

Caractérisation expérimentale des préformes 3D en fibres
de carbone assemblées à l'aide du procédé de couture
« One Sided Stitching » dédiées à la fabrication des pièces
composites aéronautiques

Par

Saad-Amine TAKI

MÉMOIRE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 05 JUIN 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Simon Joncas, directeur de mémoire
Département du génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. François Robitaille, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'université d'Ottawa

M. Christian Belleau, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Martine Dubé, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE <18 MAI 2018>

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon directeur de mémoire, Simon Joncas, pour sa patience, sa disponibilité et surtout pour son support soutenu durant toutes les phases de la réalisation de ce travail.

Je désire aussi remercier François Robitaille de l'université d'Ottawa, pour avoir accepté de codiriger mon travail, pour ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion et pour avoir mis à ma disposition tous les outils nécessaires à la réussite de mes travaux expérimentaux. Je tiens à remercier également Thanos Drivas avec qui j'ai mené conjointement la partie expérimentale de ce mémoire.

Un grand merci aux partenaires industriels du projet CRIAQ COMP-501 : Bell Helicopter, Bombardier Aéronautique, Delastek, Groupe CTT, Hutchinson Aeronautique et Texonic (anciennement JB Martin).

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues au laboratoire et ailleurs, qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche. Ainsi, un grand merci s'en va à Laurent, Louis Charles, François, Catherine, Thibault, Morad, Majid et Taoufik.

Je tiens à témoigner, aussi, toute ma gratitude à ma famille; en particulier à ma mère Fadma, mon épouse Yasmina et tous mes neufs frères et sœurs pour leur confiance et leur support inestimable tout au long de mes études.

Enfin, j'aimerais dédier ce mémoire à la mémoire de mon père Oulaid, que le bon dieu l'ait dans sa sainte miséricorde.

CARACTÉRISATION EXPERIMENTALE DES PRÉFORMES 3D EN FIBRES DE CARBONE ASSEMBLÉES À L'AIDE DU PROCÉDÉ DE COUTURE « ONE SIDED STITCHING » DÉDIÉES À LA FABRICATION DES PIÈCES COMPOSITES AÉRONAUTIQUES

Saad-Amine TAKI

RÉSUMÉ

La présente étude vise à étudier l'effet de la couture structurale de préformes en fibre de carbone, produite en utilisant la technique du "One Sided Stitching", sur le comportement mécanique des préformes sèches pour produire des composites ayant la forme finale de la pièce. La couture structurale utilisée ici ne signifie pas seulement que les fils de couture viennent consolider les plis mais forment des renforts transversaux en créant des liaisons entre les éléments de la préforme.

Un tel travail n'était pas aussi largement couvert jusqu'à présent; contrairement aux études réalisées sur les préformes tissées ou tressées. La technique de couture utilisée dans cette étude est considérée comme un processus de préparation de préforme rapide dans lequel des fils ou des couches sont disposés le long de directions sélectionnées dans le plan puis attachés ensemble selon des trajectoires prédéfinies au moyen d'une aiguille de couture qui vient pénétrer dans la préforme. Ces préformes cousues en fibres de carbone à travers l'épaisseur sont développées et optimisées pour une utilisation dans la fabrication de structures composites pour des applications aéronautiques. Il a été démontré que plusieurs tissus textiles 3D, en particulier des préformes cousues, présentent un fort potentiel de fabrication à coût moins élevé et de hautes performances des structures composites finales avec une bonne tolérance aux dommages et une bonne intégrité structurale (Ogale, 2007). Lorsque l'on compare des études menées sur les mêmes renforts, il semble que parfois des contradictions apparaissent; certaines études affirment que le processus de couture n'affecte pas ou peut améliorer légèrement les propriétés dans le plan, tandis que d'autres révèlent que les propriétés sont dégradées par une aiguille qui crée de légères déviations et brise les fils autour des points d'impact.

Dans ce mémoire, la technologie utilisée pour produire les préformes est discutée avec les résultats saillants obtenus par des essais mécaniques dans divers scénarios de chargement. Les essais mécaniques réalisés ici incluent la compaction, le cisaillement dans le plan et la flexion simple courbure ont été menées sur des préformes sans couture et d'autres cousues. Le comportement mécanique a été investigué en fonction des paramètres de couture (densité de point, motif de couture) pour mieux comprendre le comportement des renforts secs pendant le processus de formage lors du procédé du moulage par transfert de résine assisté par vide (VARTM). Il a été démontré que les configurations et les densités de couture affectent le comportement en compaction des préformes conduisant à une diminution de la fraction volumique des fibres. A partir des essais de cisaillement et de flexion, il a été constaté que la couture montre un effet minimal sur la réponse des préformes cousues par rapport aux tissus non cousus. Ce comportement en cisaillement et en flexion confère aux préformes la capacité

II

d'épouser des formes complexes telles que les raidisseurs en T fabriqués dans le cadre du projet CRIAQ COMP-501.

Mots clés : Préformes cousues, couture OSS®, compaction, cisaillement cadre articulé, flexion

**CARACTÉRISATION EXPERIMENTALE DES PRÉFORMES 3D EN FIBRES
DE CARBONE ASSEMBLÉES À L'AIDE DU PROCÉDÉ DE COUTURE
« ONE SIDED STITCHING » DÉDIÉES À LA FABRICATION DES PIÈCES
COMPOSITES AÉRONAUTIQUES**

Saad-Amine TAKI

ABSTRACT

This work aims at investigating the effect of structural stitching of carbon fibre preform realised using the technique of one-sided stitching, on the mechanical behaviour of dry preforms. In contrast to studies on woven or braided preforms, the stitched preforms were not so widely covered so far. The stitching technique used in this study is considered as rapid process of preform preparation in which yarns or layers are arranged along selected directions in the plane and then tied together along predefined paths using a sewing needle. These through the thickness stitched carbon fibers preforms are developed and optimized for use in the manufacture of composite structures for aeronautical applications. It has been demonstrated that many 3D textile fabrics, especially stitched preforms, have a high potential for lower cost manufacturing and high performance of final composite structures with good damage tolerance and structural integrity (Ogale, 2007). When comparing studies carried out on the same reinforcements, sometimes it seems that contradictions appear; some studies claim that the stitching process does not affect or can slightly improve the properties in the plane, while others reveal that the properties are degraded by a needle that creates slight deviations and breaks the threads.

The technology used for producing the carbon fibre preforms is discussed along with salient results obtained from mechanical testing under compaction, in-plane shear and bending. Tests were conducted on unstitched preforms and preforms stitched using different parameters including stitch density and stitch pattern. It was demonstrated that the stitching configurations and densities affect compaction behavior of preforms leading to a decrease in fibre volume fraction. From shear and bending tests, it was found that stitching shows minimal effect on the response of stitched preforms comparing to unstitched fabrics. This behavior under shear and bending loading contributes the preforms the ability to comply with complex shapes such as T stringers that were manufactured in the framework of the CRIAQ COMP-501 project.

Keywords : Stitched preforms, one-sided stitching (OSS®), compaction, in-plane shear, bending

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART DES MÉTHODES DE FABRICATION DES PRÉFORMES TEXTILES 3D « NEAR-NET SHAPE » POUR DES STRUCTURES COMPOSITES À GÉOMÉTRIES COMPLEXES.....	
1.1 Généralités	3
1.1.1 Les procédés d'infusion liquide de la résine.....	3
1.1.2 L'évolution des préformes textiles.....	4
1.1.3 Types de procédés de fabrication des préformes textiles.....	5
1.2 Les techniques de couture (Stitching).....	6
1.2.1 La couture conventionnelle.....	8
1.2.2 “One Sided Stitching” (OSS®).....	9
1.2.3 Touffetage (Tufting)	11
1.2.4 Technique de broderie.....	11
1.2.5 Avantages et limitations des techniques de couture	12
1.3 Le tissage	13
1.3.1 Du tissage 2D au tissage 3D	13
1.3.2 Tissage 3D multicouches - interlock.....	15
1.3.3 Non-tissés 3D orthogonaux.....	17
1.3.4 Tissage 3D multiaxial	19
1.3.5 Préformes sandwich	22
1.3.6 Textiles 2,5D.....	24
1.3.7 Intérêts et limitations des tissés 3D.....	24
1.4 Tressage	25
1.4.1 Du tressage conventionnel aux préformes tressées 3D.....	25
1.4.2 Tressage 3D « 4-steps »	28
1.4.3 Tressage 3D « 2-steps »	28
1.4.4 Tressage interlock multicouches.....	30
1.4.5 Intérêt et limitations des tressés 3D	30
1.5 Tricotage	31
1.5.1 Textiles multiaxiaux tricotés.....	32
1.5.2 Hybridation tissage/tricotage	33
1.5.3 Intérêt et limitations des tricotés	34
1.6 Analyse comparative des techniques de fabrication des préformes textiles.....	34
1.6.1 Comparaison des techniques de fabrications de préformes 3D « near net-shape »	34
1.6.2 Résumé des principaux potentiels et limitations des techniques textiles 3D	37
1.7 Discussion et analyse critique des techniques de fabrication de préformes 3D	38
1.7.1 Principaux avantages des structures textiles 3D	38

1.7.2	Limitations actuelles à l'utilisation des textiles 3D	39
-------	---	----

CHAPITRE 2 ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES PRÉFORMES

	TEXTILES	41
2.1	Généralités	41
2.2	Sélection du procédé de préformage	42
2.3	Caractérisation des renforts textiles pour la fabrication des pièces composites par préformage	43
2.4	Principaux modes de déformations lors du préformage de textiles	45
2.5	Comportement et caractérisation en traction	47
2.5.1	Traction uni-axiale	47
2.5.1.1	Courbe d'essai typique	47
2.5.1.2	Nature viscoélastique des préformes textiles	48
2.5.1.3	Anisotropie des tissus	49
2.5.2	Traction bi-axiale	50
2.6	Caractérisation du comportement en cisaillement	52
2.6.1	Comportement en cisaillement des tissés	54
2.6.2	Essai de cisaillement par cadre articulé	55
2.6.3	Essai d'extension en biais	57
2.6.4	Comparaison des deux méthodes d'essai en cisaillement	58
2.7	Comportement et caractérisation en flexion	60
2.7.1	Caractérisation expérimentale de la flexion	62
2.7.2	Drapabilité	62
2.8	Caractérisation et comportement mécanique en compaction	64
2.8.1	Montage de compaction	64
2.8.2	Comportement lors de la compression transverse	65
2.8.3	Perméabilité des renforts fibreux	68
2.8.4	Préformage de textiles 3D	69
2.8.5	Modification des comportements par une architecture 3D	70
2.8.6	Compaction de renforts 3D	71

CHAPITRE 3 DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE DE CARACTÉRISATION

	DES RENFORTS COUSUS EN FIBRE DE CARBONE	73
3.1	Plan de travail	73
3.2	Choix des renforts à caractériser	74
3.3	Essais de compaction	76
3.3.1	Quantité de tissus	76
3.3.2	Dimensions des échantillons	77
3.3.3	Procédure de l'essai	79
3.3.4	Essais de compaction localisée	80
3.3.5	Méthode d'analyse des essais de compaction	82
3.4	Essais de cisaillement dans le plan avec cadre articulé	85
3.4.1	Contexte de l'essai de cisaillement	85
3.4.2	Quantité de tissus	86
3.4.3	Dimensions des échantillons	86

3.4.4	Procédure de l'essai	87
3.4.5	Méthode d'analyse des essais de cisaillement en cadre articulé	88
3.5	Essais de flexion simple courbure	91
3.5.1	Contexte de l'essai	91
3.5.2	Quantité de tissus	92
3.5.3	Dimensions des échantillons	92
3.5.4	Procédure de l'essai	93
3.5.5	Méthode d'analyse des essais de flexion	95
CHAPITRE 4 ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX SUR RENFORTS COUSUS EN FIBRE DE CARBONE		101
4.1	Compaction	101
4.2	Compaction localisée	110
4.3	Cisaillement en cadre articulé	116
4.4	Flexion simple courbure	122
CONCLUSION		129
ANNEXE I	GÉOMÉTRIE DU RAIDISSEUR FABRIQUÉ DANS LE CADRE DU PROJET CRIAQ COMP-501	131
ANNEXE II	TECHNIQUE D'ASSEMBLAGE DU RAIDISSEUR FABRIQUÉ DANS LE CADRE DU PROJET CRIAQ COMP-501	133
ANNEXE III	PRÉFORME TYPE AVEC COUTURES SIMPLES ET SUPERPOSÉES	135
BIBLIOGRAPHIE		137

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Revue des techniques de tissage 3D introduisant des fibres en biais (Kamiya et al., 2000)20
Tableau 1.2	Principaux paramètres lors du préformage de formes complexes 3D et des techniques de fabrication textiles.....35
Tableau 2.1	Comparatif des caractérisations du cisaillement.....59
Tableau 3.1	Caractéristiques des tissus étudiés dans le cadre du projet74
Tableau 3.2	Sommaire des échantillons testés en compaction77
Tableau 3.3	Ensemble des échantillons testés en compaction localisée81
Tableau 3.4	Paramètres géométriques utilisés pour l'analyse de l'essai de flexion99
Tableau 4.1	Sommaire de l'évolution de la fraction volumique maximale de fibre obtenues après 5 cycles de compaction108
Tableau 4.2	Sommaire des valeurs moyennes des fraction volumiques de fibre obtenues après 3 cycles de compaction localisée114

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Classification des procédés de fabrication de préformes 3D5
Figure 1.2	Couture conventionnelle : a) concept, b) architectures et c) appareillage8
Figure 1.3	Principe de la couture OSS (Adaptée de Treiber, 2011).....10
Figure 1.4	Principe de la couture aveugle (Adaptée de Treiber, 2011).....10
Figure 1.5	Principe du touffetage (Adaptée de Treiber, 2011)11
Figure 1.6	Procédé de broderie (Adaptée de Brandt et al., 2005)12
Figure 1.7	Schéma représentatif du tissage 2D (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005)14
Figure 1.8	Exemples de tissage 3D multicouches a) orthogonal b) interlock15
Figure 1.9	Exemple de préforme 3D 3Weave™ (Compagnie américaine 3Tex).....17
Figure 1.10	Système de positionnement orthogonal non-tissé (Fukuta et al. 1974)18
Figure 1.11	Technique de placement de fibres combinée avec le touffetage (Potluri, 2008)18
Figure 1.12	Illustration des procédés de fabrication de préformes 3D multiaxiales21
Figure 1.13	Schéma de préformes sandwich fabriquées par Volvet Weaving (Wambua et Anandjiwala, 2011)23
Figure 1.14	Un tisseur de type Maypole :a) Schéma et b) Photographie (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005)26
Figure 1.15	Schéma de l'échange alternatif des mèches lors du tressage27
Figure 1.16	Schéma de fonctionnement du tressage 4-steps (Lomov, Verpoest et Robitaille,2005)28

II

Figure 1.17	Schéma de fonctionnement du tressage 2-steps (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005)	29
Figure 1.18	Schéma de l'architecture de NCF (Tong, Mouritz et Bannister, 2002)	32
Figure 1.19	Procédé et architecture hybride tissage/tricotage (Kamiya et al., 2000)	33
Figure 2.1	a) Distorsion des fibres et zone riche en résine causées par un renfort transversal, b) ondulations des mèches dans le plan et c) des renforts Z dans un tissu 3D interlock (Mouritz et Cox, 2010).....	41
Figure 2.2	Distinction entre les échelles micro, meso et macro (Adapté de Buet-Gautier et Boisse, 2001, Komeli et Milani, 2011).....	44
Figure 2.3	Drapage expérimental d'un textile de verre sur une demi-sphère et déformation des réseaux de lignes (Boisse 2004).....	46
Figure 2.4	Courbe force-extension généralisée d'un essai de traction uni-axiale (Chan et al., 2006).....	48
Figure 2.5	Hystérésis d'un tissu suite à un essai en tension uni-axiale.....	49
Figure 2.6	L'influence de l'embuvage d'un tissu (Boisse, 2004)	50
Figure 2.7	Comportement en tension bi-axiale d'un sergé 2 X 2 de carbone (Boisse, 2004).	51
Figure 2.8	a) Montages de traction bi-axiale, b) surface caractéristique des résultats (Boisse et al., 2011 ; Quaglini, Corazza et Poggi, 2008)	52
Figure 2.9	Essais de cisaillement : a) KES-F, b) test d'extension biais c) test du cadre articulé (Mohammed et al., 2000)	53
Figure 2.10	Analyse de l'état de contrainte lors de l'essai de cisaillement selon le système KES-F (Hu, 2004).....	53
Figure 2.11	Mouvements et courbe caractéristique de l'essai de cisaillement d'un tissu de verre (Allaoui et al., 2007)	54
Figure 2.12	Cadre de cisaillement équipé d'un système de mesure optique des déformations (Boisse, 2004).....	56
Figure 2.13	Test d'extension en biais : a) montage, b) représentation des zones de cisaillement à l'état initial, c) représentation des zones	

	de cisaillement à l'état final, c) courbe de cisaillement (Harrison, Clifford et Long, 2004; Lomov et al., 2008)	57
Figure 2.14	Courbe typique de flexion d'un tissu (Adapté de Hu, 2004)	61
Figure 2.15	Banc d'essai de flexion (ASTM D1388) et la courbe de résultat associée (Boisse et al., 2011)	62
Figure 2.16	Système de détermination de la drapabilité du textile (Hu, 2004).....	63
Figure 2.17	Dispositif d'essai de compaction d'interlock (De Luycker, 2009; Ogale et Mitschang, 2007).....	65
Figure 2.18	Courbe typique de compaction (chargement et décharge) (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005)	67
Figure 2.19	(a) Imbrications possibles des différentes couches les unes dans les autres (nesting); (b) pression locale et moyenne lors de la compaction (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005).....	68
Figure 2.20	Préformage de tissu interlock 3D : a) expérimental, b) simulé, c) stéréo-corrélé (De Luycker, 2009).....	70
Figure 3.1	Les deux configurations de couture testées a) couture simple et b) couture perpendiculaire	75
Figure 3.2	Dimensions des échantillons de compaction (Adapté de Drivas, T. 2014)	78
Figure 3.3	Dispositif de compaction : Machine Instron, plateaux de compaction et table de manipulation des préformes	79
Figure 3.4	Dispositif de compaction localisée : Machine Instron 4482 et plateaux de compaction.....	81
Figure 3.5	Modélisation de l'essai de compaction par un système de ressorts en série	84
Figure 3.6	Dimensions des échantillons dédiés aux essais de cisaillement en cadre articulé	87
Figure 3.7	Montage pour l'essai de cisaillement en cadre articulé	88
Figure 3.8	Schéma de principe de l'essai de cisaillement en cadre articulé	89
Figure 3.9	Dimensions des échantillons pour l'essai de flexion dans une préforme avant le découpage	93

IV

Figure 3.10	Montage expérimental pour essais de flexion.....	94
Figure 3.11	Direction de chargement par rapport à l'orientation de la couture	94
Figure 3.12	Principe de l'essai de flexion a) à l'état initial, b) durant la flexion de la préforme (Adapté de Drivas, T. 2014)	96
Figure 4.1	Fraction volumique de fibre en fonction de la pression de compaction sous sollicitation cyclique de 2 échantillons de préformes non cousues (Uns_1 et Uns_2)	102
Figure 4.2	Fraction volumique de fibre en fonction de la pression de compaction sous sollicitation cyclique de 2 échantillons avec coutures simples d'un pas 4 mm	103
Figure 4.3	Fraction volumique de fibre en fonction de la pression de compaction sous sollicitation cyclique de 2 échantillons avec coutures simples d'un pas de 8 mm	104
Figure 4.4	Fraction volumique de fibre en fonction de la pression de compaction sous sollicitation cyclique de 2 échantillons avec coutures superposées d'un pas de 4 mm	105
Figure 4.5	Fraction volumique de fibre en fonction de la pression de compaction sous sollicitation cyclique de 2 échantillons avec coutures superposées d'un pas de 8 mm	106
Figure 4.6	Comparaison des résultats de compaction des différentes échantillons de préformes cousues et non cousues (1er et 5ème cycle).....	107
Figure 4.7	Observations de l'effet de la compaction sur les trois types de préformes étudiées	109
Figure 4.8	L'évolution de la fraction volumique de fibre au cours de l'essai de compaction localisée des préformes en fibre de carbone non cousues	110
Figure 4.9	L'évolution de la fraction volumique de fibre des préformes avec couture simple d'un pas de 8 mm compactée localement au milieu du fil de couture	111
Figure 4.10	L'évolution de la fraction volumique de fibre des préformes avec couture simple d'un pas de 8 mm compactée localement au niveau du point de couture	112

Figure 4.11	L'évolution de la fraction volumique de fibre des préformes avec couture superposée d'un pas de 8 mm compactée localement113
Figure 4.12	Observations microscopiques à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) de l'effet de la couture sur la préformes.....116
Figure 4.13	Comparaison des résultats de cisaillement cadre articulé des préformes non cousues et cousues.....118
Figure 4.14	Observations des différentes interactions à l'intérieur des lignes de couture : a) simples et b) superposées119
Figure 4.15	La compression latérale des mèches le long d'une ligne de couture dans une préforme ave couture simple d'un pas de 4 mm (adapté de Thanos Drivas, 2014)120
Figure 4.16	Le verrouillage des fibres à l'intérieur des zones de couture sous l'effet de la compression latérale et du cisaillement122
Figure 4.17	Résultats obtenus partir de l'essai de flexion réalisées sur des échantillons de préformes non cousues123
Figure 4.18	Résultats obtenus à partir de l'essai de flexion sur des préformes avec couture simple d'un pas de 4mm124
Figure 4.19	Résultats obtenus à partir de l'essai de flexion sur des préformes avec couture simple d'un pas de 8mm125
Figure 4.20	Comparaison des résultats obtenus à partir des essais de flexion sur préformes non cousues et cousues126
Figure 4.21	Présence du phénomène de flambement de fibres lors de l'essai de flexion d'un échantillon de préforme cousue avec un pas de couture de 4mm.....127
Figure 4.22	Observation du phénomène d'effilochage des fils de couture lors de l'essai de flexion d'un échantillon de préforme cousue avec un pas de couture de 8mm128

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AFP	Advanced fibre placement
BA	Bombardier Aeronautique
BH	Bell Helicopter
CF	Carbon fiber
CRIAQ	Consortium for Research and Innovation in Aerospace in Quebec
CTT	Centre des Technologies Textiles
ETS	École de Technologie Supérieure
HA	Hutchinson Aerospace
ILSS	Inter-laminar shear strength
JB	JB Martin
LCM	Liquid composite moulding
OSS	One Sided Stitching
PAN	Polyacrylonitrile
PF	Picture-frame
PMC	Polymer matrix composite
PMMA	Polymethyl methacrylate
RFI	Resin film infusion
RTM	Resin transfer moulding
UL	Université Laval
UO	Université d'Ottawa
VARTM	Vacuum assisted resin transfer moulding.
Vf	Volume fibre fraction

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

k	Rapport de bi-axialité
F_s	Force de cisaillement en Newton (N)
F_x	Force appliquée au « picture-frame » (PF) en Newton (N)
Φ	Angle du cadre PF en degrés
D_x	Déplacement du cadre PF en millimètre (mm)
l	Largeur du cadre PF en millimètre (mm)
θ_{bet}	Angle de cisaillement lors du test d'extension en biais en degrés
$DC\%$	Pourcentage de drapage (Drape coefficient)
V_f	Fraction volumique de fibres (%)
V_F	Volume de fibres en mètre cube (m^3)
ρ_c	Masse volumique du carbone Kilogramme/mètre cube (kg/m^3)
M	Masse de l'échantillon en Kilogramme (kg)
S	Surface compactée de l'échantillon en mètre carré (m^2)
e	Épaisseur de l'échantillon en millimètre (mm)
θ	Angle instantané du cadre articulé en degrés
F_{s-norm}	Force de cisaillement normalisée Newton/ millimètre (N/mm)
L_F	Largeur du cadre articulé en millimètre (mm)
L_f	Largeur d'un échantillon de renfort fibreux en millimètre (mm)
dx	Déplacement instantané de la partie supérieure du cadre en millimètre (mm)
γ	Angle de cisaillement du test cadre articulé en degrés
F_T	Force transmise à la base de la plate-forme de flexion en Newton (N)
F_t	Force appliquée à la préforme en flexion en Newton (N)
ε	Angle entre la liaison inclinée et le plan horizontal lors de l'essai de flexion en degrés
$\Delta\gamma$	Angle de flexion en degrés
γ_i	Angle à la position instantanée i en degrés
γ_0	Angle que fait le gabarit avant le début de l'essai en degrés
M_o	Moment de flexion autour du point O Newton*millimètre (N*mm)

II

$M_{b\text{-norm}}$ Moment de flexion normalisé de la préforme en $\text{Newton} \cdot \text{millimètre} / \text{millimètre}$
($\text{N} \cdot \text{millimètre} / \text{millimètre}$)

l_f Largeur d'un échantillon de la préforme en millimètre (mm)

INTRODUCTION

Durant son existence, l'homme a connu différentes révolutions qui ont changé son mode de vie et son comportement. Parmi elles, on peut citer la révolution industrielle due à la découverte de l'acier, et celle des plastiques, marquée par le développement de l'industrie du pétrole et ses dérivés. Mais depuis quelques années, il semblerait que nous entamons une nouvelle ère connue par la maîtrise et l'utilisation progressive d'un nouveau type de matériaux appelé matériaux composites. Ces derniers ne sont autres qu'un mélange hétérogène d'au moins deux matériaux de natures différentes, la résine polymère et les renforts fibreux.

En effet, les matériaux composites existaient depuis plusieurs siècles. Par exemple, nos ancêtres ont utilisé les os, le bois et la paille qui sont des matériaux composites constitués de fibres noyées et liées entre elles par des tissus dont le rôle est de distribuer les contraintes et atteindre une protection optimale contre l'environnement extérieur.

Grâce à la combinaison de bonnes performances mécaniques et de réduction de masse par rapport aux matériaux traditionnels (métaux et alliages), l'émergence progressive des matériaux composites a connu un grand essor dans l'industrie aéronautique et aérospatiale. En effet, aujourd'hui, les dernières générations des avions commerciaux de Boeing (B 787) et d'Airbus (A 380) contiennent plus de 50 % en masse de matériaux composites (Potluri, 2008). Ces matériaux sont de plus en plus utilisés dans divers domaines industriels vu les avantages nombreux qu'ils présentent :

- Réduction de masse,
- Propriétés mécaniques remarquables,
- Autre performances (résistance chimique, résistance électrique, résistance aux changements de température, résistance aux érosions...),
- Bonne adaptation pour la conception de pièces complexes et multifonctionnelles,
- Réduction de nombre de pièces à assembler.

En raison de leur potentiel significatif de réduction de masse et des autres avantages cités ici, les recherches actuelles dans le domaine des matériaux composites destinés à l'industrie aéronautique convergent vers l'étude et la compréhension exhaustive de l'utilisation des structures primaires et secondaires (panneaux de fuselage et ailes) (Poe, Dexter et Raju, 1997). Ces recherches qui ont aussi pour but de minimiser le nombre d'assemblages, d'optimiser la conception et le temps de fabrication, portent sur le développement des matériaux composites à base de préformes textiles 3D (Greenhalgh et Hiley 2003).

Ce projet de maîtrise s'inscrit dans le cadre de ces développements qui se déroulent dans un contexte industriel international insistant sur des diminutions des coûts de fabrication, des augmentations de la production ainsi que sur la promotion de la filière des matériaux composites hautes performances et des textiles techniques en particulier les renforts 3D au Canada. Ainsi, l'objectif principal de ce mémoire est de contribuer concrètement au développement des préformes textiles 3D « near net-shape » qui semblent prometteuses pour des applications aéronautiques via l'étude et la compréhension approfondie du comportement mécanique de ces préformes lors du mécanisme de préformage afin d'avoir des pièces à géométries complexes.

Ce mémoire est subdivisé en deux parties principales; la première est consacrée à la revue de littérature, tandis que la deuxième est réservée à l'étude expérimentale des renforts choisis pour atteindre les objectifs du projet CRIAQ COMP-501. Ainsi, on s'intéressera dans le premier chapitre, à l'étude des différents renforts textiles 3D existants sur le marché, à l'analyse critique de leurs technologies de fabrication ainsi qu'à leur intérêt pour la production des structures composites pour divers usages (aéronautique, transport, militaire, ...). Le deuxième chapitre se penche sur l'étude des différents modes de préformage des renforts textiles et les méthodes expérimentales pour les caractériser mécaniquement sous diverses sollicitations. Le troisième chapitre sera consacré à l'étude des préformes textiles assemblées avec la technique de couture OSS. Finalement, les résultats des essais mécaniques réalisés sur les préformes 3D cousues sont présentés et analysés dans le quatrième chapitre.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE L'ART DES MÉTHODES DE FABRICATION DES PRÉFORMES TEXTILES 3D « NEAR-NET SHAPE » POUR DES STRUCTURES COMPOSITES À GÉOMÉTRIES COMPLEXES

1.1 Généralités

Dans le domaine aéronautique et aérospatial, l'innovation technologique industrielle des dernières années fût sans aucun doute celle des matériaux composites, car ils permettent d'alléger considérablement le poids des pièces d'une part, et de réduire le nombre des pièces à assembler d'autre part. On s'intéresse dans le cadre du projet CRIAQ COM-501, aux matériaux composites à renforts textiles et plus particulièrement aux textiles tridimensionnels. Ces matériaux de hautes performances sont conçus pour la fabrication des éléments structuraux dans le domaine aérospatial, marin et aéronautique.

Le choix du type de matrice et de renfort, ainsi que l'arrangement (orientation) des fibres sont bien entendu liés aux propriétés finales recherchées (propriétés mécaniques, aspect de surface, ...). Par contre, le choix de la mise en œuvre dépend de la pièce à réaliser. En effet, la nature des pièces (type de fibre et type de matrice) et leur géométrie, rendent certains procédés de fabrication plus convenables que d'autres. Au cours des vingt dernières années, l'utilisation des procédés LTM (Liquid Transfer Moulding), RTM (Resin Transfer Moulding) et VARTM (Vaccum Assisted Resin Transfer Moulding), est sans cesse croissante dans la majorité des secteurs.

1.1.1 Les procédés d'infusion liquide de la résine

Les composites ont vu leur proportion d'utilisation augmenter grâce aux tissus pré-imprégnés de résine permettant de contrôler la proportion fibreuse (V_f) et la qualité générale de la pièce. Ils sont aujourd'hui massivement utilisés dans l'aérospatiale, mais présentent des inconvénients logistiques. Effet, ils nécessitent des zones de stockage à basse température et

leur mise en œuvre est longue tant pour le drapage que pour la consolidation dans un autoclave (Durand, 2008). Enfin, leur faible drapabilité rend difficile la réalisation de pièces complexes, menant à l'utilisation massive d'assemblage mécanique de type rivetage (Mouritz et al., 1999).

L'intérêt actuel croissant des préformes sèches est associé au développement de techniques d'infusion rapide de type RTM (Resin Tranfert Moulding) ou RFI (Resin Film Infusion) (Lowe, 2005). Contrairement aux méthodes de consolidation de pré-imprégnés sous autoclave, les procédés d'infusion liquide, ont des temps d'infusion nettement plus courts et présentent beaucoup d'avantages dans la qualité des pièces fabriquées.

1.1.2 L'évolution des préformes textiles

Les procédés d'infusion de résine n'utilisent pas de fibres pré-imprégnées, mais des préformes de fibres sèches. La fabrication de renforts fibreux bidimensionnels (2D) par tissage, tricotage ou tressage s'avère maîtrisée et leur usage est bien répandu. Cependant, leur utilisation, qui consiste en un empilement de couches textiles 2D se traduit par de faibles propriétés mécaniques dans la direction perpendiculaire au plan du stratifié (moins de 10% des propriétés dans le plan) (Tong, Mouritz et Bannister, 2002). Également, il convient de noter une susceptibilité importante au délaminage entre deux couches de stratifiés même à très faible charge, entraînant ainsi une ruine rapide et catastrophique de la pièce. Les renforts 2D sont donc disqualifiés pour les structures critiques (Miravete, 1999).

Diverses techniques de fabrication de préformes à architecture tridimensionnelle (3D) ont été élaborées pour pallier aux limitations des préformes 2D. Il s'agit de procédés automatiques relativement complexes s'inspirant des techniques conventionnelles de couture, de tissage, de tressage et de tricotage. Les préformes issues de ces méthodes présentent des fibres dans les 3 directions cartésiennes, augmentant ainsi l'équilibre des propriétés mécaniques dans l'espace et la tolérance aux dommages de la pièce composite finale (Greenhalgh et Hiley, 2003).

L'élaboration de préformes unitaires avec ces techniques est particulièrement ambitieuse : ainsi des préformes « near net-shape » sont réalisées pour réduire les coûts de fabrication en limitant les pertes de matières et en réduisant le nombre d'opérations de découpe et de manipulation (Bogdanovich et Mohamed, 2009). Ces préformes 3D peuvent être aussi de formes complexes (présence de doubles courbures, embranchements, trous, variations de section etc.). L'utilisation de procédés automatiques permet de limiter l'intervention de main d'œuvre qualifiée et coûteuse dans le processus de fabrication et d'assurer une meilleure qualité des pièces.

1.1.3 Types de procédés de fabrication des préformes textiles

Il existe de nombreuses revues de littérature sur les procédés de fabrication de renforts textiles 3D. Bien qu'il soit possible de classer ces méthodes par nombre d'axes de renforcements (Wambua et Anandjiwala, 2011), il a été choisi ici de classer les procédés par types de technologie en cinq grandes familles (bien que certains soit hybrides). On peut distinguer le tissage, le tressage, le tricotage et les techniques de coutures comme présentées à la figure 1.1.

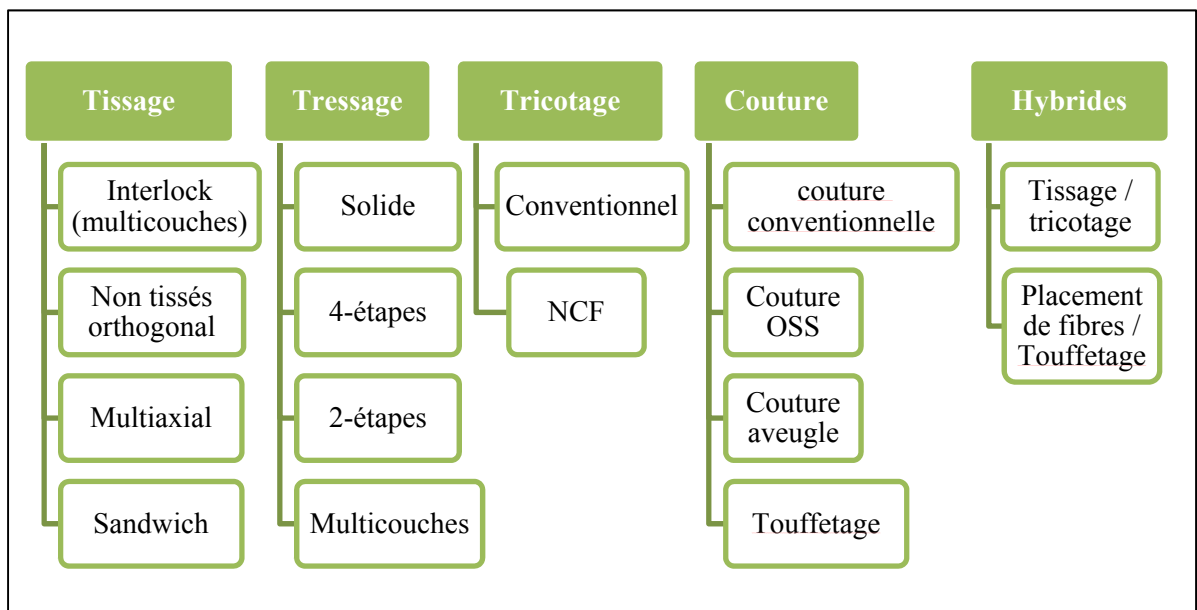


Figure 1.1 Classification des procédés de fabrication de préformes 3D

Dans la suite de ce rapport, on se limitera aux procédés permettant de créer des préformes sèches unitaires à géométrie complexe « near net-shape » en vue d'une infusion de résine liquide pour la réalisation de structures hautes performances. Ainsi les techniques suivantes ne seront pas décrites ici :

- Les préformes utilisant des fibres coupées qui présentent une orientation aléatoire de fibres et de faibles propriétés mécaniques, ne sont pas appropriés pour des structures haute performances (Redd et al, 1997),
- Le Z-pinning qui est une technique principalement utilisée pour renforcer localement dans la direction Z des composites fabriqués à base de pré-imprégnés, ne sera pas abordée dans ce rapport (Partridge, Bonnington et cartié, 2003),
- L'utilisation des nanotubes de carbone comme renforts transversaux pour augmenter les propriétés des textiles semble prometteuse mais ne sera pas revue en détail ici (Wicks, De Villoria et Wardle, 2010).

Le vocabulaire et les principes de base des technologies textiles sont disponibles et particulièrement bien expliqués dans la littérature (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005) et ne seront pas repris dans ce présent mémoire pour des raisons de simplification.

1.2 Les techniques de couture (Stitching)

Le procédé de couture semble le plus simple des technologies de fabrication et d'assemblage des préformes 3D qui seront présentées dans ce présent manuscrit.

En effet, les tissus cousus sont des préformes 2D renforcées dans la direction z, par une mèche "couture" qui traverse la préforme dans son épaisseur. Ce renfort dans l'épaisseur peut être dirigé soit perpendiculaire au plan horizontal, soit incliné. Ils sont alors constitués de deux éléments principaux ; la structure non cousue et la couture.

- La structure de la préforme non cousue peut être des empilements de monocouches constituées par des mats, des stratifiés ou par des bidirectionnels (tissus, tricoté, tressé

multiaxial) ou également elle peut être une structure sandwich.

- La couture est réalisée soit en piquage soit en chaînette (avec ou sans bouclette), sur des pré-imprégnés ou sur des préformes sèches. Elle peut être verticale ou inclinée avec ou sans entrecroisement.

La technologie de couture par addition de renforts dans la direction transverse des textiles pouvant être assemblés pour former des préformes complexes permet d'augmenter l'intégrité de la structure (tolérance aux dommages) et ses performances dans la direction des coutures hors-plan (Brandt, Drechsler et Filsinger, 2001). Relativement peu couteuse en termes d'investissements initiaux en comparaison aux techniques de tissage ou de tressage, la couture de textile peut être facilement automatisée et être utilisée à grande vitesse (Tong, Mouritz et Bannister, 2002). Par contre, il est certain que la perforation de textiles 2D entraîne des déviations de fibres et dommages avec des effets sur les propriétés mécaniques pas complètement compris (Mouritz et Cox, 2010). Par ailleurs, ces techniques ne peuvent plus être considérées comme des méthodes de préformage directes puisqu'elles nécessitent une étape supplémentaire dans le processus de fabrication (Weimer, Mitschang et Manfred, 2002). Un exemple célèbre de l'usage de la couture pour la fabrication des préformes complexes dans le secteur aéronautique est le projet d'envergure de la NASA en collaboration avec Boeing. Ce projet était basé sur la couture d'ailes d'avion sur plus de 12 m de long, 38 mm d'épaisseur (Karal, 2001). Plus récemment, une structure composite de porte d'avion sans assemblage mécanique grâce à l'utilisation de coutures a été développée par Latécoère et ses partenaires Européens (Ichard, 2011).

Différentes techniques de fabrication et d'assemblage des préformes sèches ont été développées dont une excellente revue de littérature est donnée par Treiber (Treiber, 2011). Dans la suite de ce chapitre, de brèves descriptions seront présentées.

1.2.1 La couture conventionnelle

La couture conventionnelle consiste à insérer un fil de couture à l'aide d'une aiguille à partir d'une surface, tandis que l'autre côté de la préforme est bloqué par un système de bobine. Dans la littérature (Ogale et Mitschang, 2004), on trouve que les trois techniques de couture conventionnelle les plus utilisées sont la technique de couture chaînette « Chain stitch », la couture nouée « Lock stitch » et la couture nouée modifiée « Modified Lock stitch ». Le principe de ces techniques est illustré à la figure 1.2.

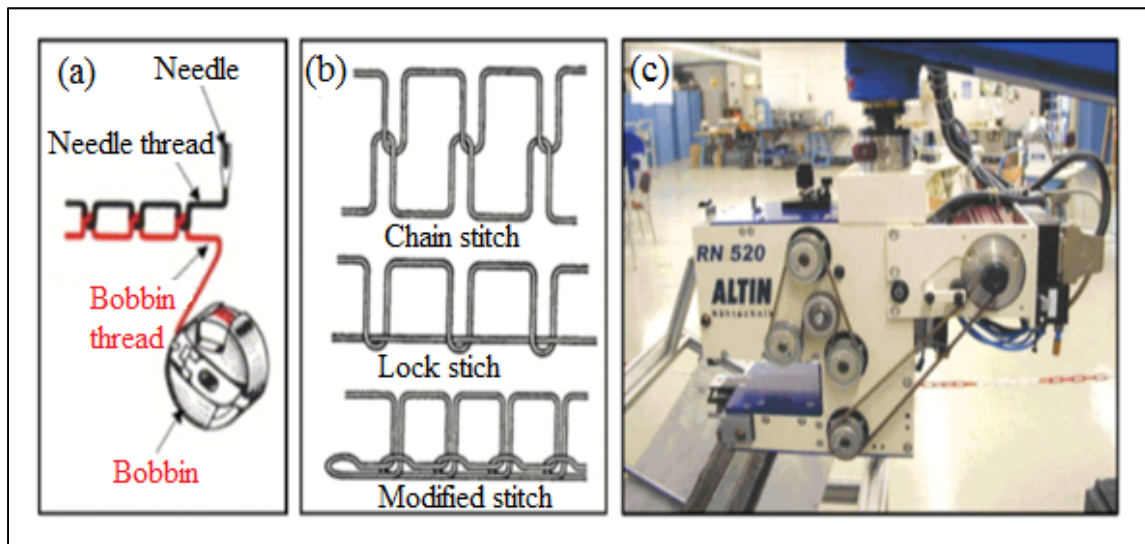


Figure 1.2 Couture conventionnelle : a) concept, b) architectures et c) appareillage

La technique de couture chaînette s'avère la plus utilisée et adaptée à la fabrication et l'assemblage des préformes dédiés aux matériaux composites structuraux. Ce potentiel d'utilisation est lié à sa simple mise en œuvre grâce à l'usage d'un seul fil de couture moins tendu. Cette distinction offre à la préforme cousue une très bonne flexibilité et drapabilité. En revanche, le fil de couture qui est peu tendu peut provoquer l'ondulation et l'écartement des fibres lors du préformage générant ainsi des zones avec un faible taux de fibres. Ces zones représentent un risque pour la structure composite vu qu'elles seront comblées par la résine lors de l'imprégnation de la préforme, ce qui mène à la création de poches ou amas de résine (Ogale et Mitschang, 2004).

Il est reporté dans la littérature (Dransfield et al., 1994; Ogale et Mitschang, 2004) que la couture nouée est la plus répandue dans l'industrie du textile. Son principe est basé sur l'introduction de deux fils de couture; le premier avec l'aiguille et le second via la bobine. La boucle est ainsi créée à l'intérieur de la préforme. Ce type de renforcement de la préforme dans l'épaisseur permet d'avoir une meilleure résistance par rapport à la couture chaînette. Par contre, l'existence de la boucle entre les plis engendre une concentration de contraintes qui peuvent affaiblir la structure. Ainsi, l'utilisation de la couture nouée est déconseillée pour l'assemblage de préformes destinée à la fabrication des pièces composites structurales.

Pour pallier aux inconvénients de couture nouée, un troisième type de renforcement conventionnel a été développé. La technique de couture nouée modifiée « modified lock stitch » permet l'entrecroisement des fils en surface et non plus au milieu de la préforme, limitant ainsi, les distorsions internes et les concentrations de contraintes (Dransfield et al., 1994; Ogale et Mitschang, 2004). Cette technique est souvent sollicitée lorsqu'il s'agit de renforcements de préformes pour composites.

1.2.2 “One Sided Stitching” (OSS®)

Le renforcement par couture d'une structure complexe est limité par l'obligation d'avoir accès à la préforme des deux côtés. Cet inconvénient a poussé les chercheurs et industriels à développer des techniques qui ne requièrent accès qu'à un seul côté (Thrum, 2005).

Un premier concept développé par l'institut des textiles d'Aachen (ITA) en Allemagne, propose d'entrelacer les deux fils de couture par deux aiguilles inclinées de 45° (figure 1.3). Ce procédé permet de coudre à haute vitesse (1400 points/ minute) sur une épaisseur maximale de 8 mm (Treiber, 2011).

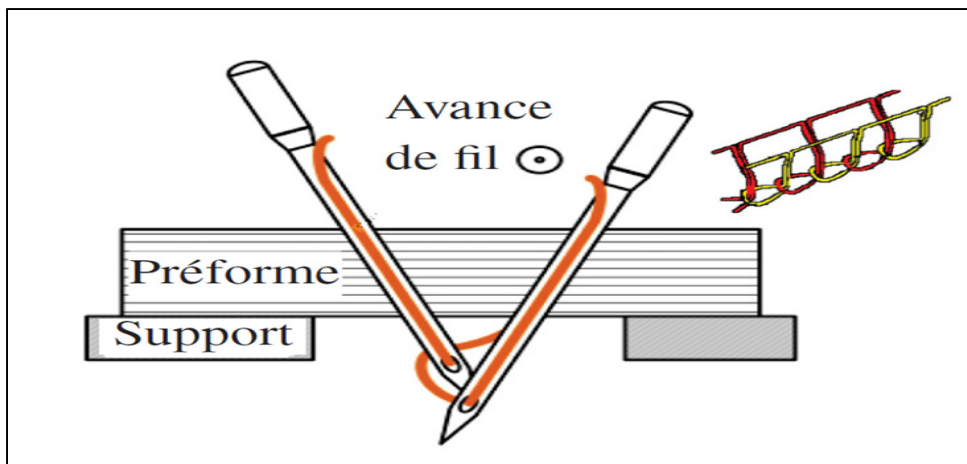


Figure 1.3 Principe de la couture OSS (Adaptée de Treiber, 2011)

L'usage d'une aiguille courbée pour réaliser des coutures « aveugles » (blind stitching) afin d'entrelacer les couches du stratifié est une seconde option connue depuis des années dans l'industrie vestimentaire (figure 1.4) (Ogale, Mitschang, 2004). Il faut noter qu'à ce stade, l'aiguille ne transverse pas entièrement la préforme et l'action de couture peut donc être réalisée directement sur le moule avant l'infusion de la résine.

L'une des premières utilisations de cette technique remonte à 2002, lorsque le géant de l'aéronautique Airbus a fait appel à cette technique d'assemblage pour la cloison arrière de l'A380.

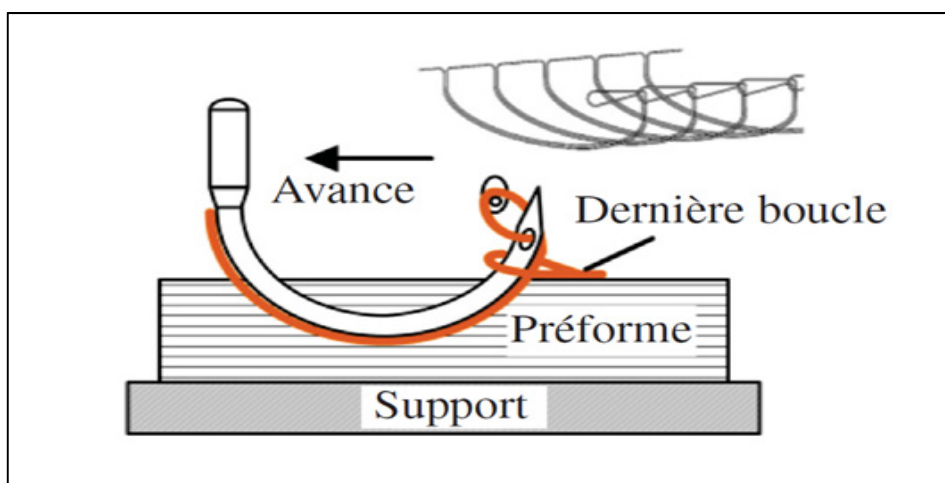


Figure 1.4 Principe de la couture aveugle (Adaptée de Treiber, 2011)

1.2.3 Touffetage (Tufting)

Le touffetage est une autre technique OSS® se basant sur l'utilisation d'une seule aiguille sans tête au design particulier. Il est ainsi permis de coudre des laminés sans l'entrelacement de deux fils de couture. La friction générée par les différents plis maintient le fil en place pendant l'opération, une boucle sécurisant le fil de couture en fin de passe. La figure 1.5 présente le schéma de principe du procédé de touffetage.

