10°	h (mm)	b (mm)	$\mathbf{f}_{r}\left(\mathbf{mm} ight)$	F _r (N)	E max	$\sigma_{max}(MPa)$	E(MPa)
CS1/10°	3,61	15,5	7,69	361	0,03	128	5104
CS2/10°	3,75	15,46	7,57	347	0,03	130	5478
CS3/10°	3,51	15,56	7,1	313	0,02	128	5757
Moyenne	3,62±0.12	15,50±0.05	7,45±0.31	340±24	0,03±0.002	129±1	5447±327

Tableau V-8 : Caractéristiques mécaniques des éprouvettes CS10° en flexion



Figure V-16 : Courbes contrainte/déformation des éprouvettes CS10°

Le tableau V-9 représente les caractéristiques mécaniques intrinsèques des éprouvettes CS/20° obtenus par l'essai de flexion.

Lot CS/20°	h (mm)	b (mm)	$f_r(mm)$	$\mathbf{F}_{\mathbf{r}}\left(\mathbf{N}\right)$	E max	$\sigma_{max}(MPa)$	E(MPa)
CS1/20°	3,85	15,65	6,56	291	0,02	135	6511
CS2/20°	3,63	15,45	7,36	246	0,03	130	5680
CS3/20°	3,71	15,16	7,42	292	0,03	150	6423
Moyenne	3,73±0.11	15,42±0.24	7,11±0.48	276±26	0,03±0.001	138±10	6204±456

Tableau V-9 : Caractéristiques mécaniques du lot CS20° en flexion



Figure V-17 : Courbes contrainte/déformation des éprouvettes CS20°

Le tableau V-10 représente les caractéristiques mécaniques intrinsèques des éprouvettes CS/30° obtenus par l'essai de flexion.

Lot CS/30°	h (mm)	b (mm)	$f_r(mm)$	$\mathbf{F_{r}}\left(\mathbf{N}\right)$	E max	σ _{max} (MPa)	E(MPa)
CS1/30°	3,10	15,76	5,91	180	0,02	192	7558
CS2/30°	3,37	15,38	5,38	212	0,02	172	6944
CS3/30°	3,30	14,98	6,46	209	0,02	176	6129
Moyenne	3,25±0.14	15,37±0.39	5,91±0.54	200±17	0,02±0.003	180±10	6877±717

Tableau V-10 : Caractéristiques mécaniques du lot CS30° en flexion



Figure V-18 : Courbes contrainte/déformation des éprouvettes CS30°

V.2.5 Interprétation des résultats pour les éprouvettes avec cisaillement de renfort (lot CS)

Comme le montre les figures V-16, V-17 et V-18, le comportement à rupture en flexion des composites CS10°, CS20° et CS30°, nous permettent de distinguer trois zones ; une zone linéaire correspondant au comportement élastique de matériau, puis une zone non linéaire associée à l'apparition de premiers endommagements suivi d'une chute successive de l'effort jusqu'à la rupture totale du matériau. Les éprouvettes du lot de référence (ATe) présentent un plateau non linéaire plus important par rapport aux matériaux avec cisaillement du renfort (CS). Cela peut s'expliquer par l'augmentation de taux locale de fibres à cause des déformations de cisaillement qui mène à l'augmentation de zone de concentration de contraintes qui favorisera la propagation de délaminage dans le matériau. Ceci est dû au fait que les fibres sont entrelacées les unes avec les autres, ce qui entraîne des nœuds aux points de croisement induisant des concentrations de contraintes.

Toutes les éprouvettes présentent un comportement presque similaire pour le même lot avec des caractéristiques mécaniques qui augmente proportionnellement en fonction de l'angle de cisaillement du renfort taffetas. Les paramètres élastiques des éprouvettes avec cisaillement de renfort (tableaux V-8, V-9, et V-10) sont plus importants par rapport au matériau de référence (lot ATe). Ceci est dû à l'augmentation locale du taux massique de fibres dans le matériau en fonction de l'angle de cisaillement, ainsi qu'à la contribution importante des mèches transverses pour la rigidité du matériau.