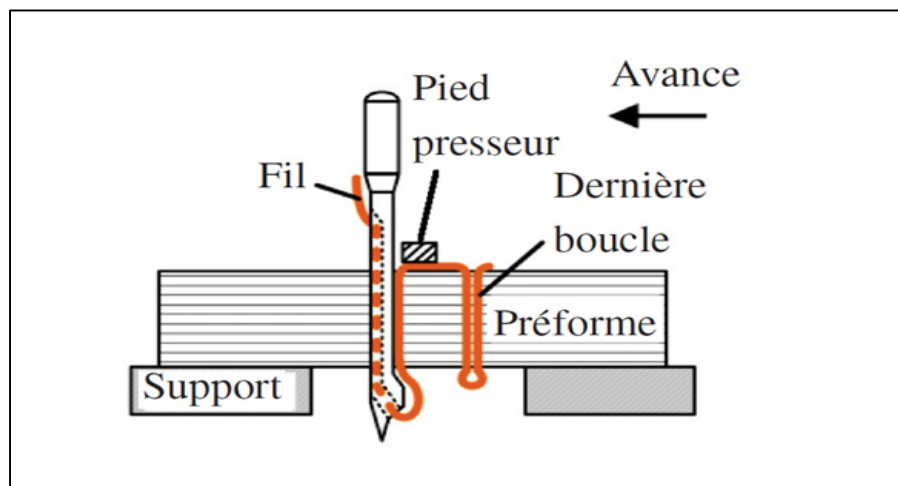


Figure 1.5 Principe du touffetage (Adaptée de Treiber, 2011)

On rapporte souvent dans la littérature qu'il y a possibilité de coudre des épaisseurs importantes aussi bien à plat que sur des profils incurvés (Treiber, 2011) comme la possibilité de réaliser du « blind tufting » (Préau, Treiber et Partridge, 2011).

1.2.4 Technique de broderie

La broderie peut être très utile pour la fabrication de préformes pour des applications composites hautes performances. En utilisant des machines à coudre et à broder relativement conventionnelles du types Cornely et Schiffli, il est possible de renforcer de manière localisée les zones de fortes contraintes par des mèches judicieusement mises en place (Brandt, Filsinger et Gessler, 2005). Bien que le procédé soit encore lent et cher (Lowe, 2005), sa capacité de

renforcer suivant des directions optimisées est particulièrement appropriée pour des trous et points d'attache comme le montre la figure 1.6.

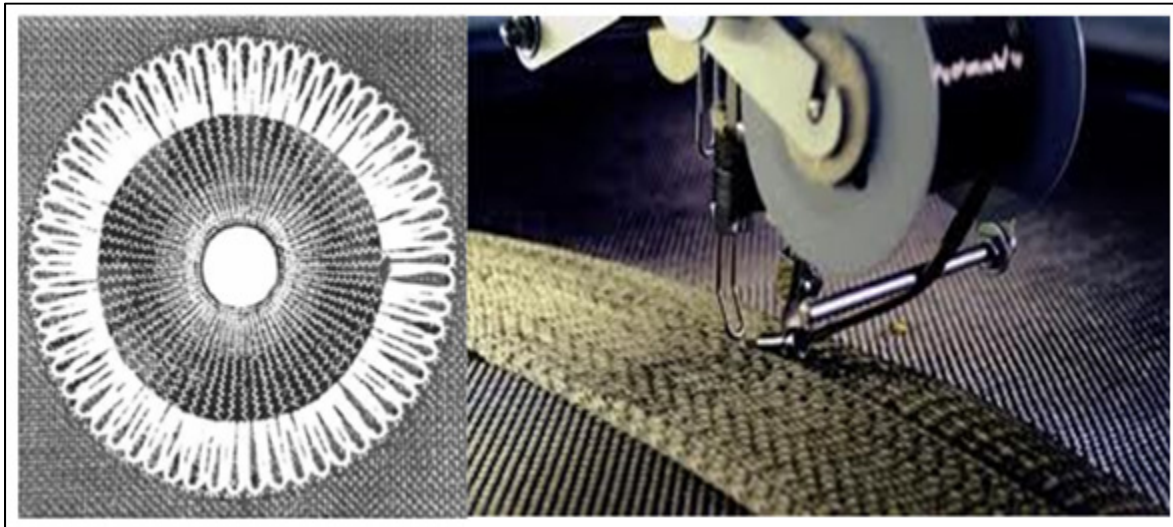


Figure 1.6 Procédé de broderie (Adaptée de Brandt et al., 2005)

Schiebel, Block et Herrmann ont détaillé les méthodes d'optimisation nécessaires au développement de ces techniques brevetées dans les années 90 (Schiebel, Block et Herrmann, 2008). Utilisée par ailleurs par Hightex GmbH sous le nom de « Tailored Fibre Placement (TFP) », cette technique a notamment permis de fabriquer des poutres en I courbées pour Eurocopter réduisant de 60% la masse de la structure en aluminium préexistante (Bannister, 2004).

1.2.5 Avantages et limitations des techniques de couture

D'une manière générale, l'utilisation des techniques de couture présente des avantages intéressants lorsqu'on cherche à renforcer et à assembler des préformes textiles destinées à la fabrication de pièces composites structurales. En revanche, il se peut que ces technologies de couture engendrent des défauts esthétiques pouvant réduire les caractéristiques mécaniques de la pièce finale (Mouritz et Cox, 2010). On pourra résumer les avantages et les inconvénients de ces techniques comme suit :

▪ **Avantages :**

- Amélioration de la manipulation des préformes,
- Augmentation des performances hors-plan,
- Amélioration de la résilience Mode I et II,
- Procédé simple, relativement peu cher et facilement automatisable,
- Grande flexibilité, possibilité de renforcer localement des structures ayant de fortes contraintes transverses,
- Possibilité de remplacer les assemblages mécaniques (de type rivetage) sur les pièces composites.

▪ **Inconvénients :**

- Réduction des propriétés dans le plan,
- Déviations de fibres autour des renforts transversaux, création de zones riche en résine (potentiel sites d'initiation de fissures),
- Dommages des fibres, abrasion des aiguilles et des fibres (carbone),
- Ajout d'une étape supplémentaire dans le processus de fabrication,
- Difficulté de coudre des structures épaisses,
- De nombreux paramètres restent encore relativement mal compris : durabilité, prédiction, relations paramètres/propriétés.

1.3 Le tissage

1.3.1 Du tissage 2D au tissage 3D

Le tissage semble être la plus avancée des techniques textiles ainsi que la plus utilisée puisque 70% des textiles 2D utilisés pour la fabrication de composites en 1989 étaient des tissés (Kamiya et al., 2000). Des revues détaillées sur le tissage 2D sont largement disponibles dans la littérature (Chou, 1992 ; Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005).

Le tissage 2D correspond à entrelacer des fils de trame « weft » entre des fils de chaîne « warp » parallèles. Une foule (shedding) est formée par les harnais qui retiennent et écartent d'une manière précise les fils de chaîne afin de permettre l'insertion des fils de trame. À la fin,

un peigne (reed) vient rabattre les différents fils pour former un tissu bidirectionnel. La figure 1.7 illustre le mécanisme du tissage 2D.

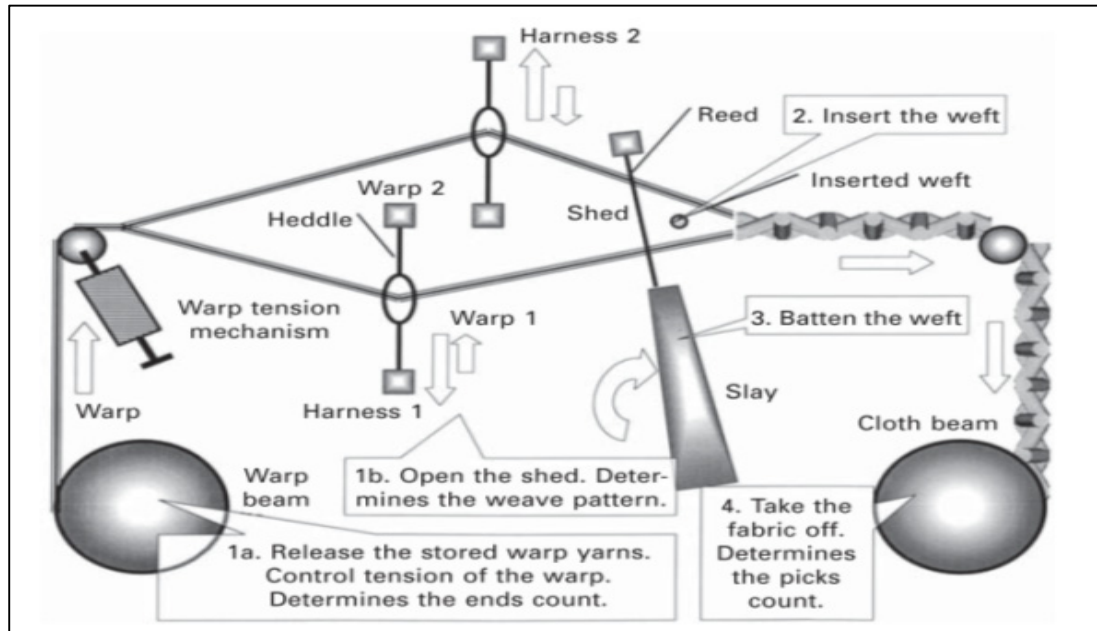


Figure 1.7 Schéma représentatif du tissage 2D
(Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005)

Différentes armures textiles peuvent être accomplies suivant le motif de tissage adopté. Le système « Jacquard » dont les fils de chaîne sont contrôlés individuellement par des lisses est le plus utilisés et peut atteindre des vitesses très élevées, jusqu'à 600 insertions de trame par minute.

En 1972, les premiers tissus 3D carbone-carbone furent développés pour augmenter la durabilité de frein d'avions en remplacement d'alliages haute température (Tong, Mouritz et Bannister, 2002). Le tissage 3D permet d'augmenter les faibles performances hors-plan des stratifiés de tissus 2D et d'augmenter leur tolérance aux dommages par l'ajout de renfort à travers l'épaisseur.

La totalité des revues de littérature établies sur la caractérisation des préformes 3D sont dédiées aux tissés 3D vu l'ancienneté de leur utilisation dans divers domaines de l'industrie. Les

prochains paragraphes seront consacrés à présenter et étudier brièvement les différents types de tissés 3D.

1.3.2 Tissage 3D multicouches - interlock

Le tissage 3D multicouches ou interlock se base sur le tissage 2D et nécessite d'avoir plusieurs couches de fibres de chaîne dont leur nombre détermine l'épaisseur de la préforme 3D finale. Mais la notion de couche est peu pertinente pour un matériau monobloc, on parle alors de $N+1/2$ couches, N correspondant au nombre de fils de trame insérés successivement (De Luycker, 2009).

Un certain nombre de mèches de chaîne est utilisé pour lier les couches de textiles entre elles en s'entrelaçant à différentes épaisseurs du textile. L'utilisation d'une commande numérique est nécessaire vue la complexité des mouvements des lisses afin de permettre le tissage interlock. L'angle que ces mèches font avec les fils de chaîne dans le plan permet de créer différentes géométries de textiles 3D comme le montre la figure 1.8.

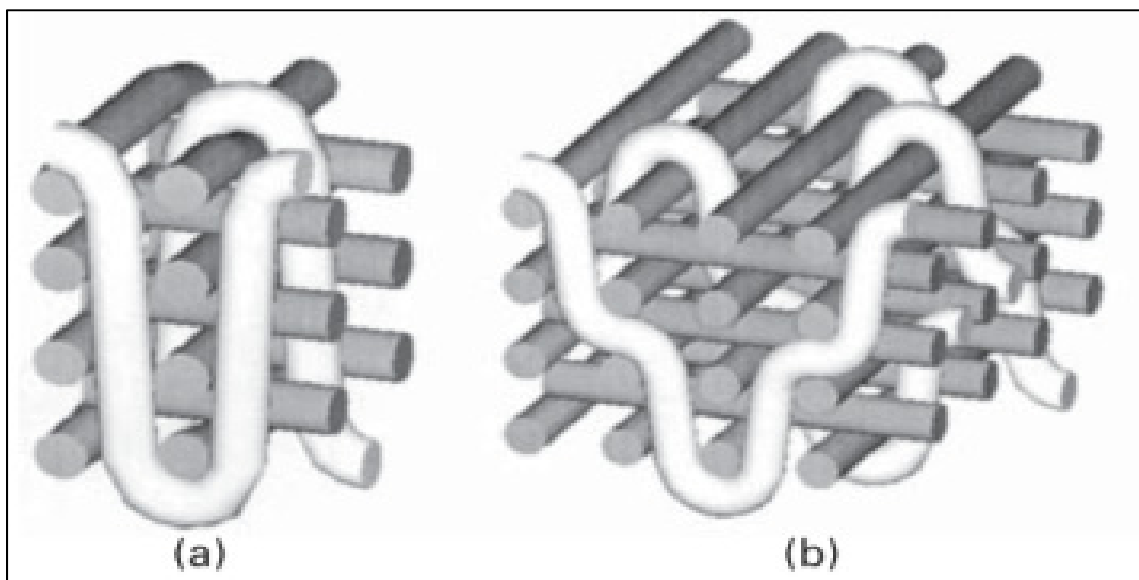


Figure 1.8 Exemples de tissage 3D multicouches a) orthogonal b) interlock (De Luycker, 2009)

Si les mèches de chaîne s'entrelacent avec uniquement les couches voisines (layer-to-layer), l'ondulation est moins extrême que l'interlock à travers l'épaisseur. Dans le cas de la configuration orthogonale, les mèches de chaîne s'enchevêtrent entre les faces avant et arrières de la préforme de manière verticale participant ainsi à la résistance hors-plan de la préforme. En revanche, cette architecture ne permet plus de consolider les propriétés dans le plan de la préforme (Mouritz et al., 1999).

Bien que des formes ouvertes ou des sections en I puissent être fabriquées, ces techniques sont limitées à des formes relativement plates et simples mais présentent l'avantage d'utiliser une évolution relativement simple de métiers à tisser conventionnels (Tong, Mouritz, Bannister, 2002).

Une application commerciale de ces techniques sont les préformes 3WeaveTM mises au point par la société Américaine 3Tex. Dans cette technique brevetée, les mèches de renforts transverses orthogonales sont différentes de celle des fibres de chaîne, leur positionnement et leur taille sont spécialement optimisés pour limiter l'ondulation des fibres X et Y du plan (Bogdanovich et Mohamed, 2009). D'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 5 cm (figure 1.9), ces préformes ont permis des économies importantes sur diverses applications (Bannister, 2004).



Figure 1.9 Exemple de préforme 3D 3Weave™
(Compagnie américaine 3Tex)

1.3.3 Non-tissés 3D orthogonaux

Un inconvénient des tissés multicouches 3D réside dans la présence de fibres de chaîne extrêmement ondulées ; la tension de ces renforts interlock peut provoquer une déviation importante des mèches de trame et de chaîne voisines. Quelques techniques de positionnement des fibres dans les trois directions (X, Y et Z), de manière optimisée ont été mises au point pour limiter ces effets. Les mèches ne sont pas à proprement dit entrelacées, et on ne parle plus alors de tissage.

Ces méthodes sont plus complexes que les méthodes de tissage 3D multicouches et leur production lente conduit à une utilisation très limitée (Tong, Mouritz, Bannister, 2002) malgré un Vf rapporté plus élevé que les tissus multicouches (Wappat, 2006). L'exemple le plus souvent cité dans la littérature est celui du système breveté de Fukuta (figure 1.10) (Fukuta et al., 1974).

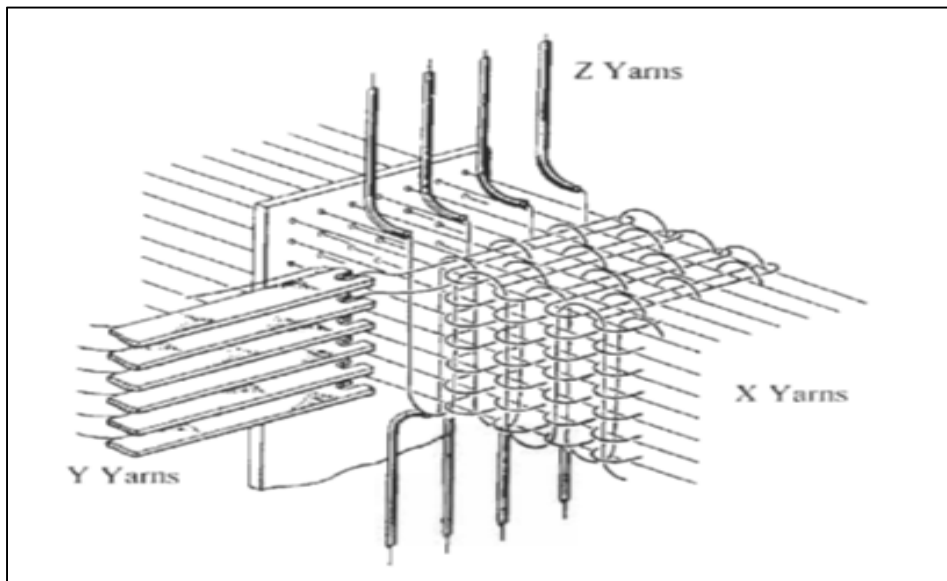


Figure 1.10 Système de positionnement orthogonal non-tissé
(Fukuta et al. 1974)

Beaucoup plus récemment, Potluri propose le placement robotisé de fibres comme une alternative au tissage 3D. S'inspirant des techniques de placement automatique de bande de pré-imprégnés, cette technique relativement simple a été développée pour le placement de fibres sèches sur un support suivant différentes orientations grâce à des broches fixées sur les côtés du support tel montré à la figure 1.11.

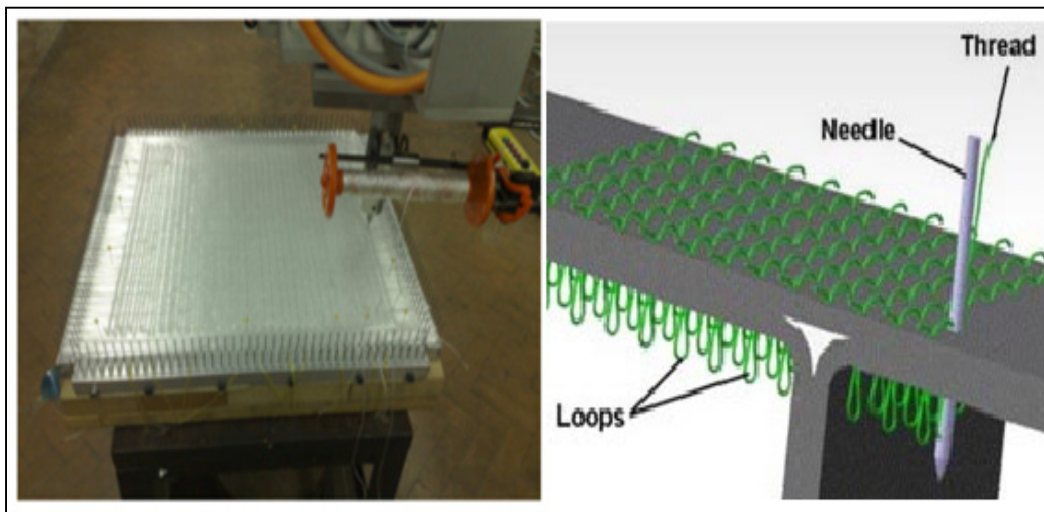


Figure 1.11 Technique de placement de fibres combinée avec le touffetage
(Potluri, 2008)

Une fois que l'épaisseur souhaitée est obtenue, des renforts suivant l'épaisseur peuvent être ajoutés grâce à une tête de touffetage montée sur un bras robotisé.

Cette méthode offre la possibilité de créer des préformes de géométrie très complexe (contour arbitraire sur un support courbé). Cette technique permet aussi d'avoir un excellent positionnement multiaxial des fibres ce qui permet d'avoir une ondulation moins prononcée de ces dernières. Malgré tout, des efforts pour augmenter le Vf et la vitesse du procédé demeurent les grands défis à mener dans l'avenir (Potluri et al., 2009, Potluri, 2008).

1.3.4 Tissage 3D multiaxial

Pour pallier à la limitation de l'orientation des fibres dans les préformes tissés 3D multicouches (orientation seulement à 0° et 90°), de très nombreuses techniques ont été développées pour insérer des mèches en biais (le plus souvent à $\pm 45^\circ$) (Tong, Mouritz, Bannister, 2002). Il s'agit de préformes dont les couches de mèches de chaîne, de trame et les renforts en biais ou transversaux ne sont plus tissées entre elles mais peuvent être insérées de manière très contrôlée. Il ne s'agit donc plus toujours du procédé de tissage, bien que ces préformes soient fabriquées sur des métiers conventionnels modifiés (Gokarneshan et Alagirusamy, 2009).

Les récentes optimisations de machines sont nombreuses et complexes. Des revues exhaustives de ces différents développements sont largement disponibles (Bilisik, 2011a; Kamiya et al., 2000). Dans ce rapport, sont repris certaines de ces avancées ; le tableau 1.1 reprend notamment les intérêts et limitations de certaines de ces méthodes, le plus souvent protégées par des brevets.

Tableau 1.1 Revues des techniques de tissage 3D introduisant des fibres en biais
(Kamiya et al., 2000)

	Auteurs	Description	Intérêt / limitation
a	(Ruzand et Guenot, 1994)	Utilisation de barbins (lappets)	Tissé interlock 4 couches, biais dans le plan Multicouche tissé limité, Vf faible et absence de réels renforts à travers l'épaisseur
b	(Anahara, Yasui et Omari, 1991)	Métiers 5 axes : Utilisation d'arbres à vis (screw shaft system) pour tenir les mèches de chaîne, de trame et orienter les fibres en biais, le renfort Z est inséré par une lance et une aiguille (rapier needle system)	Non-tissé, multicouches Biais dans le plan, et renforts Z Manque d'uniformité et Vf faible
c	(Yasui et al., 1993)	Utilisation de blocs de guidage en rotation (guide blocks) pour placer les fibres en biais	Meilleure uniformité des fibres en biais Dommages des fibres à cause de la lance
d	(Bilisik et Mohamed, 1994)	La chaîne est mise en place par des tubes (rapier), la trame et les renforts sont mis en place des aiguilles	Orthogonal non tissé avec biais non uniforme Vf plus élevé
e	(Mood et Mahboubian-Jones, 1992)	Peigne de battant dévié (split-reed) pour introduire les biais entre les mèches de trame	Préforme uniforme mais procédé complexe pour des vitesses de tissage importantes Les mouvements de la foule (shedding) peuvent entraîner une abrasion des fibres
f	(Anahara, Yasui et Omari, 1992)	Translation et rotations de bobines posées sur des disques	Tissage tridimensionnel polaire (axial, circonférentiel, biais), Procédé complexe, abrasion des fibres

La figure 1.12 illustre les éléments caractéristiques de ces quelques concepts décrits dans ce rapport. Les métiers de tissage multiaxial présentés dans cette section sont encore à un stade très précoce.

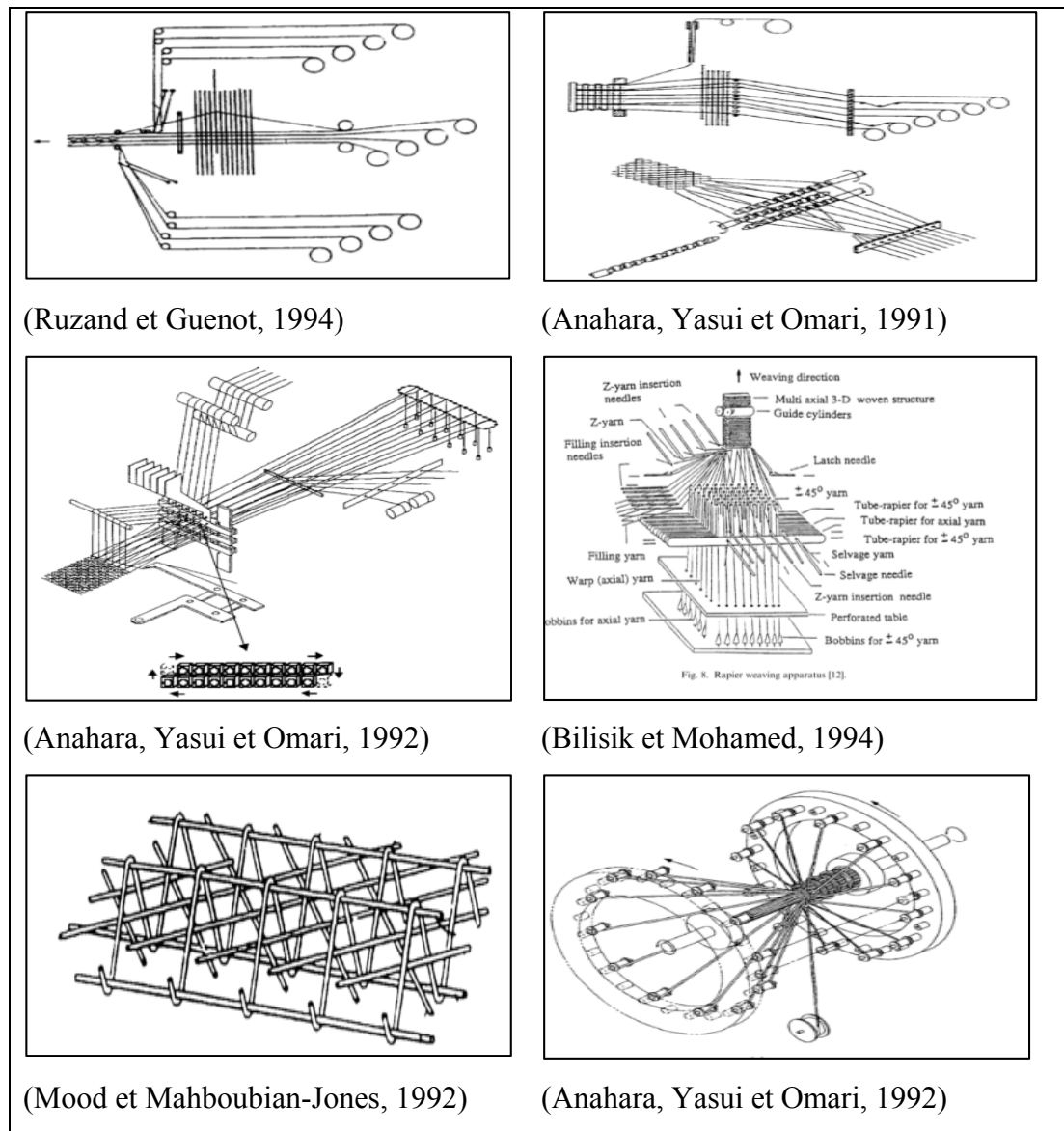


Figure 1.12 Illustration des procédés de fabrication de préformes 3D multiaxiales

Bilisik a mené un intéressant travail de comparaison de deux méthodes de tissage multiaxial avec des fibres en biais dans lesquelles les fibres sont placées par une lance (tube-rapier) ou par un véhiculeur (tube-carrier). Un large nombre de paramètres a été étudié. La technique par carrier, plus dispendieuse et longue à mettre en place, apporte une stabilité et uniformité supérieure au placement des fibres en biais et un Vf plus haut (jusqu'à 47.5%) et donc des propriétés mécaniques plus élevées. Par contre, davantage d'études sont nécessaires sur l'optimisation du procédé de fabrication et des propriétés des préformes résultantes. Il est rapporté que la tension des mèches est un paramètre important et que l'abrasion des fibres doit aussi être considérée (en particulier dans le tissage de fibres de carbone) (Bilisik, 2011).

Gokareneshan et Alagirusamy ont mené une étude sur l'évaluation critique des techniques de tissage 3D à partir de métiers 2D dont les mécanismes de formation de la foule et d'enroulement (shedding et take-off) ont été modifiés (Gokareneshan et Alagirusamy, 2009). Dans le même contexte, on note aussi, le développement par Bombardier Aerospace UK en collaboration avec l'Université de Ulster (UK) des tissus 3D multicouches multiaxiaux prometteurs au nom de SpaRC (Quinn et al., 2008; Wappat, 2006).

Ces techniques de tissage multiaxial sont prometteuses car elles permettent de fabriquer des préformes à géométrie complexe avec une architecture interne meilleure que les tissés 3D conventionnels. Des efforts sur la compréhension des phénomènes d'abrasion (Lee et al., 2002) et des mécanismes de foule (shedding) (Gokareneshan, Jegadeesan et Dhanapal, 2009) sont toujours en cours de d'étude. Malgré tout, ces procédés sont plus lents que les métiers conventionnels, ce qui les rend peu envisageables pour des productions conséquentes (Tong, Mouritz et Bannister, 2002).

1.3.5 Préformes sandwich

S'inspirant des techniques de fabrication du velours, le procédé de tissage des sandwichs est une extension du tissage 2D. Deux couches de tissus sont reliées par des mèches de chaîne communes aux deux couches formant un sandwich épais comme montré figure 1.13.

L'espace et les angles des mèches de connexion peuvent être ajustés selon l'application désirée et une mousse expansive est généralement ajoutée. L'intérêt de ces sandwichs, appelé 'distance fabric', est la forte résistance au délaminage entre les couches de tissus en surface (Tong, Mouritz et Bannister, 2002).

Van Vuure et son équipe présentent dans un article, une revue détaillée des différentes architectures possibles de renforts textiles de type sandwich ainsi que l'évaluation de leurs propriétés mécaniques (Van Vuure, Ivens et Verpoest, 2000).

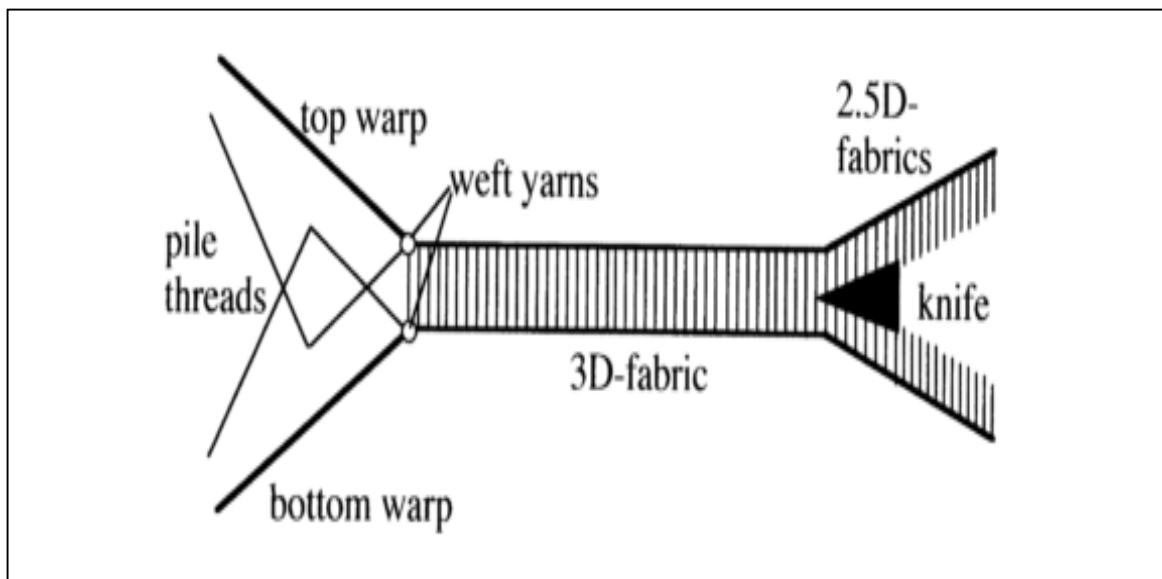


Figure 1.13 Schéma de préformes sandwich fabriquées par Volvet Weaving (Wambua et Anandjiwala, 2011)

Cette architecture en sandwich permet d'éviter au maximum le délaminage entre les deux tissus en surface, mais son utilisation reste limitée à des applications relativement simples (épaisseur et forme limitées).

1.3.6 Textiles 2,5D

Les textiles dits « 2,5D » n'ont pas été évoqués jusqu'ici puisque qu'ils ne sont pas clairement définis dans la littérature. Pour Ivens et autres, ces textiles sont obtenus en découpant une préforme de type sandwich, comme illustre la figure 1.13, les textiles 2D « poilus » résultant de cette découpe seraient ces textiles 2.5D augmentant la résilience des composites fabriqués à partir de ces textiles (Ivens et al., 1994) Tandis que Nehme et autres utilisent le terme de tissus 2,5D pour qualifier des tissés 3D interlock identiques à ceux décrit plus haut dans ce rapport (Nehme et al., 2011).

De Luycker rapporte dans une récente publication que le tissage en continu à travers l'épaisseur n'offrant plus de plan favorable au délaminage, permet l'augmentation de la tolérance aux dommages et aux impacts (De Luycker, 2009).

1.3.7 Intérêts et limitations des tissés 3D

D'une manière générale, voici quelques avantages et inconvénients des techniques de tissage 3D par rapport aux textiles 2D (Mouritz et al., 1999) :

▪ **Avantages :**

- Augmentation significative des propriétés hors-plan et de des performances d'impact et de tolérance aux dommages (Stig et Hallström, 2009),
- Bonnes propriétés mécaniques dans les trois directions, et s'approchent des matériaux isotopiques,
- Meilleure perméabilité et imprégnation des fibres par la résine (les fils dans la direction Z agissent comme des canaux par capillarité),
- Possibilité d'optimiser l'orientation des fibres suivant l'application.

▪ **Inconvénients :**

- Les métiers conventionnels limitent les préformes à des orientations de fibres 0° et 90°,
- Les techniques de préformes multiaxiales sont chères et encore à un stade précoce,

- Réduction de 10-50% des propriétés dans le plan (désorientation, déviation et dommage des fibres) (voir également le chapitre « 6. Discussion » de ce rapport),
- Le coût dû au nombre important de mèches à insérer limite souvent la largeur des préformes fabriquées (Tong, Mouritz et Bannister, 2002),
- Drapage difficile sur des moules courbés,
- Endommagement des fibres causé par des opérations répétées de « shedding »
- Pavé rectangulaire dont l'épaisseur et la largeur sont difficiles à modifier (bien que le degré de compaction permette de varier l'épaisseur) (Potluri, Sharif et al. 2009).

1.4 Tressage

1.4.1 Du tressage conventionnel aux préformes tressées 3D

En tressage, les mèches sont entrelacées grâce à la rotation de bobines de fils autour d'un cadre circulaire (machine Maypole). Les mèches en tension convergent longuement en un point pour s'entrelacer autour d'un mandrin (Figure 1.14) (Tong, Mouritz et Bannister, 2002).

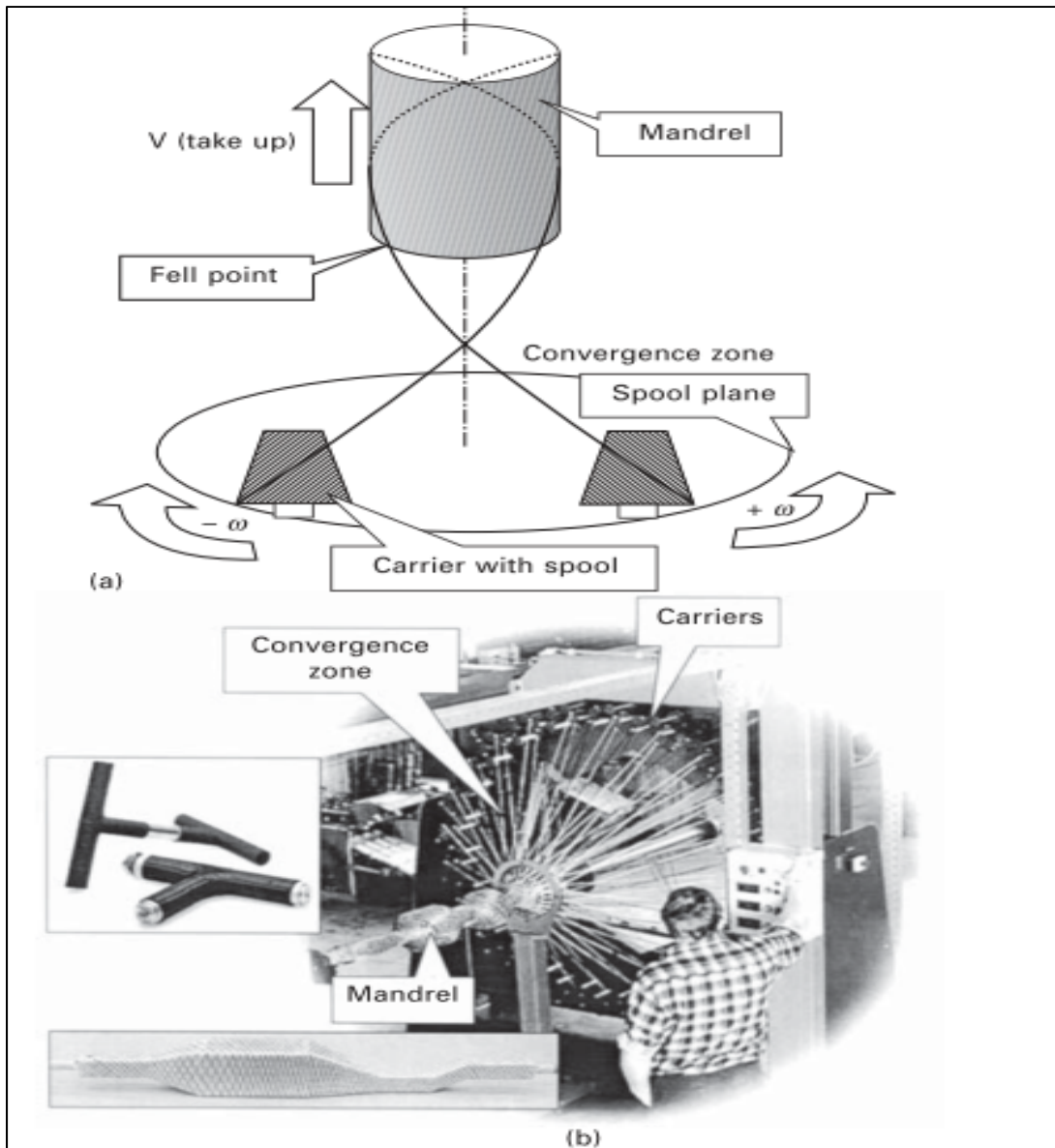


Figure 1.14 Un tisseur de type Maypole :a) Schéma et b) Photographie (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005)

Les bobines de fils passent d'un roulement à un autre grâce à des roulements à cornes « horn gear » comme il est détaillé à la figure 1.15, offrant ainsi la possibilité d'un échange alternatif des positions de mèches, recommandé lors du tressage (Wambua et Anandjiwala, 2011).

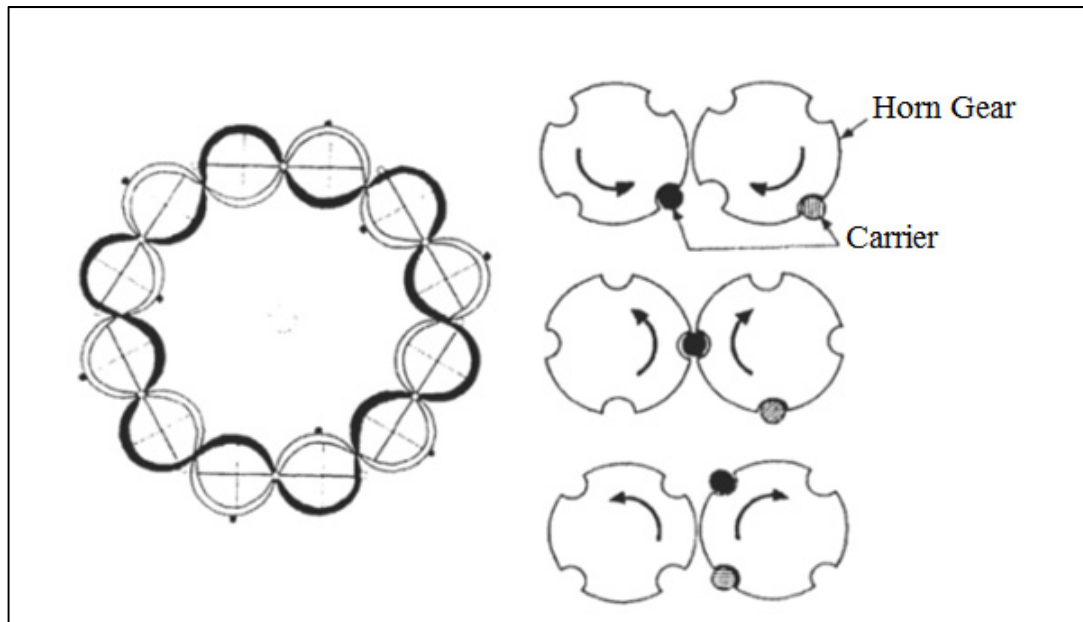


Figure 1.15 Schéma de l'échange alternatif des mèches lors du tressage (Tong, Mouritz et Bannister, 2002)

Au cours de ce procédé plutôt complexe, un bon nombre de paramètres interviennent tels que le nombre de fils, leur taille, l'angle de tressage, la forme du mandrin, la rotation des bobines, la vitesse de « take-up », la compaction de la tresse, etc.

Le tressage conventionnel est limité à des pièces plates ou tubulaires. Il est possible d'ajouter des mèches supplémentaires selon un axe (souvent 0° dans le cas du tressage triaxial) afin d'obtenir des propriétés mécaniques plus élevées. Notons enfin que le positionnement de fibres à 90° est impossible avec le tressage conventionnel.

Le tressage 3D permet d'entrelacer les mèches afin de produire des préformes plus épaisses, dont la notion de couches est perdue comparativement au tissage. Tout en augmentant l'intégrité des structures, les sections peuvent être plus complexes que le tressage conventionnel dans les techniques décrites ci-après (Wambua et Anandjiwala, 2011).

1.4.2 Tressage 3D « 4-steps »

Avec cette technologie, schématiquement décrite sur la figure 1.16, un ensemble de mèches s'entrelacent à partir d'un ensemble de bobines sur un réseau de lignes et colonnes de la forme de la préforme à fabriquer. Comme son nom l'indique, 4 étapes de mouvements de ces colonnes et rangées sont nécessaires pour réaliser un cycle. Un système de « frappe » est requis entre chaque cycle (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005 ; Tong, Mouritiz et Bannister, 2002). Cette technique permet de créer des formes complexes (avec des bifurcations, trous).

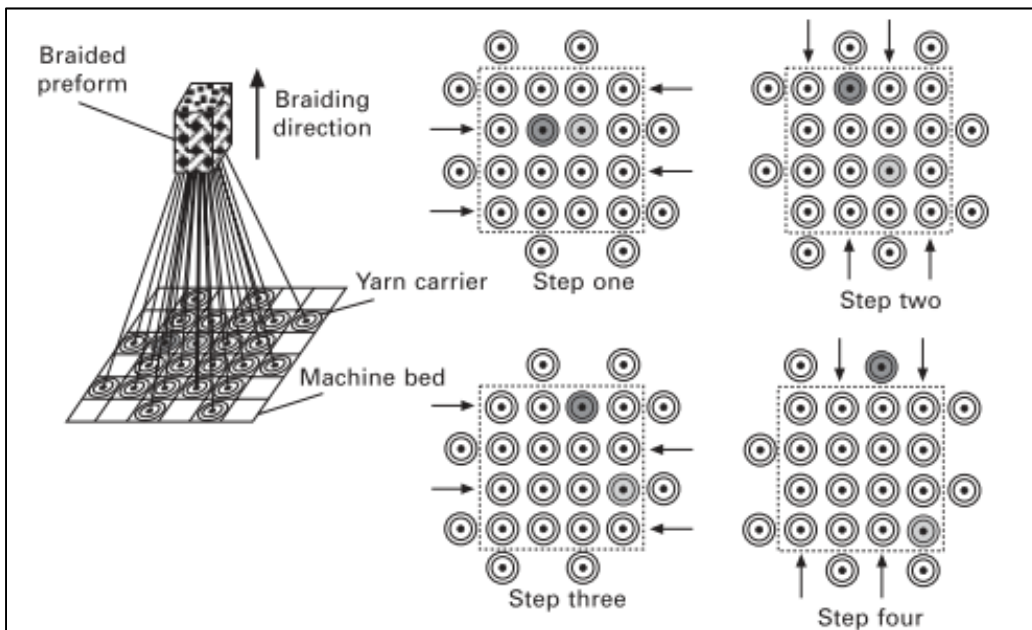


Figure 1.16 Schéma de fonctionnement du tressage 4-steps
(Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005)

1.4.3 Tressage 3D « 2-steps »

Dans cette autre méthode de tressage 3D (voir figure 1.17), qui ne nécessite plus de système de compaction mais offre une orientation des mèches plus importante, un large nombre de fils axiaux de tressage sont mis en place selon la forme de la préforme à fabriquer grâce à un ensemble de bobines situé en périphérie de ce réseau. Suivant un cycle en deux temps, les porte-fils passent à travers le réseau de fils axiaux pour créer des enchevêtrements et tresser en

3D la préforme souhaitée (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005). Notons qu'il est possible de placer des fibres à 90° avec ce système.

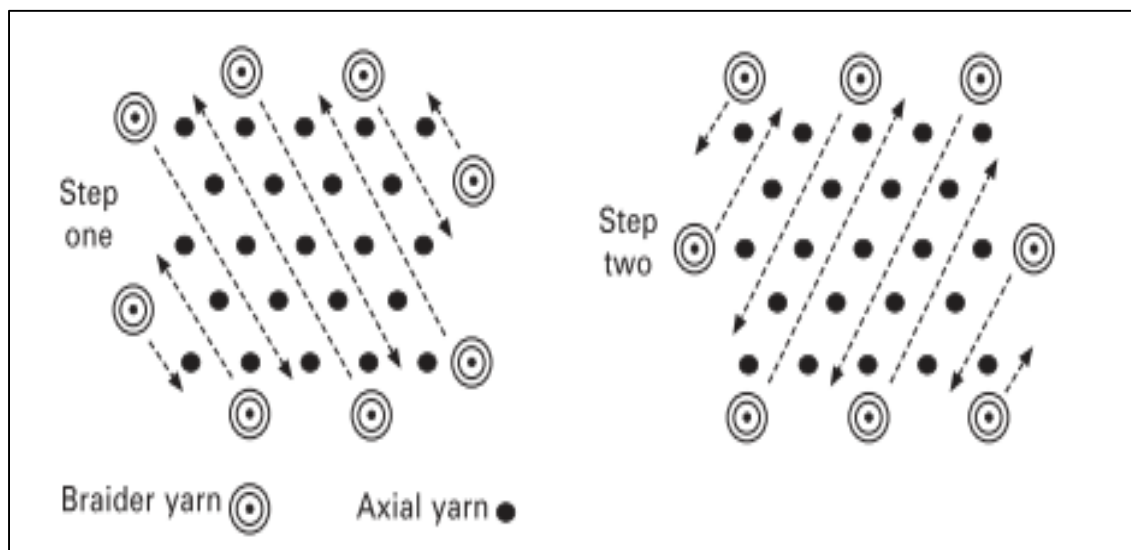


Figure 1.17 Schéma de fonctionnement du tressage 2-steps
(Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005)

On dénombre plusieurs configurations de tressage possibles avec ces méthodes; « l'orientation des fibres n'est pas limitée à un plan, ce qui constitue le principal avantage de ce[s] procédé[s]. Cependant chaque augmentation des propriétés hors-plan se fait au dépend des propriétés dans le plan » rapportent Lomov et autres (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005). Davantage d'informations sur ces deux procédés peuvent être trouvées dans la littérature. Une comparaison claire de l'architecture et des performances du tressage 4-step et 2-step est particulièrement présentée par Li et autres (Li et Shiekh, 1988).

D'autre part, l'étude de l'influence de l'architecture de tressage et le nombre de couches lors du tressage 4-steps sur la structure unitaire est devenue un domaine de recherche actuel et à part entière pour comprendre les relations performances-procédé de fabrication (Bilisik, 2011b).

1.4.4 Tressage interlock multicouches

Identiquement aux équipements de tressage 2D, cette technique se base sur un ensemble de « braiding tracks » placé en parallèle autour du cadre circulaire. Des transferts de fils entre les couches sont autorisés, entrelaçant ainsi les couches de tresses voisines. Mise au point par Albany Techniweave Inc., cette technologie pourrait être très utile pour des structures tubulaires épaisses (Tong, Mouritz et Bannister, 2005).

Malgré que cette technique présente un V_f plus faible, elle permet d'entrelacer les fibres entre les différentes couches voisines (interlock dans le plan), menant à une ondulation moindre des mèches et réduit donc moins les propriétés dans le plan que le tressage 2 et 4 steps. La vitesse de tressage est également plus grande, 80% d'un métier à tresser traditionnel (Kamiya et al., 2000).

1.4.5 Intérêt et limitations des tressés 3D

D'une manière générale, voici les avantages et inconvénients des tressés 3D (Mouritz et al., 1999) :

- **Avantages :**
 - Bon degré de reproduction du tressage fabriqué,
 - Possibilité de produire des formes très complexes, near net shape à section variable,
 - Augmentation de la tolérance aux dommages,
 - Excellente intégrité structurelle,
 - Très bonne résistance au cisaillement.
- **Inconvénients :**
 - Propriétés en tension et compression faibles (fibres fortement ondulées et hors des directions de charges),
 - Performance en flambage : 2/3 des performances en laminés 2D,
 - Taille des préformes limités par la taille de la machine (<100mm de large),
 - Vitesse de tressage relativement faible (Wappat, 2006),
 - Machinerie complexe et très dispendieuse,

- Temps de montage longs, répétés et coûteux (Tong, Mouritz et Bannister, 2005),
- Longueur de tressage limité par la quantité de fils présent dans les bobines,
- Technologies récentes qui manque de maturité : méconnaissance des performances mécaniques des préformes et de la durabilité de ses structures,
- Les modèles prédictifs n'ont pas encore été mis au point de manière satisfaisante,
- Peu de fabricants maîtrisent ces technologies (Bannister, 2004).