V.2.5 Analyse visuelle des éprouvettes rompues

Au cours des essais de flexion trois points, on entend des craques avant la rupture totale de l'échantillon, qui correspondent au différents mécanisme d'endommagement dans le matériau. Nous obtenons des ruptures en traction (Mode I) pour tous les lots avec un délaminage (Mode II) inter pli qui suit la direction des mèches, ainsi que des ruptures de fibres et de matrice (figure V-19, V-20 et V-21). Nous avons observé un changement de couleur de la zone endommagée par rapport à la couleur initiale des éprouvettes. Cette zone est plus remarquable pour le lot B (figure V-20).



Figure V-19 : Eprouvettes rompues du lot A



Figure V-20 : Eprouvettes rompues du lot B



Figure V-21 : Eprouvettes rompues du lot C

V.2.5 Effet de l'anisotropie

Les résultats des contraintes à rupture obtenus en flexion sur les éprouvettes du lot A dans le sens des chaines et trames (figure V-22) montrent que la résistance à la rupture est dépendante de la direction de sollicitation et de sens de découpe des éprouvettes. En effet le rapport entre la contrainte suivant les trames et les chaines est de 0,8 pour la sollicitation sur la face extérieure et de 0,89 pour la sollicitation sur la face intérieure. Le rapport lots B et 0,70

pour le lot C. De même pour les modules d'élasticité figure V-23, en faisant le rapport entre le module d'élasticité suivant les trames et les chaines, nous obtenons 0,79 pour la sollicitation sur la face extérieure, 0,81 pour la sollicitation sur la face intérieure. Cela est dû à la structure du renfort et au type de moulage (défauts existant dans le matériau). Cette divergence peut être due également à la distribution non uniforme des contraintes dans l'essai de flexion trois points.



Figure V-22 : Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture pour le lot A.



Figure V-23 : Influence de l'anisotropie sur le module d'élasticité pour le lot A

Les histogrammes des figures V-24 et V-25 montres l'influence de l'anisotropie sur les contraintes de rupture et les modules d'élasticité. Ces caractéristiques sont dépendantes de la direction et elles sont importantes dans la direction des chaines. En effet le rapport entre la contrainte suivant les trames et les chaines est de 0,86. De même pour les modules d'élasticité en faisant le rapport entre le module d'élasticité suivant les trames et les chaines, nous obtenons 0,96.



Figure V-24 : Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture pour le lot B



Figure V-25 : Influence de l'anisotropie sur le module d'élasticité E pour le lot B.

Les histogrammes des figures V-26 et V-27 montres l'influence de l'anisotropie sur les contraintes de rupture et les modules d'élasticité pour le matériau de référence ATe et les lots avec cisaillement de renfort CS.

D'après ces figures, on remarque que la contrainte à la rupture (figure V-26) et le module d'élasticité (figure V-27) évoluent linéairement en fonction de l'angle de cisaillement pour le matériau CS.

Cela est dû principalement l'augmentation locale du taux de fibres.

On constate aussi que le module d'élasticité des matériaux avec cisaillement CS est plus important par rapport au matériau sain ATe.

Par contre la contrainte à rupture du matériau de référence ATe est plus importante par rapport aux matériaux avec cisaillement du renfort CS. Ceci est dû au fait que les fibres sont entrelacées les unes avec les autres, ce qui entraîne des nœuds aux points de croisement pendant la déformation du renfort taffetas induisant des concentrations de contraintes qui favorisera la propagation de délaminage dans le matériau.



Figure V-26 : Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture pour le lot A et CS





V.3 USINAGE DES COMPOSITES

Afin d'avoir des produits finis, la fabrication des objets avec les matériaux composites nécessite la réalisation de perçages pour l'assemblage (montage) de différentes composantes et accessoires. Pour cela, on a réalisé des essais de perçage en variant les conditions de coupe pour voir la qualité des trous et les différents mécanismes d'endommagement engendrés, ainsi que d'autres phénomènes qui se manifeste lors de cette opération.

V.1.3 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour l'usinage sont les même utilisé pour les essais de de flexion trois points. Nous avons réalisé des essais de perçage sur des plaques de matériau de référence A, le matériau B et sur les matériaux avec cisaillement du renfort CS/10°, CS20° et CS30°.

V.1.4 Géométrie des éprouvettes d'usinage

Pour les opérations de perçage, nous avons découpé des plaques de dimension suivante :

- Longueur de la plaque l=150mm
- Largeur de la plaque b=100mm
- L'épaisseur h de la plaque est fonction de l'empilement du matériau.