1.5 Tricotage

Ce procédé est le moins connus et le moins étudié des techniques de fabrication de préformes (Bannister, 2004). Il peut cependant s'avérer intéressant pour certains composants ayant des courbures importantes et formes très complexes; les textiles tricotés sont réputés pour leur haute formabilité. Ils présentent aussi une structure unique, de faible densité et d'excellente résistance à l'impact (Mourritz et al., 1999). Bannister rapporte que des économies de fabrication sont l'ordre de 75% par rapport aux technologies de bandes pré-imprégnées (Bannister, 2004).

Les techniques de tricotage conventionnelles en chaîne et en trame ne sont pas décrites ici vue leur faible intérêt pour les structure hautes performances. En effet, elles présentent une faible proportion volumique de fibres V_f et de faibles performances structurales due à une architecture de fibres hautement courbées (résistance en tension inférieure aux tissés 2D). La difficulté de fabriquer des tricots épais rend son usage pour des structures primaires aérospatiales difficilement envisageable (Mourritz et al., 1999). Dans la littérature, Padaki et Leong précisent la machinerie, les propriétés, applications et limitations des textiles tricotés dans des revues complètes (Leong et al., 2000; Padaki, Alagirusamy et Sugun, 2006).

1.5.1 Textiles multiaxiaux tricotés

Le procédé de tricotage présente malgré tout un intérêt très particulier par sa rapidité de fabrication et la possibilité d'obtenir des tissus multiaxiaux sur des machines de tricotage en chaîne de type LIBA ou Mayer (Kamiya et al., 2000).

Les textiles Non-Crimp Fabric (NCF) consistent à un empilement de couches de fibres droites orientées suivant plusieurs axes. Les différentes couches de fibres sont assemblées par tricotage (souvent à l'aide d'un fil en polyester) comme illustré figure 1.18.

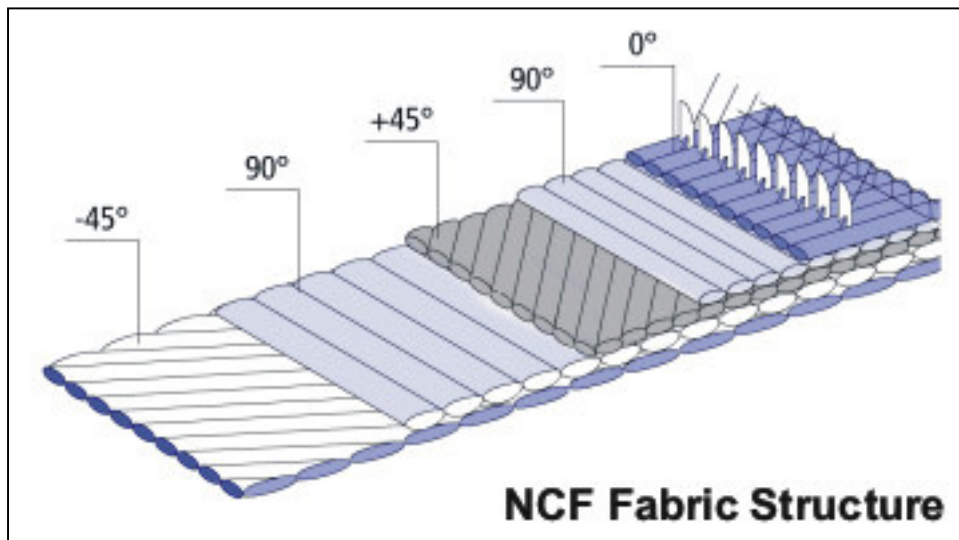


Figure 1.18 Schéma de l'architecture de NCF
(Tong, Mouritz et Bannister, 2002)

Les tissus NCF voient leur part d'utilisation progresser et sont notamment utilisés pour réduire le nombre de couches de tissus 2D à utiliser dans le caisson central de l'A380 (Bannister, 2004). Pouvant atteindre 98% des propriétés des pré-imprégnés, ils sont idéaux comme « sous-ensemble » de préformes car les mèches ne sont pas ondulées à la différence des tissés 3D. Renforcé dans la direction transversale par de la couture ou du tricotage en chaîne, ils offrent un matériau de choix présentant une orientation des fibres quasi-isotropiques (Brandt, Filsinger et Gessler, 2005).

Le tricot de fils qui maintient les couches de tissus unidirectionnels peuvent conduire à des ondulations / déviations des fibres. Cet inconvénient qui peut conduire à des « yeux de poisson » (Lowe, 2005) voire des canaux de résine après infusion. Ces phénomènes sont étudiés de près par Lomov et autres (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005). Par ailleurs, ils possèdent une certaine fragilité, et ne permettent pas la réalisation de formes complexes (courbures limitées) car ils sont élaborés sous la forme de blocs monolithiques (De Luycker, 2009).

1.5.2 Hybridation tissage/tricotage

Le tricotage peut aussi trouver un grand intérêt dans l'hybridation avec une autre technique. La technique d'hybridation tissage/tricotage est la plus souvent citée dans la littérature. Elle consiste à placer des fibres en biais (limité à $\pm 45^\circ$) à l'aide des aiguilles de tricotage à travers l'épaisseur des fibres de chaînes de section variable, comme illustré à la figure 1.19 (Bilisik, 2011a; Kamiya et al., 2000).

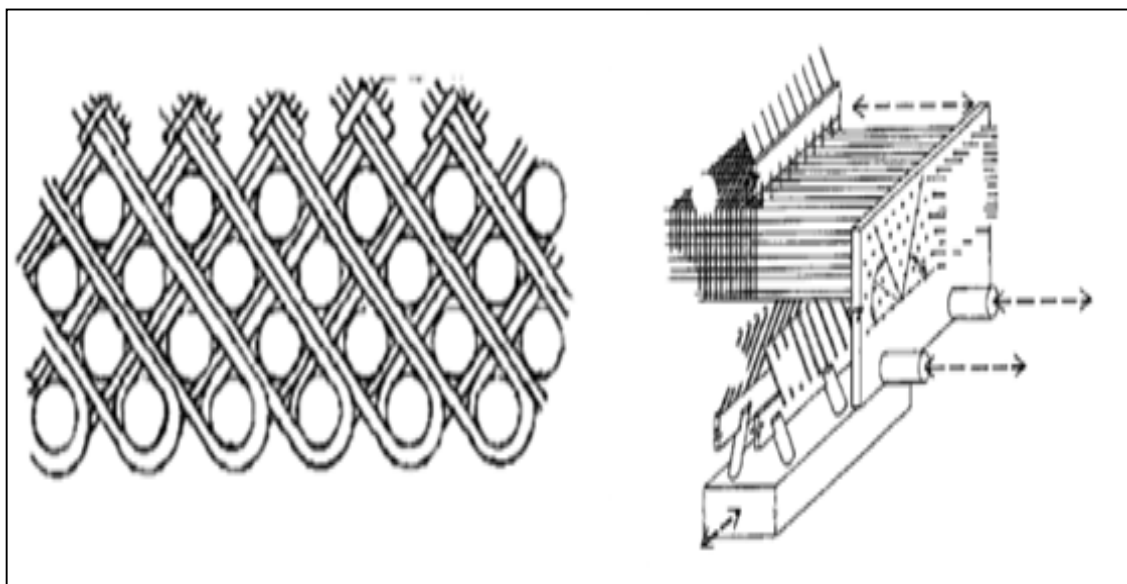


Figure 1.19 Procédé et architecture hybride tissage/tricotage
(Kamiya et al., 2000)

1.5.3 Intérêt et limitations des tricotés

D'une manière générale, voici les avantages et inconvénients des techniques de tricotage (Mouritz et al, 1999) :

- **Avantages :**
 - Excellente drapabilité et formabilité,
 - Génération de peu de déchet,
 - Productivité importante, potentiel d'économie en utilisant ces technologies,
 - Machinerie existante nécessitant peu de modifications (Leong et al., 2000),
 - Utilisant croissante des tissus NCF pour leur architecture quasi-isotopique (bien que les propriétés interlaminaire sont faibles).
- **Inconvénients :**
 - Zones plus rigides que d'autres dues au changement dans la structure même du tricot lors du drapage,
 - Limitation à des préformes peu épaisses,
 - Raideur et résistance limitée (fibres hautement ondulées),
 - Connaissance très parcellaire du comportement de ces textiles (en statique et en fatigue).

1.6 Analyse comparative des techniques de fabrication des préformes textiles

1.6.1 Comparaison des techniques de fabrications de préformes 3D « near net-shape »

Les avantages, inconvénients, potentiels et tendances de développement sont largement discutés dans la littérature et sont compilés dans le tableau 1.2 qui donne une vue d'ensemble des critères importants permettant de différencier les techniques revues. Dans la littérature, les adjectifs utilisés pour qualifier aussi bien les propriétés mécaniques, les dimensions et autres mesures de temps sont souvent subjectifs et rarement appuyé par des exemples chiffrés permettant des vérifications à posteriori.

Tableau 1.2 Principaux paramètres lors du préformage de formes complexes 3D et des techniques de fabrication textiles

Famille de procédés	Géométrie / forme	Orientations des fibres	Formabilité / Drapabilité	Propriétés mécaniques	Temps de montage /de mise en route
Couture 2D	<ul style="list-style-type: none"> - Très variées -Divers types de structures (panneaux, portes courbes) -Entourage de trous 	Libre (suivent la direction des sollicitations critiques)	Bonne	<ul style="list-style-type: none"> -Réduction des performances dans le plan, -Augmentation de la tolérance aux dommages et des propriétés hors plan 	Court
Tressage 3D	<ul style="list-style-type: none"> -Tissus plats -Profilés fermés et ouverts (I, L, Z, O, U) -Châssis -Raidisseurs -Bifurcations 	<ul style="list-style-type: none"> -10 -80°sur certaines machines -Intégration possibles des fibres suivant l'axe 0° 	Très bonne	<ul style="list-style-type: none"> -Rigidité et résistance faibles (en tension et en compression) -Bonne intégrité structurelle des profilés 	Très long
Tricotage 3D	Formes très complexes (Coquilles, noyaux, courbures,...)	<ul style="list-style-type: none"> -Multiaxiales dans le plan (0°/90°/±45°) et jusqu'à 8 couches, fixées par le tricot pour les NCF -Multiaxial possible 	Excellente	<ul style="list-style-type: none"> -Faibles pour les tricotés conventionnels, -Excellentes pour les NCF dans le plan mais mauvaises propriétés interlaminaires 	Court
Tissage 3D	<ul style="list-style-type: none"> -Tissus plats -Raidisseurs I, L -Profilés simples -Châssis 	Limitation aux directions 0°/90°	Faible	<ul style="list-style-type: none"> -Rigidité et résistance 0/90° satisfaisantes -Ondulation des mèches, impact sur les propriétés dans le plan pas encore clair 	Très long

Tableau 1.2 (Suite)

Famille de procédés	Productivité	Développements actuels	Avantages	Inconvénients
Couture 2D	Élevée (faible pour la broderie)	Optimisation de la tête de couture (dommages, taille)	<ul style="list-style-type: none"> -Hautement automatisé -Bonne méthode d'assemblage -Augmentation de la tolérance aux dommages -Amélioration des propriétés dans la direction Z 	<ul style="list-style-type: none"> -Réduction des propriétés dans le plan -Limitation à des épaisseurs faibles
Tressage 3D	Moyenne	Variations des sections et d'orientations des fibres	<ul style="list-style-type: none"> -Grande flexibilité (orientation et section de préformes) -Possibilités de réalisation des pièces complexes -Bon équilibre des propriétés hors plan et dans le plan -Excellentes propriétés en cisaillement 	<ul style="list-style-type: none"> -Limitations de la taille des préformes à celle de la machine -Équipements spécialisés et couteux -Fabrication des préformes lente -Connaissances très parcellaires
Tricotage 3D	Élevée	<ul style="list-style-type: none"> -Multiaxial pour renforcer de manière préférentielle une direction -Améliorer le nombre de couche -Hybridation 	<ul style="list-style-type: none"> -Bonne flexibilité et drapabilité -Bonne résistance à l'impact et aux dommages (absorption d'énergie) -Bonne productivité -Faible génération des déchets 	<ul style="list-style-type: none"> Structures de boucles, susceptibles aux concentrations des contraintes -Casse des fibres (notamment de carbone) -Faible propriétés dans le plan et hors plan -Anisotropie -Connaissances très limités de ces techniques
Tissage 3D	Élevée	<ul style="list-style-type: none"> -Multiaxiaux avec des fibres à 45° -Maîtrise des paramètres du procédé de la productivité 	<ul style="list-style-type: none"> -Équipement relativement standard. -Amélioration de la productivité à l'aide de complexes modifications sur les machines -Propriétés dans le plan et hors plan modérées -Limitations des formes réalisables 	<ul style="list-style-type: none"> -Pas de fibres en biais sur les concepts de machines standards -faible drapabilité -Maîtrise incomplète des mécanismes

Références utilisées pour le tableau : (Rudd et al., 1997,) ; (Miravete, 1999) ; (Bannister, 2004) ; (Mouritz et al., 1999) ; (Clarke, 1998) ; (Padaki, Algirusamy et Sungun, 2006)

Weimer et les autres se sont intéressés aux différentes techniques de préformes 3D dans leur habilité à créer des trous au sein des préformes (d'un intérêt significatif quand on connaît l'importance de l'assemblage mécanique des pièces mécaniques) (Weimer et al., 2000).

1.6.2 Résumé des principaux potentiels et limitations des techniques textiles 3D

Malgré sa grande capacité de produire des préformes « net-shape », le tricotage reste limité aux structures non porteuses de charge car ses propriétés mécaniques et son Vf sont faibles (fibres bouclées). Le renforcement multiaxial des tricots est plus prometteur pour des pièces aux sollicitations élevées, et sa principale utilisation est les tissus quasi-isotropes de type NCF, malgré de faibles propriétés interlaminaire dues aux coutures en fils de polyester (Bannister, 2004).

Le tressage 3D est théoriquement intéressant par sa capacité à fabriquer des préformes d'une grande intégrité structurelle, net-shape, de section complexe et variable. En revanche, ces technologies sont très récentes et complexes, leur maîtrise est limitée à quelques rares industriels et universitaires. Des améliorations en terme de productivité, mais surtout dans la compréhension des paramètres et des propriétés mécaniques résultantes sont nécessaires.

Les techniques de couture sont relativement simples et ne demandent pas d'investissement colossal pour les industriels. Ces méthodes très flexibles ont montré leur intérêt dans l'assemblage de tissus 2D et dans l'augmentation des propriétés hors-plan. Par contre, leur impact et dommage sur les propriétés dans le plan n'est pas encore pleinement compris.

Le tissage 3D, est de loin le plus étudié, semble considéré comme le procédé ayant le plus grand potentiel d'applications. Son Vf est élevé et sa productivité relativement bonne quand les préformes sont réalisés sur une machinerie proche des procédés conventionnels. Néanmoins, de nombreux efforts sont encore à fournir dans la compréhension de l'influence des paramètres de procédé et les propriétés mécaniques des préformes (Bannister, 2004).

1.7 Discussion et analyse critique des techniques de fabrication de préformes 3D

1.7.1 Principaux avantages des structures textiles 3D

Tous les procédés de textiles 3D présentent l'avantage d'être « near net-shape » réduisant ainsi les pertes de matières et le temps et coût associés aux opérations de découpe, drapage et assemblage (Mouritz et al, 1999). La stabilité du textile est améliorée, la manipulation de telles préformes unitaires est ainsi plus facile et moins susceptible à l'effilochage.

L'ajout de renforts dans la direction perpendiculaire au plan des stratifiés conventionnels 2D, augmente les propriétés hors plan dans le cas du tissage 3D. Le développement de métiers multiaxiaux permet d'augmenter les directions renforcées par la présence de fibres, permettant une utilisation de ces matériaux pour des sollicitations plus complexes. Bogdanovich et Mohamed font une distinction intéressante entre interfaces « macro » des composites multicouches 2D, susceptibles au délaminage à faible charge et les « micro » interfaces de pièces composites unitaires 3D peu sensibles au phénomène de ruine dramatique par propagation des fissures (Bogdanovich et Mohamed, 2009). La résistance aux dommages et aux impacts est ainsi grandement améliorée grâce aux préformes 3D.

L'architecture multidirectionnelle des préformes unitaires permet une infusion plus rapide que les stratifiés formés de textiles 2D (Wappat, 2006). Rappelons que l'intérêt premier des textiles 3D est de réduire le coût global de fabrication de pièces composites hautes performances. Ainsi, remplacer les pré-imprégnés et les processus de fabrication de composites incluant les consolidations sous autoclave permettra d'augmenter la vitesse de production (l'autoclave ayant un rôle de goulot dans le flux de production) et de réduire les coûts associés aux pré-imprégnés et à leur stockage à basse température contraignant. De larges pièces peuvent être infusées en moins de dix minutes par les techniques d'infusion de résine liquide, contre plusieurs heures sous autoclave, réduisant les temps et coûts de production. Ces procédés de type RTM, plus facilement automatisables, permettent en outre une proportion fibreuse élevée, de bonnes tolérances dimensionnelles, des pièces plus complexes et une excellente qualité de fabrication (Rudd et al., 1997).

1.7.2 Limitations actuelles à l'utilisation des textiles 3D

De nombreux démonstrateurs composites ont été mis au point utilisant les différentes préformes décrites dans ce rapport, mais relativement peu se sont concrétisées par une application commerciale. La principale raison est « la combinaison de facteurs économiques, de fabrication, de propriétés mécaniques et de durabilité » (Mouritz et al., 1999).

En effet, diverses limitations dans la fabrication de ces préformes ont été décrites ici aussi bien en termes d'orientations des fibres, de productivité, de taille de préformes (toujours limité par la taille des machines peu importe le procédé choisi). L'investissement représenté par ces équipements textiles de pointe est très important et une étude économique convient d'être menée afin d'évaluer sa viabilité au regard des gains réalisés par l'utilisation de préformes unitaires moins coûteuses en main-d'œuvre et temps de production. Même s'il est souvent rapporté d'importante réduction des coûts par l'utilisation de ces diverses techniques (Bannister, 2004), le potentiel de réduction des coûts n'est pas encore clairement établi (Wappat, 2006).

Les techniques de tissage et de tressage sont relativement récentes, ce qui explique une faible compréhension de l'influence sur les propriétés mécaniques des paramètres de fabrication (Mouritz et al., 1999). Il manque également encore beaucoup de données sur les propriétés mécaniques de ces composites textiles 3D. Les modèles prédictifs de comportement statique en fatigue et à la rupture ne sont pas encore au point. Il existe également beaucoup d'inconnues concernant la durabilité de ces solutions. Le tricotage dont l'architecture est plus complexe demeure encore moins compris. En effet, les techniques de placement de fibres sont très récentes ; davantage d'études sont nécessaires pour évaluer les potentiels de ces méthodes prometteuses.

Enfin, les systèmes de contrôle des fibres doivent être davantage automatisés pour augmenter la qualité des préformes et rendre la fabrication moins dépendante des opérateurs (Wappat, 2006).

CHAPITRE 2

ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES PRÉFORMES TEXTILES

2.1 Généralités

Une des principales limitations des textiles 3D et cousus serait leurs propriétés mécaniques réduites dans le plan. Ces limitations sont dues à l'ondulation et aux distorsions causées par l'enchevêtrement des fibres porteuses de charge pour les tissés, et les dommages de perforation dus aux aiguilles de couture pour les tissus cousus. La figure 2.1 montre les principaux défauts présents dans les textiles 3D.

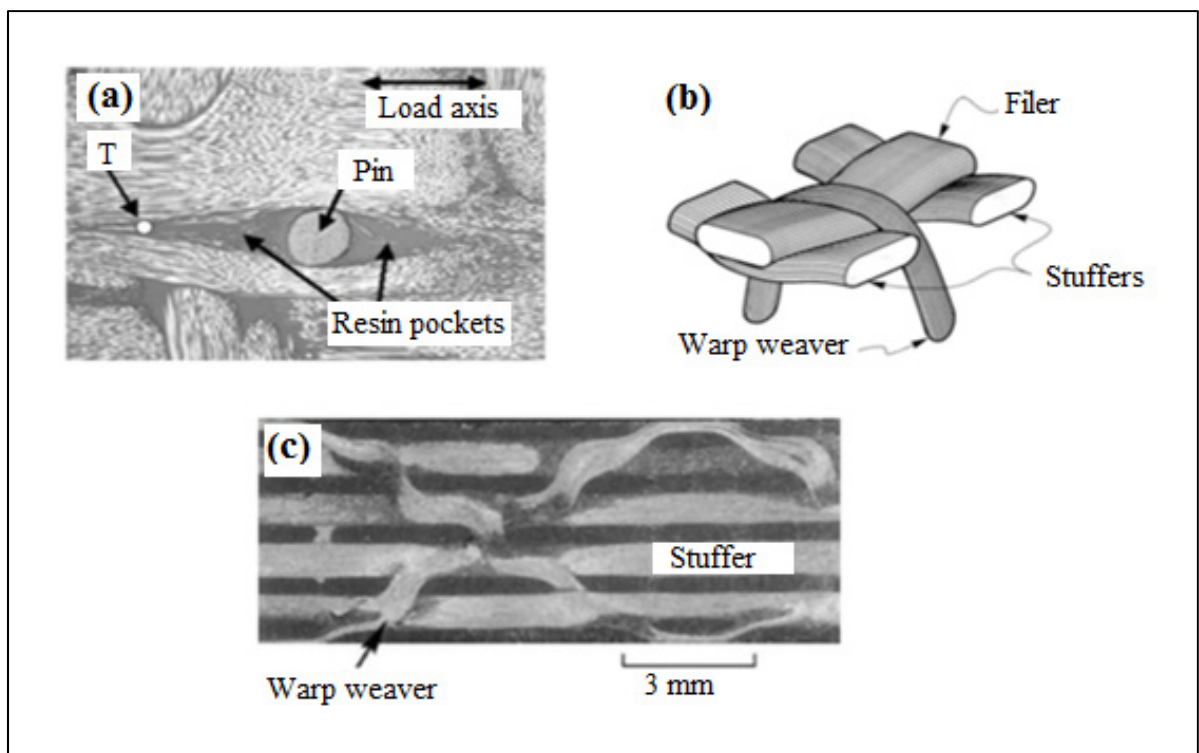


Figure 2.1 a) Distorsion des fibres et zone riche en résine causées par un renfort transversal, b) ondulations des mèches dans le plan et c) des renforts Z dans un tissu 3D interlock (Mouritz et Cox, 2010)

Il est enfin noté l'influence de l'abrasion des fibres sur les performances des pièces composites issues des préformes lors de la mise en forme des préformes. Ceci est particulièrement critique

pour les fibres de carbone, très susceptibles à l'abrasion lors du tissage. Diminuer la vitesse du métier est un moyen d'éviter ces problèmes, mais limite l'intérêt économique du tissage (Lee, Leong et Herszberg, 2001).

La perte de résistance et de rigidité dans le plan des textiles 3D par rapport aux 2D varie beaucoup d'une étude à l'autre. Mouritz et Cox ont mené un travail bibliographique intéressant (Mouritz et Cox, 2010) pour comparer les résultats de nombreuses équipes de recherches sur les propriétés mécaniques de ces renforts de nouveaux. D'après cette étude, la perte de raideur et de résistance à la tension ne semble pas significative tant pour les composites à préformes tissés 3D que les composites cousus. Généralement inférieure à 20%, la diminution des performances n'est en effet pas toujours montrée et même de faibles augmentations des propriétés dans le plan sont parfois notées, certainement dues à une augmentation du V_f . Les auteurs précisent que de tels écarts pourraient être mieux compris si les équipes précisaient davantage lors des essais conduits, la tension des fils, la taille et la forme des aiguilles utilisées. Ceci rend les qualifications de ces techniques difficiles, et limite l'usage de ces techniques à plus large échelle.

2.2 Sélection du procédé de préformage

Même si des formes identiques peuvent être créées par différentes techniques, chaque technique présente des orientations des fibres différentes et un V_f différent qu'il convient de prendre en considération lors du choix du procédé de fabrication (Miravete, 1999).

Fort des connaissances obtenues sur les différentes techniques de fabrication disponibles, il est important de sélectionner la technique d'élaboration, voire une combinaison de ces techniques, au regard de l'élément structural à réaliser. Ainsi, la conception microstructurale proposée par Kamiya cherche à prendre en compte de manière systématique un ensemble de paramètres tels que la géométrie, la taille, les performances et l'état de contrainte de la pièce composite ainsi que la proportion et l'orientation des fibres. Il propose également un tableau pour la sélection du type de technique de fabrication de préformes suivant le type de sollicitation de la structure

finale (Kamiya et al. 2000). Le tableau comparatif des techniques de ce présent rapport est un outil utile. D'autres marches à suivre sont également proposées par Miravete pour le développement de préformes 3D (Miravete, 1999).

2.3 Caractérisation des renforts textiles pour la fabrication des pièces composites par préformage

Dans le cadre de la fabrication de pièces composites polymères à renforts fibreux par les technologies d'infusion liquide de résine (RTM ou RFI), le préformage du renfort textile est une opération essentielle pour les performances de la structure finale. Cette opération de préformage diffère du formage d'autres matériaux métalliques ou polymères puisque qu'il s'agit de déformer un renfort fibreux sec initialement plan à l'architecture et à l'épaisseur variables, sur une surface dans l'espace, la résine étant infusée et réticulée par la suite (Boisse, 2004).

Avant d'atteindre ce stade, la caractérisation des tissus secs s'avère une étape très importante dans le processus de fabrication de pièces composites. D'ailleurs, une grande partie des travaux liés à la caractérisation des renforts textiles est basée sur des mesures, des essais à caractères mécaniques et sur la modélisation des propriétés mécaniques. Le but de tous ces travaux de recherche est de mettre en évidence les propriétés qualitatives des matières textiles, dans une perspective d'amélioration de certaines mesures à caractère mécanique et afin de répondre aussi à des exigences industrielles ou commerciales devenant de plus en plus sévères. En effet, ils doivent souvent satisfaire aux besoins de l'utilisation et de la production.

Les modes de mesure de la qualité des tissus ont beaucoup évolué avec le développement de l'industrie textile. Ils sont destinés à fournir des caractéristiques mécaniques bien déterminées. Certains types d'essais, parmi ces mesures, ont vu leurs naissances très tôt dans l'histoire textile et deviennent de plus en plus sophistiqués grâce aux développements technologiques, alors que d'autres sont toujours en voie d'apparition et de développement.

Les principaux comportements mécaniques du tissu sont à prendre en considération sont : le comportement en traction dans les sens chaîne et trame, le comportement en cisaillement et le comportement en flexion. Pour déterminer les caractéristiques mécaniques des préformes, des essais sur des éprouvettes sont nécessaires à réaliser, soit en empruntant la méthode proposée par Kawabata (Kawabata Evaluation System for Fabrics, KES-F) ou via des tests mécaniques respectant les normes en vigueur pour chaque type d'essai.

Cette partie du texte est consacrée à la présentation des différents essais pratiqués sur le tissu, qui nous permettent de mesurer certaines propriétés mécaniques (rigidité en traction, en cisaillement, en flexion, etc) dans le but de mieux comprendre le comportement de ces préformes lors qu'elles sont associées avec une résine polymère.

Les déformations des renforts continus résultent des mécanismes particuliers au niveau du comportement mécanique d'assemblage de fibres. En général, la description d'un renfort fibreux met en évidence trois échelles (figure 2.2) qui le caractérise : l'échelle macroscopique (échelle du tissu), l'échelle mésoscopique (échelle des mèches) et l'échelle microscopique (échelle des fibres).

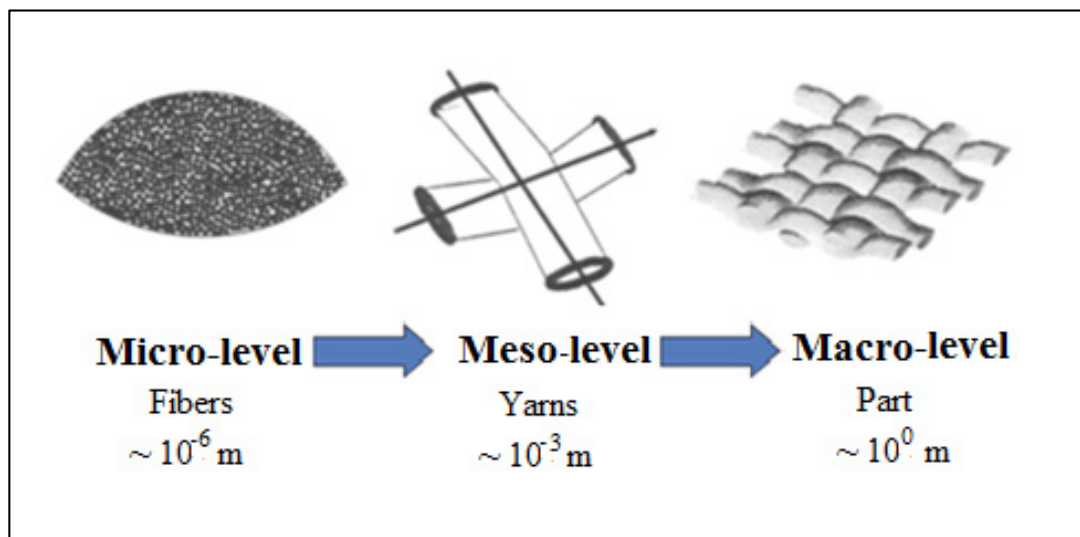


Figure 2.2 Distinction entre les échelles micro, meso et macro (Adapté de Buet-Gautier et Boisse, 2001, Komeli et Milani, 2011)

Le comportement mécanique à l'échelle macroscopique du renfort est fortement lié à celui des deux échelles inférieures. À l'échelle microscopique, les fibres possèdent une rigidité longitudinale en tension très importante, par contre les autres rigidités telles que la rigidité en compression, la rigidité en flexion sont très faibles. Les mèches constituées de fibres héritent donc aussi de ces caractères. Le tissu obtenu par tissage des mèches possède aussi une rigidité très élevée dans la direction des mèches, mais le tissage apporte au tissu une non-linéarité à l'échelle macroscopique. Celle-ci est due au changement d'ondulation lors des extensions du renfort.

Afin d'optimiser la mise en forme des textiles, il convient de comprendre leurs comportements et d'éviter l'occurrence de phénomènes de non-qualité récurrents tels que rapportés par (Rugg et Cox, 2004) :

- Rupture des mèches en tension,
- Flambements locaux lorsque les mèches sont sollicitées en compression,
- Plis du tissu dus aux angles de cisaillements élevés,
- Zones sèches ou pauvres en fibres (proportion volumique locale de fibres).

Grâce à ces premières constatations, les comportements en tension, compression et surtout en cisaillement des textiles semblent importants. La drapabilité d'un textile sera d'autant plus grande que sa rigidité en cisaillement est faible (Chou, 1989). À noter également que les déformations du textile entraînent une variation de la proportion volumique de fibres modifiant la perméabilité du textile c'est-à-dire les mécanismes d'imprégnation de la résine.

2.4 Principaux modes de déformations lors du préformage de textiles

Dans cette section, on présentera les différents modes de déformation qui surviennent lors du processus de drapage ou de préformage des textiles. Un premier principe est le celui de « non-glissement chaîne-trame », en considérant le drapage d'un tissu comme montre la figure 2.3. On constate que les lignes peuvent être des courbes mais ne sont en aucun cas rompues (Boisse, 2004).



Figure 2.3 Drapage expérimental d'un textile de verre sur une demi-sphère et déformation des réseaux de lignes (Boisse 2004)

L'évaluation du comportement en tension est évidemment à considérer même si l'allongement reste relativement faible correspondant à une réduction de l'embuvage. En revanche, l'énergie associée à ce phénomène peut être importante à cause des hauts niveaux de rigidité des fibres. En compression, il est rapporté que les mèches sont susceptibles de flamber à faible charge (Boisse, 2004).

La déformation de cisaillement dans le plan correspond à la rotation des mèches autour de leur point de contact chaîne-trame, assimilable à un système de 4 barres. Ce mécanisme peut engendrer des déformations de grande amplitude à faible charge, jusqu'à un angle de blocage. Le cisaillement est considéré comme étant le principal mode de déformation des tissés (Boisse, 2004). L'hypothèse de « Pin-Jointed-Net » de mèches non extensibles dans le cas du cisaillement est considérée pour interpréter le comportement en cisaillement (Dridi, 2010).

2.5 Comportement et caractérisation en traction

Le comportement en traction lors de la mise en forme d'un textile est important. Il convient d'évaluer la rigidité en tension des textiles grâce aux mesures de force et d'élongation. Il est à noter que ces propriétés diffèrent suivant la direction de sollicitation (chaîne ou trame). Il convient ainsi de mener les tests suivant les deux directions.

2.5.1 Traction uni-axiale

En utilisant une machine de traction conventionnelle et en suivant les normes ISO 13934-1 et ISO 13934-2 et ASTM D 3822-01, les tests de traction de tissus sont relativement simples à réaliser (Kovar et Dolatabadi, 2011). Il convient aussi de respecter les conditions de préparation des échantillons en suivant la norme ASTM D 5035-06. Les données extraites de ces essais sont le module élastique, les élongations et efforts à la rupture ainsi que le coefficient de poisson dans les deux directions du tissés ($0^\circ/90^\circ$) (Dridi, 2010). Il est également possible d'utiliser le système KES-F comme illustré par (Lahey, 2002).

2.5.1.1 Courbe d'essai typique

L'essai de traction uni-axiale comporte trois phases distinctes comme présenté à la figure 2.4 :

- Des frottements inter-fibres interviennent lors des premiers instants de l'essai;
- La deuxième phase correspond à une diminution de l'embuvage du tissu dans la direction de sollicitation. Il y a « dés-ondulation » des mèches;
- Enfin, une fois les mèches tendues et le tissu stabilisé, l'effort est exercé directement sur les fibres entraînant une augmentation de la rigidité, égale à la rigidité des fibres. On constate alors une compression des mèches dans la direction orthogonale à la sollicitation (Lahey, 2002).

La courbe n'est pas linéaire à cause de l'embuvage et de la compression transverse des mèches.

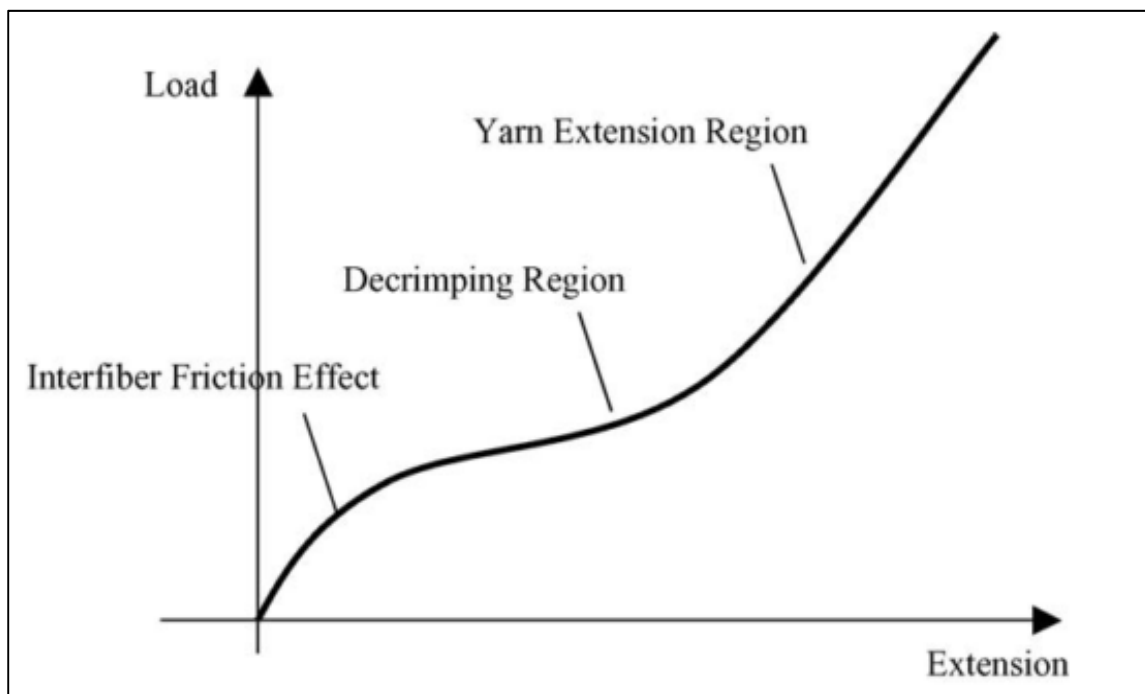


Figure 2.4 Courbe force-extension généralisée d'un essai de traction uni-axiale (Chan et al., 2006)

Ainsi, l'extension globale du tissu est principalement due au phénomène de désondulation plutôt qu'à l'extension des fibres. Le changement de l'embuvage au niveau des points de croisement des mèches est donc un phénomène important. Lorsqu'il augmente dans une direction, il diminue dans l'autre (Boisse, 2004).

2.5.1.2 Nature viscoélastique des préformes textiles

Comme illustré à la figure 2.5 par l'hystérésis, une fois l'effort sur le tissu supprimé, celui-ci ne retrouve pas son état d'extension initial. La nature viscoélastique des tissus est mise en évidence. Cette déformation résiduelle indique une perte d'énergie (Hu, 2004). Parallèlement, un durcissement des mèches embuvées lors de l'étirement est constaté.

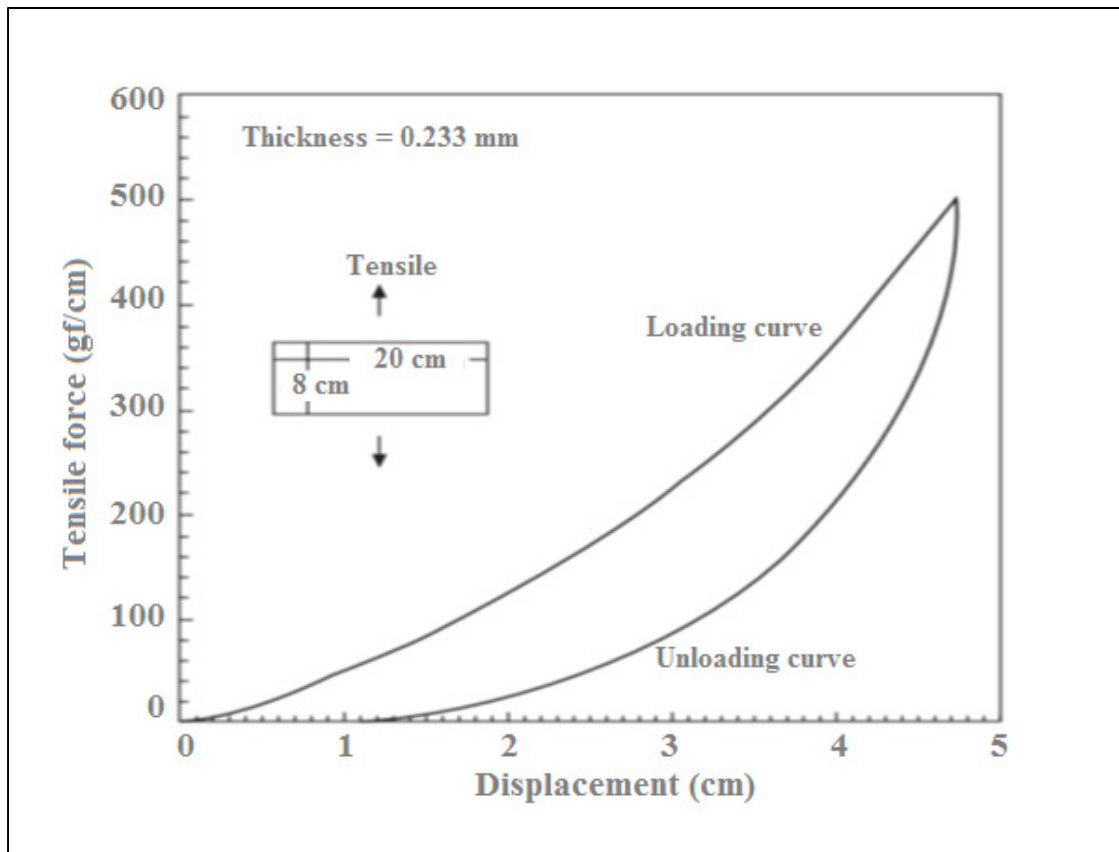


Figure 2.5 Hystérésis d'un tissu suite à un essai en tension uni-axiale (Hu, 2004)

2.5.1.3 Anisotropie des tissus

L'influence de l'angle d'extension par rapport à la direction de la chaîne et de la trame est très grande dans le mécanisme de déformation. À 45 degré, le module calculé ne correspond alors qu'au comportement en cisaillement, c'est d'ailleurs un moyen de caractériser le cisaillement. Les structures des tissus sont souvent asymétriques (sergé et satin en particulier) (Hu, 2004). Le coefficient de Poisson permet d'évaluer le changement de longueur dans la direction perpendiculaire à la sollicitation (Hu, 2004). Lors d'un essai de traction uni-axiale, ce coefficient est d'une importance majeure afin de déterminer les paramètres mécaniques dans la direction en biais (45°).

2.5.2 Traction bi-axiale

L'essai de tension uni-axial a mis en évidence le rôle très important de l'embuvage des mèches lors de la traction des tissus. La réponse à la tension dans une direction affecte l'embuvage dans l'autre direction et ainsi son état de tension. La dépendance des deux directions (chaîne et trame) en tension est illustrée à la figure 2.6.

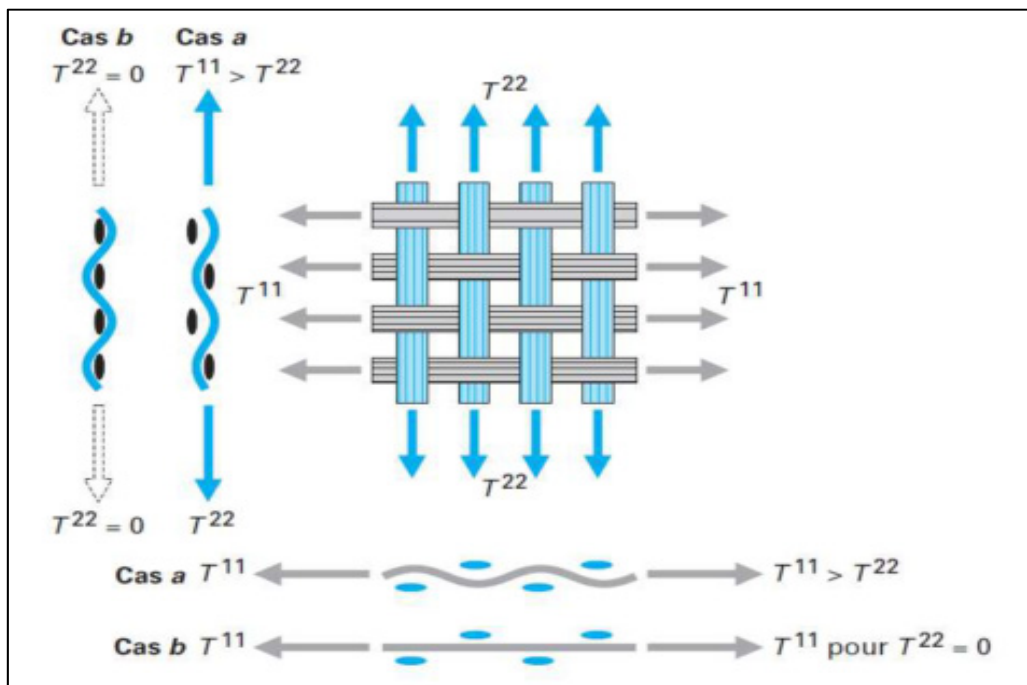


Figure 2.6 L'influence de l'embuvage d'un tissé (Boisse, 2004)

L'état de tension dans chaque direction peut être explicité par le rapport de bi-axialité, k :

$$k = \frac{\varepsilon_{\text{chaîne}}}{\varepsilon_{\text{trame}}} \quad (3.1)$$

$k=0$ correspond à un essai de tension uni-axiale (cas libre).

La figure 2.7 montre les résultats de traction bi-axiale pour différents rapports k . Plus les mèches sont tendues (i.e : embuvage réduit) plus on se rapproche d'un essai des fibres seules et plus la zone non-linéaire de la courbe tension-déformation est réduite (Boisse, 2004).

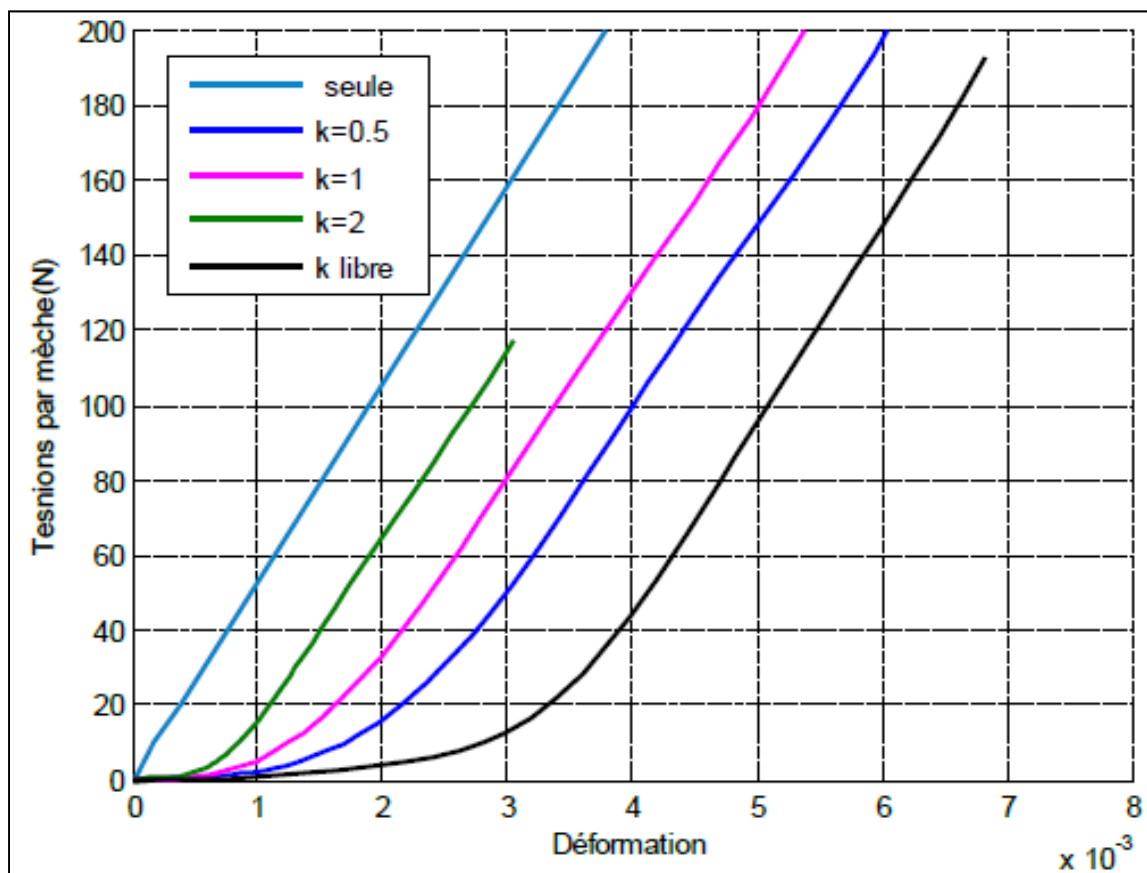


Figure 2.7 Comportement en tension bi-axiale d'un sergé 2 X 2 de carbone (Boisse, 2004).

L'essai bi-axial dont un montage est montré à la figure 2.8, consiste à tirer selon les deux directions en même temps. Il n'existe pas de méthode standardisée pour cet essai.

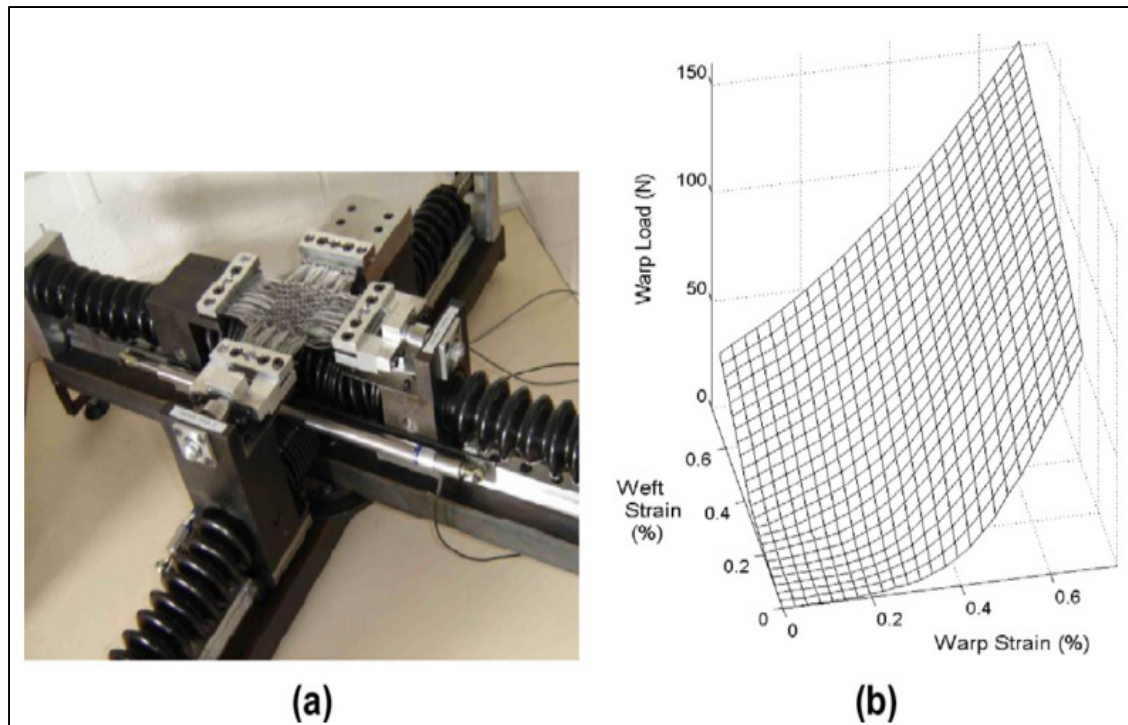


Figure 2.8 a) Montages de traction bi-axiale, b) surface caractéristique des résultats (Boisse et al., 2011 ; Quaglini, Corazza et Poggi, 2008)

2.6 Caractérisation du comportement en cisaillement

La littérature concernant la caractérisation du cisaillement des tissus est extrêmement riche. En effet, il s'agit du principal mode de déformation d'un tissu. Il intervient à faible charge dès que le textile est sollicité avec un angle différent de la direction des mèches. Les déformations en cisaillement affectent les autres propriétés telles que la flexion et la traction. Mohammed et autres se proposent de comparer les différentes méthodes de caractérisation du cisaillement très bien décrites (voir la figure 2.9) (Mohammed et al., 2000).

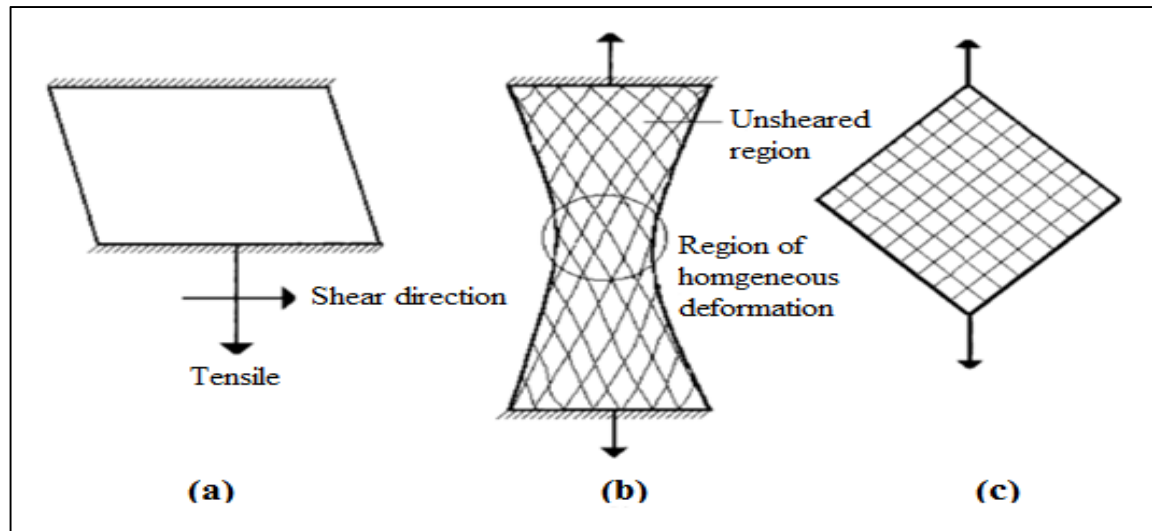


Figure 2.9 Essais de cisaillement : a) KES-F, b) test d'extension biais c) test du cadre articulé (Mohammed et al., 2000)

L'utilisation de l'essai de Kawabata n'est pas idéale pour déterminer le module de cisaillement. Outre la limitation de l'angle de rotation à 8° , l'étoffe est en cisaillement simple. L'analyse de l'état de contrainte avec le KES-F ne montre pas un cisaillement pur et uniforme comme illustré à la figure 2.10. Reste alors les méthodes d'extension en biais et du cadre articulé, décrites dans la suite de ce paragraphe.

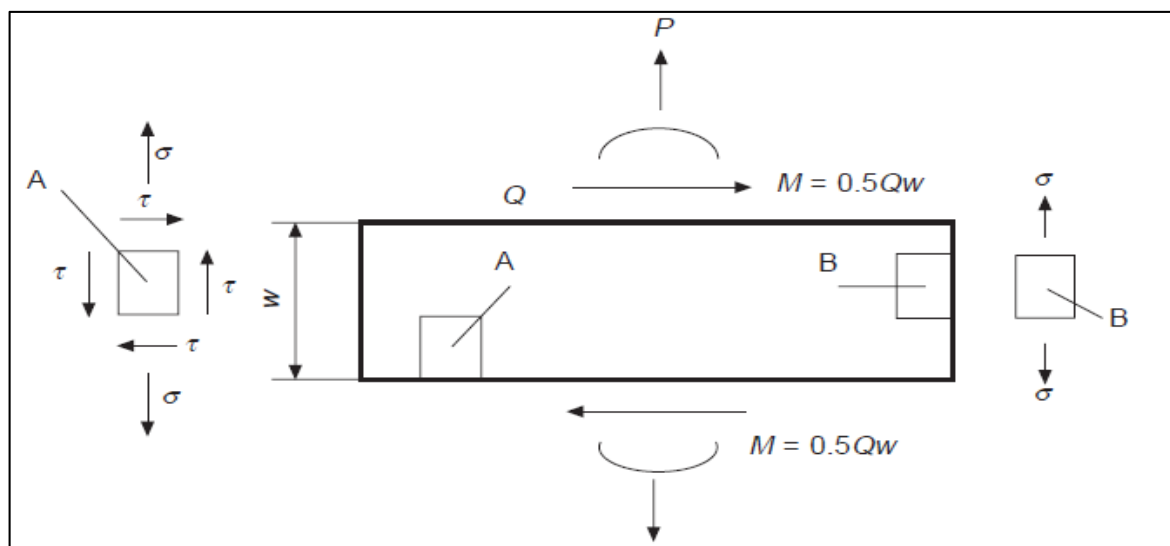


Figure 2.10 Analyse de l'état de contrainte lors de l'essai de cisaillement selon le système KES-F (Hu, 2004)

2.6.1 Comportement en cisaillement des tissés

L'essai de cisaillement met en évidence le caractère non-linéaire de l'effort de cisaillement en fonction de l'angle tel illustré à la figure 2.11.

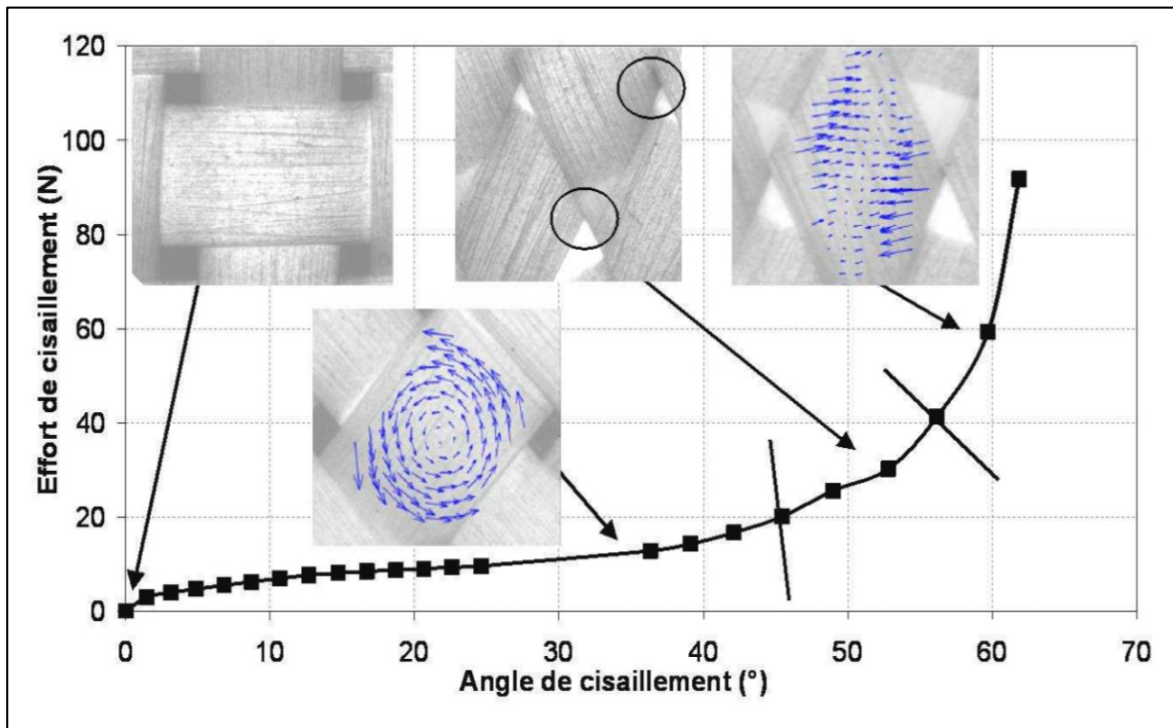


Figure 2.11 Mouvements et courbe caractéristique de l'essai de cisaillement d'un tissu de verre (Allaoui et al., 2007)

On peut distinguer trois phases avec des mécanismes distincts (De Luycker, 2009) :

- Pour des angles de cisaillement très faibles, le frottement statique des mèches entre-elles entraîne une raideur en cisaillement importante. Une fois entré dans le régime de friction dynamique (à environ 3° à la figure 2.11) la raideur diminue.
- Le deuxième mécanisme à apparaître lors du cisaillement correspond au glissement des fibres autour des points de contact « chaîne-trame », cette rotation des mèches comblent les interstices, la raideur est générée uniquement par les frottements.
- Pour des angles plus importants, on observe une augmentation de la compression transverse qui s'ajoute aux frottements. Une fois tous les interstices remplis, le textile se « verrouille », la raideur augmente fortement une fois le blocage en cisaillement

atteint (De Luycker, 2009; Hu, 2004). L'apparition d'un angle de blocage est accompagnée de l'apparition de plis sur l'éprouvette (Allaoui et al., 2007).

Deux sources d'inélasticité en cisaillement sont rapportées par (De Luycker, 2009) :

Premièrement, suite à la répétition des essais en cisaillement, une compaction résiduelle des fibres dans les mèches est constatée, impliquant une diminution de la raideur au cours des essais. Ceci serait expliqué par un réarrangement irréversible des fibres au sein des mèches.

Ensuite, le comportement viscoélastique des fibres est aussi mis en évidence lors des essais de cisaillement avec décharge. L'hystérésis produit lors du cisaillement est uniquement dûe aux frottements des points de contacts inter-mèches lors de leur rotation, bien que des frottements interviennent pendant tout l'essai (Hu, 2004; Lahey, 2002). Ce comportement hystérétique peut être négligé puisque la mise en forme ne comprend généralement pas de décharge.

Enfin, il est rapporté par De Luycker que l'ensimage qui est responsable du maintien de la cohésion des fibres dans les mèches, de la réduction de l'abrasion et l'amélioration de la qualité de l'interface matrice/renfort, peut ajouter une rigidité supplémentaire sur les tissus fortement embuvés (De Luycker, 2004).

2.6.2 Essai de cisaillement par cadre articulé

Lors du test de cisaillement par cadre articulé ou, l'éprouvette textile en forme de croix est montée dans un cadre métallique articulé dans ses quatre coins comme montré à la figure 2.12.

Monté sur une machine de traction conventionnelle, le cadre déformable impose à l'échantillon une déformation en cisaillement pur.

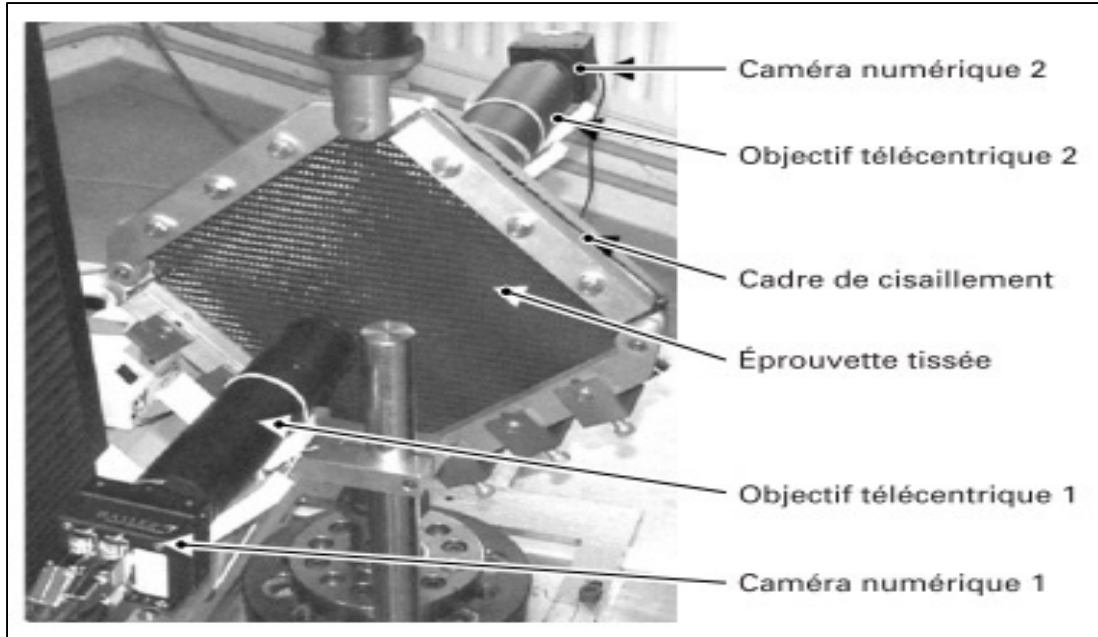


Figure 2.12 Cadre de cisaillement équipé d'un système de mesure optique des déformations (Boisse, 2004)

La force de cisaillement F_s que subit le tissu est déterminée à partir de la force axiale appliquée sur le cadre articulé F_x à l'aide l'équation suivante :

$$F_s = \frac{F_x}{2 \cos \Phi} \quad (3.2)$$

L'angle de cisaillement θ_{pf} est donné par :

$$\theta_{pf} = \frac{\pi}{2} - 2\Phi = \frac{\pi}{2} - 2 \left[\cos^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{D_x}{2l} \right) \right] \quad (3.3)$$

Avec

Φ est l'angle du cadre, et D_x est le déplacement du cadre, et l est la largeur du cadre.

Le moindre défaut d'alignement mène à des forces de compression ou de tension appliquées sur les fils mal alignés. Ceci est la principale faiblesse de ce test, outre l'utilisation d'un outillage spécifique, car un léger écart dans le positionnement de l'échantillon provoque de

larges écarts dans la mesure de la force de cisaillement tant les ordres de grandeurs entre les raideurs en tension et cisaillement sont différents (Willems et al., 2011).

2.6.3 Essai d'extension en biais

Pour évaluer le comportement en cisaillement, le dispositif de l'essai d'extension en biais est couramment utilisé pour sa simplicité. Ce test utilise l'anisotropie des textiles et correspond à un test de tension uni-axial d'une éprouvette de tissu dont les mèches de chaîne et de trame sont orientées à 45° avec la direction d'extension (Dridi, 2010) comme illustré à la figure 2.13.

Cet essai correspond au test de cisaillement proposé dans le système « Fabric Assurance by Simple Testing », le FAST-3 lorsque le rapport longueur / largeur de l'échantillon est au moins égal à 2. Les efforts mesurés au cours de cet essai sont relativement faibles (rarement au-delà de 200N) tandis que les déplacements sont importants.

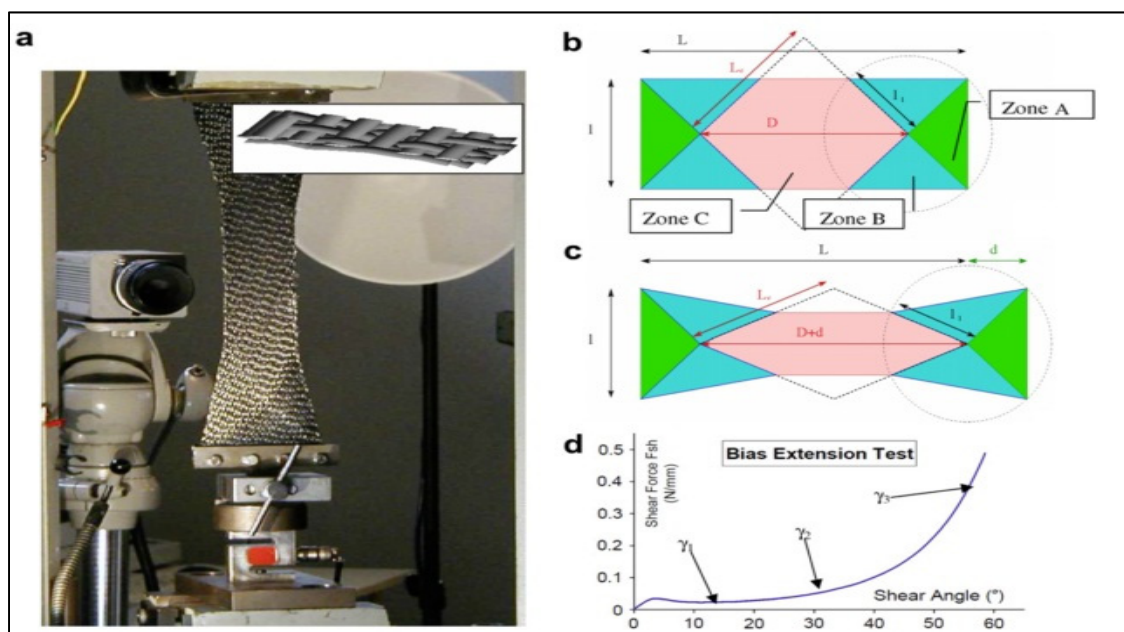


Figure 2.13 Test d'extension en biais : a) montage, b) représentation des zones de cisaillement à l'état initial, c) représentation des zones de cisaillement à l'état final, c) courbe de cisaillement (Harrison, Clifford et Long, 2004; Lomov et al., 2008)

L'hypothèse majeure pour ce test est la non extension des mèches (Pin-Jointed-Net). Trois zones apparaissent sur l'éprouvette au cours de l'essai : les zones A ne se déforment pas tandis que les zones B et C sont soumises à un cisaillement pur. Le cisaillement dans la zone C est deux fois plus important que dans les zones B. Les déformations sont considérées uniformes dans chacune de ces zones.

L'angle de cisaillement θ_{bet} est défini par :

$$\theta_{bet} = \frac{\pi}{2} - \varphi = \frac{\pi}{2} - 2\arccos\left(\frac{D+d}{\sqrt{2}D}\right) \quad (3.4)$$

Avec

φ est l'angle de cisaillement pur de la zone C, et D est la diagonale de la zone C, et d est le déplacement des mors.

Il est rapporté que cette formule est valide tant qu'aucun détissage ou glissement des mèches est constaté sur l'éprouvette (Willems et al., 2011). De tels phénomènes peuvent apparaître lorsque l'angle de cisaillement atteint une zone limite comprise entre 40° et 50°. Or, dans les situations de préformage réel, l'angle de cisaillement reste toujours inférieur à 40° (De Luycker, 2009).

2.6.4 Comparaison des deux méthodes d'essai en cisaillement

Des critères adimensionnels sont utilisés afin de comparer les deux tests (Harrison, Clifford et Long, 2004; Hivet et Duong, 2010). De Luycker propose en particulier d'utiliser le couple de cisaillement pour dimensionner les essais d'extension en biais et du cadre articulé.

Le test d'extension en biais semble avoir une relativement bonne répétabilité et constitue une méthode rapide pour déterminer l'angle de blocage. Il présente néanmoins le défaut d'avoir plusieurs zones qui rendent un dépouillement de résultats moins aisé. Les difficultés dans le découpage des échantillons pour le cadre articulé et leur positionnement sur le banc d'essai impliquent une forte variabilité dans les résultats si l'échantillon est soumis à un quelconque

effort en tension ou compression en cas de mauvais alignement. Malgré tout, le test du cadre articulé offre des conditions de cisaillement pur sur toute l'aire de l'échantillon. Dans les deux cas, un soin particulier est nécessaire lors de la préparation. Les différences entre les deux méthodes sont étayées au tableau 2.1.

Tableau 2.1 Comparatif des caractérisations du cisaillement

	Essai du cadre articulé	Essai d'extension en biais
<i>Avantages</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Simple à réaliser. - Calcul de l'angle de cisaillement à partir du déplacement. - Déformation homogène dans presque tout l'échantillon simplifie l'analyse. - Possibilité d'imposer une tension dans le plan au début de test. - Possibilité de contrer le taux de cisaillement au cours du test. 	<ul style="list-style-type: none"> - Simple à réaliser. - Une méthode convenable pour mesure l'angle de verrouillage. - Pas de problèmes de tensions liées au blocage des échantillons au cours du test.
<i>Inconvénients</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite une plate-forme spéciale. - Problèmes d'alignement des échantillons sur le dispositif. - Le blocage / serrage des échantillons peut affecter les résultats. - Le bloc métallique de serrage peut induire un champ thermique non uniforme au sein du matériau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite des poignées de serrage spécifiques. - Déformation hétérogène dans l'échantillon. - Besoin de marquer l'échantillon et de performer l'analyse par image pour enregistrer l'angle de cisaillement. - Difficile de contrôler le taux de cisaillement. - Plage d'angles de cisaillement limitée.

Cheng met à disposition des lecteurs une intéressante vue d'ensemble des résultats des principaux laboratoires du domaine ayant caractérisés le cisaillement de tissus 2D avec les deux techniques ; test d'extension en biais et le test du cadre articulé (Cheng, 2004).

Par ailleurs, (Lomov et Verpoest, 2006) donnent pour différents tissus en verre une expression paramétrique du comportement en cisaillement à partir des données issues du comportement en tension, flexion, compression et friction, en fonction de la densité des fibres.

Des récents travaux ont été menés par (Komeili et Milani, 2011) sur le chargement de textiles en tension et cisaillement. L'impact de sollicitations combinées est étudié sur un banc d'essai de tension-bi-axiale adapté pour introduire un angle de cisaillement. Un impact important sur le comportement en cisaillement augmentant les déformations locales (compression transverse) dû à la rigidification des mèches tendues par la tension a été démontré.

2.7 Comportement et caractérisation en flexion

La flexion est un important paramètre quand il s'agit de caractériser la drapabilité et la manipulation. C'est cependant un mécanisme difficile à caractériser et cela se ressent dans la littérature et la multitude des tests proposés sans qu'un consensus ne semble émerger (Hu, 2004).

Une fois encore, une perte d'énergie (hystérésis) est constatée lors des essais de flexion. Ceci est dû à la nature viscoélastique des fibres (figure 2.14). Les frottements entre les mèches constituent l'autre mécanisme principal à prendre en compte lors de la flexion d'un textile (Hu, 2004).

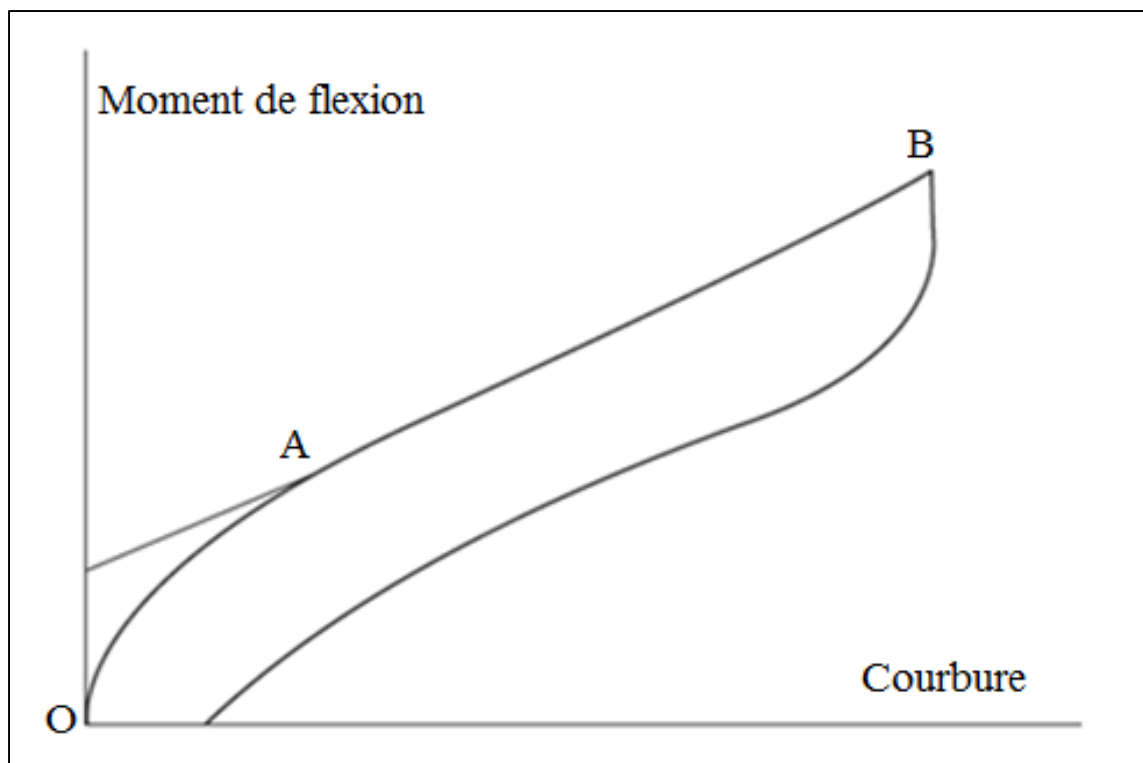


Figure 2.14 Courbe typique de flexion d'un tissu (Adapté de Hu, 2004)

Les grandeurs souvent considérées sont la rigidité en flexion (1ère dérivée de la courbe), le moment de flexion et la courbure. La zone linéaire est souvent difficile à caractériser. L'influence des frottements, de l'embuvage et de la raideur des mèches n'est pas encore bien comprise. Un point d'accord entre les différentes équipes ayant travaillé ces questions est que la taille de l'hystérésis est un moyen d'estimer la friction interne au tissu (Hu, 2004).

Il est rapporté que les comportements en cisaillement et flexion sont proches, allant même jusqu'à dire qu'ils sont identiques, la courbure étant relié directement à l'angle de cisaillement et au nombre de fibres par cm. Malgré tout, le phénomène « d'écrouissage » (augmentation de la rigidité suite à l'extension des mèches) semble affecter seulement les propriétés de rigidité en flexion et non en cisaillement. La différence entre les deux phénomènes viendrait des frottements inter-fibres, ceux-ci étant plus importants en flexion qu'en cisaillement et sont modifiés par les effets d'écrouissage en extension (Hu, 2001).

2.7.1 Caractérisation expérimentale de la flexion

Deux principales méthodes de tests sont rapportées dans la littérature. Tout d'abord, la méthode de flexion en porte à faux, dont les normes ASTM D1388-08 et ISO 4604 1978 détaillent l'essai (figure 2.15). Dans ce test, le moment de flexion est une fonction linéaire de la courbure.

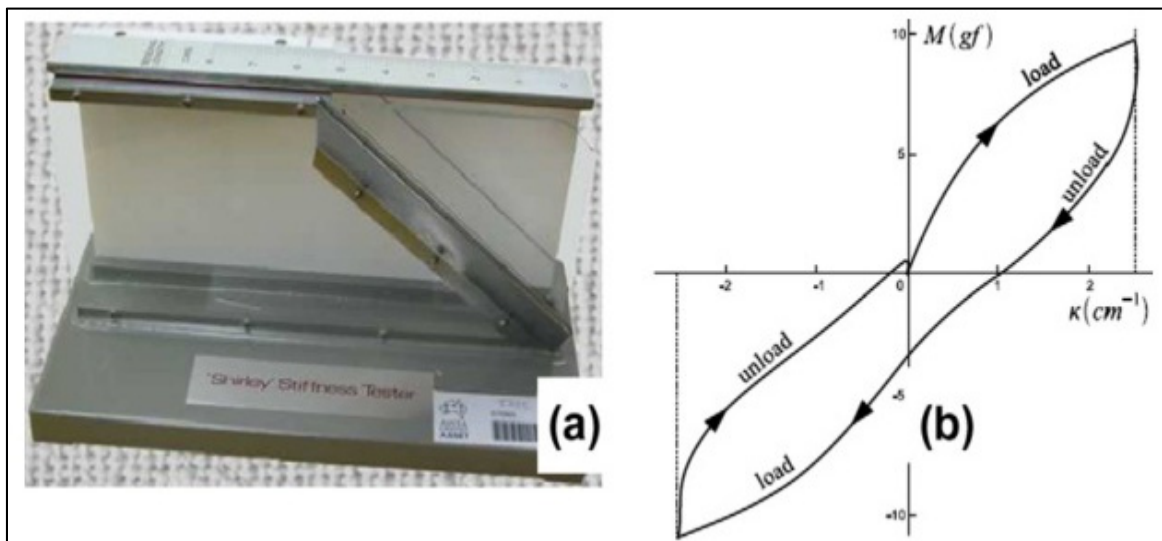


Figure 2.15 Banc d'essai de flexion (ASTM D1388) et la courbe de résultat associée (Boisse et al., 2011)

L'utilisation du système de Kawabata (KES-F) est rapporté de pas convenir parfaitement pour les renforts composites mais est tout de même utilisé (DeBilbao et al., 2010).

Il existe d'autres essais dont le « Heart loop test », le « Schiefer flexomètre », le « Planoflex » ou encore le « MIT drapemeter »; ces techniques sont revues par (Saville, 1999). Dans « Experimental study of bending behaviour of reinforcement », De Bilbao décrit les procédures d'essai, les équations et techniques d'analyse des résultats (De Bilbao et al., 2010).

2.7.2 Drapabilité

L'évaluation de la drapabilité dépend des propriétés discutées précédemment à savoir le comportement en flexion et en cisaillement principalement. La rigidité en flexion est le premier paramètre intervenant sur la drapabilité. Le moment d'inertie, l'épaisseur et la masse sont aussi

déterminants dans la capacité d'un textile à épouser une forme quelconque. La sensation de drapabilité peut varier d'un opérateur à l'autre (Saville, 1999).

Le drapemètre, initialement développé par Chu puis amélioré par Cusick, permet de déterminer le pourcentage de drapage (Drape coefficient DC%) dont la formule est donnée par l'équation 3.5. Il correspond au rapport de l'aire de tissu drapé W_2 à l'aire non-drapé W_1 . Plus un textile est rigide, plus il aura un coefficient élevé. Il est mesuré à l'aide de l'ombre créé par un système lumineux comme le montre la figure 2.16.

$$DC(\%) = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (3.5)$$

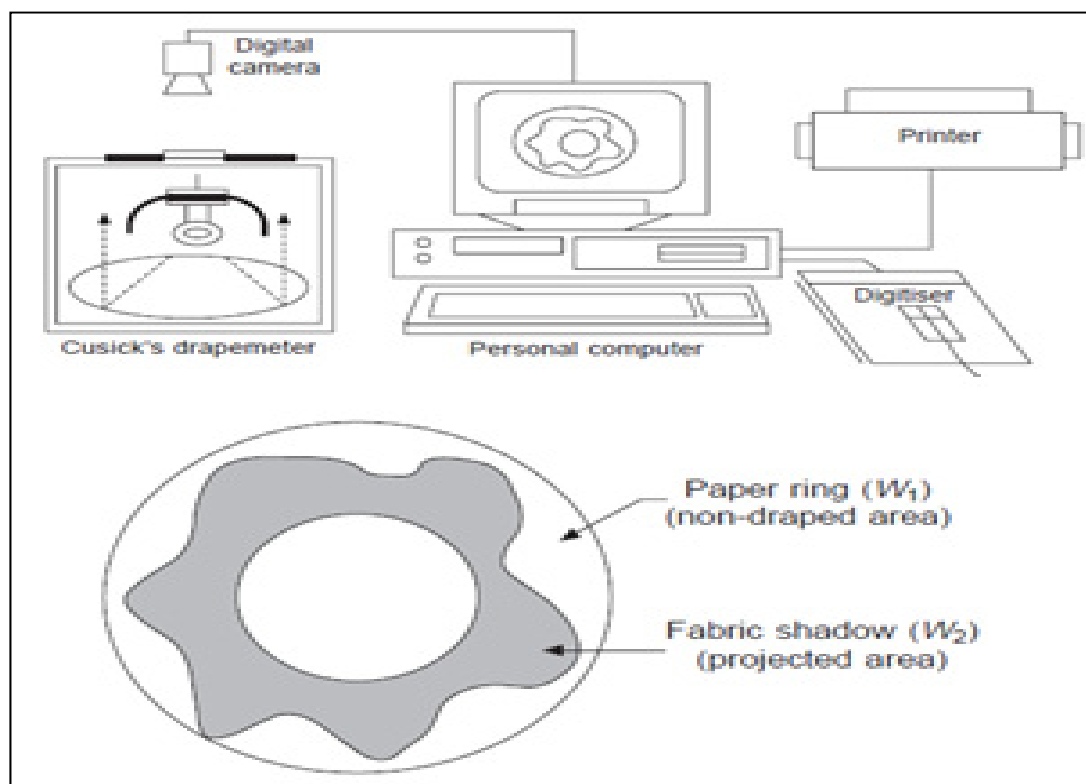


Figure 2.16 Système de détermination de la drapabilité du textile (Hu, 2004)

Il n'existe pas de dimensions standardisées du diamètre du textile et du disque de support. Les plus récents systèmes peuvent également évaluer la drapabilité dynamique (Hu, 2004).

La raideur de drapage a également été définie comme la flexion uni-axiale sous le propre poids d'un textile, dans un système de flexion en porte à faux, la longueur et la rigidité en flexion étant les deux grandeurs mesurées lors de ce test. L'appareil utilisé dans ce cas est un flexomètre, les principaux paramètres sont la longueur de tissu libre, l'angle de flexion et la longueur de flexion (De Bilbao et al., 2010).

Les trois méthodes rapidement présentées ici peuvent être reliées. Il existe un certain nombre de travaux de corrélation entre DC%, et l'angle de flexion, la rigidité B de KES-F et les valeurs de cisaillement. L'ensemble de ces études est remarquablement revu par Hu et son équipe (Hu, 2004, p.197).

2.8 Caractérisation et comportement mécanique en compaction

Lors du préformage des textiles, la compression transverse (perpendiculaire au textile) est beaucoup plus pertinente car elle correspond à la compaction des renforts fibreux dans un moule de type RTM afin d'obtenir des préformes finales « near net-shape ». L'épaisseur du composite est contrôlée par l'espacement entre les surfaces du moule (Ogale et Mitschang, 2007). Cette étape du procédé de préformage est très importante car elle conditionne la proportion volumique en fibres du composite.

2.8.1 Montage de compaction

S'inspirant de la norme BS 2544, relative à l'épaisseur des textiles, les essais procèdent par l'utilisation d'une machine de compression associée à un plateau supérieur de dimensions connues et d'un plateau rotulé inférieur de section connue également, comme illustré à la figure 2.17. Le capteur de force doit être adapté à des efforts importants.

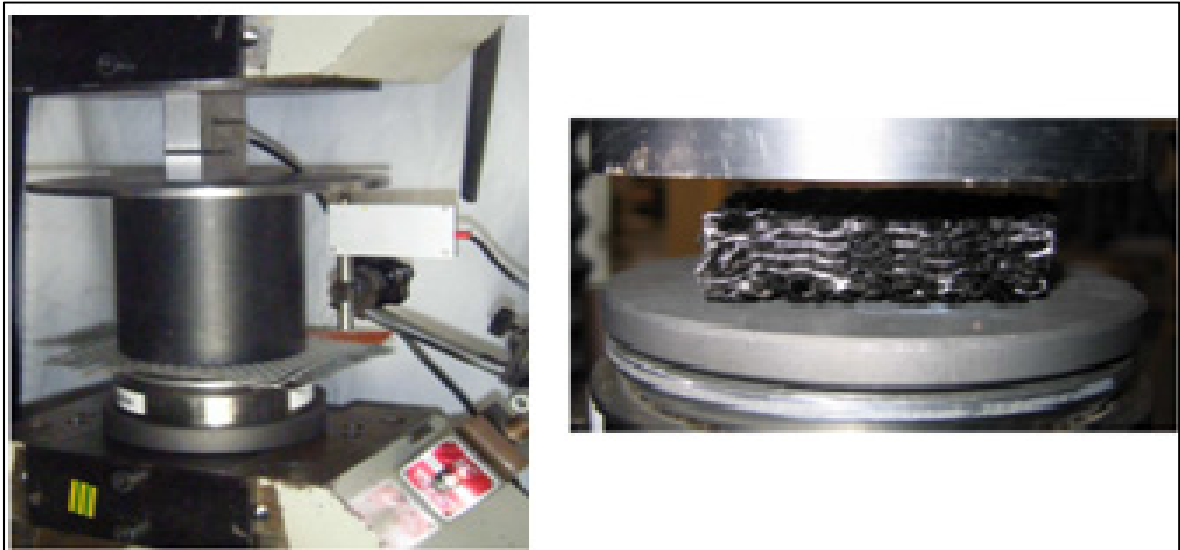


Figure 2.17 Dispositif d'essai de compaction d'interlock (De Luycker, 2009; Ogale et Mitschang, 2007)

Une compression est exercée sur l'échantillon de manière quasi-statique (0.5 mm/min). Le déplacement et l'effort sont enregistrés au cours de l'essai.

Le KES-F propose également un test de caractérisation de la compression transversale des textiles. Exprimée en fonction de l'épaisseur du textile, la pression varie de façon non linéaire et les paramètres d'évaluation du phénomène sont l'énergie, le module de la zone linéaire et la taille de l'hystérésis. Ce test est davantage approprié aux textiles peu épais, c'est-à-dire à la compression des mèches (Lomov, Verpoest, Robitaille, 2005).

2.8.2 Comportement lors de la compression transversale

L'effort est reporté en termes de pression (force/surface) exercée tandis que la variation de l'épaisseur est traduite en variation du V_f . Alors que la fraction volumique fibreuse est de l'ordre de 10-25% pour un textile non compressé, celle-ci atteint plus de 50% pour un empilement compacté (Lomov, Verpoest, Robitaille, 2005). Un adimensionnement est opéré afin de comparer divers essais en utilisant le volume de l'échantillon testé (Ogale et Mitschang, 2007).

$$V_f = \frac{V_F}{V} = \frac{M}{\rho_c S e} \quad (3.6)$$

Avec :

- V_F Volume de fibres,
- V Volume total de l'échantillon,
- ρ_c Masse volumique du carbone,
- M Masse de l'échantillon,
- S Surface compactée de l'échantillon,
- e Épaisseur de l'échantillon.

La courbe caractéristique pression- V_f obtenue pour un essai de compaction est montrée à la figure 2.18. Ayant une allure exponentielle, la courbe indique d'abord une compaction significative à faible pression, puis la pression augmente très fortement (raideur importante) en fin d'essai pour compresser le renfort à un V_f plus élevé. On observe une fois de plus la nature viscoélastique des renforts textiles lors de la relaxation, c'est-à-dire que le renfort textile après décharge ne retrouve pas son épaisseur initiale (ni son V_f). Les fibres au sein des mèches et les mèches entre-elles au sein du renfort se réarrangent induisant des frottements différents de la configuration initiale (De Luycker, 2009). Les conséquences de la relaxation pour le préformage et la fabrication de composites sont décrites par (Lomov, Verpoest, Robitaille, 2005).

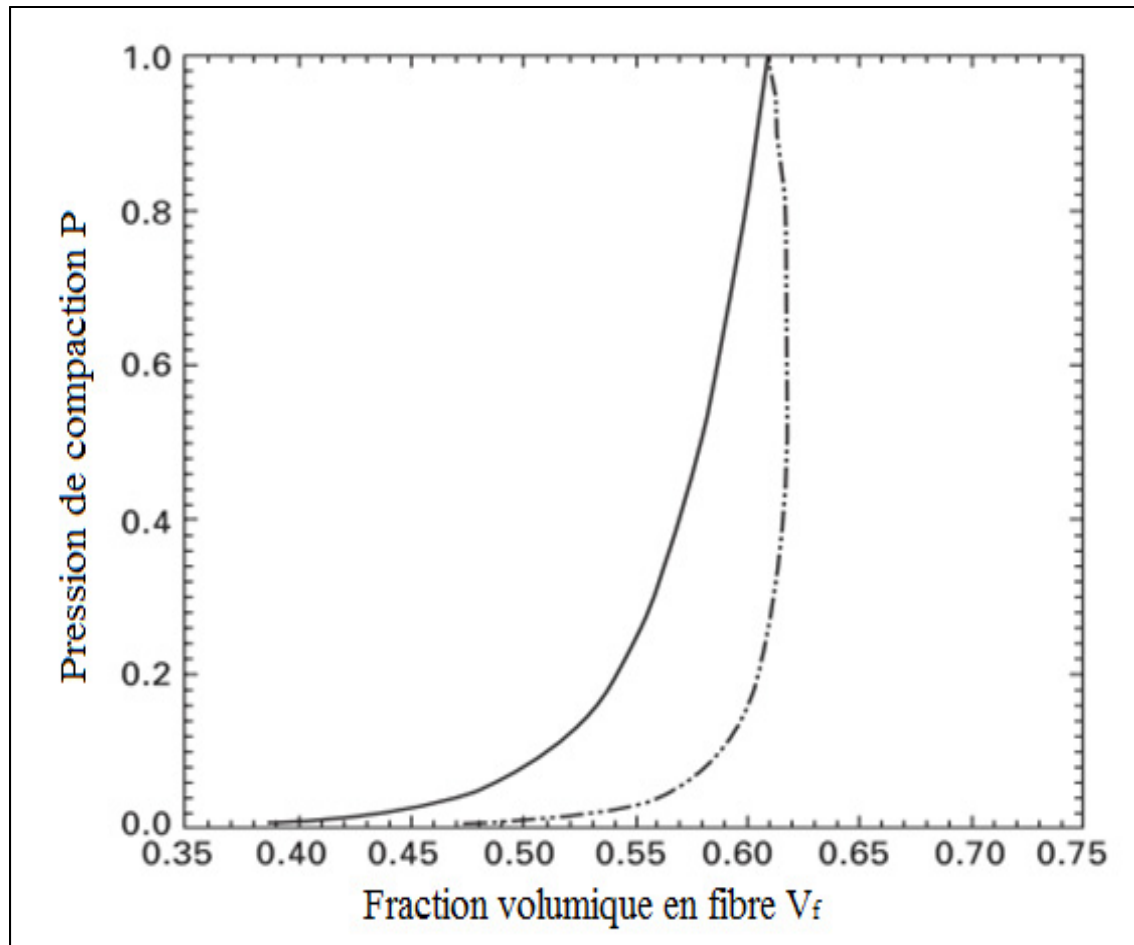


Figure 2.18 Courbe typique de compaction (chargement et décharge)
(Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005)

Ce test permet d'estimer la pression de fermeture d'un moule pour un V_f voulu dans le cadre de fabrication de composites par RTM dans lequel le renfort est comprimé entre deux plateaux rigides, bien qu'en réalité les surfaces du moule soient rarement parallèles (Lomov, Verpoest, Robitaille, 2005). La figure 2.19 illustre deux concepts intervenant lors de la transmission des forces compressives au sein du renfort textile. En fait, la pression n'est pas uniforme sur un textile puisque celui-ci n'est pas plan. L'imbrication (nesting) des couches empilées de tissu peut affecter le résultat des essais de compaction et le V_f final.

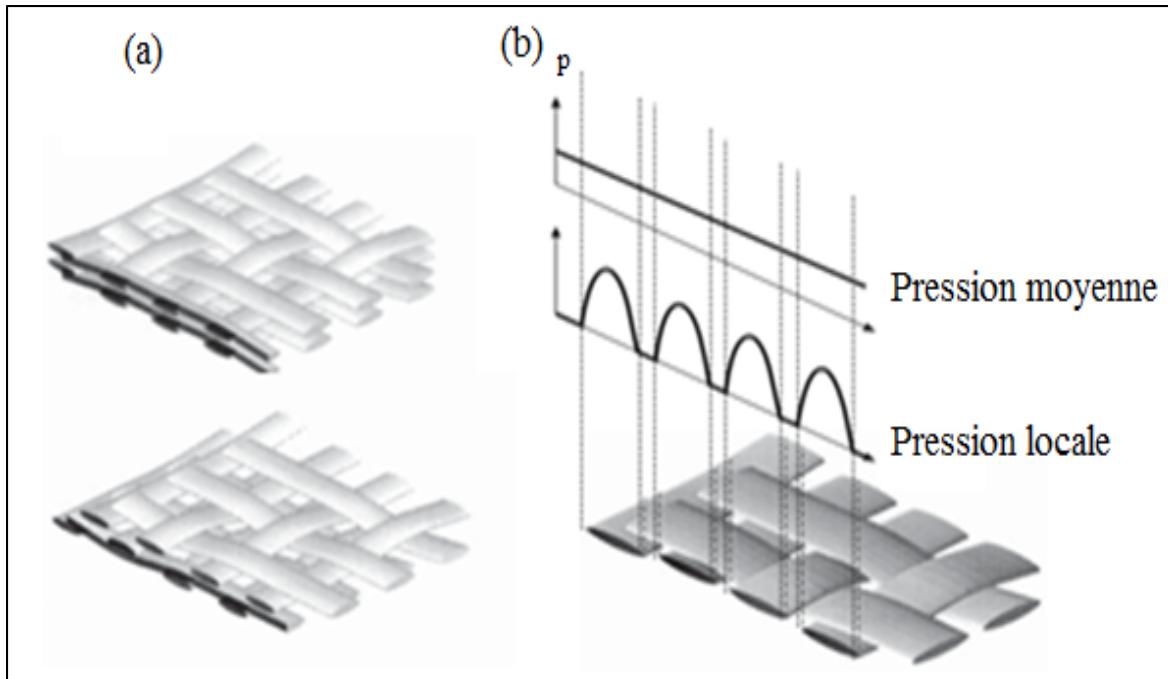


Figure 2.19 (a) Imbrications possibles des différentes couches les unes dans les autres (nesting); (b) pression locale et moyenne lors de la compaction (Lomov, Verpoest et Robitaille, 2005)

2.8.3 Perméabilité des renforts fibreux

Le niveau de compaction des renforts fibreux fait directement varier la proportion fibreuse des préformes. Ceci a un impact direct sur la facilité avec laquelle la résine pourrait être injectée dans les renforts fibreux. De manière instinctive, plus un renfort est dense plus un fluide aura de la difficulté à infuser ce renfort fibreux, et une pression d'injection de résine sera nécessaire. Pour des pièces composites à haute performance, un maximum de proportion fibreuse est souhaité, les zones sèches comme les zones riches en résine sont à proscrire (Lomov, Verpoest, Robitaille, 2005). En outre, l'infusion doit être réalisée le plus rapidement possible dans un souci de productivité. On comprend alors l'intérêt qu'a la compaction des renforts fibreux dans les paramètres du procédé RTM, cependant le V_f n'est pas le seul paramètre jouant un rôle dans l'imprégnation de la résine.

L'étude de l'imprégnation des renforts est un domaine de recherche très compétitif à l'heure actuelle. La loi de Darcy (équation 3.7) déterminant la vitesse d'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux (le renfort fibreux) est donnée par :

$$v = -\frac{K}{\eta} \nabla p \quad (3.7)$$

Cette vitesse est directement reliée à la perméabilité K dans le plan textile, η étant la viscosité de la résine, ∇p étant le gradient moyen de pression. La perméabilité, fonction directe du V_f du textile, est un paramètre hautement dépendant de la géométrie du renfort fibreux et est difficile à prédire. La caractérisation de la perméabilité des tissus d'habillement est normalisée (ASTM D737, ISO 15496 et ASTM D5493). Arbter et son équipe de chercheurs proposent une étude intéressante de comparaison de 16 techniques différentes de mesure de la perméabilité des principales équipes de recherches dans le monde (Arbter et al., 2011).

2.8.4 Préformage de textiles 3D

Les renforts 3D (tissés interlock, tressage 3D, NCF...) sont des solutions prometteuses pour limiter les opérations de drapage et obtenir simplement des préformes « near net-shape ». Bien qu'il n'existe pas de normes sur la caractérisation des textiles 3D, il est possible de trouver dans la littérature un certain nombre d'informations sur leur caractérisation, comportement et simulation de préformage. (De Luycker, 2009) a étudié le préformage de renforts 3D interlock de différentes épaisseurs sur une hémisphère. La figure 2.20 montre la nature et l'allure de la déformée de ces renforts lors du préformage.