Figure V-28 : Géométrie des éprouvettes d'usinage

V.1.5 Machine utilisée pour l'usinage

Une fraiseuse est une machine-outil utilisée pour usiner tout type de pièces mécaniques (figure V-29), à l'unité ou en série, par enlèvement de matière à partir de blocs ou parfois d'ébauches estampées ou moulées, à l'aide d'un outil coupant nommé fraise.

En dehors de cet outil qui lui a donné son nom, une fraiseuse peut également être équipée de foret, de taraud ou d'alésoir.

On a travaillé sur une fraiseuse au hall de technologie de l'UMMTO à Oued Aissi.

C'est une fraiseuse vertical semi-automatique a trois axes ; le foret est monté sur le chariot longitudinal est taille la matière grâce à sa rotation (vitesse de coupe) et au mouvement relatif de la fraise par rapport à la pièce (vitesse d'avance). La plaque fixée par un étau de serrage montée sur des glissières se déplace relativement suivant des coordonnées X Y ou Z. Par convention, l'axe Z est l'axe de rotation de la broche, les axes X et Y sont contenus dans un plan perpendiculaire à Z. Les vitesses de coupes et d'avances sont introduite manuellement à la machine.



Figure V-29 : Fraiseuse verticale semi-automatique

V.1.6 Les forets utiliser

Pour les perçages effectuer sur les plaques composites, on a utilisé trois foret hélicoïdaux de différent diamètres Ø6mm ; Ø8mm ; Ø10mm (figure V-30).



Figure V-30 : Les différents diamètres des forets utilisés

V.1.7 Les conditions d'usinage

Dans notre travail, nous avons varié les paramètres d'usinage comme suit :

Trois vitesses de coupe de 250tr/min, 500tr/min et 710tr/min.

Avec trois vitesses d'avance de 80 mm/min, 160 mm/min et 250 mm/min.

V.3.5.1 Qualité des trous de matériau sain (lot A)

Nous avons découpé cinq plaques de matériau sain (sans défauts) de dimension (100mm*150mm), et nous avons réalisé des trous de différents diamètres en variant les conditions de coupe. Les fractographies des plaques après usinage sont données par les figures V-31, V-32, V-33, V-34 et V-35.



Figure V-31 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 250tr/min



Figure V-32 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 500tr/min



Figure V-33 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min



Figure V-34 : Perçage avec vitesse d'avance de 160mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min



Figure V-35 : Perçage avec vitesse d'avance de 250mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min

V.3.5.1 Qualité des trous de matériau avec cisaillement de 30° (lot CS30°)

Nous avons découpé cinq plaques de matériau avec cisaillement de 30° de dimension (100mm*150mm), et nous avons réalisé des trous de différents diamètres en variant les conditions de coupe. Les fractographies des plaques après usinage sont données par les figures V-36, V-37, V-38, V-39 et V-40.



Figure V-36 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 250tr/min



Figure V-37 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 500tr/min



Figure V-38 : Perçage avec vitesse d'avance de 80mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min



Figure V-39 : Perçage avec vitesse d'avance de 160mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min



Figure V-40 : Perçage avec vitesse d'avance =250mm/min et vitesse de coupe =710tr/min

V.3.5.1 Qualité des trous de matériau avec cisaillement de 10° (lot CS10°)

Nous avons découpé une plaque de matériau avec cisaillement de 10° de dimension (100mm*150mm), et nous avons réalisé des trous de différents diamètres en utilisant vitesse d'avance de 250mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min

La photographie de la plaque après usinage est donnée par la figure V-41.



Figure V-41 : Perçage avec vitesse d'avance =250mm/min et vitesse de coupe =710tr/min

V.3.5.1 Qualité des trous de matériau avec cisaillement de 20° (lot CS20°)

Nous avons découpé une plaque de matériau avec cisaillement de 20° de dimension (100mm*150mm), et nous avons réalisé des trous de différents diamètres en utilisant vitesse d'avance de 250mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min

La photographie de la plaque après usinage est donnée par la figure V-42.



Figure V-42 : Perçage avec vitesse d'avance de 250mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min

V.3.5.1 Qualité des trous de matériau B

Nous avons découpé une plaque de matériau B contenant quatre coches de taffetas de dimension (100mm*150mm), et nous avons réalisé des trous de différents diamètres en utilisant vitesse d'avance de 250mm/min et vitesse de coupe de 710tr/min La photographie de la plaque après usinage est donnée par la figure V-43.