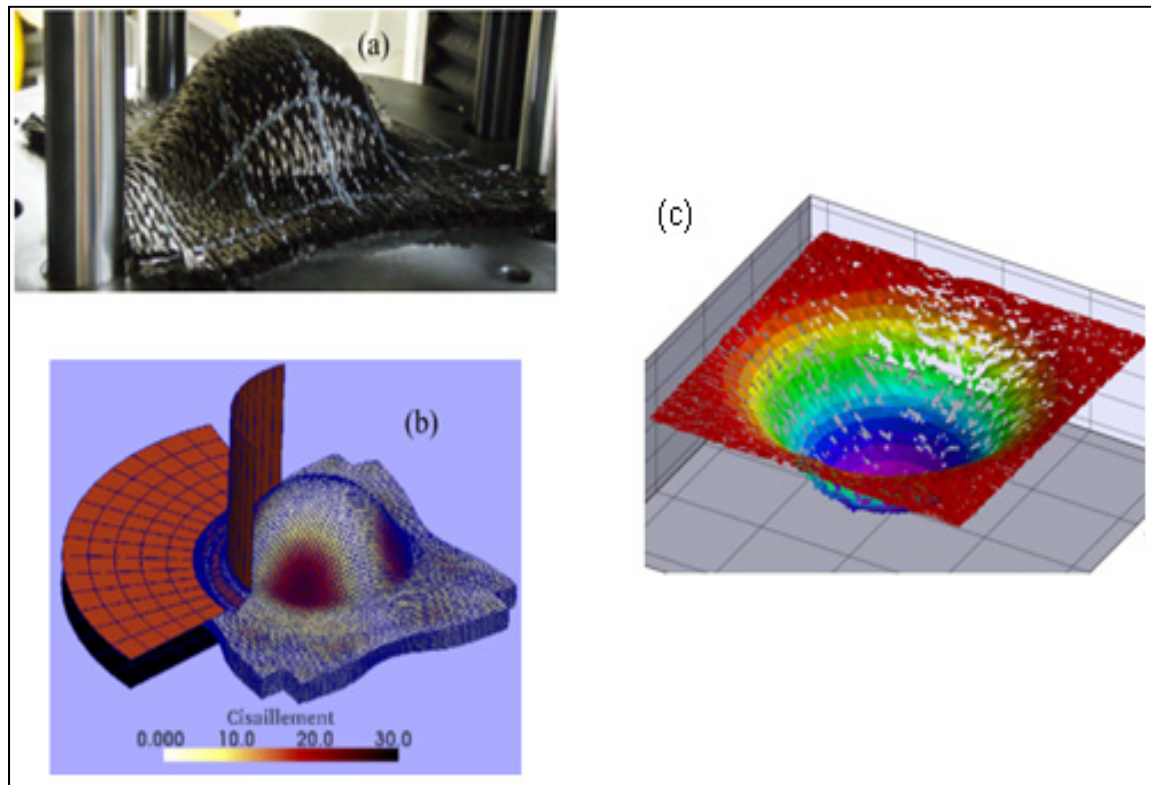


Figure 2.20 Préformage de tissu interlock 3D : a) expérimental, b) simulé, c) stéréo-corrélé (De Luycker, 2009)

2.8.5 Modification des comportements par une architecture 3D

Les mécanismes au sein de renforts 3D sont beaucoup plus difficiles à caractériser que pour les textiles 2D. D'une part, il manque la visibilité des mécanismes internes au renforcement. Ensuite, de par l'architecture complexe des fibres, une sollicitation simple du renfort implique des comportements à l'échelle mésoscopique autrement plus complexes. Par exemple, l'embuvage de tissés 2D est faible et similaire dans les deux directions principales, alors que pour un interlock, les mèches dans le plan vont être relativement droites et les mèches transversales de jonction seront fortement embuvées.

La rigidité des textiles en flexion est très faible et parfois elle est même négligée et le matériau est alors considéré comme une membrane. Pour les textiles de fibres rigides ou épais (comme c'est le cas pour les tissés 3D) ce paramètre devient important et ne peut plus être négligé.

2.8.6 Compaction de renforts 3D

La compaction orthogonale au plan du textile, semble être un paramètre important à prendre en compte. Celle-ci est significative pour les textiles épais (empilement de laminés ou textiles 3D épais) lors de la fermeture du moule RTM. La compaction aura un rôle sur les propriétés des textiles mais aussi sur la pièce composite finale suite à des variations dans le volume fibreux et de la perméabilité. Le comportement en compression dépend beaucoup de l'architecture des textiles (Endruweit et Long, 2010).

Rapporté comme ayant une meilleure perméabilité que les empilements de textiles 2D, il n'existe pourtant pas dans la littérature de modèles pour la perméabilité de renforts 3D. (Endruweit et Long, 2010) se proposent de déterminer les perméabilités dans le plan et à travers l'épaisseur de tissés 3D et trouvent une perméabilité transverse plus importante pour un tissé 3D que pour des empilements 2D.

Rugg et Cox mettent en évidence quelques spécificités des préformes tressées 3D lors de leur compression. Ils montrent que la compaction de tressage multicouche supprime les glissements en rotations des fibres observées pour des tressages 2D. (Rugg et Cox, 2004). Une partie non-négligeable du chargement ne sert pas à l'élargissement des mèches mais est transférée en cisaillement par les mèches en biais.

(Mahadik, Brown et Hallett, 2010) ont évalué l'influence de la compaction de deux textiles interlock 3D en carbone sur leur degré d'embuvage et la taille des canaux de résine. L'utilisation de la tomographie est alors nécessaire pour évaluer ces deux paramètres très importants pour les performances de composites à architecture 3D. Sous chargement, il est montré un aplanissement des mèches ondulées et une réduction de canaux de résine, bien qu'ils dépendent également grandement de l'architecture initiale de tissage. On montre aussi une tendance similaire de réduction de la taille des zone pauvres en fibres autour de la présence de fils de couture « stitching » pour assembler les tissus NCF, grâce à la compaction des préformes qui implique une augmentation du Vf.

CHAPITRE 3

DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE DE CARACTÉRISATION DES RENFORTS COUSUS EN FIBRE DE CARBONE

3.1 Plan de travail

Dans le cadre de ce projet de recherche, une série d'essais expérimentaux a été menée envers un objectif commun : la caractérisation du comportement mécanique des renforts cousus sous différentes sollicitations afin de comprendre le comportement de ces renforts lors du drapage dans un premier temps et permettre ultérieurement d'orienter les études expérimentales en termes d'investigation des propriétés mécaniques, tenue en fatigue et endommagement des structures composites issues de ces préformes (Maîtrise de Catherine Leduc, CRIAQ COMP-501). Il existe plusieurs sortes de renforts 3D dédiés pour des applications structurales dans les domaines de pointe tels que l'aéronautique et l'aérospatiale. Les présents travaux portent sur l'étude expérimentale du comportement mécanique des renforts secs assemblés à l'aide de la technique de couture à un seul accès (« OSS stitching ») (voir annexe I)

Dans un premier temps, ces renforts cousus sont caractérisés du point de vue géométrique afin d'identifier l'impact de la couture et de ses différentes configurations sur l'intégrité de la préforme.

Ensuite, ces préformes sont testées sous diverses sollicitations telles la compaction, le cisaillement dans le plan et la flexion dans le but d'évaluer leurs propriétés mécaniques et conclure sur l'effet de la couture sur leur évolution.

Une fois ces essais réalisés, on examine la géométrie et la qualité des surfaces des préformes. Cette étape porte sur l'identification des dommages tels que les désalignements des fibres, les ouvertures dues à la couture ou l'identification de la nature de la déformation que subissent les tissus après une sollicitation mécanique quelconque. Pour se faire, la visualisation

microscopique des préformes est effectué à l'aide d'un microscope optique standard et d'un microscope confocal à balayage au département de génie de la production automatisée à l'ÉTS.

3.2 Choix des renforts à caractériser

Les caractéristiques des tissus de fibre de carbone investigués dans le cadre de cette étude, sont présentées au tableau suivant :

Tableau 3.1 Caractéristiques des tissus étudiés dans le cadre du projet

Style	Armure	Épaisseur (mm)	Masse surfactive (g/m ²)	Chaîne	Trame	Ratio chaîne/trame
TC-06-P	Taffetas	0.31	192	C*, 3K, 200 tex	C*, 3K, 200 tex	50% / 50 %
TC-06-T	Sergé 2x2	0.38	205	C*, 3K, 200 tex	C*, 3K, 200 tex	50% / 50%
TC-09-U	UD	0.70	320	C*, 12K, 800 tex	Uf**, 60 tex	97% / 3%

* C: Carbone,

** Uf: Uniflex (fil en fibre verre)

Pour les essais expérimentaux, un choix a été réalisé de travailler avec des renforts de fibre carbone 3K (3000 filaments dans une mèche) tissés en sergé 2x2 (205 g/m²) fabriqués par Texonic. Les préformes à tester désignent la séquence de plis tissés et cousus de telle manière à avoir une structure quasi-isotrope, nommée « Quasi ». Les préforme étaient composées de 20 plis ayant une séquence symétrique $[(\pm 45^\circ) / (0^\circ, 90^\circ)]_{5,s}$, où 90° correspond à la direction de la chaîne.

Pour réaliser une couture structurale, un fil de carbone 2x67tex et une méthode OSS® ont été utilisées par le groupe CTT. La direction de la machine de couture coïncide avec la direction

de 0° de la préforme. Considérant le pas et le type de ligne de couture, quatre types de préformes ont été produites. La figure 3.1 montre les deux configurations de couture testées au cours du projet CRIAQ-COMP 501.

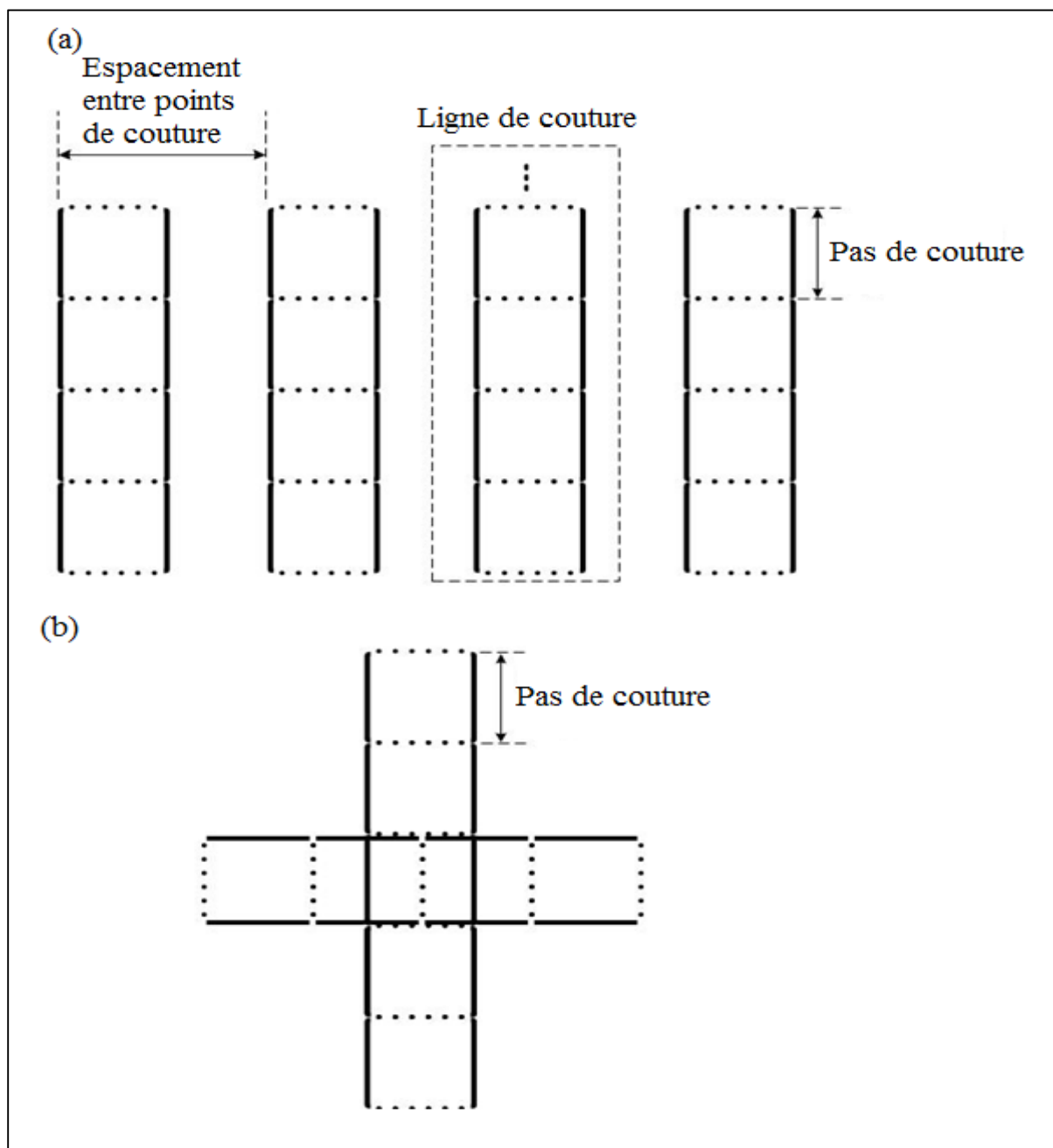


Figure 3.1 Les deux configurations de couture testées a) couture simple et b) couture perpendiculaire

3.2.1 Essais de compaction

La compaction dans l'épaisseur revêt une importance centrale lors de l'opération d'infusion ou VARTM. Elle permet une augmentation remarquable de la portion volumique des fibres vf, mais diminue l'infusion de la résine à travers la préforme donc la perméabilité de la préforme. Des études menées par Ogale, Mitschang et Boisse ont montré l'impact du processus et paramètres de couture sur le comportement en compaction des préformes. À partir de cela, il s'avère que la présence des fils de couture aurait un effet local sur les tissus cousus lors de la compaction, ce qui affectera les propriétés globales du laminé. Il est important de mentionner que lors de la compaction des préformes dans les moules, la géométrie et le comportement de la couture faite sur un renfort non-compacté peuvent être altérés.

3.2.2 Quantité de tissus

La quantité de tissus réservés aux essais de compaction est évaluée à vingt plis de tissés de carbone. Les essais sont menés sur quatre configurations possibles en utilisant des fils de couture en carbone avec des longueurs de pas de couture de 4 et 8 mm. Il est important de mentionner que des tissus non cousus sont aussi testés sous compaction pour fins de comparaisons. Ainsi le test de compaction a été réalisé sur vingt et trois échantillons. Le tableau 3.2 regroupe les différents échantillons de préformes testés en compaction standard. Après analyse de la reproductibilité des résultats et pour des raisons de simplification, on se limite à la présentation que de deux tests par type de configuration étudiée.

Pour simplifier et distinguer facilement les différents échantillons étudiés lors de l'analyse des résultats, une nomenclature à l'aide de sigles a été choisi pour chaque échantillon. La désignation de ces sigles est la suivante :

- **Uns_{i_cyc_j}** : Échantillon **non cousu** numéro **i** lors du cycle de compaction numéro **j**.
- **SinPX_{i_cyc_j}** : Échantillon **avec couture simple ayant un pas de couture de X mm** (**X vaut 4 ou 8 mm**) numéro **i** lors du cycle de compaction numéro **j**.

- **SupPX_i_cyc_j** : Échantillon avec couture superposée ayant un pas de couture de **X mm (X vaut 4 ou 8 mm)** numéro **i** lors du cycle de compaction numéro **j**.

Tableau 3.2 Sommaire des échantillons testés en compaction

Désignation de l'échantillon	Nomenclature de la préforme	Type de couture	Pas de couture (mm / pas)
Uns_1	700-0005-P4	Non cousu	-
Uns_2	700-0005-P4	Non cousu	-
SinP4_1	700-0005-P4	Couture simple	4 mm
SinP4_2	700-0005-P4	Couture simple	4 mm
SinP8_1	700-0006-P8	Couture simple	8 mm
SinP8_2	700-0006-P8	Couture simple	8 mm
SupP4_1	700-0005-P4	Couture superposée	4 mm
SupP4_2	700-0005-P4	Couture superposée	4 mm
SupP8_1	700-0006-P8	Couture superposée	8 mm
SupP8_2	700-0006-P8	Couture superposée	8 mm

3.2.3 Dimensions des échantillons

On considère la préforme ayant les dimensions présentées à la figure 3.2. Les essais de compaction sont réalisés sur des préformes non cousues et d'autres avec des coutures simples ou superposées. Un nombre de répétitions est fait afin de s'assurer de la répétabilité des résultats. Une préforme avec couture simple et superposée est montrée à l'annexe III.

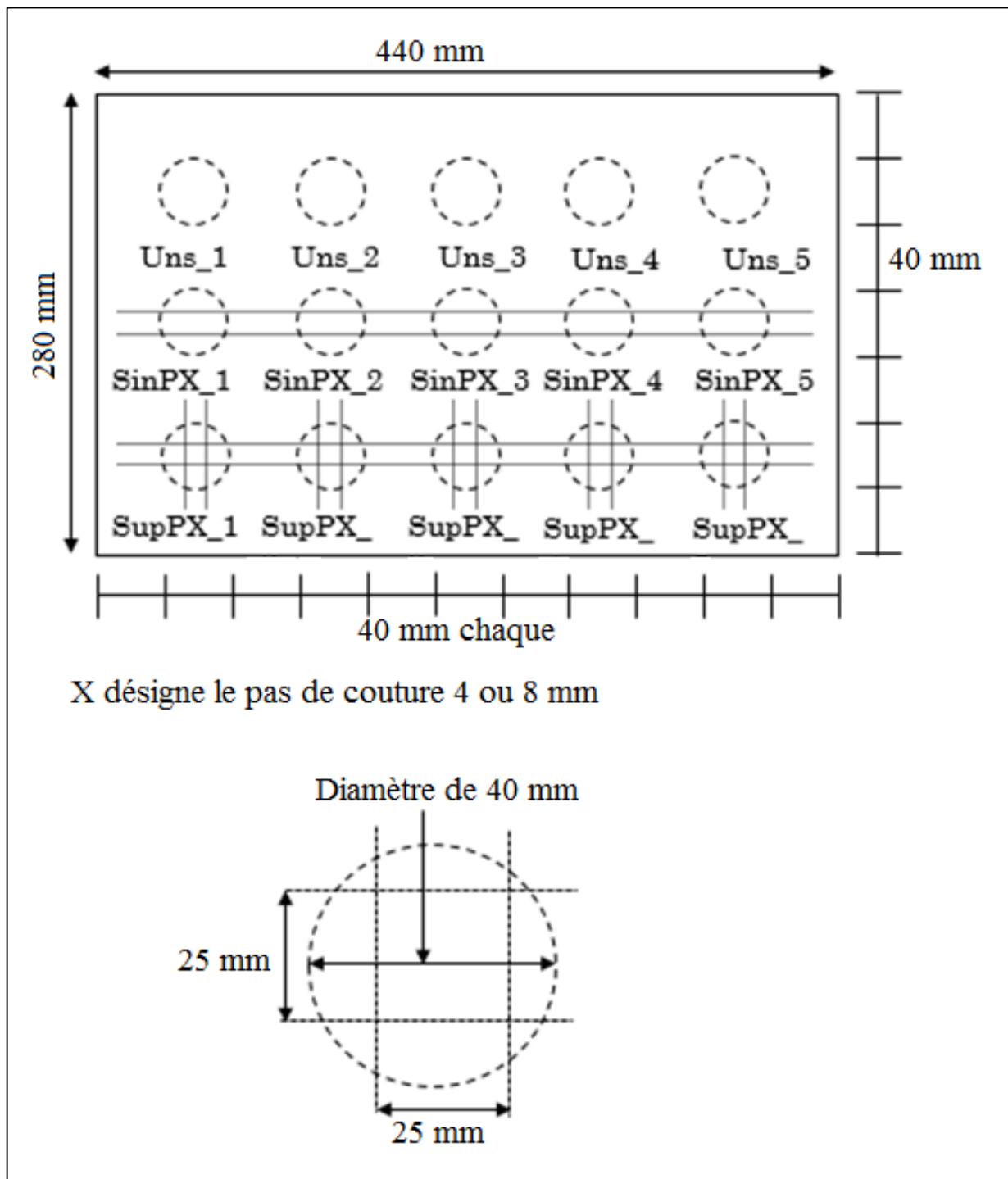


Figure 3.2 Dimensions des échantillons de compaction (Adaptée de Drivas T., 2014)

3.2.4 Procédure de l'essai

Le test de compaction a été réalisé à l'aide d'une machine conventionnelle de traction Instron 4482 équipée d'une cellule de charge de 1 kN. On installe des plateaux de compaction compatibles avec nos essais. Ces plateaux de forme cylindrique ont un diamètre de 40mm permettant de compacter de façon globale les zones cousues. La figure 3.3 présente le montage et les plateaux de l'essai de compaction. Pour faciliter la manipulation de la préforme, une table de support a été utilisée dans les essais de compaction.

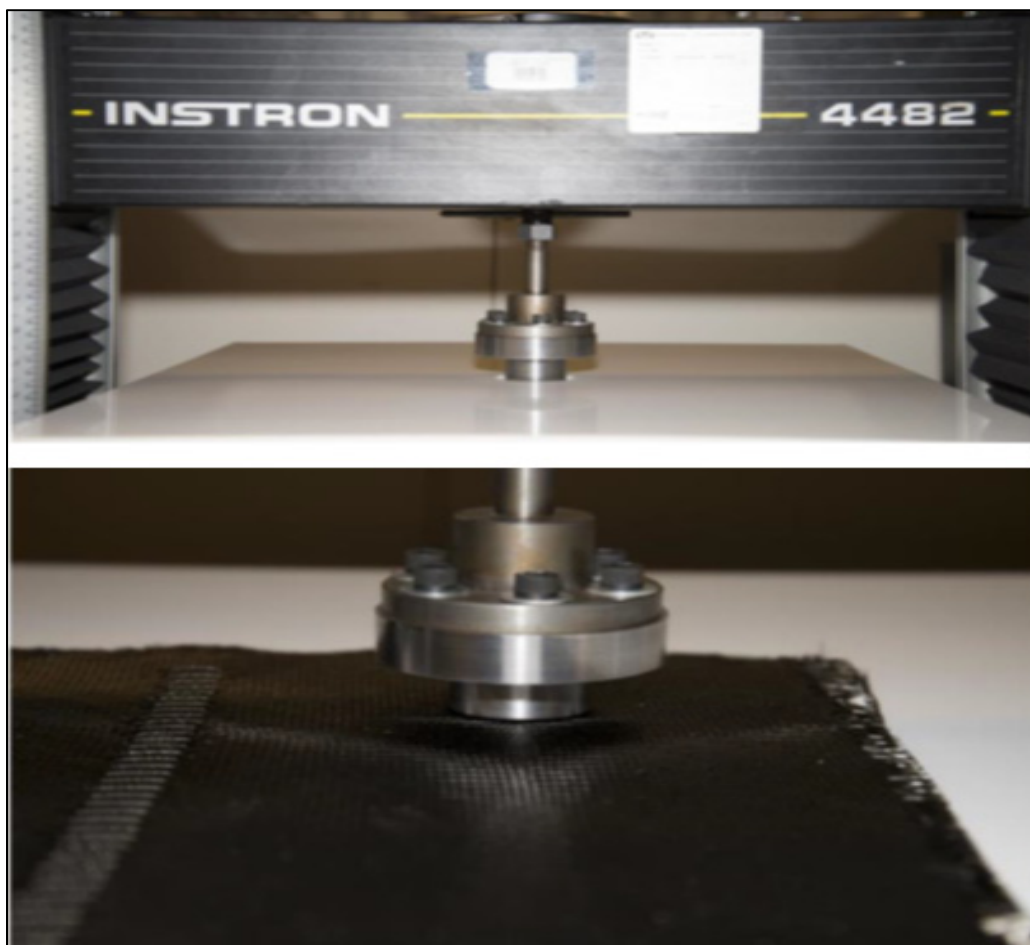


Figure 3.3 Dispositif de compaction : Machine Instron, plateaux de compaction et table de manipulation des préformes

Les renforts ont été compactés à une vitesse constante de 5 mm / min jusqu'à un niveau de force de compression d'environ 125.66 N équivalent à la pression choisie de 0.1 MPa (1 bar). Le

test a été conduit selon le mode compression-relaxation; une charge de compression est appliquée suivie d'un maintien pendant 1 minute à la fin de l'essai. Des essais ont été effectués sur tous les échantillons pour 5 cycles de compaction successifs sur la même surface compactée. Au cours de l'essai, le déplacement et l'effort sont enregistrés.

Les paramètres étudiés sont les variations de la fraction volumique de fibre et la pression maximale appliquée lors des essais de compaction en fonction des paramètres de la structure du textile tels le pas et le type de couture.

Ces essais permettent d'identifier la résistance de la préforme sèche à la compression, d'évaluer mécaniquement et physiquement les effets de la couture sur les renforts textiles cousus dans l'épaisseur, et d'avoir une idée du mode de déformation de ces structures lors du préformage.

3.2.5 Essais de compaction localisée

Afin d'obtenir plus de détails sur le comportement local de nos préformes lors de la compression transversale et des effets de couture, des essais de compaction localisée ont été réalisés sur les mêmes éprouvettes étudiées dans la dernière section.

De nouveaux plateaux cylindriques de 10 mm de diamètre ont été conçus et montés sur une machine Instron 4482 comme le montre la figure 3.4. La vitesse d'essai a été fixée à 1 mm / min et la préforme a été compactée jusqu'à atteindre une pression de 1 bar. Le même mode d'essai que lors de la compaction standard a été utilisé, à savoir la compression - relaxation.

Seules les préformes non cousues et cousues (couture simple et superposée) avec un pas de couture de 8 mm ont été étudiées au cours de ces essais. Trois répétitions et 3 cycles de compaction successifs ont été réalisés pour chaque échantillon. Le tableau 3.3 présente le sommaire des échantillons testés en compactations localisée.



Figure 3.4 Dispositif de compaction localisée : Machine Instron 4482 et plateaux de compaction

Tableau 3.3 Ensemble des échantillons testés en compaction localisée

Désignation de l'échantillon	Nomenclature de la préforme	Type de couture	Pas de couture (mm / pas)	zone compactée
Uns_1	700-0005-P4	Non cousu	-	
Uns_2	700-0005-P4	Non cousu	-	
Uns_3	700-0005-P4	Non cousu	-	
SinP8_1	700-0005-P4	Couture simple	4 mm	Point de couture
SinP8_2	700-0005-P4	Couture simple	4 mm	Point de couture
SinP8_3	700-0005-P4	Couture simple	4 mm	Point de couture
SinP8_1	700-0006-P8	Couture simple	8 mm	Fil de couture
SinP8_2	700-0006-P8	Couture simple	8 mm	Fil de couture
SinP8_3	700-0006-P8	Couture simple	8 mm	Fil de couture
SupP8_1	700-0006-P8	Couture superposée	8 mm	
SupP8_2	700-0006-P8	Couture superposée	8 mm	
SupP8_3	700-0006-P8	Couture superposée	8 mm	

3.2.6 Méthode d'analyse des essais de compaction

L'essai de compaction a pour but de caractériser la rigidité du renfort textile dans l'épaisseur et de quantifier l'évolution de la fraction volumique de fibre sous l'effet de la pression de compaction.

Le test est réalisé en comprimant le renfort textile entre deux plateaux parallèles de diamètre $d_s=40\text{mm}$ pour la compaction standard et $d_l=10\text{mm}$ pour la compaction localisée. On note que la section comprimée du renfort est S_{tissu} . Cette section compactée de la préforme est respectivement évaluée à $1.2566 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ et $0.0785 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ lors des essais de compaction standard et compaction localisée.

Vu que la section comprimée du renfort présente la particularité de rester constante au cours de l'essai, on peut donc relier la variation du volume de l'échantillon testé à sa variation d'épaisseur déterminée à partir des déplacements enregistrés au moyen du capteur de la machine de traction. La variation d'épaisseur peut être reliée au taux volumique de fibres. Cette conversion permet de normaliser l'essai de compaction et de pouvoir comparer les résultats obtenus avec différents renforts textiles.

Avant de débiter la série de tests sur le renfort, un test de compaction à vide a été réalisé dans le but de soustraire la déformation rémanente liée aux plateaux de compaction. La pression exercée sur l'échantillon de renfort est définie par :

$$P = \frac{F_{\text{tissu}}}{S_{\text{tissu}}} \quad (3.1)$$

Où :

F_{tissu} est l'effort enregistré lorsque le test est réalisé en présence de la préforme, et S_{tissu} est l'aire de la surface compactée.

Le taux volumique de fibre est défini par le rapport entre le volume occupé par les fibres V_{fibre} et le volume entre les plateaux de compaction V_{plateaux} .

$$v_f = \frac{V_{fibre}}{V_{plateaux}} \quad (3.2)$$

Avec :

$$V_{fibre} = \frac{m_{fibre}}{\rho_{fibre}} \quad (3.3)$$

$V_{plateaux}$ est défini comme étant le produit de l'aire de la surface des plateaux de compaction et la hauteur instantanée entre les plateaux.

Lors des calculs de déplacements propres aux fibres, il est nécessaire de tenir compte de la déformation résiduelle liée aux plateaux. Cela est rendu possible en introduisant un facteur correctif à la distance instantanée entre les plateaux. Ainsi la distance corrigée entre les plateaux devient :

$$d_{corrigée} = d - f_{correctif} \quad (3.4)$$

Le facteur de correction $f_{correctif}$ est lié à la force appliquée sur les plateaux et peut être déterminé à partir des essais de compaction à vide.

Si on suppose que le système de compaction réagi tel qu'un ressort comme schématisée à la figure 3.5, lorsque le test de compaction est réalisé à vide, le comportement de ce dernier est considéré linéaire et la raideur $k_{plateaux}$ est donnée par :

$$k_{plateaux} = \frac{F}{d_{plateaux}} \quad (3.5)$$

où F est la force appliquée par la machine de traction, et $d_{plateaux}$ est le déplacement enregistré au cours de l'essai

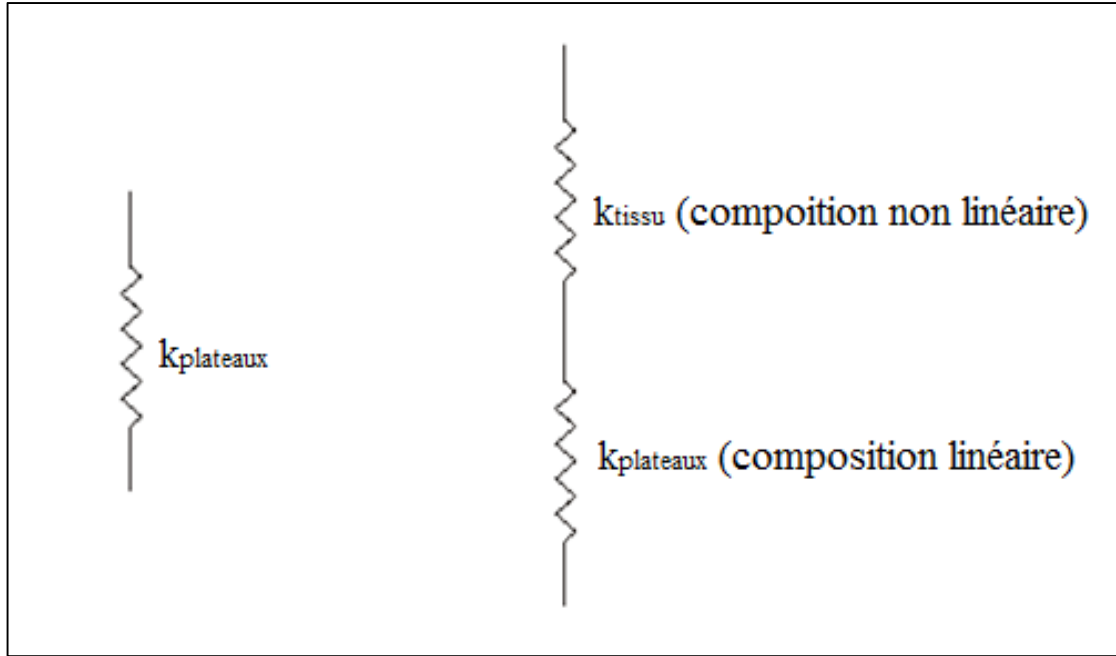


Figure 3.5 Modélisation de l'essai de compaction par un système de ressorts en série

L'analyse mécanique du système de ressorts en série permet de déduire l'ensemble des équations suivantes :

$$d_{total} = d_{tissu} + d_{plateaux} \quad (3.6)$$

$$k_{\text{équivalent}} = \frac{k_{plateaux} * k_{tissu}}{k_{plateaux} + k_{tissu}} \quad (3.7)$$

$$k_{plateaux} * d_{plateaux} = k_{tissu} * d_{tissu} \quad (3.8)$$

Or :

$$k_{\text{équivalent}} = \frac{F}{d_{total}} \quad (3.9)$$

La combinaison des toutes ces équations permet d'obtenir :

$$k_{tissu} = \frac{F * k_{plateaux}}{d_{total} * k_{plateaux} - F} \quad (3.10)$$

$$d_{plateaux} = f_{correctif} = \frac{d_{total}}{1 + \frac{k_{plateaux}}{k_{tissu}}} \quad (3.11)$$

En reportant ces relations dans l'expression du taux volumique de fibre on obtiendra ainsi :

$$v_f = \frac{m_{fibre}}{A_{plateaux} * d_{correcté} * \rho_{fibre}} = \frac{M_{fibre}}{d_{correcté} * \rho_{fibre}} \quad (3.12)$$

Le poids des fibres comprimées entre les plateaux de compaction m_{fibre} est défini dans un empilement de couches de renforts textiles par le produit de la masse surfacique de renfort, l'aire de la surface compactée et le nombre de plis composant la préforme.

3.3 Essais de cisaillement dans le plan avec cadre articulé

3.3.1 Contexte de l'essai de cisaillement

Un renfort multidirectionnel est essentiellement non drapable, et ne peut être testé en cisaillement. Dans le contexte strict des séquences d'empilement déterminées pour le projet, l'essai n'est pas pertinent. Toutefois, s'informer de la possibilité de produire des tissus bidirectionnels qu'on peut coudre en premier et draper en deuxième lieu (couture essentiellement parallèle / perpendiculaire aux fils de trame et chaîne), et qui sont enfin combinés pour produire les multidirectionnels recherchés dans le cadre du projet CRIAQ-COMP 501, mérite un nombre limité d'essais.

3.3.2 Quantité de tissus

La réalisation des essais de cisaillement nécessite 8 plis de tissus de carbone ayant la séquence $[0/90^\circ]_4$. Vu le manque de données sur ce genre d'essai faits sur de telles préformes, il a été décidé de ne tenter qu'une seule configuration initialement avec un pas de couture de 4 mm. Il est aussi possible de faire changer le nombre de plis utilisés puisque la séquence d'empilement réservée pour la fabrication du composite ne s'applique pas dans le cas de ces essais.

La nature des assemblages et des coutures requis pour les essais de cisaillement par cadre articulé sont les suivants :

- 3 assemblages sans couture,
- 3 assemblages avec couture simple,
- 3 assemblages avec couture perpendiculaire.

3.3.3 Dimensions des échantillons

Des préformes empilées à $[0^\circ / 90^\circ]_4$ seulement ont été découpées sur les échantillons en forme de croix présentant une longueur de bord L_{cadre} de 140 mm puis montées et fixées aux 4 bras d'un cadre de longueur L_{tissu} de 175 mm. La figure 3.6 montre les dimensions des échantillons testés en cisaillement.

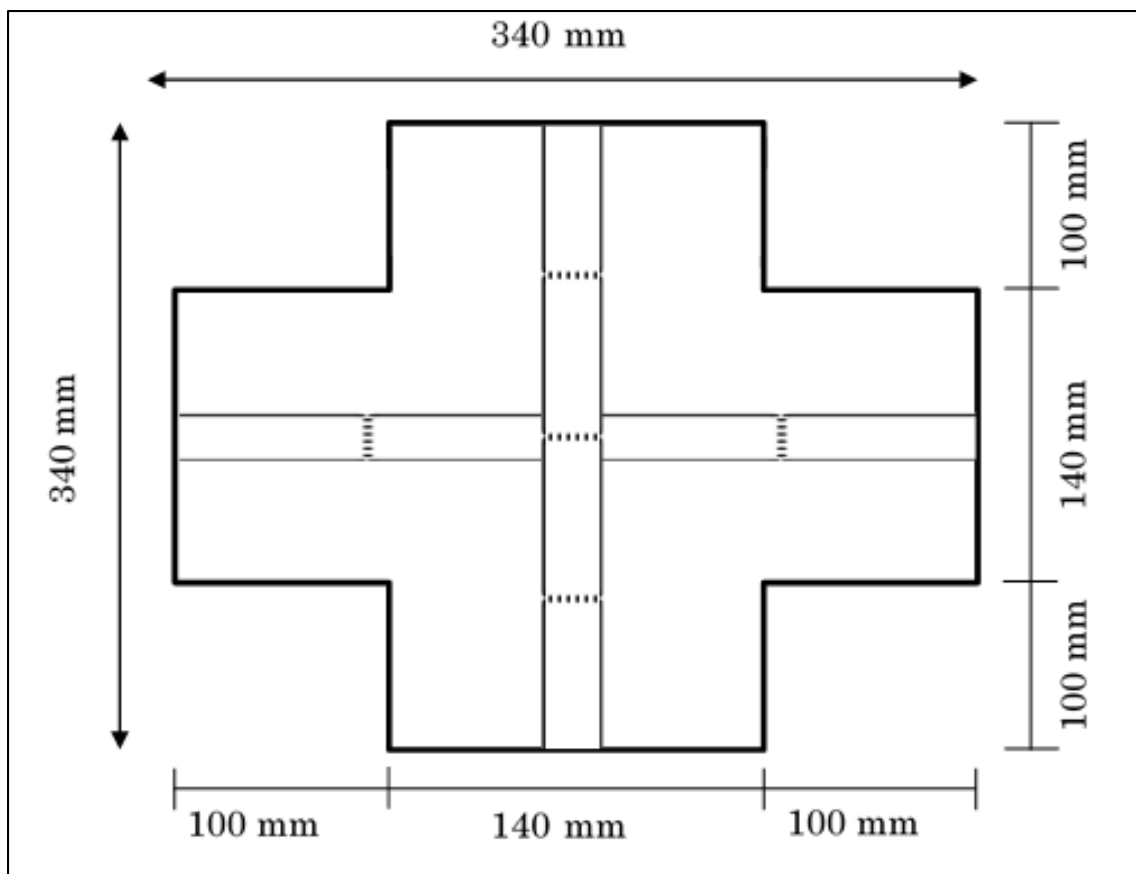


Figure 3.6 Dimensions des échantillons dédiés aux essais de cisaillement en cadre articulé (adapté de Drivas T., 2014)

3.3.4 Procédure de l'essai

Pour réaliser le test de cisaillement en cadre articulé, l'éprouvette textile en forme de croix ayant les dimensions présentées à la figure 3.6, est montée dans un cadre métallique articulé dans ses quatre coins tel que montré à la figure 3.7. Monté sur une machine de traction universelle Instron 4482 équipée d'une cellule de charge de 1 kN, le cadre déformable impose à l'échantillon une déformation en cisaillement pur. La partie inférieure du cadre reste immobile tandis que la partie supérieure se déplace à une vitesse de 5 mm / min jusqu'à atteindre un déplacement maximal de 95 mm qui correspond à un angle de cisaillement final de 66 degrés. Chaque échantillon a été cyclé une seule fois.

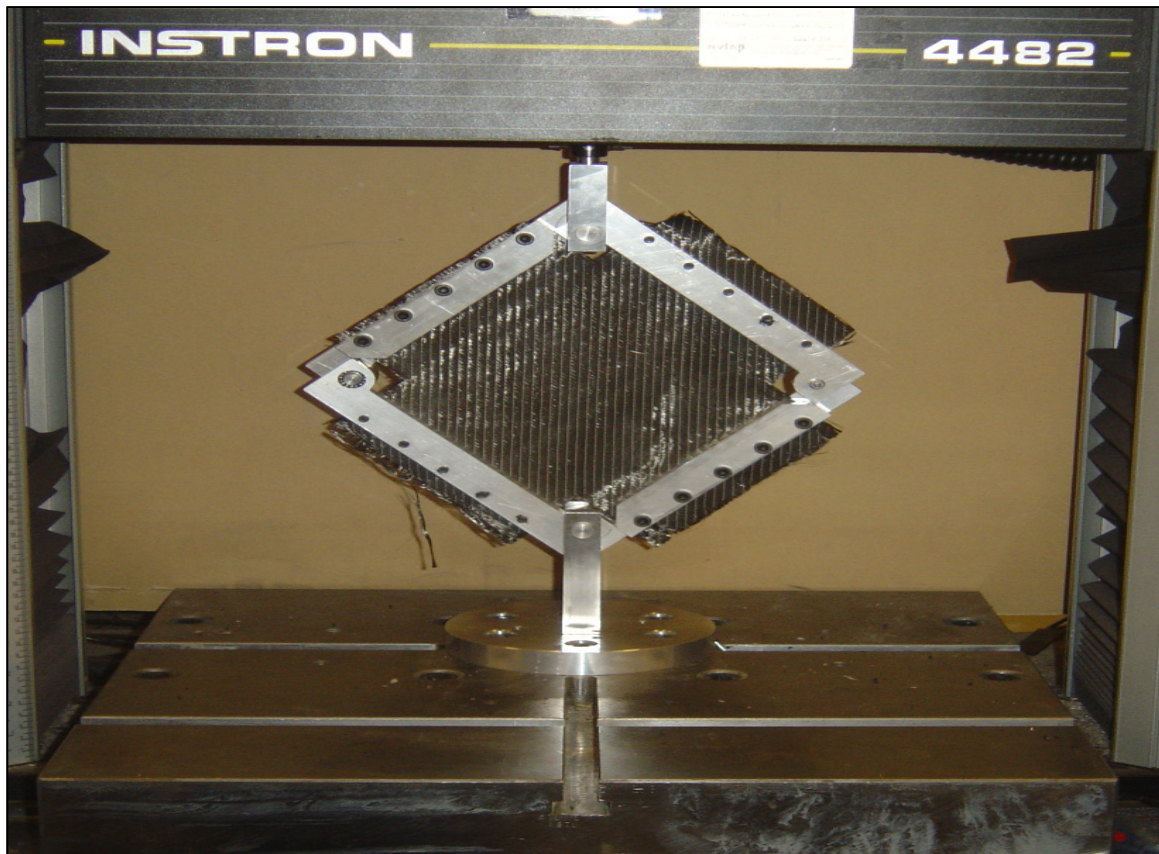


Figure 3.7 Montage pour l'essai de cisaillement en cadre articulé

3.3.5 Méthode d'analyse des essais de cisaillement en cadre articulé

L'essai de cisaillement en cadre articulé permet d'imposer une cinématique de cisaillement pur sur l'ensemble de l'échantillon textile. Pour réaliser cet essai, un cadre métallique composé de quatre côtés de mêmes longueur ($L_{\text{cadre}}=175\text{mm}$) assemblés par des liaisons pivots à leurs extrémités est utilisé.

Un échantillon sous forme de croix, dont la zone utile a une longueur $L_{\text{tissu}}=140\text{mm}$, est fixé dans le cadre au moyen de talons. Le cadre chargé avec le renfort textile est ensuite installé sur une machine de traction universelle par deux coins diagonalement opposés.

Lors des essais de cisaillement, le cadre métallique subit une cinématique comme le montre la figure 3.8 :

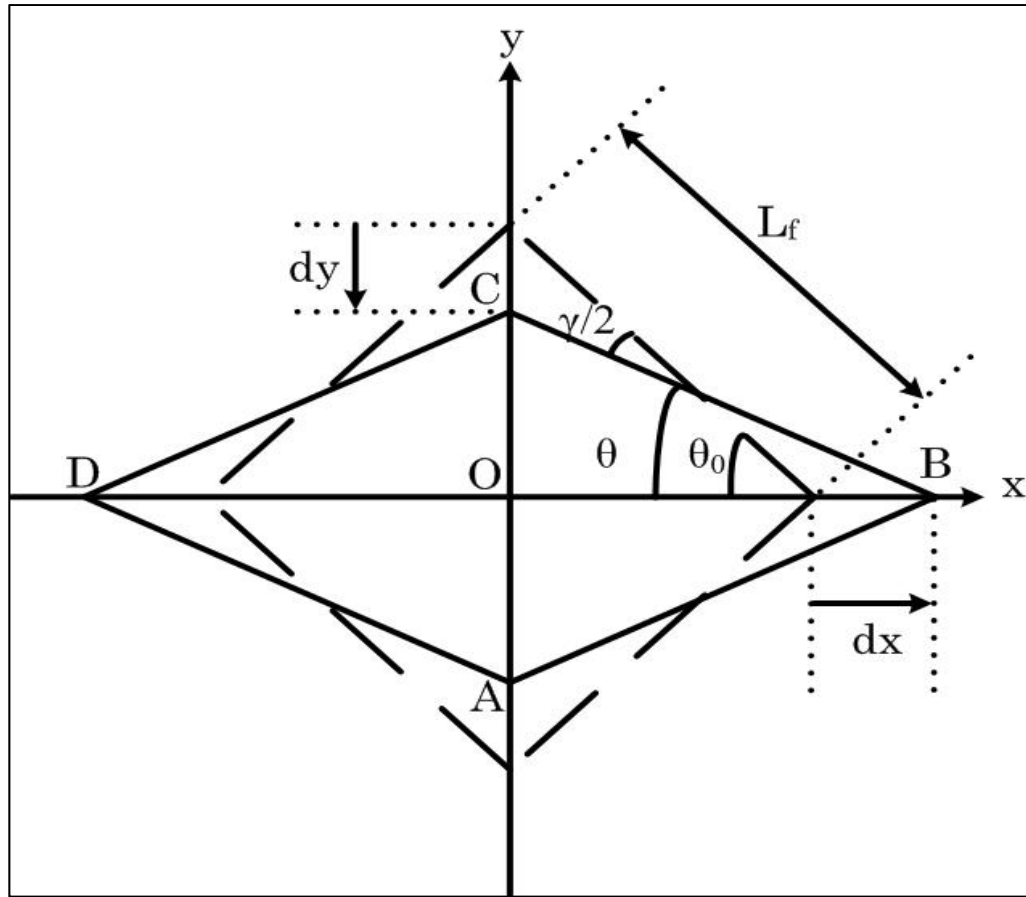


Figure 3.8 Schéma de principe de l'essai de cisaillement en cadre articulé

À partir de la figure précédente, l'angle de cisaillement γ est défini par :

$$\gamma = 2 * (\theta_0 - \theta) = \frac{\pi}{2} - 2 * \theta \quad (3.13)$$

En prenant en considération la géométrie du cadre, l'angle θ peut être exprimé en fonction des déplacements du cadre lié à la machine de traction :

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\sqrt{2} * L_{cadre} + dx}{2 * L_{cadre}} \right] \quad (3.14)$$

Ainsi, à partir du déplacement des points d'attache de la machine de traction, on peut obtenir la déformation en cisaillement.

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2 * \cos^{-1} \left[\frac{\sqrt{2} * L_{cadre} + dx}{2 * L_{cadre}} \right] \quad (3.15)$$

où :

L_{cadre} est la longueur d'un côté du cadre, et dx est le déplacement instantané du cadre.

Des essais à vide (cadre seul, sans renfort textile) ont été menés afin d'évaluer et d'éliminer l'erreur provoquée par le poids et l'inertie de l'appareil. Ainsi la charge nette F appliquée par la machine au renfort est obtenue en soustrayant une valeur de décalage F_{vide} de la valeur F_{tissu} enregistrée par la machine lorsque le tissu est déformé dans le cadre métallique. La valeur de décalage F_{vide} est déterminée en effectuant plusieurs essais à vide sur le cadre afin d'enregistrer la force requise pour déformer le cadre. Ainsi, la force de traction appliquée sur l'échantillon de renfort est définie par :

$$F = F_{tissu} - F_{vide} \quad (3.16)$$

où :

F est l'effort net de traction que subit l'échantillon de renfort; F_{tissu} est l'effort de traction sur le cadre métallique avec le renfort, enregistré par la machine de traction lorsque le renfort est placé dans le cadre; et F_{vide} est l'effort de traction enregistré lorsque le cadre vide est sollicité.

La force de cisaillement F_s est déterminée par:

$$F_s = \frac{F}{2 * \cos(\theta)} \quad (3.17)$$

où

F est la force axiale enregistrée par la machine de traction et θ est l'angle instantané du cadre.

Il existe de nombreuses méthodes de normalisation du test de cisaillement pour fins de comparaison des résultats expérimentaux issus des essais conduits sur des échantillons de différentes tailles. En se basant sur des considérations énergétiques (travail de cisaillement) et la méthode utilisée par Lomov et son équipe (Lomov, 2005), la force normalisée de cisaillement peut être exprimée de la façon suivante :

$$F_{s-norm} = F_s * \frac{L_{cadre}}{L_{tissu}^2} \quad (3.18)$$

Où :

L_{tissu} est la longueur de l'échantillon de renfort testé en cisaillement, et L_{cadre} est la longueur du cadre articulé utilisé,

Il faut mentionner que l'effort normalisé n'as pas de réalité physique, il permet tout simplement de comparer des résultats obtenus pour différentes tailles d'échantillons de renforts.

3.4 Essais de flexion simple courbure

3.4.1 Contexte de l'essai

La flexion est un paramètre important lorsqu'il s'agit de caractériser la drapabilité et la manipulation des préformes textiles sèches. Cependant, cette propriété est difficile à caractériser, et cela se ressent dans la littérature et la multitude de tests proposés sans qu'un consensus n'ait émergé.

D'une manière générale, les tissus fibreux doivent être pliés lors du préformage et l'assemblage pour produire des préformes avec des géométries complexes comme celle du démonstrateur à réaliser dans le cadre du projet CRIAQ COMP-501 présenté dans l'annexe II. Mais le fait que certaines coutures peuvent être faites avant ou après cette flexion, affecte, la facilité/difficulté et la reproductibilité de l'assemblage.

Malgré que la flexibilité des tissus peut devenir faible à cause de la couture, il demeure possible de plier les assemblages cousus aux rayons requis grâce à la flexion des fibres. Le cas échéant, le comportement en flexion des assemblages cousus, les configurations finales des fils de couture et reproductibilité de ces configurations auront un impact lors du procédé d'infusion de la résine.

Il est ainsi important de comprendre, en particulier, l'influence de la couture et de ses paramètres sur le comportement en flexion des préformes cousues, et de prévoir la possibilité que ces dernières puissent prendre des formes complexes répondant aux besoins particuliers des industriels aéronautiques.

3.4.2 Quantité de tissus

Les essais de flexion seront réalisés sur des échantillons de préformes cousues et non cousues ayant 20 plis de tissus en fibre de carbone. Les échantillons ont été testés pour 4 types de configurations semblables à celles utilisées lors des essais de compaction; c'est-à-dire en utilisant le fil de carbone pour l'assemblage par couture avec un pas de 4 mm et 8 mm. On a aussi évalué l'effet de l'orientation de la couture, à cette fin, certains échantillons ont des coutures en pleine longueur et d'autres en pleine largeur. Aucune superposition des coutures n'était prévue pour les essais de flexion.

3.4.3 Dimensions des échantillons

Les échantillons utilisés pour ce type d'essai ont les dimensions présentées à la figure 3.9. Sur la même préforme, on trouvera les échantillons non cousus et d'autres avec des coutures simples suivant la largeur ou la longueur de l'échantillon.

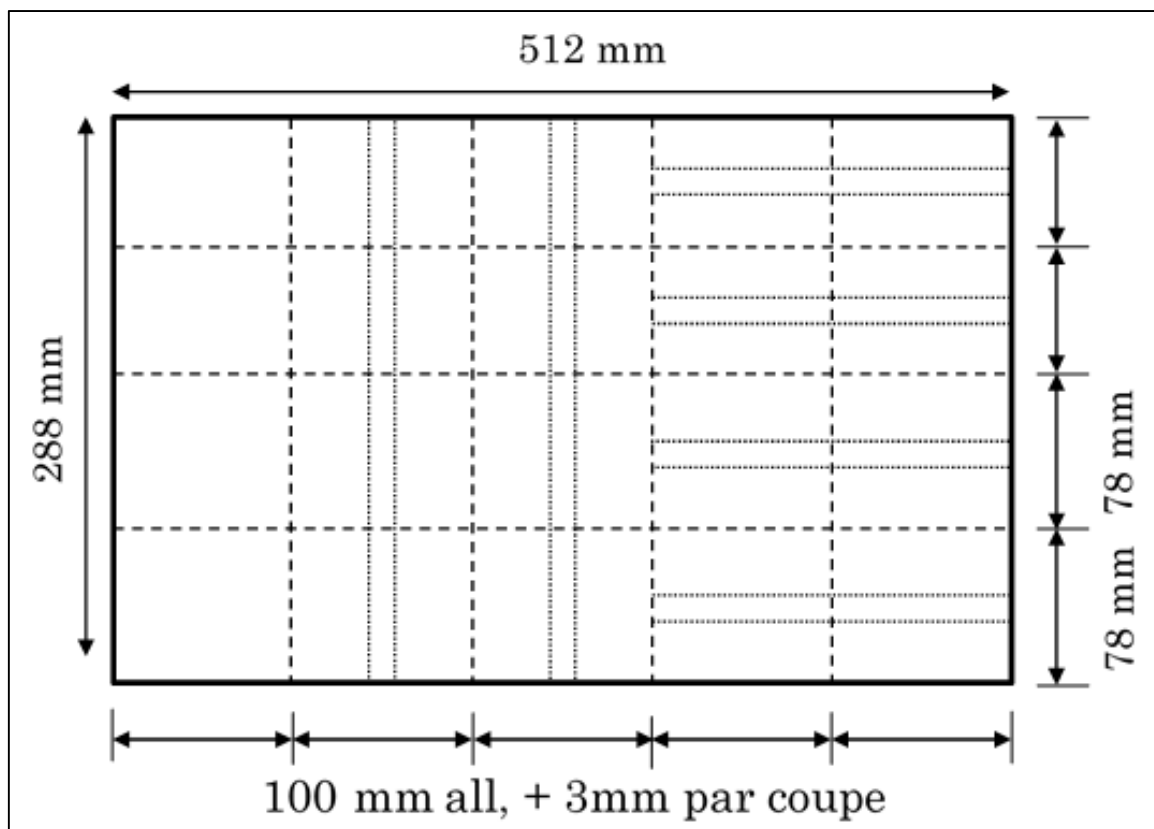


Figure 3.9 Dimensions des échantillons pour l'essai de flexion dans une préforme avant le découpage

3.4.4 Procédure de l'essai

Les essais de flexion ont été conduits sur une machine Instron 4482 équipée d'un gabarit conçu pour mener des tests de flexion sur renforts fibreux, figure. 3.10. Deux répétitions des essais ont été réalisées afin d'avoir des résultats significatifs et exploitables. Des échantillons ont été testés avec coutures parallèles ou perpendiculaires à la courbure de flexion comme illustre la figure 3.11.

Les essais de flexion sur tissus avec coutures simples et sans coutures ont été menés dans des conditions identiques, pour fins de comparaison des résultats.

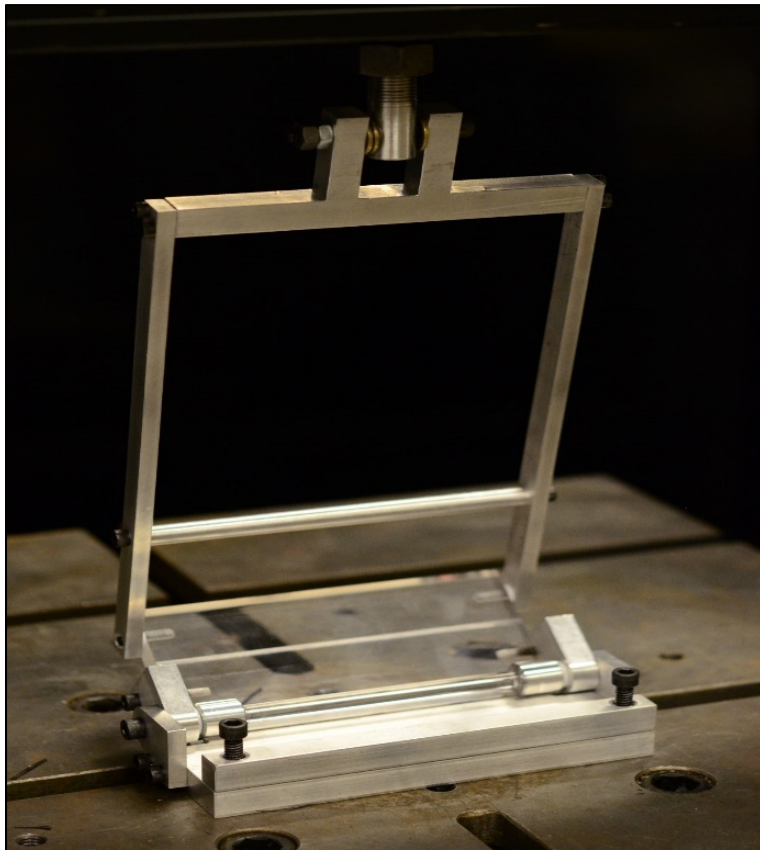


Figure 3.10 Montage expérimental pour essais de flexion

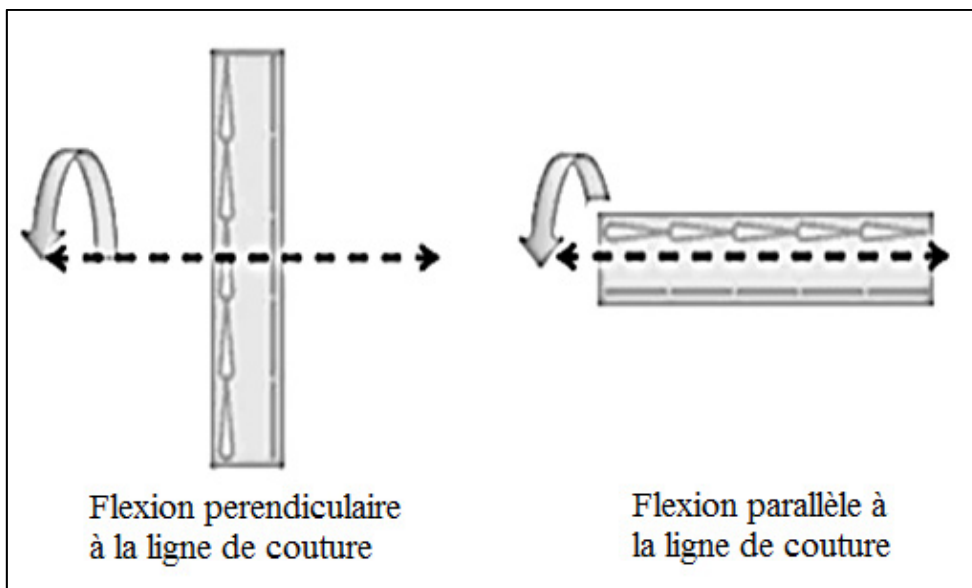


Figure 3.11 Direction de chargement par rapport à l'orientation de la couture

Le montage de flexion inclut des plateaux transparents en poly méthyl méthacrylate (PMMA) visant à permettre l'observation des rayons de courbure interne et externe pendant les essais.

La machine universelle Instron 8842 applique une charge axiale au bras de liaison du montage imposant un déplacement à vitesse constante de 20 mm / min jusqu'à atteindre une extension maximale de 70 mm.

3.4.5 Méthode d'analyse des essais de flexion

En général, les tissus fibreux doivent présenter une facilité de pliage lors de l'assemblage de la préforme et une facilité à se conformer aux formes complexes. Le fait d'avoir de nombreuses architectures de préformes assemblées avec des façons variées nécessite la réalisation de tests afin d'identifier l'effet de chaque architecture sur le comportement en flexion, et par la suite déterminer la faisabilité de l'assemblage.

Dans le cadre du projet CRIAQ-COMP 501, l'objectif des essais de flexion était de qualifier et de quantifier la capacité des empilements de tissus à se plier et se conformer à la géométrie d'un raidisseur en T avec un rayon de 4.2 mm, montré dans l'annexe II.

De la même façon que lors des essais précédents, et afin de permettre une analyse juste des essais de flexion, on a procédé à des essais sans tissus afin de quantifier les forces d'inertie et les frottements liés à l'appareillage de flexion et de les retirer des forces enregistrées lors des essais avec préformes. Ces essais ont aussi été menés dans une optique de normalisation des essais, afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux qui sont disponibles dans la littérature.

En considérant que la vitesse de déplacement imposée est faible, une analyse statique du système mécanique peut être utilisée.

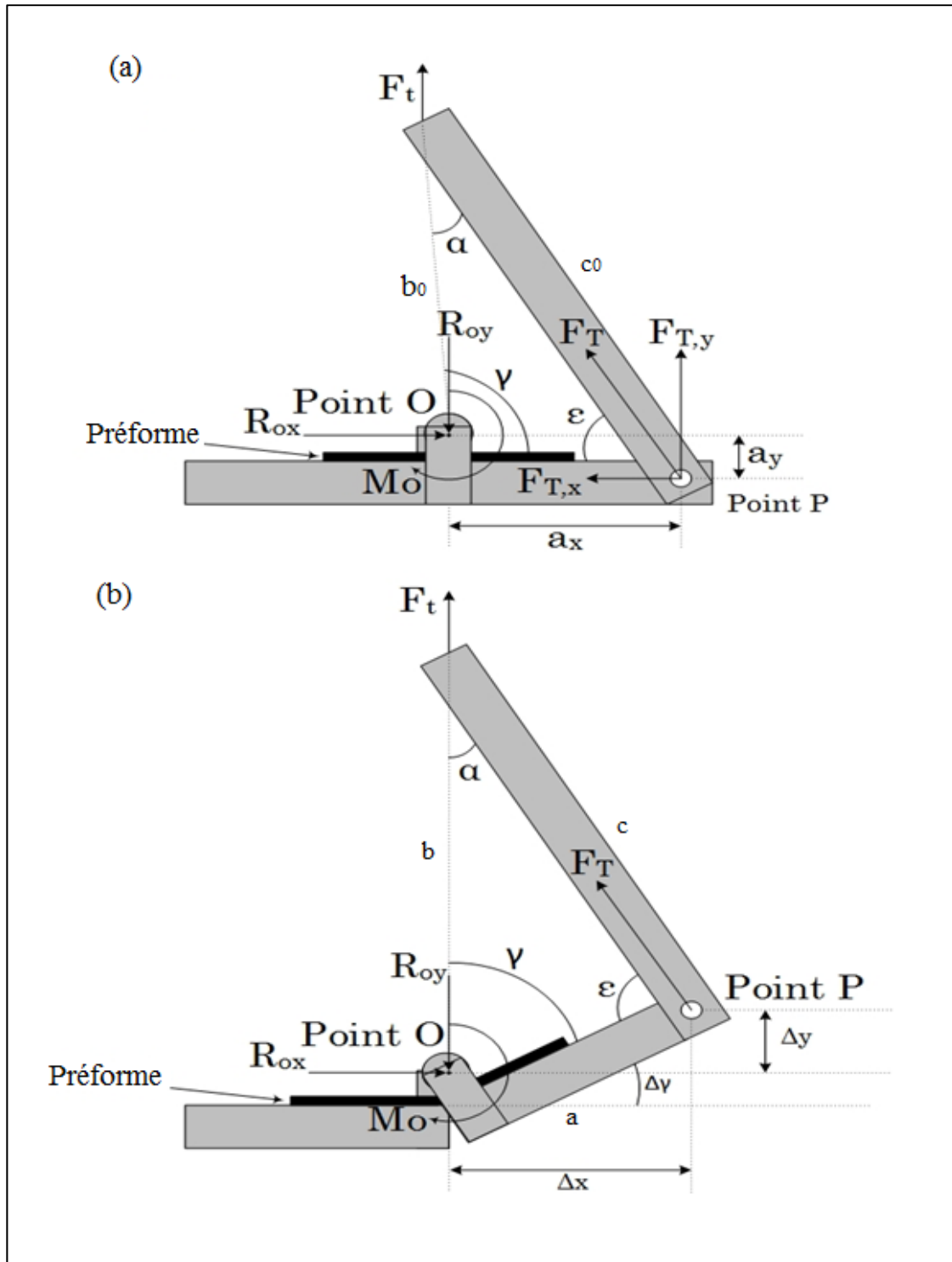


Figure 3.12 Principe de l'essai de flexion a) à l'état initial, b) durant la flexion de la préforme (Adapté de Drivas, T. 2014)

En s'appuyant sur la figure 3.12 qui présente le schéma de principe de l'essai de flexion, on peut définir la force F_T transmise à la base de la plate-forme de flexion :

$$F_T = \frac{F_t}{\sin(\varepsilon)} \quad (3.19)$$

où F_t est la force appliquée à la préforme pendant l'essai, et ε est l'angle entre la liaison inclinée et le plan horizontal.

En étudiant le système de flexion utilisé, le bilan de forces et des moments autour du point O est déterminé par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rightarrow + \sum F_x = 0 \Leftrightarrow 0 = R_{Ox} - F_{T,x} \\ \uparrow + \sum F_y = 0 \Leftrightarrow 0 = -R_{Oy} + F_{T,y} \\ + \sum_o M_O \Leftrightarrow 0 = (\Delta x * F_{T,y}) + (\Delta y * F_{T,x}) - M_O \end{array} \right. \quad (3.20)$$

où :

$$\begin{cases} F_{T,x} = F_T * \sin(\alpha) \\ F_{T,y} = F_T * \cos(\alpha) \end{cases} \quad (3.21)$$

En passant en revue les forces et les moments autour du point O, le moment de flexion peut être calculé comme suit :

$$M_O = [\Delta x * F_T * \cos(\alpha)] + [\Delta y * F_T * \sin(\alpha)] \quad (3.22)$$

où Δx et Δy sont les distances instantanées du point P au point de liaison de l'appareil de flexion.

$$\Delta x = a_x * \cos(\Delta \gamma) + a_y * \sin(\Delta \gamma) \quad (3.23)$$

$$\Delta y = a_y * \cos(\Delta\gamma) - a_x * \sin(\Delta\gamma) \quad (3.24)$$

où $\Delta\gamma$ est l'angle de flexion qui peut être défini comme suit :

$$\Delta\gamma = \gamma_i - \gamma_0 \quad (3.25)$$

où γ_i est l'angle à la position instantanée i et γ_0 est l'angle que fait le montage avant le début de l'essai, soit à l'état initial)

En se basant sur une approche purement géométrique on pourra aussi quantifier les angles définis par le montage de flexion :

$$\gamma_i = \arccos\left(\frac{a^2 + (b_0 + d_i)^2 - c^2}{2a(b_0 + d_i)}\right) \quad (3.26)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{a \sin \gamma}{c}\right) \quad (3.27)$$

$$\beta = 90 - \alpha - \gamma_i \quad (3.28)$$

$$\varepsilon = 90 - \alpha \quad (3.29)$$

Pour fins de comparaison des résultats obtenus pour l'essai de flexion, le moment a été normalisé par rapport à la largeur de l'échantillon testé, via la relation suivante :

$$M_{b-norm} = \frac{M_O}{l_{tissu}} \quad (3.30)$$

Où

l_{tissu} est la largeur de l'échantillon de préforme testé

Toutes les paramètres géométriques utilisées pour l'analyse de l'essai de flexion apparaissent au tableau 3.4.

Tableau 3.4 Paramètres géométriques utilisés pour l'analyse de l'essai de flexion

Paramètre géométrique mesuré de l'essai de flexion	valeur
a_x	51 mm
a_y	13.5 mm
$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$	52.6 mm
b_0	232 mm
c	250 mm
γ_0	105 Deg

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX SUR RENFORTS COUSUS EN FIBRE DE CARBONE

4.1 Compaction

Les résultats obtenus à partir d'essais normalisés en compaction pour différentes configurations de renforcement sont présentés aux figures 4.1 à 4.6. L'évolution de la fraction volumique de fibre a été reportée en fonction de la pression exercée sur un échantillon de la préforme, via les équations présentées au chapitre précédent.

Toutes les courbes de compaction obtenues après traitement des données des essais, présentent une apparence exponentielle et montraient une bonne reproductibilité. Il a été observé que les échantillons de préformes sans couture présentaient une plus grande fraction volumique de fibre V_f pour un même niveau de pression, en comparaison avec les échantillons de préformes cousues. L'explication principale à cela est que le processus de couture provoque des déviations locales et des désalignements de fibres autour des points de couture, ce qui mène à la présence de zones localement faible en concentration de fibres.

Comme on peut le constater à la figure 4.1, les essais de compaction sur deux échantillons de préformes non cousues (uns_1 et uns_2) conduisent à une augmentation de la fraction volumique de fibre après chaque cycle de compaction, de $V_f = 55\%$ au premier cycle pour atteindre une valeur de $V_f = 57.6\%$ au 5ème cycle. Ce constat peut s'expliquer par le réarrangement successif des fibres à l'intérieur de la préforme en compaction.

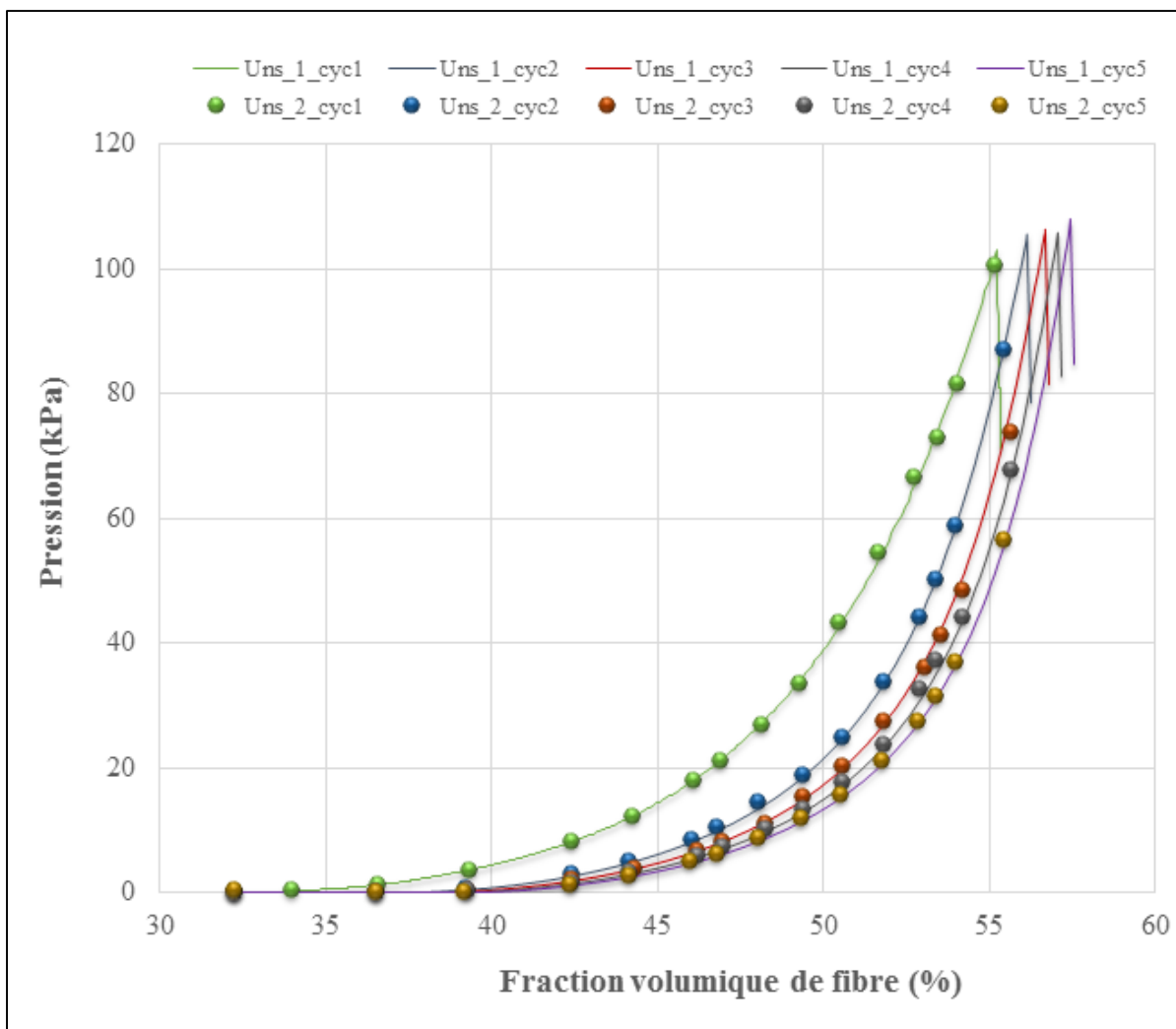


Figure 4.1 Fraction volumique de fibre en fonction de la pression de compaction sous sollicitation cyclique de 2 échantillons de préformes non cousues (Uns_1 et Uns_2)

La figure 4.2 montre l'allure des courbes d'évolution de la fraction volumique de fibre V_f pour 2 échantillons de préformes avec coutures simples d'un pas de 4 mm (SinP4_1 et SinP4_2) en fonction de la pression exercée durant les 5 cycles de compaction successifs.

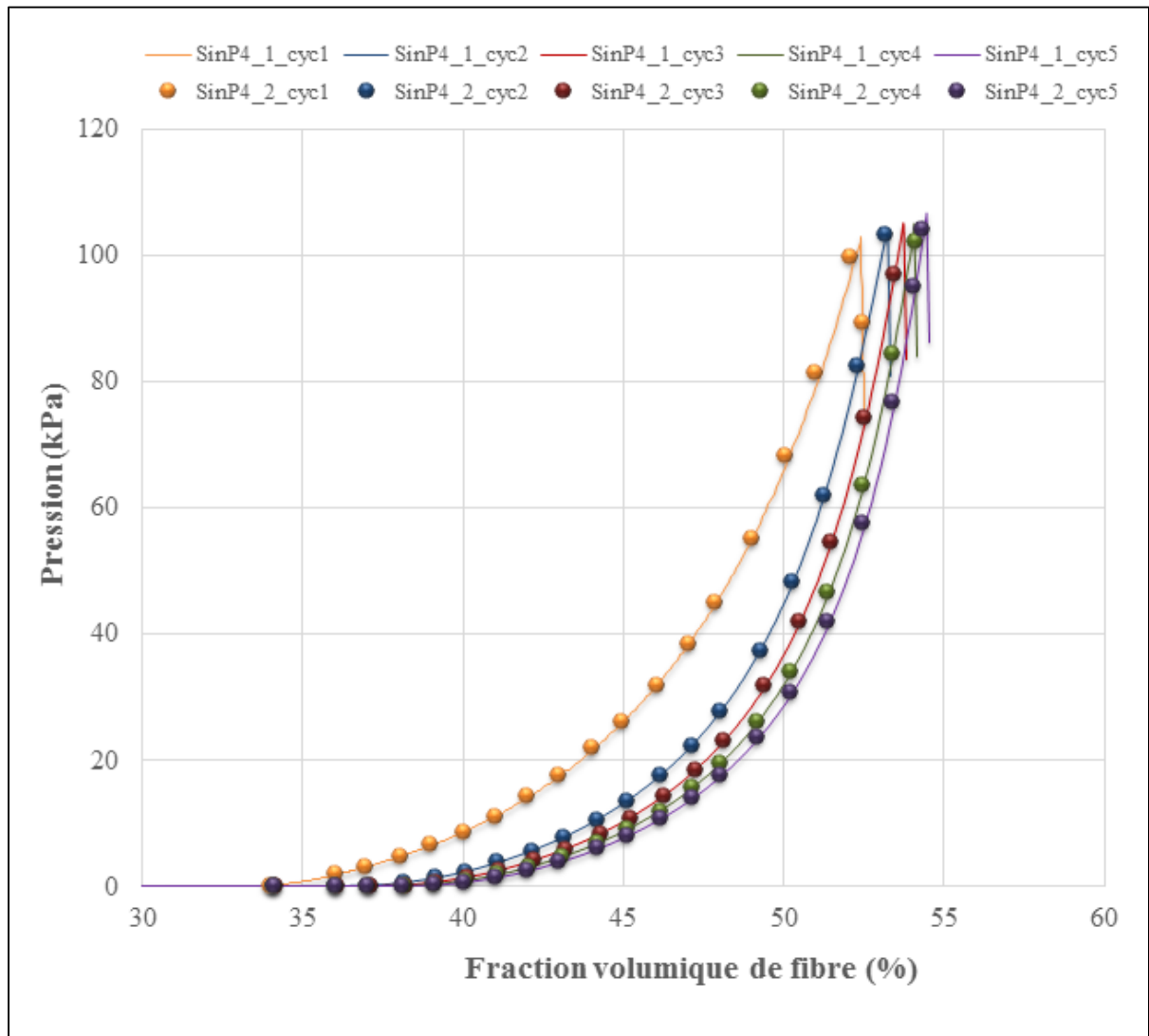


Figure 4.2 Fraction volumique de fibre en fonction de la pression de compaction sous sollicitation cyclique de 2 échantillons avec coutures simples d'un pas 4 mm

Il a été constaté que, pour les échantillons de préformes comportant des coutures simples avec un pas de 4 mm, la fraction volumique de fibre V_f diminue d'environ 2.5% comparativement aux tissus non cousus.

Les courbes de l'évolution de la fraction volumique de fibre V_f en fonction de la pression exercée durant les 5 cycles de compaction successifs, pour 2 échantillons de préformes avec coutures simples d'un pas de 8 mm (SinP8_1 et SinP8_2) sont présentées à la figure 4.3.

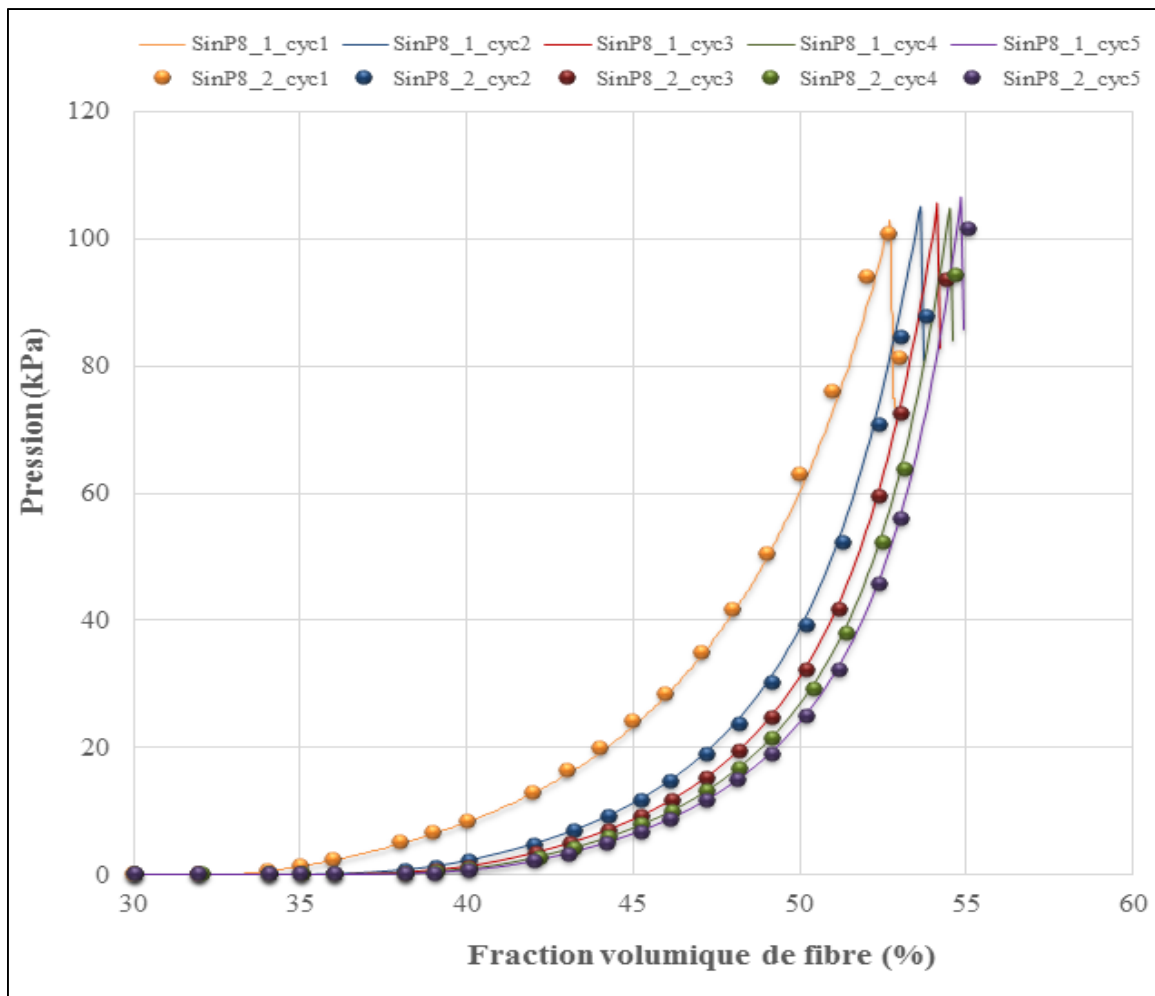


Figure 4.3 Fraction volumique de fibre en fonction de la pression de compaction sous sollicitation cyclique de 2 échantillons avec coutures simples d'un pas de 8 mm

La fraction volumique de fibre V_f des échantillons de préformes comportant des coutures simples avec un pas de 8 mm diminue d'environ 2% relativement à celle obtenue lors de la compaction des tissus non cousus.

La figure 4.4 présente les courbes de l'évolution de la fraction volumique de fibre V_f en fonction de la pression exercée durant les 5 cycles de compaction successifs, pour 2 échantillons de préformes avec coutures superposées d'un pas de 4 mm (SupP4_1 et SupP4_2).

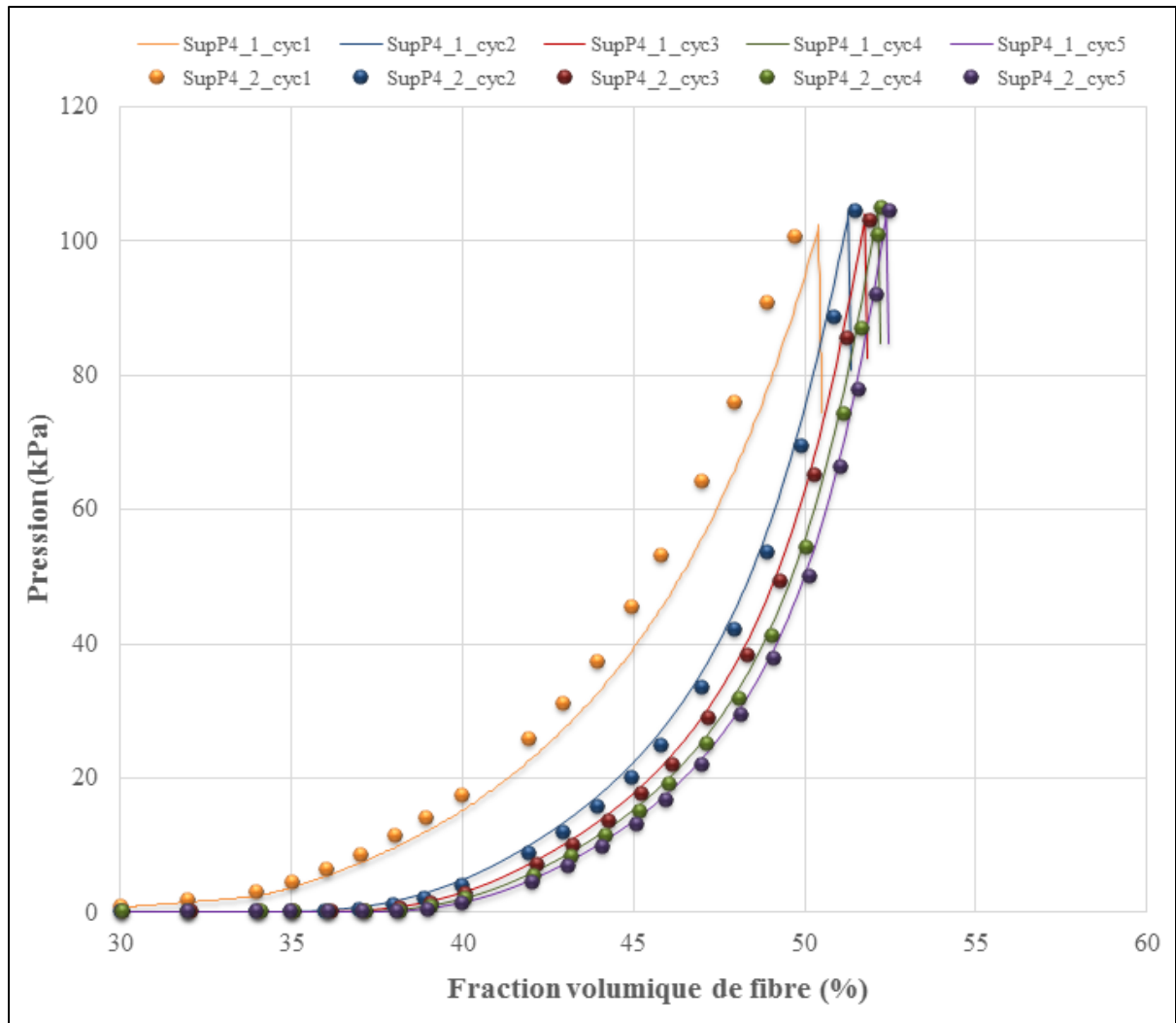


Figure 4.4 Fraction volumique de fibre en fonction de la pression de compaction sous sollicitation cyclique de 2 échantillons avec coutures superposées d'un pas de 4 mm

Ces courbes obtenues à partir des essais de compaction sur des échantillons de préformes avec coutures superposées d'un pas de couture de 4 mm présentent une diminution significative d'environ 5% de la fraction volumique de fibre V_f par rapport à celles obtenues pour les tissus non cousus.

Les courbes de l'évolution de la fraction volumique de fibre V_f en fonction de la pression exercée durant les 5 cycles de compaction successifs, obtenues à partir des essais de compaction pour 2 échantillons représentatifs de préformes avec coutures simples d'un pas de 8 mm (SupP8_1 et SupP8_2) sont présentées à la figure 4.5.

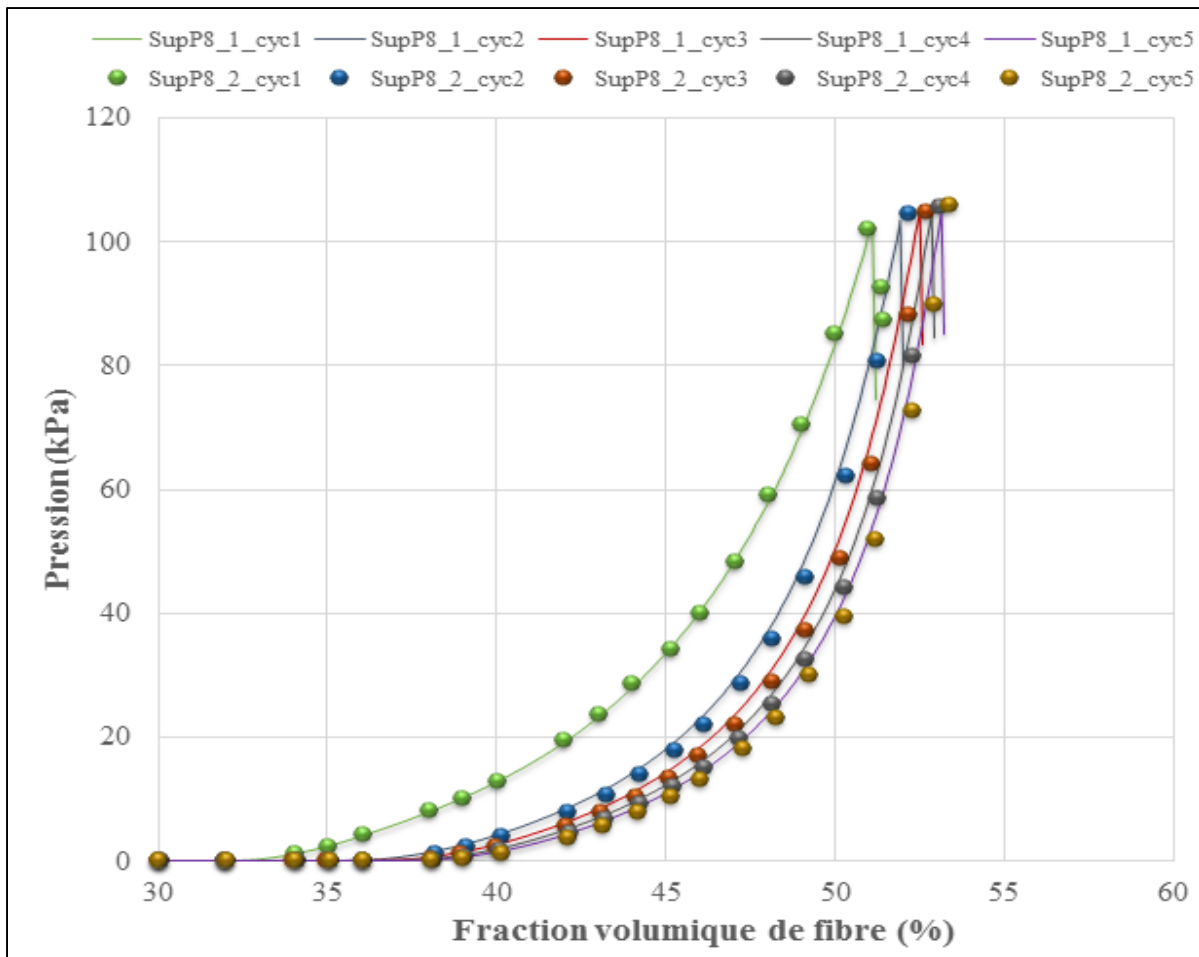


Figure 4.5 Fraction volumique de fibre en fonction de la pression de compaction sous sollicitation cyclique de 2 échantillons avec coutures superposées d'un pas de 8 mm

La comparaison de ces dernières courbes avec celles obtenues lors des essais de compactations sur des échantillons non cousus montre que la fraction volumique de fibre V_f des échantillons avec coutures superposées d'un pas de 4 mm présente une diminution d'environ 3.5 %.

L'analyse de toutes les courbes de compaction présentées à la figure 4.6 permet d'identifier l'effet de la densité des coutures, caractérisée par la nature des coutures simples ou superposées et par le pas de couture, sur la fraction volumique de fibres des préformes en fibres de carbone. Lorsque la densité de couture augmente; c'est-à-dire le passage d'un pas de couture de 8 mm à 4 mm, la fraction volumique de fibres V_f diminue pour les deux types de couture, simple ou superposée. De même, une diminution de la fraction volumique a été constaté lorsqu'on compare des échantillons de préformes avec un même pas de couture mais des configurations de couture différentes (simple ou superposée).

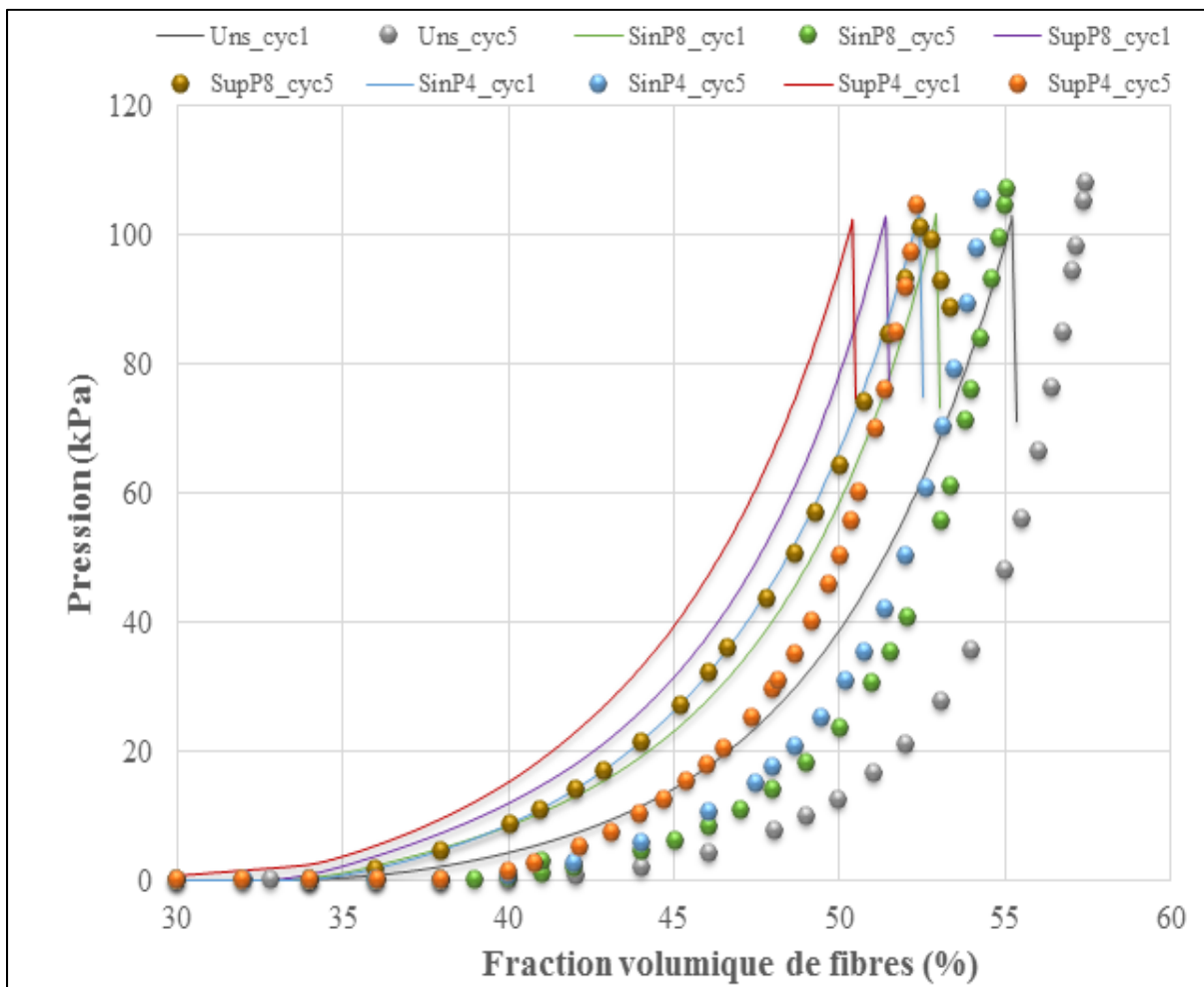


Figure 4.6 Comparaison des résultats de compaction des différents échantillons de préformes cousues et non cousues (1er et 5ème cycle)

Le tableau 4.1 résume les fractions volumiques moyennes de fibres atteintes lors des 3 derniers cycles de compaction pour toutes les préformes testées.

Tableau 4.1 Sommaire de l'évolution de la fraction volumique maximale de fibre obtenues après 5 cycles de compaction

Type d'échantillon	Fraction volumique de fibres V_f (%)				
	<i>1^{er} cycle</i>	<i>2^{ème} cycle</i>	<i>3^{ème} cycle</i>	<i>4^{ème} cycle</i>	<i>5^{ème} cycle</i>
Non cousu	55.50	56.30	56.80	57.30	57.60
SinP4	52.90	53.75	54.30	54.65	54.90
SinP8	53.15	54.00	54.60	54.95	55.30
SupP4	50.75	51.85	52.10	52.40	52.65
SupP8	51.45	52.25	52.80	53.30	53.90

Visuellement, il a été observé que le processus de couture génère des défauts sur la surface de la préforme tels que des désalignements de fibres et un sertissage. La compaction cyclique tend à réduire, même d'une manière minimale, ces défauts en réarrangeant les fibres et en fermant les ouvertures à l'intérieur de la préforme, comme le montre la figure 4.7.

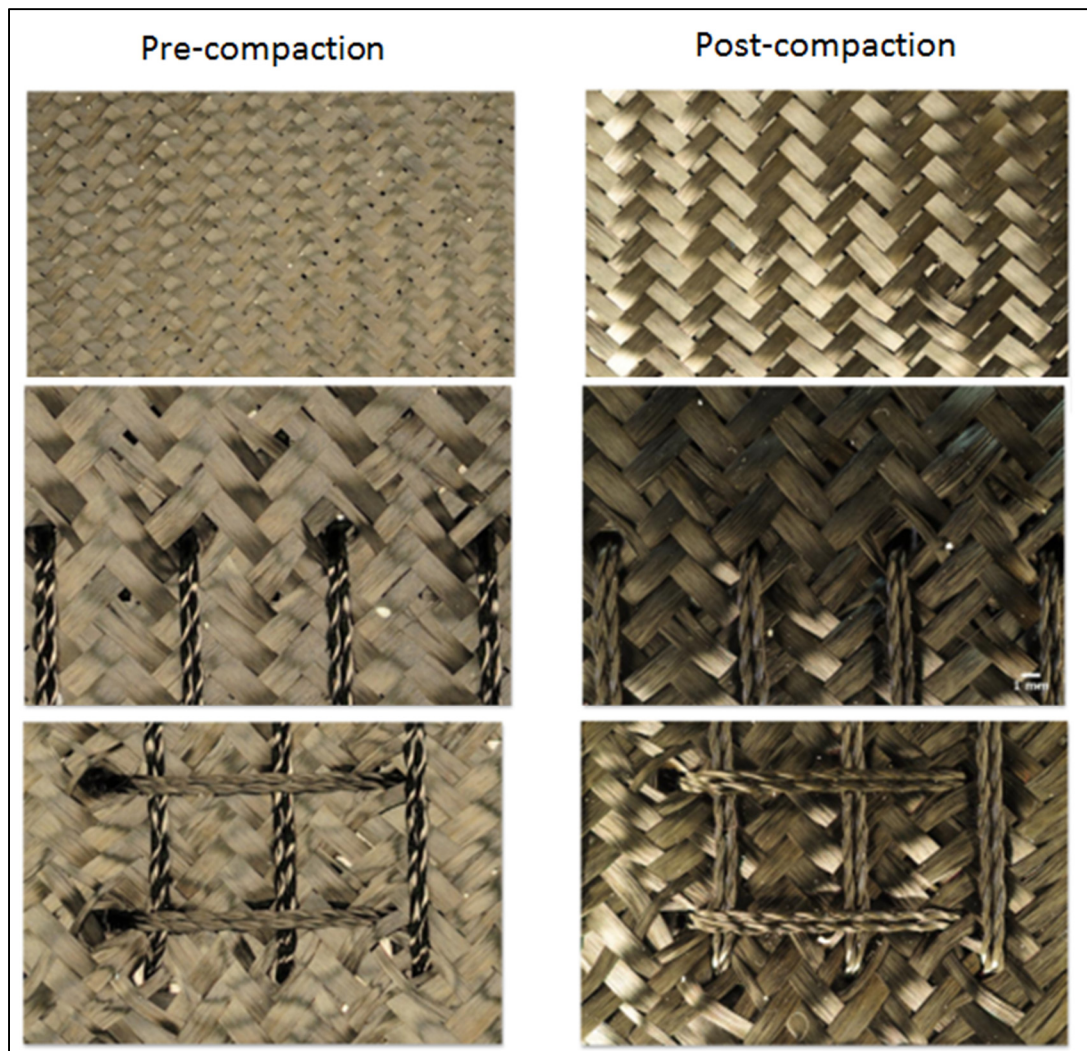


Figure 4.7 Observations de l'effet de la compaction sur les trois types de préformes étudiées

Malgré l'avantage de renforcer l'intégrité dimensionnelle des préformes, les coutures superposées et une grande densité de couture ont un effet plus important que le cyclage sur la fraction volumique des préformes en fibre de carbone. Ce constat semble prévisible, vu que l'introduction d'un fil de couture supplémentaire dans la direction perpendiculaire mène à un rassemblement des fils de tissus dans cette direction, créant ainsi des zones avec un moindre nombre de fibres. Cela, génère ainsi une fraction volumique de fibre V_f plus faible autour du point de couture.