Figure V-43 : Perçage avec vitesse d'avance =250mm/min et vitesse de coupe =710tr/min

V.3.5.1 Qualité des trous de matériau B

Pendant l'usinage sur la fraiseuse, en remarque que les coupeaux sont sous forme de petit grain sous forme de poudre quand l'outil tourne avec une grande vitesse (710tr/min) qui apparaisse bien sur la figure V-44.



Figure V-44 : Apparence des coupeaux sous forme de petit grain

Par contre les coupeaux sont sous forme de rubans continus quand l'outil tourne avec une petite vitesse (250tr/min). La forme des rubans est donnée sur la figure V-45.


Figure V-45: Apparence des coupeaux sous forme de fils

On observe pendant le perçage des trous à grande vitesse que le foret engendre une petite courbure à la sortie de trou avant la pénétration totale de la pièce. Par contre la courbure est plus importante quand le foret avance avec une petite vitesse. C'est le même phénomène qui se produit pour le paramètre des vitesses d'avance.

A la fin de l'usinage des plaques on remarque que déchaussement des fibres et plus important pour les plaques avec défauts de cisaillement calibré (figure V-46). Par contre, on remarque que pour le matériau sain (figureV-47) l'arrachage des fibres ne sont pas important. On trouve une bonne qualité des trous par rapport aux matériaux avec cisaillement et le matériau B.



Figure V-46 : Déchaussement des fibres de lot CS30°



Figure V-47 : Bonne qualité des trous usinés.

V.1 CONCLUSION

- Les caractéristiques mécaniques obtenues en flexion sur les éprouvettes du lot de référence dans le sens des chaines et trames montrent que la résistance à la rupture est dépendante de la direction de sollicitation et de sens de sollicitation du matériau.
- La contrainte à la rupture et le module d'élasticité évoluent linéairement en fonction de l'angle de cisaillement pour le matériau avec défaut de cisaillement calibré.
- Au cours des essais de flexion trois points, on entend des craques avant la rupture totale de l'échantillon, qui correspondent au différents mécanisme d'endommagement dans le matériau. Nous obtenons des ruptures en traction (Mode I) pour tous les lots avec un délaminage (Mode II) inter pli qui suit la direction des mèches, ainsi que des ruptures de fibres et de matrice
- L'utilisation des bonne paramètre d'usinage permet d'évité l'apparition des défauts (délaminage, déchaussement des fibres).
- Dans les opérations d'usinage l'existence de déformation de cisaillement calibré favorise le déchaussement des fibres.

Conclusion générale

Cette étude nous a permis de définir une approche de la caractérisation de matériaux composites par des essais statiques monotones. La présente étude a concerné en premier lieu, la mise au point d'une méthodologie de caractérisation en flexion trois points de matériaux composites sain et avec déformation de cisaillement de renfort. Des opérations d'usinage (perçage) à différents paramètres de coupe ont été réalisées par la suite pour voir la qualité des trous obtenus.

Le dépouillement des résultats des essais de flexion trois point, nous permet d'accéder aux caractéristiques intrinsèques des matériaux. Les propriétés mécaniques varient selon le sens d'orientation des renforts ainsi que le sens de sollicitation. Les résultats des contraintes à rupture obtenus en flexion sur les éprouvettes testées dans la direction des chaines sont plus importants que celle trouvées suivant la direction trames, ce qui montre que la résistance à la rupture est dépendante de la direction de sollicitations. De même pour les modules d'élasticité, Cela est dû à l'architecture de renfort taffetas. La présence des défauts influe aussi sur les caractéristiques mécaniques de ce matériau. Cette dispersion peut être due également à la distribution non uniforme des contraintes dans l'essai de flexion.

Les éprouvettes avec déformation de cisaillement présentent un comportement presque similaire pour le même lot avec des caractéristiques mécanique qui augmente proportionnellement en fonction de l'angle de cisaillement du renfort taffetas. Les paramètres élastiques des éprouvettes avec cisaillement de renfort sont plus importants par rapport au matériau de référence. Ceci est dû à l'augmentation locale du taux massique de fibres dans le matériau en fonction de l'amplitude de l'angle de cisaillement, ainsi qu'à la contribution importante des mèches transverses pour la rigidité du matériau.

La présence de déformation de cisaillement dans le matériau favorise le déchaussement des fibres et le délaminage pendant les opérations de perçage.