Cette hypothèse nous a encouragé à mener des essais de compaction localisée en utilisant des plateaux de compaction ayant un petit diamètre de 10 mm au lieu de 40 mm, afin de compacter localement la zone autour du fil de couture.

4.2 Compaction localisée

Les résultats obtenus à partir d'essais de compaction localisée sont présentés de la figure 4.8 à la figure 4.11.

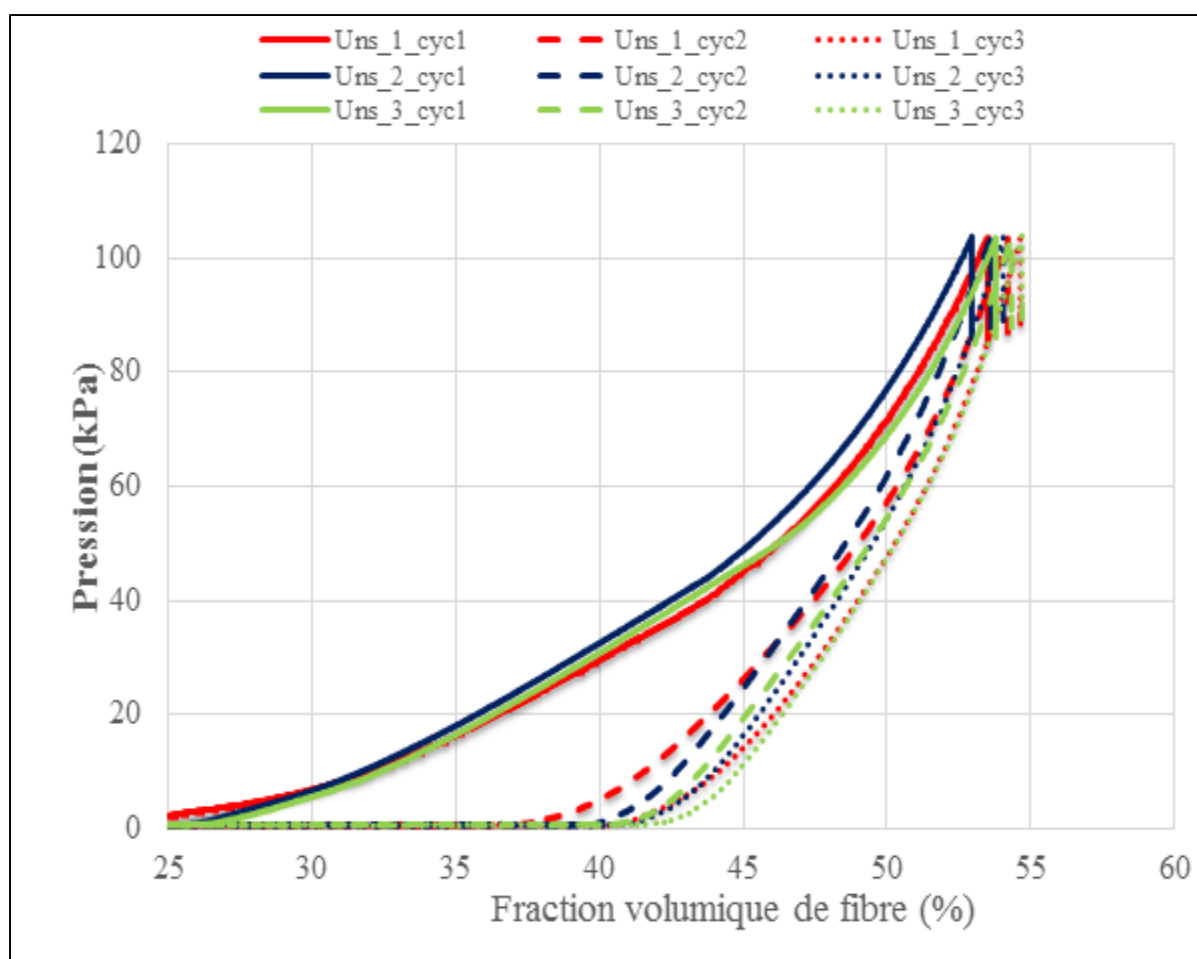


Figure 4.8 L'évolution de la fraction volumique de fibre au cours de l'essai de compaction localisée des préformes en fibre de carbone non cousues

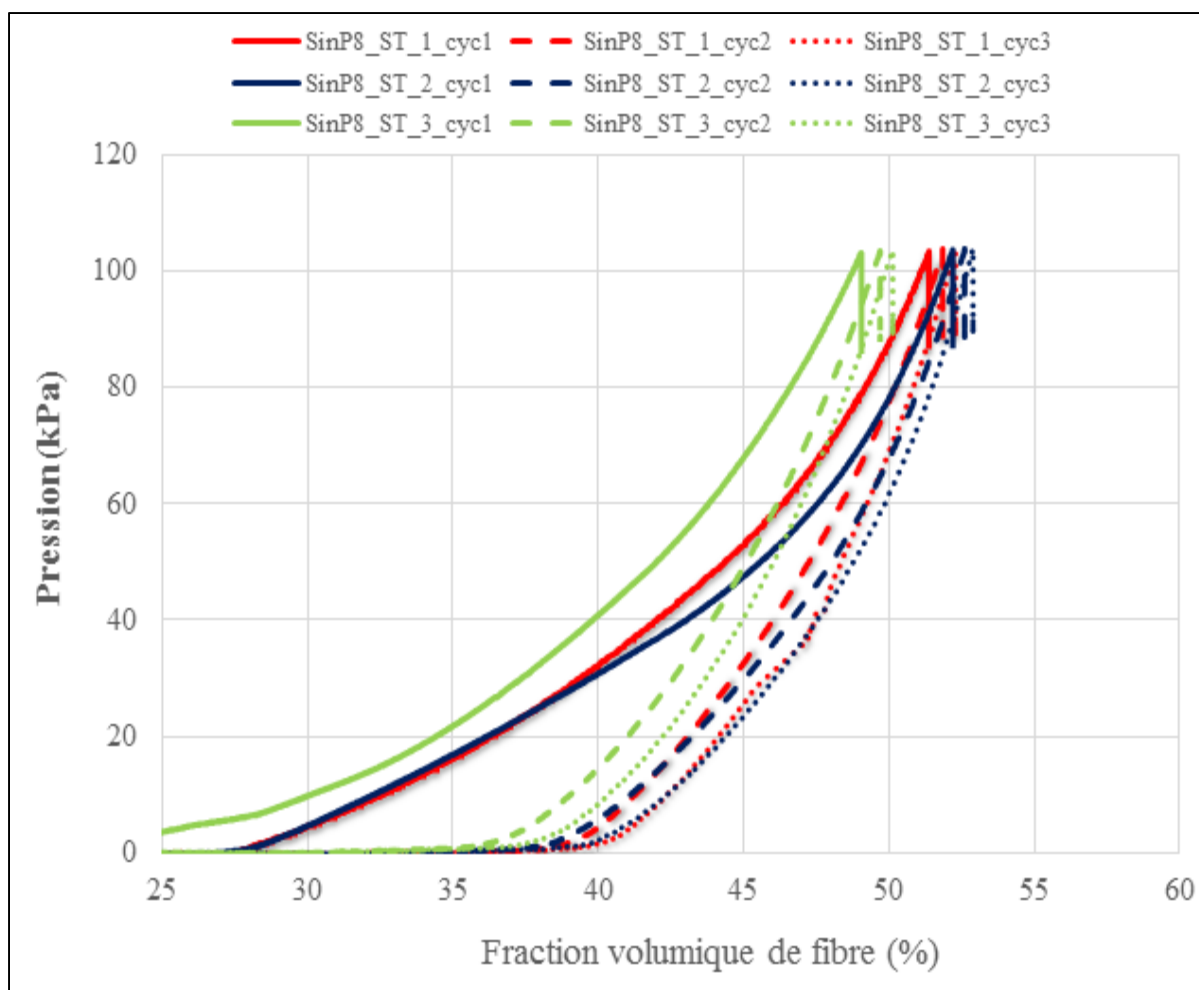


Figure 4.9 L'évolution de la fraction volumique de fibre des préformes avec couture simple d'un pas de 8 mm compactée localement au milieu du fil de couture

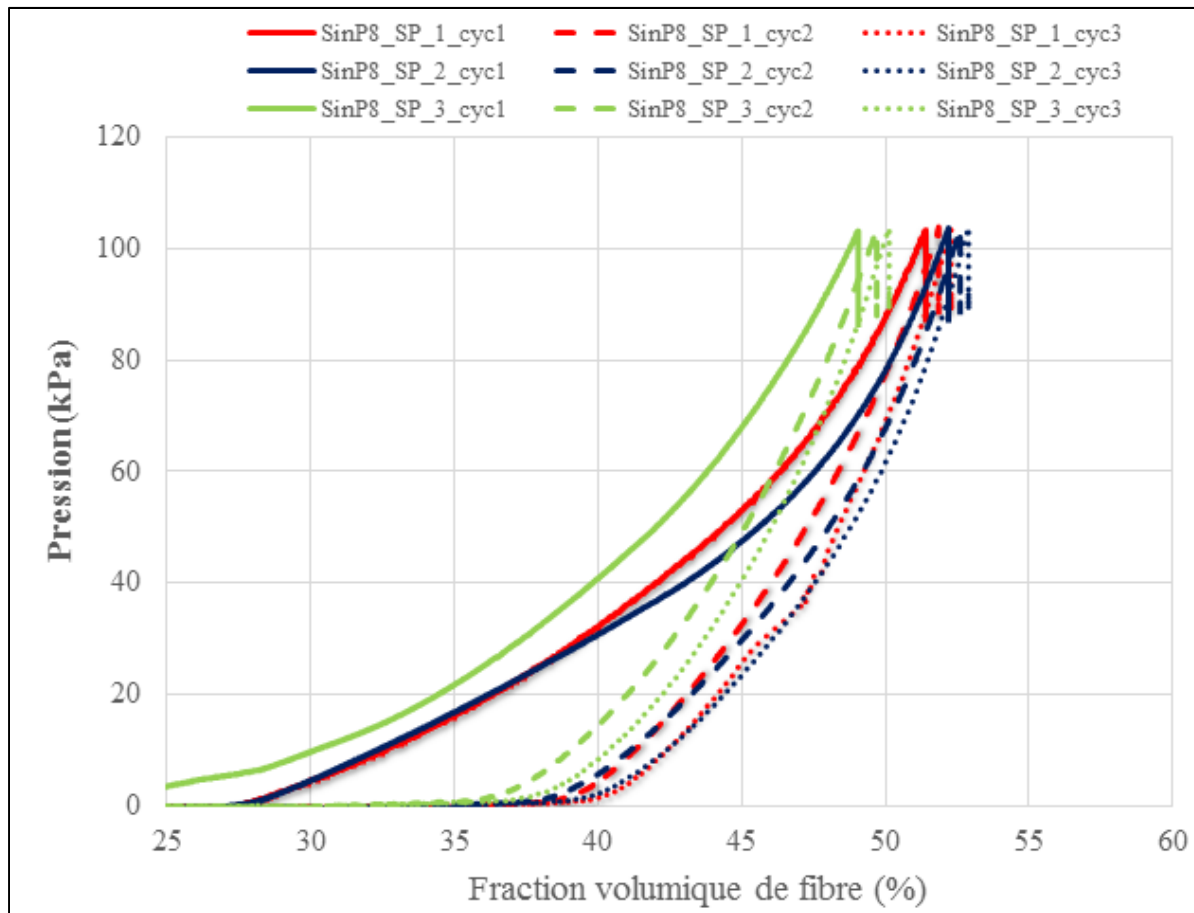


Figure 4.10 L'évolution de la fraction volumique de fibre des préformes avec couture simple d'un pas de 8 mm compactée localement au niveau du point de couture

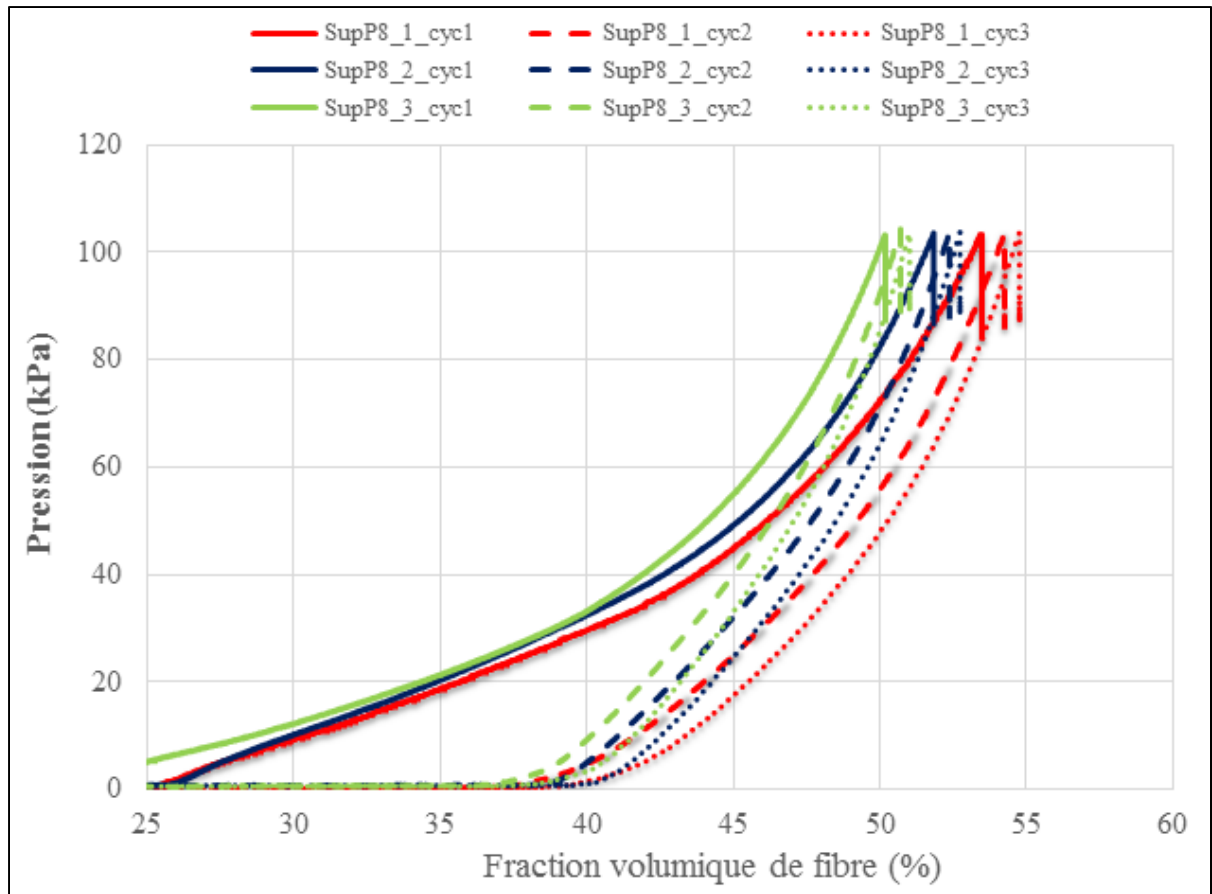


Figure 4.11 L'évolution de la fraction volumique de fibre des préformes avec couture superposée d'un pas de 8 mm compactée localement

Le tableau 4.2 résume les valeurs maximales des fractions volumiques de fibre atteintes lors de la compaction localisée pour toutes les préformes testées après le 3^{ème} cycle de compaction.

Tableau 4.2 Sommaire des valeurs moyennes des fraction volumiques de fibre obtenues après 3 cycles de compaction localisée

Type d'échantillon	Pas de couture (mm)	Cycle de compaction	V _f calculé (%)
Sans couture	0	1	53.57
	0	2	54.18
	0	3	54.95
Couture simple (Essai au milieu du fil de couture)	8	1	52.64
	8	2	53.05
	8	3	53.40
Couture simple (Essai sur le point de couture)	8	1	50.88
	8	2	51.43
	8	3	52.09
Couture croisée	8	1	49.80
	8	2	50.23
	8	3	50.56

À partir des résultats obtenus pour chaque type de tissus cousus et non cousus testés sous compaction localisée, on peut arriver aux constats suivants :

❖ **Tissus non cousus :**

- $V_{f_initiale} \approx 53,5 \%$, V_f après 3^{ème} cycle $\approx 55 \%$
- Diminution du V_f d'environ 1 % après le 3^{ème} cycle en comparaison aux fractions volumiques de fibre obtenues lors de la compaction avec les gros plateaux ayant un diamètre de 40mm.

❖ **Tissus avec couture simple :**

- Essai de compaction au milieu du fil de couture: $V_{f_initiale} \approx 52.6 \%$, V_f après 3^{ème} cycle $\approx 53.4 \%$
- Essai de compaction au niveau du point de couture: $V_{f_initiale} \approx 50.8 \%$, V_f après 3^{ème} cycle $\approx 52 \%$
- Diminution de V_f d'environ 1.5 % comparativement aux tissus sans couture

- Diminution de V_f d'environ 1 % en comparaison aux les résultats obtenus dans le cas de la compaction avec les gros plateaux ayant un diamètre de 40mm.

❖ **Tissus avec couture superposée :**

- V_f initiale ≈ 49 %, V_f après 3^{ème} cycle ≈ 51 %
- Diminution du V_f d'environ 3 % comparativement au tissus non cousus
- Diminution de la fraction volumique de fibre V_f d'environ 1.5 % par rapport aux V_f obtenues lors de la compaction avec les gros plateaux ayant un diamètre de 40mm (52.5 % après le 3^{ème} cycle pour tissus avec couture superposée).

Les essais de compaction localisée sur des renforts cousus par un fil de carbone avec un pas de 8 mm viennent consolider les résultats obtenus dans le cas de la compaction conventionnelle. Une bonne répétabilité des essais réalisés sur les trois configurations (tissus non cousus, avec couture simple et avec couture superposée) jusqu'au 3^{ème} cycle de compaction a été observée. On a constaté que les fractions volumiques de fibres obtenues lors de la compaction localisée pour un cycle déterminé sont toujours plus faibles comparativement à celles obtenues lors de la compaction conventionnelle. Cet évident constat a deux explications; la première est que la zone compactée lors de la compaction localisée est plus petite que celle comprimée lors de l'essai de compaction standard. La deuxième explication est due à la compaction bien précise et locale des zones où les coutures sont denses et qui peuvent affecter l'architecture et l'alignement des fibres au sein de la préformes.

De plus, on peut à nouveau remarquer que la couture superposée a un impact plus sévère sur la fraction volumique de fibre V_f comparativement à une couture simple. Une légère différence de V_f d'environ 1% pour la même configuration dans les deux cas de compaction a été observée. Ceci s'explique par le fait que le tissu cousu est localement compacté dans une zone où les fibres sont écrasées et désalignées par la tête de couture. En effet, les observations microscopiques réalisées à l'aide d'un microscope à balayage sur ses préformes cousues ont révélé la présence de ces défauts tel qu'illustre la figure 4.12.

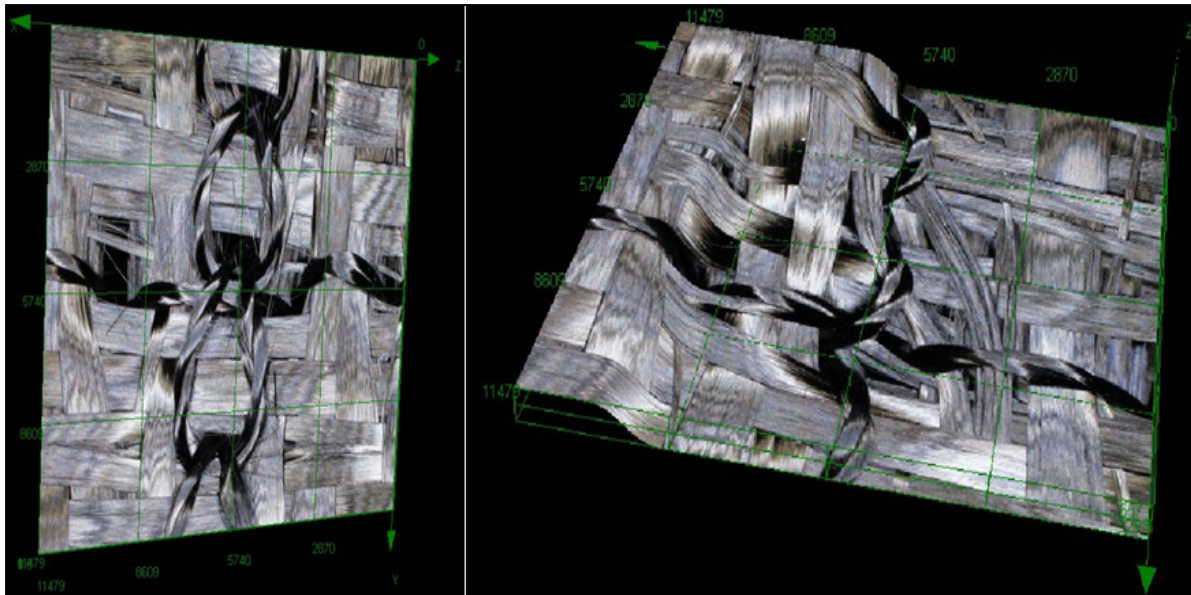


Figure 4.12 Observations microscopiques à l'aide d'un microscope confocal à balayage de l'effet de la couture sur la préformes

Enfin, lors de tous les essais réalisés sur les préformes cousues pour les deux configurations, il a été observé que les préformes avec un pas de couture de 4mm nécessitaient une force de compaction plus élevée pour obtenir la même fraction volumique que les préformes ayant un pas de couture de 8mm. Ce constat peut être attribué à la résistance des fils de couture lors de la compaction transversale locale des zones où la densité de couture est plus importante.

4.3 Cisaillement en cadre articulé

Pour mieux décrire le comportement des préformes cousues en cisaillement et les phénomènes qui apparaissent au cours de cet essai, on introduit deux notions. Le blocage localisé de couture est défini comme étant le phénomène qui survient lorsqu'un ensemble de 3 mèches adjacentes subissent une compression latérale. Lorsqu'un nombre plus important de mèches voisines (supérieure à 3) sont dans un état de compression latérale, on peut parler ainsi du phénomène du blocage total de couture.

La figure 4.13 montre les résultats des essais de cisaillement en cadre articulé pour les différentes configurations étudiées.

À partir des courbes obtenues, certains éléments de comportement peuvent être identifiés. Sur les 9 essais de cisaillement effectués, une bonne répétabilité pour chaque type de configuration à l'exception d'un test sur la préforme avec couture simple d'un pas de 4 mm. Les deux configurations de coutures ont un effet minimal sur la capacité du tissu à cisailer. Globalement, un plus grand effet a été observé à des niveaux plus élevés de déformation par cisaillement, mais tous les tissus peuvent cisailer au-delà de 60° .

La figure 4.13 montre que dans tous les essais, la force de cisaillement normalisée présente une allure progressive régulièrement jusqu'à un angle de cisaillement d'environ 20° , puis commence à diminuer légèrement jusqu'à environ 35° , après quoi elle recommence à présenter une variation exponentielle. Cette courte phase de diminution de la force de cisaillement normalisée peut être due à la réorganisation des mèches dans des zones où le frottement entre fibres a été observé avant le blocage total des fibres de renfort, en se glissant vers les zones moins encombrées de fibres.

Concernant la force de cisaillement normalisée, il a été observé que celle-ci reste relativement constante pour tous les tissus jusqu'à un angle de cisaillement de 40° avant de subir une augmentation à de grands angles de cisaillement. La première zone de la figure 4.13 qui montre une réponse quasi-linéaire correspond à la rotation élastique. La deuxième partie où la force de cisaillement normalisée n'augmente que progressivement à partir des angles de cisaillement de 6° jusqu'à 40° , se réfère à la rotation dissipative aux points de croisement des mèches. Cette rotation dissipative des mèches apparaît lorsque le mouvement transmis aux points de croisement des mèches dépasse la résistance de frottement lors de la rotation des mèches. La troisième région représente la compression latérale des mèches à des angles de cisaillement de 40° à 60° où les forces de cisaillement normalisées augmentent beaucoup plus rapidement que dans la portion précédente. La dernière zone des courbes montre ce que l'on appelle communément l'effet de blocage en cisaillement du tissu. En effet, lorsque l'angle de cisaillement est supérieur à 60° , les fils ne peuvent plus être compactés et ne peuvent plus subir de mouvements dans le plan.

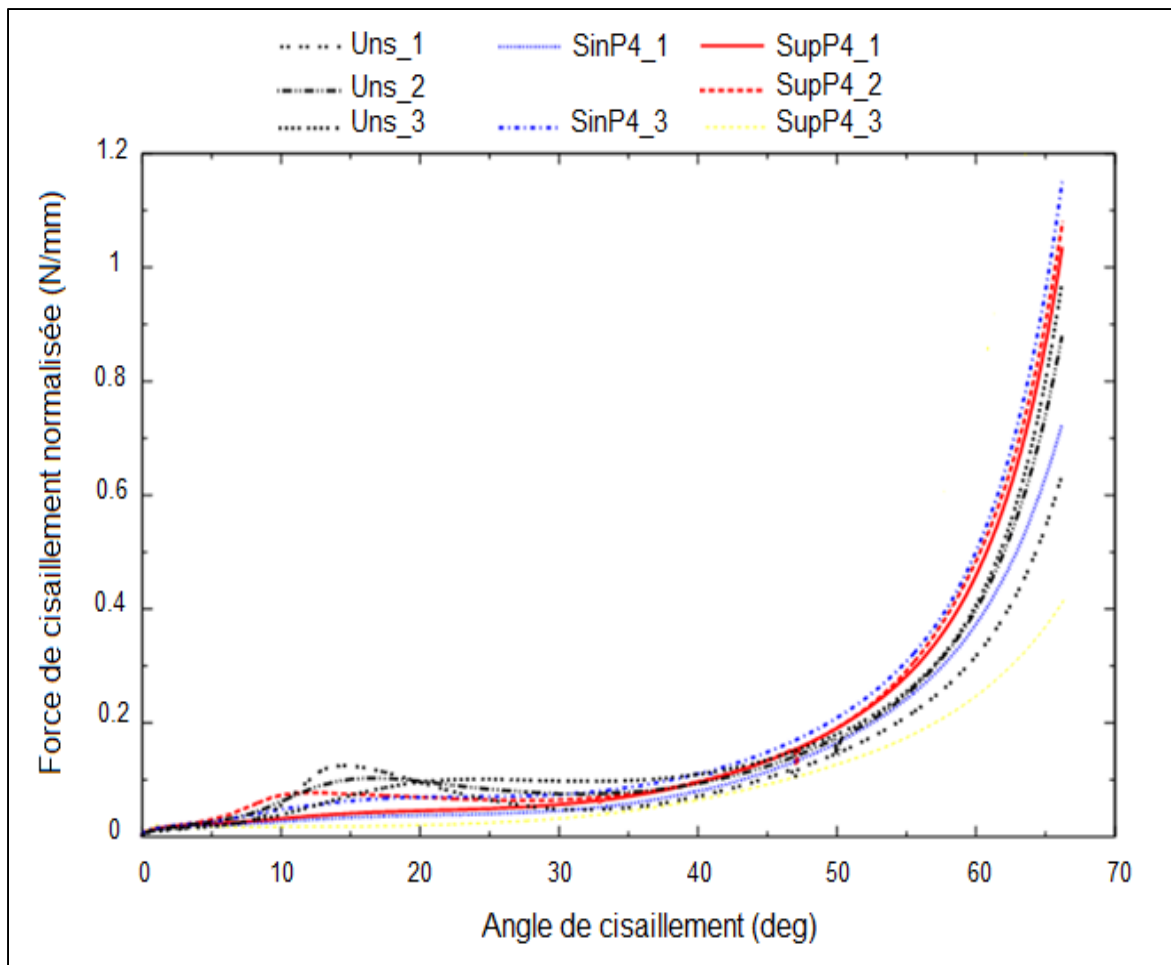


Figure 4.13 Comparaison des résultats de cisaillement cadre articulé des préformes non cousues et cousues

Les échantillons sans couture ont montré des résultats similaires avec une bonne répétabilité entre les tests à l'exception du premier essai (Uns_1). Cette différence en réponse du premier essai sur un échantillon de préforme non cousue est particulièrement attribué aux problèmes rencontrés lors de la manipulation et du montage du tissu sans couture sur le cadre articulé. En effet, l'absence de renforcement dans l'épaisseur rend le maintien des différents plis composant la préforme difficile et délicat lors de la préparation des échantillons avant les essais. Pour les essais 2 et 3 sur les préformes non cousues, on a observé que le blocage de fibres pour ce type de préforme commençait à des angles de cisaillement aussi bas que 30°. Un blocage total se produisait autour de 35° de cisaillement. Au-delà de ce point, la courbe prend une allure exponentielle.

Les échantillons avec coutures ont été étudiés dans le but de déterminer quand le blocage des fibres aurait lieu. Ainsi, deux endroits particuliers de la préforme ont été observé régulièrement durant l'essai de cisaillement, une première zone à l'intérieur des lignes de couture et une seconde zone à l'extérieur des lignes de couture. Dans le cas d'une couture superposée, on se limite à l'observation continue des phénomènes qui se produisent dans la zone située à l'intersection des lignes de couture, localisée au centre du renfort. La figure 4.14 présente ces zones constamment observées durant les essais de cisaillement en cadre articulé.

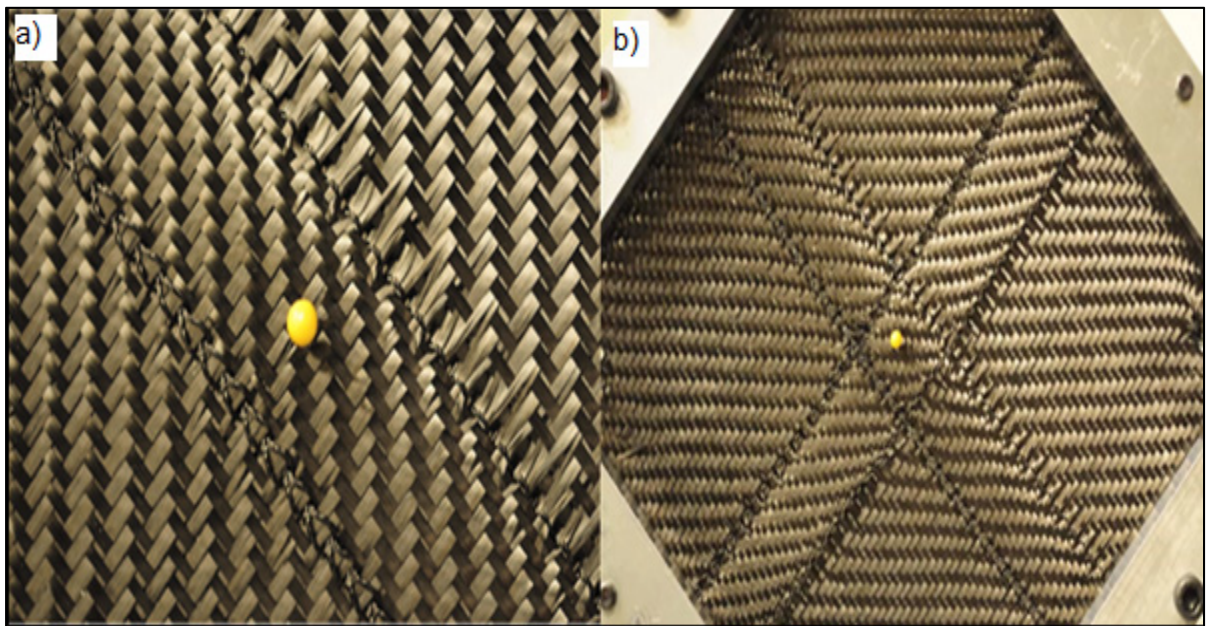


Figure 4.14 Observations des différentes interactions à l'intérieur des lignes de couture :
a) simples et b) superposées

Les courbes de cisaillement des échantillons avec couture simple affichent un comportement plus proche de ce qui était attendu, à l'exception du deuxième essai qui a été enlevé des résultats figurant à la figure 4.13, puisqu'il présentait une courbe différente de celles obtenus lors du premiers et troisième essais. Celle-ci est similaire à celle des échantillons sans couture. Les courbes correspondant aux essais sur les échantillons 1 et 3 montrent un comportement typique d'une courbe de cisaillement non linéaire classique (Allaoui et al., 2007).

On a constaté que le début du blocage des fibres à l'extérieur de la couture simple se développait localement autour 29° tandis que le blocage total apparaît à un angle de cisaillement d'environ 35° . Ce comportement est très similaire à celui obtenu dans le cas des préformes non cousues. Ce constat est cohérent, vu l'absence des fils couture dans cette zone, qui se comporte ainsi comme une préforme sans couture.

Dans un même échantillon de tissu avec coutures simples ayant un pas de 4mm, on a constaté que les blocages localisé et total de fibres commencent à des angles de cisaillement plus faibles à l'intérieur de la zone délimitée par les lignes de couture. Ils ont respectivement été observés à des angles de cisaillement d'environ 18° et 21° . L'apparition précoce des blocages localisé et total à des angles de cisaillement plus faibles comparativement aux tissus non cousus, s'explique par la présence des fils de couture qui produisent une tension des mèches localisées au sein de la zone cousue. Cette compression latérale engendre des frottements entre les mèches empêchant ainsi les fibres de se déplacer librement au sein de la préforme. La figure 4.15 illustre la présence de la pression latérale à l'intérieur des lignes de couture dans une préforme avec coutures simples d'un pas de 4 mm.

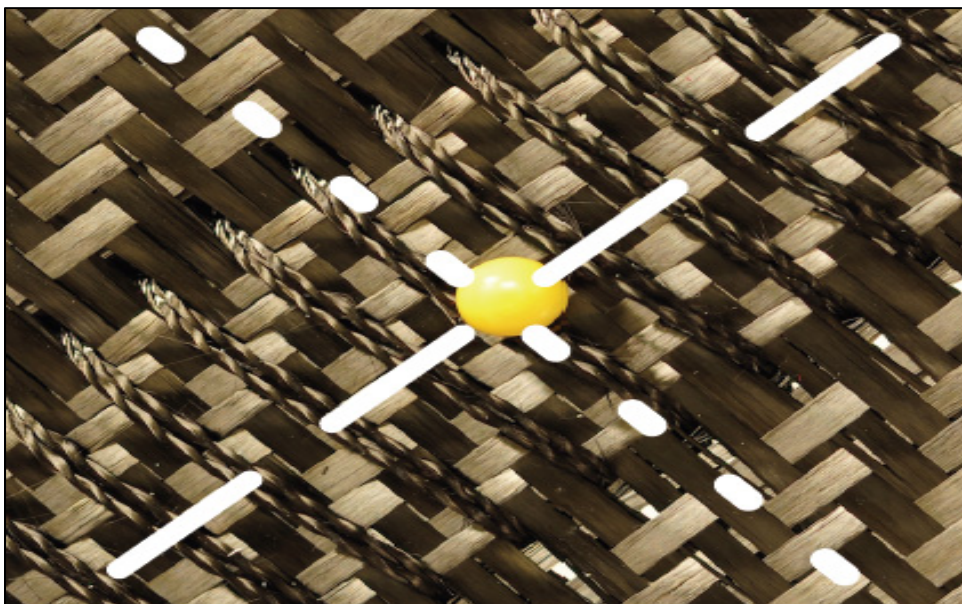


Figure 4.15 La compression latérale des mèches le long d'une ligne de couture dans une préforme avec couture simple d'un pas de 4 mm (adaptée de Drivas T., 2014)

Toutes les courbes obtenues à partir des essais de cisaillement sur des échantillons avec coutures superposées d'un pas de 4mm, présentaient la même tendance générale que celle observée avec les courbes de cisaillement non linéaires classiques (Allaoui et al., 2007).

À l'extérieur des coutures, on a observé que le blocage des fibres se développait localement à un angle de cisaillement de 20° alors que le blocage total débute à 36° . Le blocage total de fibres se produisait à des angles de cisaillement très similaires à ceux observés dans les précédents essais sur préformes sans couture et avec coutures simple.

Par contre, le blocage localisé et total des fibres dans les échantillons cousus au sein de la zone d'intersection des coutures superposées, a été observé à un stade plus avancé que dans le cas de la couture simple. Les blocages localisé et total ont été observés à des angles de cisaillement avoisinant 15° et 20° respectivement.

Le blocage des fibres est défini par l'angle auquel les espacements à l'intérieur d'un tissu quelconque se ferment et les mèches voisines se touchent sous l'effet de la compression latérale. Il paraît évident que les mèches situées dans les régions délimitées par les lignes de couture, se verrouillent et atteignent le blocage plus tôt que ceux qui les entourent comme le montre la figure 4.16.

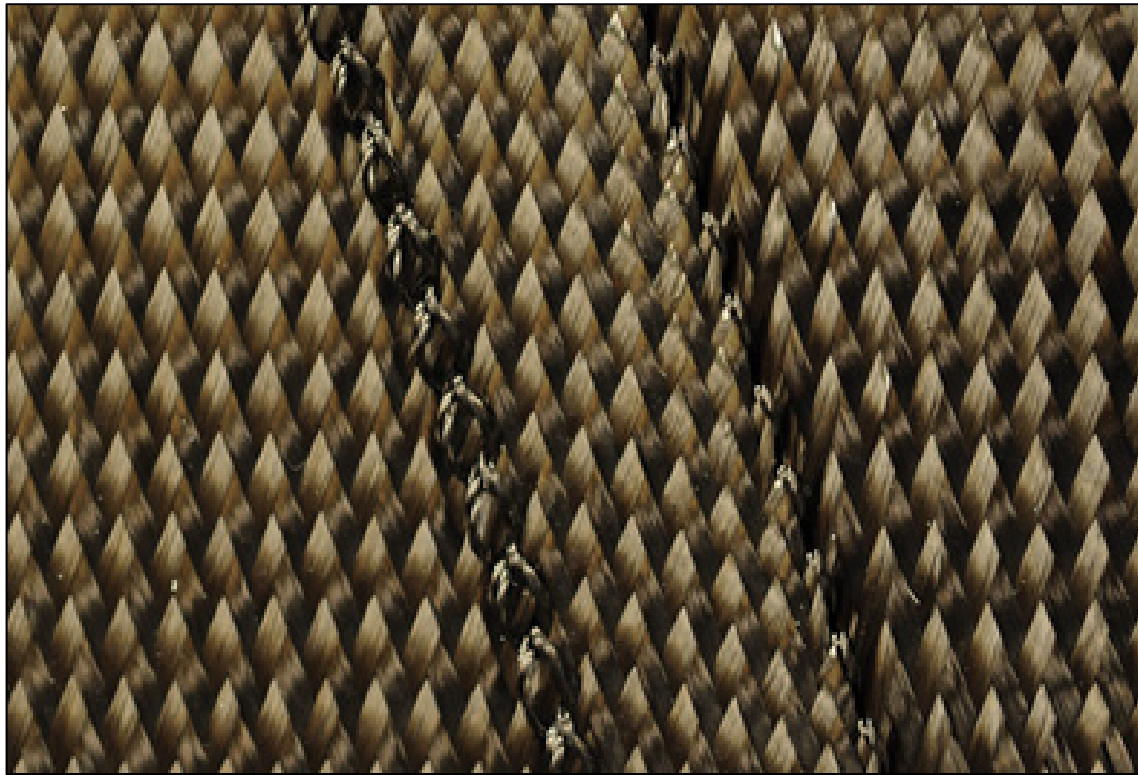


Figure 4.16 Le verrouillage des fibres à l'intérieur des zones de couture sous l'effet de la compression latérale et du cisaillement

Les résultats montrent principalement que les fils de couture structurale ont une influence négligeable sur le comportement en cisaillement dans le plan des préformes cousues, comparativement aux préformes non cousues. Des différences négligeables ont été observées pour les tissus avec coutures simples et superposées ayant le même pas de couture de 4 mm.

Il a également été constaté que pour de grandes déformations en cisaillement, la largeur du fil diminue sous compression latérale, ce qui offre plus d'espace pour le cisaillement de la préforme avant qu'un phénomène de plissement et de blocage se produisent.

4.4 Flexion simple courbure

Les essais de flexion permettent de quantifier et qualifier les effets de la couture sur les préformes en fibre de carbone. La quantification des effets de la couture revient à l'évaluation de la force nécessaire pour le maintien de la préforme à un angle de flexion spécifique et à la

détection de toute irrégularité ou saut en force pouvant apparaître au cours de l'essai de flexion. La qualification des préformes au cours de la flexion est particulièrement liée à l'identification des différents phénomènes qui peuvent surgir au sein de la préforme et au niveau des zones de couture. Au niveau des tissus, on peut ainsi déterminer la présence ou l'absence des phénomènes tels que le flambage ou l'excès de cisaillement des mèches, etc. Au niveau de la couture, on peut mettre en évidence, l'existence éventuelle de défauts tels l'effilochage des fils de couture ou la déformation des mèches avoisinant le point de couture, etc.

Les résultats obtenus à partir des essais de flexion sont présentés de la figure 4.17 à la 4.20.