Notre étude expérimentale n'est qu'une première approche et il conviendrait de développer un programme plus complet. Néanmoins elle montre que les essais de flexion trois points permettent bien d'identifier les mécanismes de rupture pouvant se produire dans des structures composites en service. Les essais de perçages ont montré que les diamètres des forets n'as pas d'influence sur la qualité des trous. Par contre la vitesse de coupe et la vitesse

d'avance ont un effet sur la qualité de formation des coupons et sur l'endommagent du matériau.

Pour poursuivre cette étude, il sera intéressant d'élaborer des matériaux contenant plusieurs plis de cisaillement de renfort et d'effectuer des essais de caractérisation mécanique pour voir les propriétés induite sur le composite final.

L'étude de l'influence des défauts de mise en forme (boucles et cisaillement du renfort) couplée à l'effet de vieillissement, revêt un caractère d'importance capitale dans le comportement en fatigue.

Utiliser le procédé d'élaboration par RTM pour voir l'influence des défauts de mise en forme sur la phase d'injection.

Les références bibliographiques

[1] Nahiére Hamila

Simulation de la mise en forme des renforts composite /Institut des sciences appliquées de Lyon/2007.

[2] Nadia Bahlouli

Cours matériaux composite/ DESS mécanique avancée et stratégie industrielle.

[3] John-Marie BERTHELOT

Mécanique de matériaux et structure composite /institue supérieur des matériaux et mécanique avancée/le Mans France.

[4] Jean-Paul BAILON et J-m DORLOT

M.C 3eme édition / école polytechnique de Montréal/2000.

[5] Laurent GORNET

Généralité sur les matériaux composite/centrale Nantes/2008.

[6] Lionel GENDRE

Les grandes familles des matériaux composite/université de Paris Saclay/2011.

[7] Laarej Merad

Étude par spectroscopie rainant et modélisation d'une résine composite RTM/Abou Baker Belkaid de Tlemcen/2010.

[8] B.E.H.L. Y

Nouveaux matériaux Thermoformable à base de fibre cellulose /institut national polytechnique de Grenoble /2008.

[9] Christophe Tephany

Analyse de formabilité des renforts composite à base de fibre naturelle/université d'Orléans/2014.

[10] Hassoun ISHAK

Étude stochastique de l'impact des défauts de porosités et de plissements dans les matériaux composites/ université de Nantes/2017.

[11] E. Erikson

The influence of surface on the prospérités/composite science and technologie/2000.

[12] Madjid HADDAD

Étude de l'impact des défauts d'usinage des structures composite par détourage sur leurs comportement mécanique/université de Toulouse/2013.

[13] GINA Gothorianer

Interaction entre les défauts d'usinages et la tenue en montage d'assemblage en carbone /époxy/université Toulouse III /2008.

[14] John-Marie BERTHELOT

Matériaux composites/ Comportement mécanique et analyse des structures 4ème édition/ et de Tec&Doc Lavoisier/ 2005

[15] G. CHRETIEN

Matériaux composites à matrice organique/ Technique et documentation /Edition EYROLLES 1986.

[16] Hammal Lynda

Etude de comportement mécanique d'un stratifié/ Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou /2009

[17] Technique d'ingénieur

Essais des plastique renforcés/1997.

[18] mécaniques des sols

Essai de cisaillement /2008.

[19] JOHO Pierre

ESSAI MECANIQUES/ 30-9-2007

[20] : Béatrice LARGE-TOUMI

Etude du comportement en fatigue de composites carbone/époxy : rôle de l'interface, thèse de doctorat/école centrale de Lyon/ 1994

[21] principe de base

Contrôle de dureté/someco.fr/2012

[22] Marc Marzano

Les matériaux composite /action composite pascal celle GNFA/2014.

[23] JAUN Pedro Ramirez

Caractérisation et modélisation de l'endommagement des composite /école nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique/2013.

[24] Hassan Nachad/

Évaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogène.

[25] Y. Perrot

Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène –Thèse/ Paris/ 2006.

[26] Manac'h pol-even

Simulation et optimisation de la fabrication de pièce composite par injection sur renfort(RTM) /université de Montréal/2009.

[27] Pierre Rahme

Contribution à l'étude de l'effet des procédés de perçage alésage sur l'application de délaminage dans les structures composites épaisses /université de Toulouse/2008.