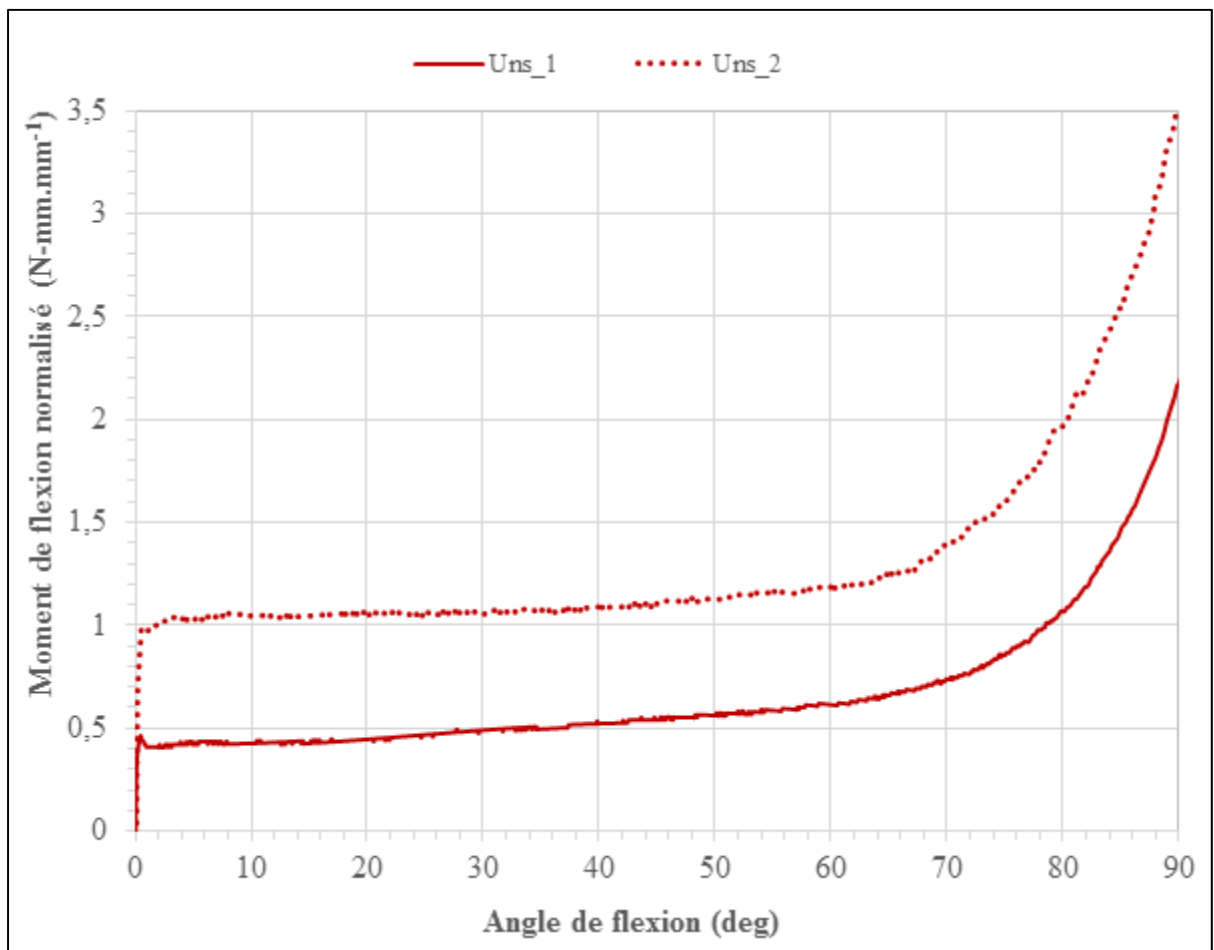


Figure 4.17 Résultats obtenus partir de l'essai de flexion réalisées sur des échantillons de préformes non cousues

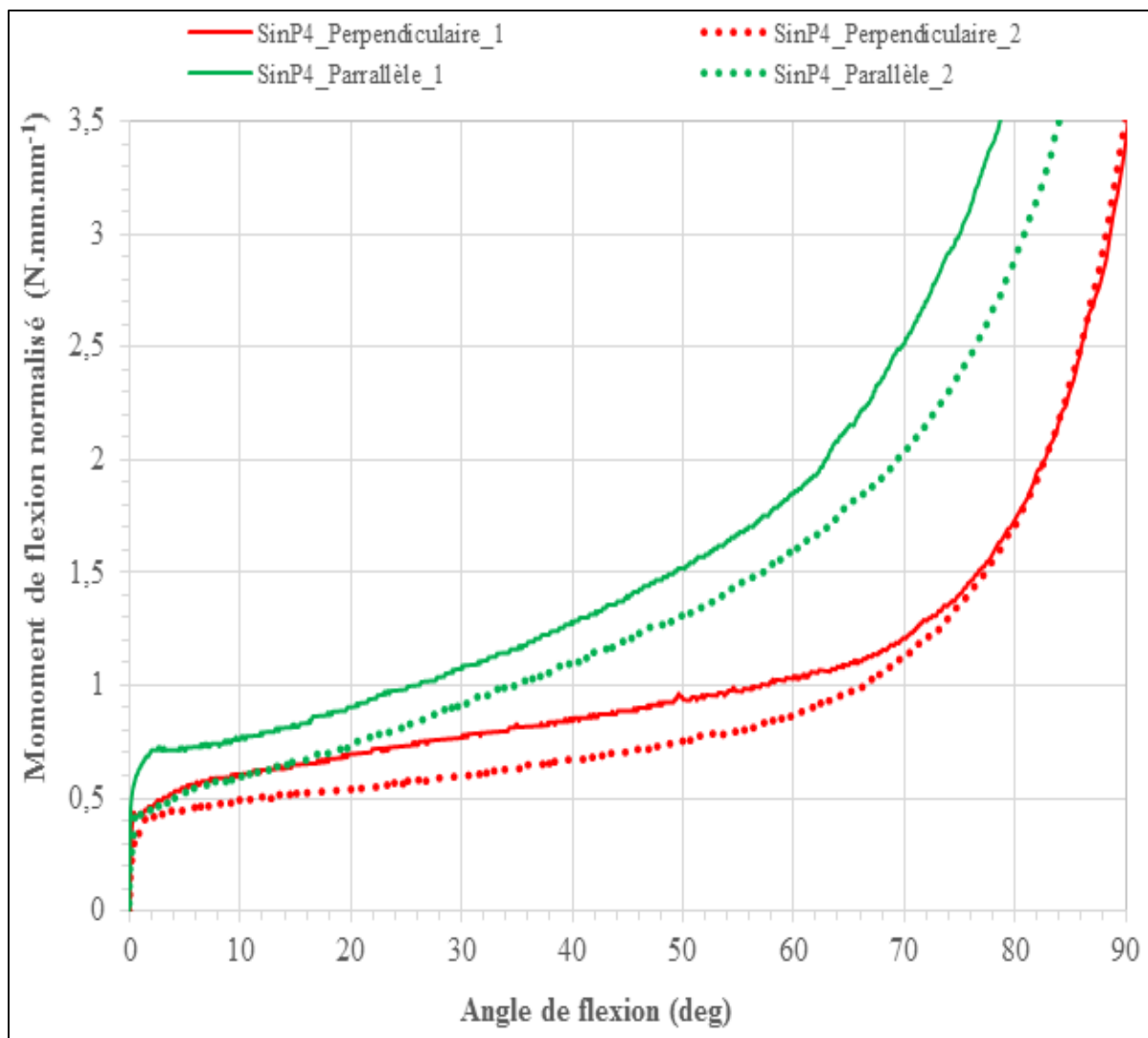


Figure 4.18 Résultats obtenus à partir de l'essai de flexion sur des préformes avec couture simple d'un pas de 4mm

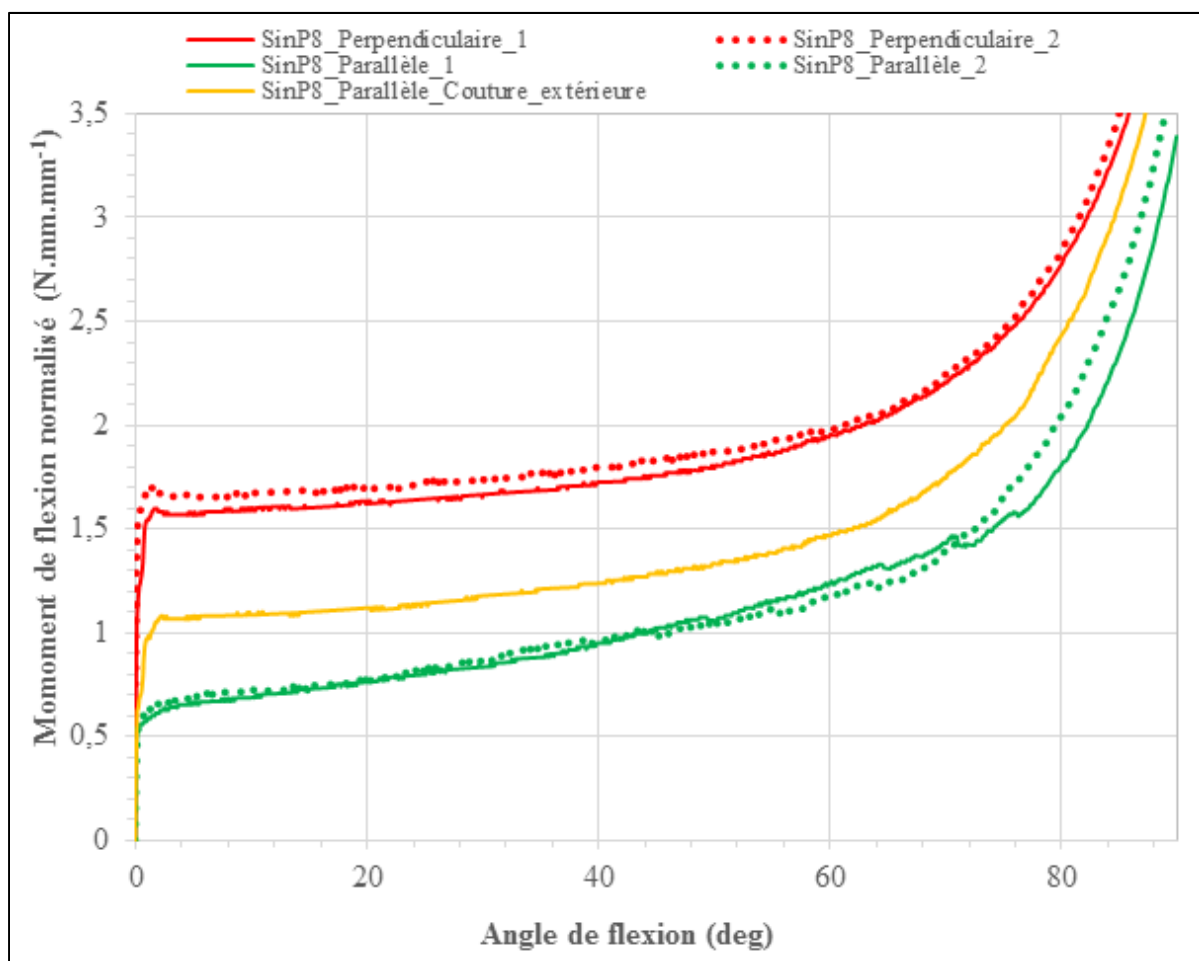


Figure 4.19 Résultats obtenus à partir de l'essai de flexion sur des préformes avec couture simple d'un pas de 8mm

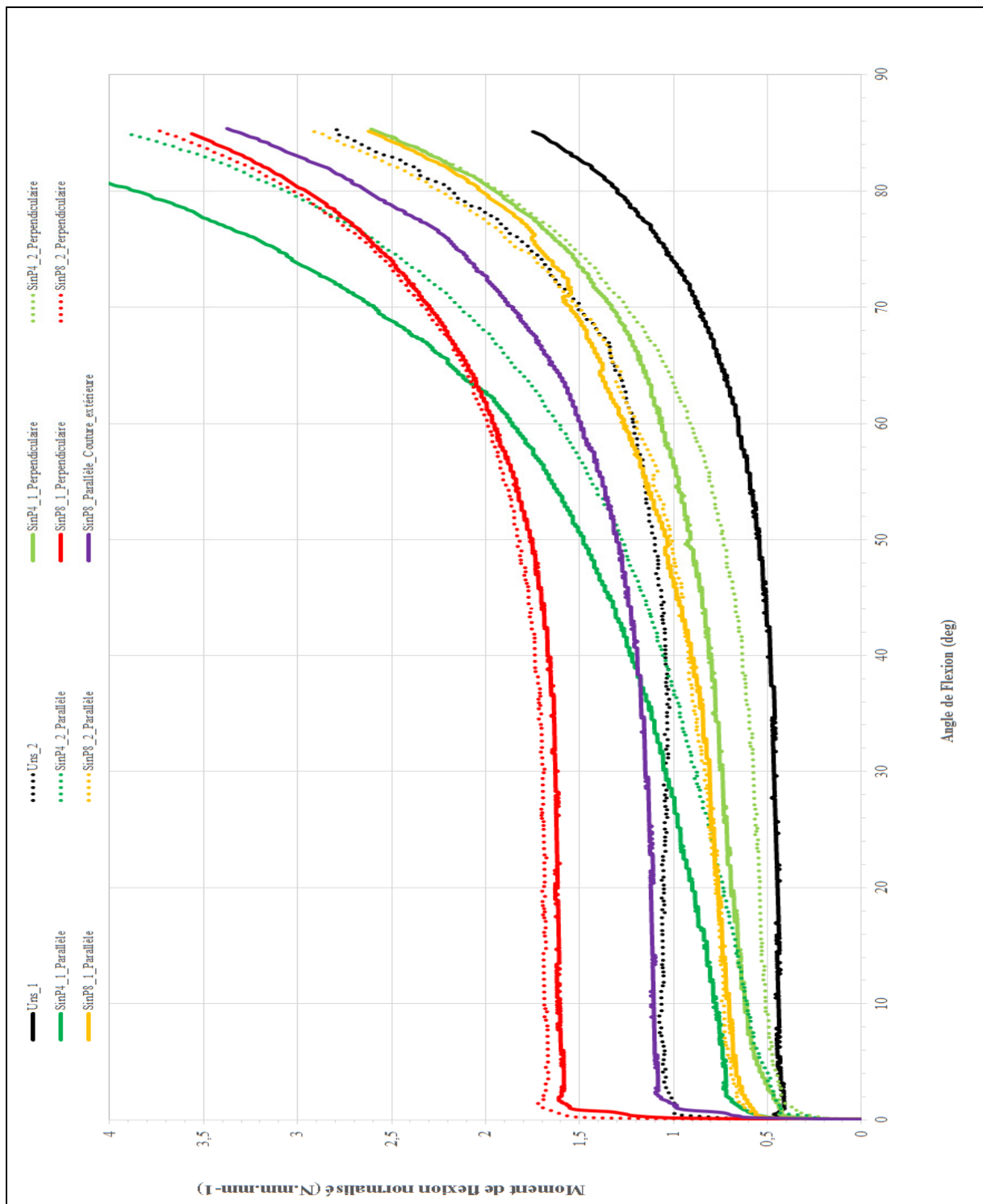


Figure 4.20 Comparaison des résultats obtenus à partir des essais de flexion sur préformes non cousues et cousues

Le comportement en flexion des tissus non cousus a montré une variabilité limitée. Il a été observé que les préformes non cousues ne subissaient aucun gauchissement des deux côtés du rayon de courbure pendant l'essai de flexion. Il a également été constaté que les échantillons non cousus présentent de petits moments de flexion à tout angle de sollicitation jusqu'à 90° .

Les résultats obtenus pour les préformes cousues avec un pas de couture de 4 mm affichent le plus grand moment de flexion lorsque le tissu est chargé parallèlement à la direction de la couture comparativement à la préforme sollicitée perpendiculairement à la direction de couture. Cela peut s'expliquer par le fait que la préforme nécessite une plus grande force de flexion en raison de la densité plus élevée des lignes de couture et aussi par le fait que la couture vient encombrer le mouvement des fils à l'intérieur de la préforme.

Quelques observations visuelles complétées lors des essais sur les préformes cousues avec un pas de couture de 4 mm en configuration parallèle ont révélé la présence de phénomènes de flambement des fibres sur la zone intérieure du rayon tel illustré à la figure 4.21.

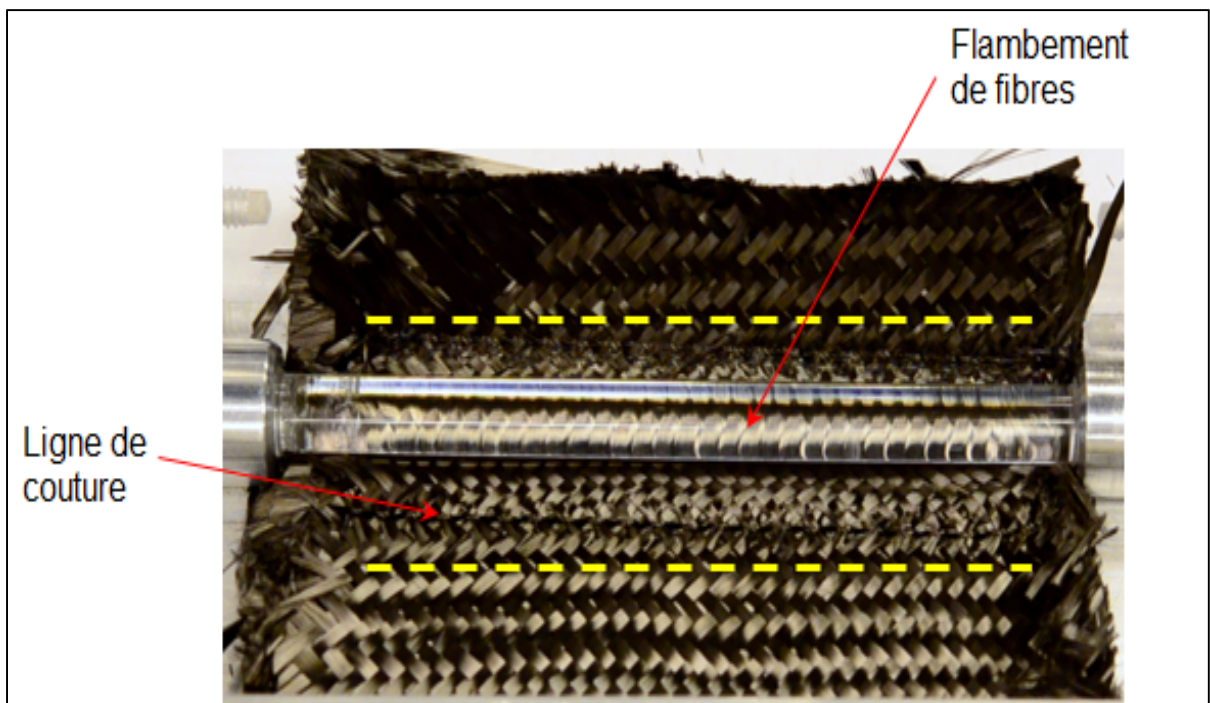


Figure 4.21 Présence du phénomène de flambement de fibres lors de l'essai de flexion d'un échantillon de préforme cousue avec un pas de couture de 4mm

Les tests effectués sur les préformes à faible densité de couture c'est-à-dire avec un pas de couture de 8 mm ont montré une faible variabilité quel que soit la direction de chargement. Cependant, une légère différence de rigidité a été enregistrée dans le cas des tissus avec une densité de couture supérieure, en particulier lorsque le chargement est parallèle à la couture. La raison est que la sollicitation dans la direction des lignes de couture des préformes avec couture dense revendique des efforts plus importantes lorsque les coutures sont particulièrement sollicitées. On a également constaté que lors des essais de flexion dans le cas du chargement parallèle des préformes avec un pas de couture de 8 mm, certains effilochages de fils de couture ont été détectés comme le montre la figure 4.22. À partir de l'essai réalisé sur une préforme ayant les fils de couture du côté du rayon extérieur, il a été observé que le changement de la direction de flexion semble avoir peu d'influence sur la rigidité en flexion (voir figure 4.19 et 4.20)

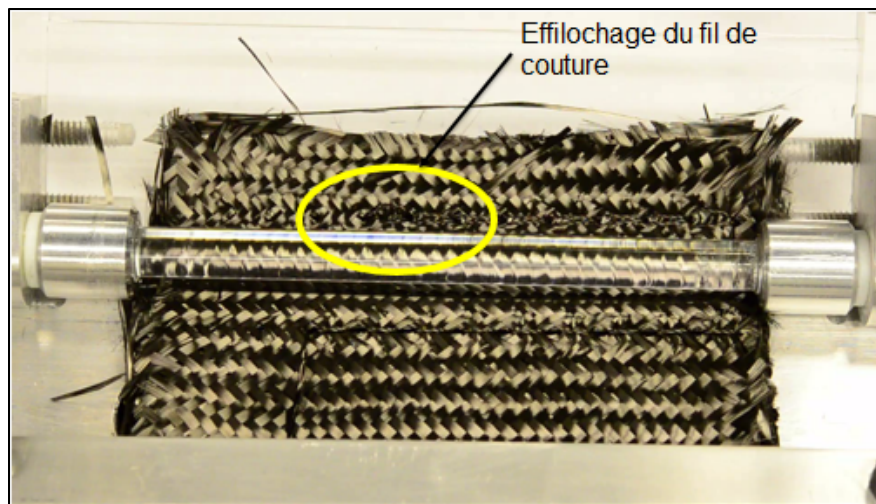


Figure 4.22 Observation du phénomène d'effilochage des fils de couture lors de l'essai de flexion d'un échantillon de préforme cousue avec un pas de couture de 8mm

En général, il a été conclu que les préformes cousues avec une densité de couture faible et chargées perpendiculairement aux lignes de couture présentent une variabilité minimale dans le comportement. Malgré les légères différences dans l'amplitude du moment de flexion pour toutes les configurations, les résultats peuvent confirmer que le chargement des préformes dans n'importe quelle direction par rapport aux lignes de couture n'est pas très important par rapport à la densité de couture.

CONCLUSION

Ce travail réalisé dans le cadre du projet CRIAQ COMP-501, s'est concentré sur la caractérisation du comportement mécanique des préformes cousues en fibres de carbone sèches soumises à diverses conditions de charge. Cette caractérisation mécanique a permis de quantifier le comportement des tissus, en particulier les préformes cousues. Ce travail peut être aussi utile pour une éventuelle future modélisation des tissus cousus et la simulation de la caractérisation mécanique des préformes ainsi que le processus de préformage.

Les tests de compaction ont permis d'analyser le comportement des préformes non cousues et cousues avec différentes densités de couture et configurations de couture soit simples ou superposées. Lorsque la préforme a été compactée, une augmentation exponentielle de la fraction volumique de fibre par rapport à la pression de compaction a été enregistrée. A partir des courbes de compaction, il a été constaté que les préformes cousues avec un pas de couture de 4 mm nécessitaient une pression de compaction plus élevée que les préformes cousues avec un pas de couture de 8 mm pour les deux configurations de couture simples ou superposées. De plus, la configuration de couture semble avoir un effet important sur la fraction volumique de fibre V_f ; la configuration de couture superposée provoque une diminution significative d'environ 2.5% et 2% de V_f par rapport au cas où il n'y a pas de couture et au cas de la couture simple respectivement.

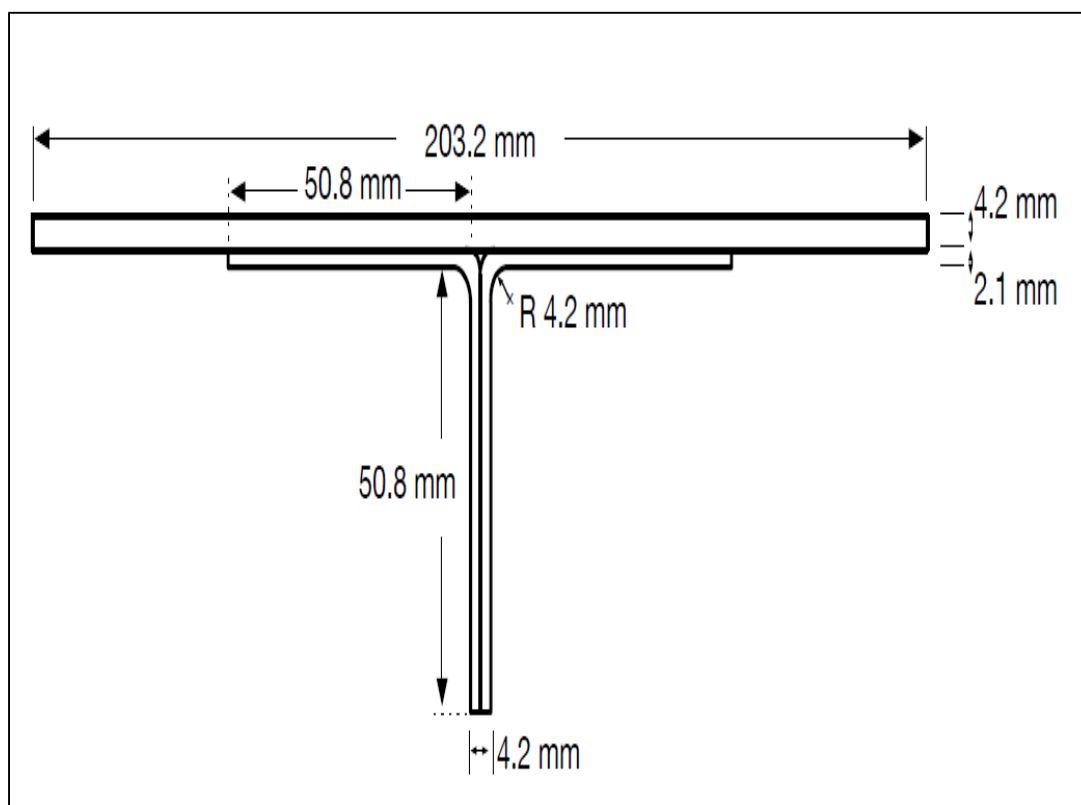
Les essais de compaction localisées sur les préformes étudiées ont permis de consolider les résultats obtenus dans le cas de la compaction classique bien qu'il présente une faible différence de 1% en fraction volumique de fibre V_f . Cette différence peut être attribuée à des changements notables dans l'architecture de la préforme au niveau des zones d'introduction des fils transversaux en raison de l'opération de couture. De plus, à partir de ces tests, on a également constaté que la couture superposée menait à une diminution notable d'environ 1.5% de V_f comparativement à une couture simple.

Les essais de cisaillement ont été réalisés à l'aide d'un cadre articulé afin de réaliser une analyse de la déformation de cisaillement proche de l'angle de blocage et faire ressortir l'impact de la couture sur le comportement en cisaillement du renfort textile utilisé dans le cadre de cette étude. Il a été constaté que l'allure de réponse en cisaillement des différents tissus testés est assez similaire et indépendante de la configuration de la couture. Tous les tissus présentent un angle de cisaillement pouvant atteindre 60° avant l'apparition des phénomènes de plissement et de blocage.

À partir des essais de flexion, on peut conclure que les préformes étudiées ici nécessitent un effort minimal pour respecter le rayon de courbure souhaité de 4.2 mm et que le choix de la direction de chargement soit parallèle soit perpendiculaire à la direction de couture, n'affecte pas significativement la raideur du tissu.

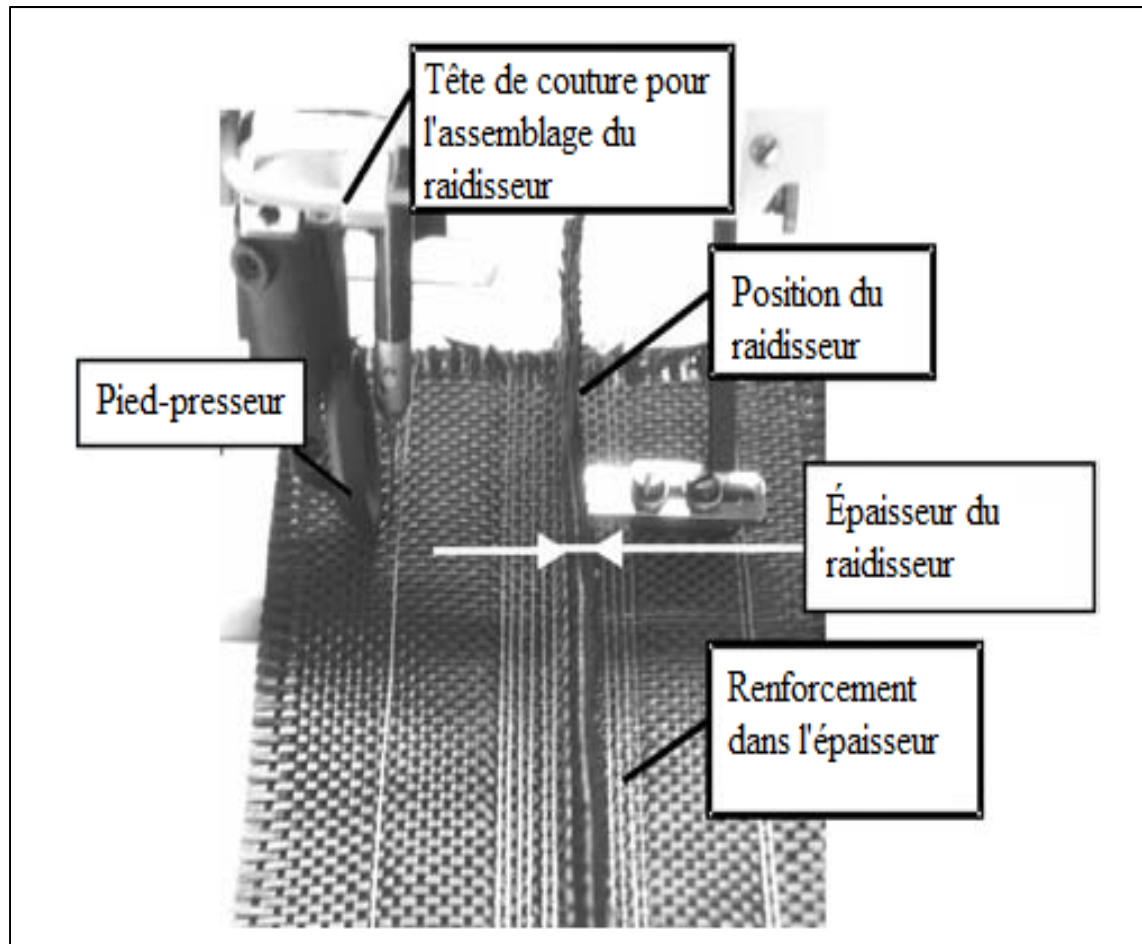
ANNEXE I

GÉOMÉTRIE DU RAIDISSEUR FABRIQUÉ DANS LE CADRE DU PROJET CRIAQ COMP-501



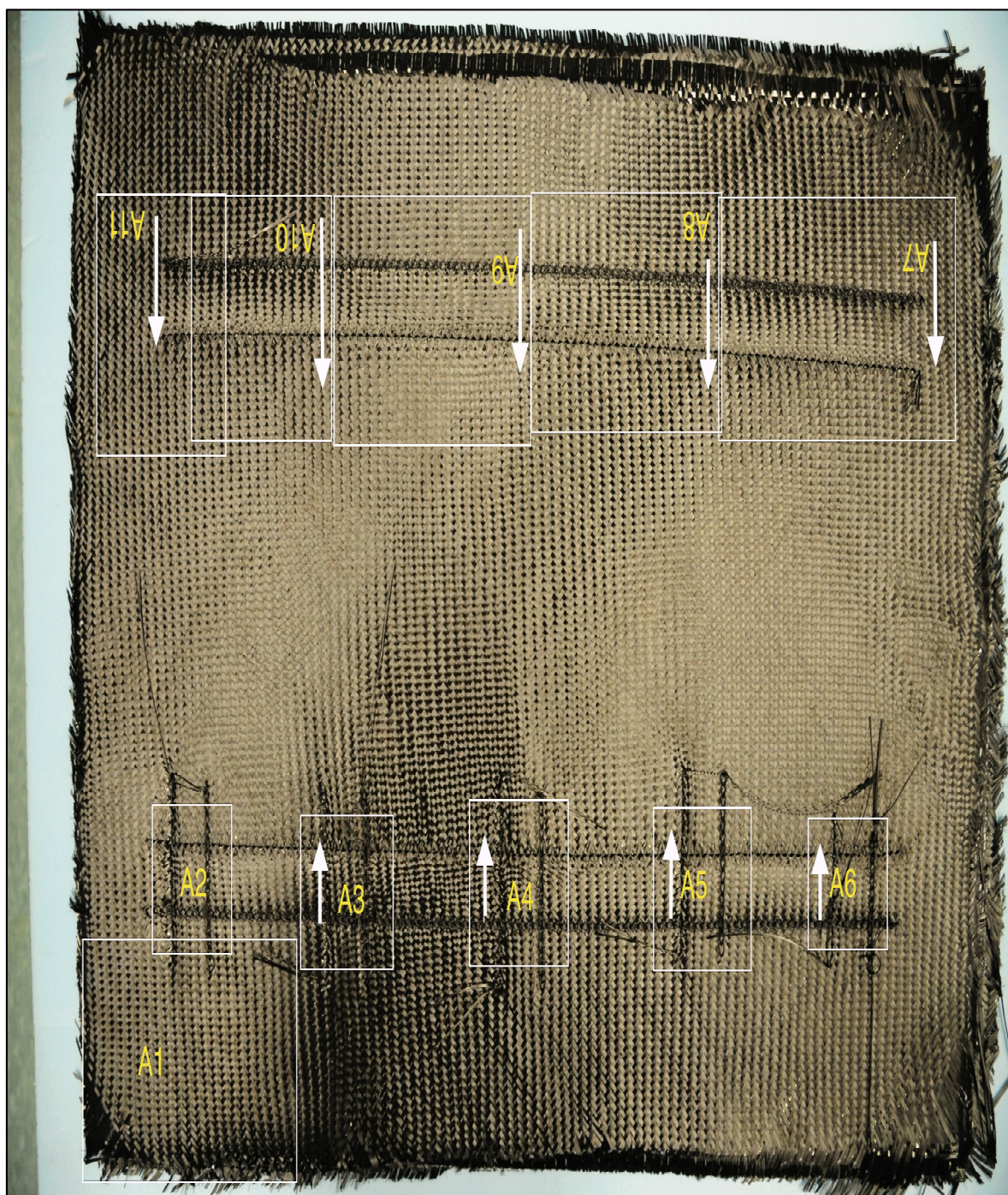
ANNEXE II

TECHNIQUE D'ASSEMBLAGE DU RAIDISSEUR FABRIQUÉ DANS LE CADRE DU PROJET CRIAQ COMP-501



ANNEXE III

PRÉFORME TYPE AVEC COUTURES SIMPLES ET SUPERPOSÉES



BIBLIOGRAPHIE

- Allaoui, S., Duong, A. V., Hivet, G., Launay J. et Valle V., 2007. « La mesure des déformations pour l'étude du comportement et la mise en forme des renforts de composites ». In *CFMI8*. (Grenoble, France). < <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00299826/en/> >.
- American Society for Testing and Materials. 2001. Standard Guide for Evaluating Nonwoven Fabrics (Withdrawn 2009). ASTM D1117.
- American Society for Testing and Materials. 2002. Standard Test Method for Twist in Yarns by Direct-Counting. ASTM D1423.
- American Society for Testing and Materials. 2007a. Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. ASTM D3822.
- American Society for Testing and Materials. 2007b. Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers. ASTM D1577.
- American Society for Testing and Materials. 2007c. Standard Test Methods for Tire Cords. Tire Cord Fabrics, and Industrial Filament Yarns Made from Manufactured Organic-Base Fibers. ASTM D885.
- American Society for Testing and Materials. 2008. Standard Test Method for Stiffness of Fabrics. ASTM D1388.
- American Society for Testing and Materials. 2009a. Standard Terminology Relating to Textiles. ASTM D123.
- American Society for Testing and Materials. 2009b. Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric. ASTM D3776M.
- American Society for Testing and Materials. 2011. Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method). ASTM D5035.
- Anahara, M., Yasui, Y. et Omori H., 1991. « Three-dimensional textile and method of producing the three-dimensional textile ». European Patent 0-426-878-A1.
- Arbter, R., J. M. Beraud, C. Binetruy, L. Bizet, J. Bréard, S. Comas-Cardona., Demaria, C., Endruweit, A., Ermanni P., Gommer F., Hasanovic, S., Henrat, P., Klunker, F., Laine, B., Lavanchy, S., Lomov, S. V., Long, A., Michaud V., Morren, G., Ruiz, E., Sol.H., Trochu F., Verleye, B., Wietgreffe, M., Wu, W. et Ziegmann G., 2011. « Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no 9, p. 1157-1168.

- Badel, P., E. Vidal-Sallé, E. Maire et P. Boisse. 2008. « Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale ». *Composites Science and Technology*. vol. 68. no 12. p. 2433-2440.
- Bannister, M. K. 2004. « Development and application of advanced textile composites ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L: Journal of Materials Design and Applications*. vol. 218. no 3. p. 253-260.
- Bilisik, A., et MH. Mohamed. 1994. « Multiaxial 3-D weaving machine and properties of multiaxial 3-D woven carbon/epoxy composites ». In *Proceedings of American Society of Composites*. p. 868-82.
- Bilisik, K. 2010. « Multiaxis 3D weaving: Comparison of developed two weaving methods (tube-rapier weaving versus tube-carrier weaving) and effects of bias yarn path to the preform properties ». *Fibers and Polymers*. vol. 11. no 1. p. 104-114.
- Bilisik, K. 2011a. « Multiaxis Three Dimensional (3D) Woven Fabric ». In *Advances in Modern Woven Fabrics Technology*. sous la dir. de (Ed.). Savvas Vassiliadis. InTech. Bilisik, Kadir. 2011b. « Three-dimensional axial braided preforms: experimental determination of effects of structure-process parameters on unit cell ». *Textile Research Journal*. vol. 81. no 20. p. 2095-2116.
- Bogdanovich, A. E., et M. H. Mohamed. 2009. « Three-Dimensional Reinforcements for Composites ». *SAMPE Journal*. vol. 45. no 6. p. 8-28.
- Boisse, P. 2004. *Mise en forme des renforts fibreux de composites*. Coll. « Les techniques de l'ingénieur »: Référence AM3734.
- Boisse, P., N. Hamila, E. Vidal-Sallé et F. Dumont. 2011. « Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses ». *Composites Science and Technology*. vol. 71. no 5. p. 683-692.
- Brandt, J. J Filsinger et A Gessler. 2005. « Sewing lessons for aerospace engineers ». In *machinedesign.com*. < <http://machinedesign.com/article/sewing-lessons-for-aerospace-engineers-0818> >. Consulté le 13 octobre.
- Brandt, J., K. Drechsler et J. Filsinger. 2001. « Advanced Textile Technologies for the cost Effective Manufacturing of High Performance Composites ». In *RTO AVT Specialists' meeting on "Low Cost Composite Structure"*. (Loen, Norway). Vol. 069(II). RTO-MP.
- British Standard. 1987. *Methods for determination of thickness of textile materials*. BS 2544.
- Buet-Gautier, K., et P. Boisse. 2001. « Experimental analysis and modeling of biaxial mechanical behavior of woven composite reinforcements ». *Experimental Mechanics*. vol. 41. no 3. p. 260-269.

- Chan, C. K., X. Y. Jiang, K. L. Liew, L. K. Chan, W. K. Wong et M. P. Lau. 2006. « Evaluation of mechanical properties of uniform fabrics in garment manufacturing ». *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 174. no 1-3. p. 183-189.
- Cheng, H.S. 2004. « Benchmark of Woven Composites Forming ». < <http://www.mech.northwestern.edu/ampl/benchmark/> >. Consulté le 15 décembre 2012.
- Chou, Tsu-Wei. 1992. « Three dimensional textile structural composites ». In *Microstructural design of fiber composites*. Cambridge New York Cambridge University Press.
- Clarke, Steven. 1998. « Engineered textile preforms for RTM: A comparison of braiding, knitting, and weaving technologies ». *SAMPE Journal*. vol. 34. no Compendex. p. 35-39.
- CompositesWorld. 2011. « 3-D woven reinforcements update ». In *Composites World*, en ligne. < <http://www.compositesworld.com/articles/3-d-woven-reinforcements-update> >. Consulté le 6 octobre 2011.
- De Bilbao, E., D. Soulat, G. Hivet et A. Gasser. 2010. « Experimental Study of Bending Behaviour of Reinforcements ». *Experimental Mechanics*. vol. 50. no 3. p. 333-351.
- De Luycker, E. 2009. « Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks ». France. INSA Lyon.
- De Luycker, E., J. Orliac, F. Morestin, P. Boisse, D. Marsal et S. Otin. 2010. « Experimental and Numerical Analyses of 3D Interlock Composite Preforming ». *International Journal of Material Forming*. vol. 3. no 0. p. 719-722.
- Durand, L.P. 2008. *Composite materials research progress*. Nova Science Publishers.
- Dridi, S. 2010. « Essais de Caractérisations des Structures Tissées ». Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Drivas, T., 2014. « Manufacturing Three-dimensional Carbon-fibre Preforms for Aerospace Composites ». Mémoire de maîtrise, Université d'Ottawa.
- Endruweit, A., et A.C. Long. 2010. « Analysis of Compressibility and Permeability of Selected 3D Woven Reinforcements ». *Journal of Composite Materials*. vol. 44. no 24. p. 2833-2862.
- Feltin, D., et K. Gliesche. 2001. « Tailored fibre placement - Cost-effective preforms for high loaded composites ». In *46th SAMPE Symposium and Exhibition. (USA) Vol. 46 II*. p. 2463-2471. Coll. « International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings) ».
- Fukuta, K., Y. Nagatsuka, S. Tsuburaya, R. Miyashita, J. Sekiguti, E. Aoki et M. Sasahara. 1974. « Three-dimensional fabric and method and construction for the production thereof ». US Patent 3834424.
- Gokarnesham, N., N. Jegadeesan et P. Dhanapal. 2009. « Recent innovations in loom shedding mechanisms ». *Indian Journal of Fibre and Textile Research*. vol. 35. p. 85-94.

- Gokarneshan. N., et R. Alagirusamy. 2009. « Weaving of 3D fabrics: A critical appreciation of the developments ». *Textile Progress*. vol. 41. no 1. p. 1-58.
- Greenhalgh. E., et M. Hiley. 2003. « The assessment of novel materials and processes for the impact tolerant design of stiffened composite aerospace structures ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. vol. 34. no 2. p. 151-161.
- Hammouda. A., X. Legrand et J. M. Castelain. 2010. « Sewing dry fibre preforms for textile composites ». In *TEXCOMP 10*. 2010. (Lille. France). p. 355-362. Coll. « Proceedings of the 10th International Conference on Textile Composites - TEXCOMP 10: Recent Advances in Textile Composites ».
- Harrison. P., M. J. Clifford et A. C. Long. 2004. « Shear characterisation of viscous woven textile composites: a comparison between picture frame and bias extension experiments ». *Composites Science and Technology*. vol. 64. no 10-11. p. 1453-1465.
- Hivet. G., et A.V. Duong. 2010. « A contribution to the analysis of the intrinsic shear behaviour of fabrics ». *Journal of Composite Materials*.
- Hu. J. 2004. *Structure and mechanics of woven fabrics*. CRC Press.
- Ichard. J.C. 2011. « An innovative aircraft structure produced by RTM using advanced stitched preforms ». *JEC composites magazine*. vol. 65.
- International Standard Organization. 1978. *Textile glass -- Woven fabrics -- Determination of conventional flexural stiffness -- Fixed angle flexometer method*. ISO 4604.
- International Standard Organization. 1999a. *Textiles -- Propriétés des étoffes en traction -- Partie 1: Détermination de la force maximale et de l'allongement à la force maximale par la méthode sur bande*. ISO 13934-1.
- International Standard Organization. 1999b. *Textiles -- Propriétés des étoffes en traction -- Partie 2: Détermination de la force maximale par la méthode d'arrachement (Grab test)*. ISO 13934-2.
- Ivens. J., P. Debaere. C. McGoldrick. I. Verpoest et P. van der Vleuten. 1994. « 2.5D fabrics for delamination resistant composite structures ». *Composites*. vol. 25. no 2. p. 139-146.
- Jenny. Z. 1994. « Formability of textile preforms for composite applications. Part 1: Characterization experiments ». *Composites manufacturing*. vol. 5. no 2. p. 113-122.
- Kamiya. R., B.A. Cheeseman. P. Popper et T.W. Chou. 2000. « Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: a review ». *Composites Science and Technology*. vol. 60. no 1. p. 33-47.

- Karal. M. 2001. AST Composite Wing Program - Executive summary. Coll. « NASA report ». NASA/CR-2001-210650. USA: NASA report.
- Kawabata. S. 1980. The standardization and analysis of hand evaluation. Textile Machinery Society of Japan.
- Khokar. N. 2002. « Woven 3D fabric material ». US Patent 6338367.
- Komeili. M., et A. S. Milani. 2011. « Finite Element Modeling of Woven Fabric Composites at Meso-Level Under Combined Loading Modes ». In Advances in Modern Woven Fabrics Technology. sous la dir. de (Ed.). Savvas Vassiliadis. p. 65-78. InTech.
- Kovar. Radko. et Mehdi Kamali Dolatabadi. 2011. « A new Method for Measuring of Rupture Properties of Fabrics ». Textile Research Journal.
- Lahey. T.J. 2002. « Modelling Hysteresis in the Bending of Fabrics ». University of Waterloo. Ontario. Canada. < http://www.scribd.com/doc/23115833/tjlahey2002#archive_trial >.
- Lee. B., K. H. Leong et I. Herszberg. 2001. « Effect of Weaving on the Tensile Properties of Carbon Fibre Tows and Woven Composites ». Journal of Reinforced Plastics and Composites. vol. 20. no 8. p. 652-670.
- Lee. L., S. Rudov-Clark. A. P. Mouritz. M. K. Bannister et I. Herszberg. 2002. « Effect of weaving damage on the tensile properties of three-dimensional woven composites ». Composite Structures. vol. 57. no 1-4. p. 405-413.
- Leong. K. H., S. Ramakrishna. Z. M. Huang et G. A. Bibo. 2000. « The potential of knitting for engineering composites—a review ». Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. vol. 31. no 3. p. 197-220.
- Li. W., et A.E. Shiekh. 1988. « The effect of processes and processing parameters on 3-D braided preforms for composites ». Journal Name: SAMPE Q.; (United States); Journal Volume: 19:4. p. Medium: X; Size: Pages: 22-28.
- Lomov. S. V., M. Barburski. Tz Stoilova. I. Verpoest. R. Akkerman. R. Loendersloot et R. H. W. ten Thije. 2005. « Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part 3: Biaxial tension. picture frame and compression tests of the preforms ». Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. vol. 36. no 9. p. 1188-1206.
- Lomov. S. V., Ph Boisse. E. De Luycker. F. Morestin. K. Vanclooster. D. Vandepitte. I. Verpoest et A. Willems. 2008. « Full-field strain measurements in textile deformability studies ». Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. vol. 39. no 8. p. 1232-1244.
- Lomov. S. V., et I. Verpoest. 2006. « Model of shear of woven fabric and parametric description of shear resistance of glass woven reinforcements ». Composites Science and Technology. vol. 66. no 7-8. p. 919-933.

- Lomov, S., I. Verpoest et F. Robitaille. 2005. « Design and Manufacture of Textile Composites ». In Chapitre 1 : Manufacturing and internal geometry of textiles. England: Woodhead publishing limited.
- Lowe, J. 2005. « Design and Manufacture of Textile Composites ». In Chapitre 11 : Aerospace applications. England: Woodhead publishing limited.
- Ly, N.G., D.H. Tester, P. Buckenham, A.F. Roczniok, A.L. Adriaansen, F. Scaysbrook et S. De Jong. 1991. « Simple Instruments for Quality Control by Finishers and Tailors ». Textile Research Journal. vol. 61. no 7. p. 402-406.
- Mahadik, Y., K. A. Robson Brown et S. R. Hallett. 2010. « Characterisation of 3D woven composite internal architecture and effect of compaction ». Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. vol. 41. no 7. p. 872-880.
- Mohammed, U., C. Lekakou, L. Dong et M. G. Bader. 2000. « Shear deformation and micromechanics of woven fabrics ». Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. vol. 31. no 4. p. 299-308.
- McHugh, Christopher. 2009. « The use of recent developments in conventional weaving shedding technology to create 3D one piece woven carbon preforms ». In SAMPE '09 Spring Symposium Conference Proceedings. (USA). Vol. 54.
- Miravete, Antonio. 1999. 3-D textile reinforcements in composite materials Coll. « Three-D textile reinforcements in composite materials ». Boca Raton, FL: Boca Raton, FL : CRC Press.
- Mood, G.I., et MGB. Mahboubian-Jones. 1992. « Multi-axial weaving ». International Patent WO 92/14876.
- Mouritz, A. P., M. K. Bannister, P. J. Falzon et K. H. Leong. 1999. « Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites ». Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. vol. 30. no 12. p. 1445-1461.
- Mouritz, A. P., et B. N. Cox. 2010. « A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites ». Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. vol. 41. no 6. p. 709-728.
- Nayfeh, S.A., J. D. Rohrs, O. Rifni, S. Akamphon, M. Diaz et E. Warman. 2006. « Bias Weaving Machine ». US Patent 7077167.
- Nehme, Samer, Ali Hallal, Farouk Fardoun, Rafic Younes, Benjamin Hagege, Zoheir Aboura, Malk Benzeggagh et Fadi Hage Chehade. 2011. « Numerical/analytical methods to evaluate the mechanical behavior of interlock composites ». Journal of Composite Materials. vol. 45. no 16. p. 1699-1716.

- Ogale, A.. et P. Mitschang. 2004. « Tailoring of Textile Preforms for Fibre-reinforced Polymer Composites ». *Journal of Industrial Textiles*. vol. 34. no 2. p. 77-96.
- Ogale, Amol. et P. Mitschang. 2007. « Compaction behavior of assembled fiber reinforced preforms ». *Journal of Industrial Textiles*. vol. 37. no 1. p. 15-29.
- Padaki, Naveen V., R. Alagirusamy et B. S. Sugun. 2006. « Knitted Preforms for Composite Applications ». *Journal of Industrial Textiles*. vol. 35. no 4. p. 295-321.
- Partridge, I., T. Bonnington et D. Cartié. 2003. « Manufacture and Performance of Z-Pinned Composites ». In *Advanced Polymeric Materials*. CRC Press. Consulté le 26 Octobre 2012.
- Poe, C.C., H.B. Dexter et I.S. Raju. 1997. *A review of the NASA textile composite research*. Hampton, Virginia.
- Potluri, P., I. Parlak, R. Ramgulum et T. V. Sagar. 2006. « Analysis of tow deformations in textile preforms subjected to forming forces ». *Composites Science and Technology*. vol. 66. no 2. p. 297-305.
- Potluri, P.; Sharif, T.; Jetavat, D. 2008. « Robotic approach to textile preforming for composites ». *Indian journal of fibre and textile reserach*. vol. 33. no 3. p. 333-338.
- Potluri, P., T. Sharif, D. Jetavat, A. Aktas, R. Choudhry et P. Hogg. 2009. « Bench-marking of 3D preforming strategies ». In *International Conference on Composite Materials 17*. (Edimbourg.UK).
- Préau, M., J. Treiber et I.K. Partridge. 2011. « Comportement et endommagement d'un raidisseur omega carbone/époxy renforcé par tufting ». In *Journées nationales des Composites*. (Poitiers).
- Quaglini, Virginio, Carola Corazza et Carlo Poggi. 2008. « Experimental characterization of orthotropic technical textiles under uniaxial and biaxial loading ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. vol. 39. no 8. p. 1331-1342.
- Quinn, J. P., A. T. McIlhagger, R. McIlhagger, S. Wilson, D. Simpson et W. Wenger. 2008. « 5 axis weaving-Technology for the next generations of aircraft-Mechanical performance of multiaxis weave structures ». In *TEXCOMP9: Recent Advances in Textile Composites*. (Newark, DE, United states). p. 99-104.
- Rudd, C. D., A. C. Long, K. N. Kendall et C. Mangin. 1997. « Liquid Moulding Technologies - Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection Moulding and Related Processing Techniques ».
- Rugg, K. L., et B. N. Cox. 2004. « Deformation Mechanisms of Dry Textile Preforms under Mixed Compressive and Shear Loading ». *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. vol. 23. no 13. p. 1425-1442.

- Ruzand. JM. et G. Guenot. 1994. « Multiaxial three-dimensional fabric and process for its manufacture ». International Patent WO 94/20658.
- Saville. B. P. 1999. Physical Testing of Textiles. Woodhead Publishing.
http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=925 >.
- Schiebel. P., T. Block et A. S. Herrmann. 2008. « Prospects and risks of tailored preforms for advanced composite applications ». In TEXCOMP9: Recent Advances in Textile Composites. 2008. (USA). p. 215-220. Coll. « Proceedings of the 9th International Conference on Textile Composites - TEXCOMP9: Recent Advances in Textile Composites »: DEStech Publications Inc.
- Schmidt. R.P., et D.A. Kalser. 2005. « Woven preform for structural joints ». US Patent 6874543.
- Schuster. M., A. Ogale, L. Peetz, J. Schuster et P. Mitschang. 2008. « Analysis of sewed preforms by visual on-line monitoring of stitch-hole variations under compaction ». Composites Science and Technology. vol. 68. no 1. p. 312-320.
- Sloan. J. 2011. « PRSEUS preform for pressurized cabin walls ». <http://www.compositesworld.com/articles/prseus-preform-for-pressurized-cabin-walls> >. Consulté le 14 décembre.
- Soden. J. A., et B. J. Hill. 1998. « Conventional weaving of shaped preforms for engineering composites ». Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. vol. 29. no 7. p. 757-762.
- Stig. F., et S. Hallström. 2009. « Assessment of the mechanical properties of a new 3D woven fibre composite material ». Composites Science and Technology. vol. 69. no 11-12. p. 1686-1692.
- Thrum. Thorsten. 2005. « Applications of One-Sided-Stitching Techniques for resin infusion preforms and structures ». SAMPE Journal. vol. 41. no 1. p. 64-67.
- Tong. L., A. P. Mouritz et M. K. Bannister. 2002. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites. Oxford: Elsevier Science.
- Treiber. J.W.G. 2011. « Performance of tufted carbon fibre/epoxy composites ». Cranfield. Cranfield University.
- Van Vuure. A. W., J. A. Ivens et I. Verpoest. 2000. « Mechanical properties of composite panels based on woven sandwich-fabric preforms ». Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. vol. 31. no 7. p. 671-680.

- Wambua, P.M., et R. Anandjiwala. 2011. « A Review of Preforms for the Composites Industry ». *Journal of Industrial Textiles*, vol. 40, no 4, p. 310-333.
- Wappat, K. 2006. HYBRIDMAT 4: Advances in the manufacture of 3-D preform reinforcement for advanced structural composites in aerospace – a mission to the USA. UK: Departement of Trade and Industry.
- Weimer, C., P. Mitschang et N. Manfred. 2002. « Continous manufacturing of tailored reinforcements for liquid infusion process based on stitching technologies ». In FPCM-6. (New Zealand).
- Weimer, C., T. Preller, P. Mitschang et K. Drechsler. 2000. « Approach to net-shape preforming using textile technologies. Part II: holes ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no 11, p. 1269-1277.
- Willems, A., S. V. Lomov, I. Verpoest et D. Vandepitte. 2011. « Drape-ability characterization of textile composite reinforcements using digital image correlation ». *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, no 3-4, p. 343-351.
- Chen X, Lindsay Waterton Taylor et Li-Ju Tsai. 2011. « An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites ». *Textile Research Journal*, vol. 81, no 9, p. 932-944.
- Yasui, Y., Anahara M., Hori F. et Y. Mita. 1993. « Production of three-dimensional woven fabric ». Japanese Patent Publication 05106140.
- Yasui, Y., M. Anahara et H. Omori. 1992. « Three-dimensional fabric and method for making the same ». US Patent 5091246.