

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

LABORATOIRE PRISME

THÈSE présentée par : **Aurélie TELMAR**

soutenue le : **7 décembre 2012**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline : **Génie Mécanique**

**Etude de déformabilité de tresses en cours de
préformage pour la fabrication de composite par
le procédé RTM**

THÈSE dirigée par :

Damien SOULAT
Gilles HIVET

Professeur des Universités, ENSAIT Roubaix
Maître de conférences, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :

Laurence SCHACHER
Jean-Louis Billoët

Professeur des Universités, Université de Mulhouse
Professeur des Universités, INSA Rouen

JURY (y reporter tous les membres de jury présents à la soutenance):

Laurence SCHACHER
Jean-Louis BILLOET
Joël BREARD
Emmanuelle Vidal-Sallé
Christine ROUSSELLE
Didier ZANELLI
Damien SOULAT
Gilles HIVET

Professeur des Universités, Rapporteur
Professeur des Universités, Rapporteur
Professeur des universités, Examinateur
Professeur des Universités, Examinateur
Professeur des Universités, Examinateur
Ingénieur Roxel, Invité
PU, Directeur de thèse
MC, Encadrant de la thèse

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'ANR et la société ROXEL pour avoir financé cette étude.

Je remercie Damien SOULAT et Gilles HIVET qui ont respectivement dirigé et encadré mes travaux de thèse. Je tiens aussi à remercier Jean LAUNAY grâce à qui le partenariat avec la société ROXEL a été développé.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à Madame Laurence SCHACHER et M. Jean-Louis BILLOET d'avoir rapporté mes travaux de thèse ainsi qu'à l'ensemble des membres du jury présents lors de ma soutenance : M. Joël BREARD, Mme Christine ROUSSELLE, Mme Emmanuelle VIDAL-SALLE, M. Didier ZANELLI.

Je tiens à remercier Jean-Marie ROZIERE, Mathilde THIBIERGE, Didier ZANELLI, ingénieurs de la société ROXEL. Je n'oublie pas Antoine QUENARD pour son assistance technique et expérimentale. De la même manière, je remercie Frédéric STOLL et Yannick COLLEVILLE, de l'atelier de Polytech'Orléans, pour leur aide précieuse concernant toute la partie expérimentale de cette étude.

Je tiens à remercier vivement mes collègues, vous m'avez tous, chacun à votre manière, permis d'avancer au cours de ces années de recherche. Merci pour tout.

Je remercie ma famille et mes amis, pour leur présence ou au contraire leur patience, durant ces longs mois.

Pour finir, je pense à toutes les personnes de Polytech'Orléans que j'ai pu côtoyer durant ces années de présence dans l'établissement, merci pour votre bonne humeur.

Sommaire

Remerciements	3
Sommaire	5
Table des illustrations.....	9
INTRODUCTION	13
CHAPITRE 1 : Du contexte industriel aux objectifs de la thèse	19
1 Introduction générale.....	20
1.1 Contexte industriel.....	20
1.2 Caractéristiques des matériaux ablatifs	22
2 Analyse des procédés de fabrication des pièces composites	24
2.1 Procédé actuel.....	24
2.2 Utilisation du RTM : Importance du choix de matériau	25
2.3 Fabriquer un tube à rallonge par RTM : Objectifs et contraintes	26
3 Choix du couple « Matériau /Procédé ».....	27
3.1 Choix du renfort	27
3.2 Etat de l'art sur les structures de type « tresse ».....	29
3.2.1 La fabrication des tresses	29
3.2.2 Les procédés de fabrication à l'aide de tresse	33
3.3 Principe du procédé retenu.....	36
3.4 Les différentes sollicitations subies par le renfort en cours de préformage.....	38
3.5 Les paramètres associés à la fabrication des tubes	39
3.5.1 Les paramètres procédé	39
3.6 Procédé de préformage par ligature de tresse : Résultats préliminaires	40
3.6.1 Les matériaux utilisés	40
3.6.2 Les observations effectuées	41
4 Conclusion	42
CHAPITRE 2 : Caractérisation et modélisation du comportement mécanique de la tresse.....	43
1 Compaction	44
1.1 Variation de la fraction volumique de fibres induite par la compaction	44
1.2 Conclusion	53
1.3 Variation de l'épaisseur induite par la compaction	54
1.3.1 Conclusion	57
2 Cisaillement	58
2.1 Généralités pour les renforts tissés.....	58

2.2	Etude du comportement mécanique en cisaillement de la tresse	61
2.3	Détermination théorique de l'angle de blocage	65
2.4	Modèle d'étude du cisaillement mésoscopique	67
3	Couplages compaction/cisaillement : Influence sur l'épaisseur des plis	75
3.1	Observations dans la littérature.....	75
3.2	Essais et résultats	75
	Les résultats expérimentaux des essais de couplage menés sur la tresse de carbone (.....	76
3.3	Bilan des études sur le couplage	77
4	Conclusion de la caractérisation et de la modélisation du comportement de la tresse.....	79
	CHAPITRE 3 : Analyse de l'étape de préformage : Modélisation et validation expérimentale.....	81
1	Modélisation du cisaillement : Développement d'un modèle d'analyse de la déformabilité	82
1.1	Les différentes échelles de l'étude.....	82
1.2	Paramètres du modèle mésoscopique.....	83
1.3	Modèle à l'échelle de la maille élémentaire	87
1.3.1	Détermination des rayons r_i le long du pli conique.....	88
1.3.2	Détermination de l'angle de cisaillement en fonction du rayon r_i	89
1.4	Comparaison avec les résultats expérimentaux.....	90
1.4.1	Validation du modèle	90
1.4.2	Résultats expérimentaux.....	92
1.4.3	Influence du choix de matériau.....	96
1.4.4	Premiers éléments de conclusion sur le modèle.....	97
2	Modélisation à l'échelle du pli.....	99
2.1	Maîtrise du taux volumique de fibres	99
2.1.1	Le modèle droit	99
2.1.2	A l'échelle du pli – fraction volumique de renfort	101
2.1.3	Influence sur l'étape d'injection.....	103
2.1.4	Influence des paramètres d'entrée du modèle.....	104
2.2	Déviances possibles du pas d'empilement et de l'orientation des plis en cours de procédé : Influences sur la qualité de la préforme obtenue	109
3	Validation par l'expérience : Campagne d'élaboration de prototypes	114
3.1	Campagne de fabrication de prototypes : protocole mis en œuvre.....	114
3.1.1	Etape de préformage.....	115
3.1.2	Etape d'injection.....	116
3.1.3	Résultats obtenus et analyses	117

3.1.4	Observations expérimentales de la forme globale des plis en cœur de pièce.....	121
3.2	Compréhension du phénomène de courbure des plis	123
3.3	Maîtrise de la compaction des plis.....	125
4	Les modèles théoriques envisagés	126
4.1	Modèle « courbe »	126
4.2	Modèle « courbe/droit »	127
4.3	Modèle « droit/droit »	130
4.4	Bilan	131
5	Conclusion de l'analyse de l'étape de préformage	132
Chapitre 4 : Procédé d'élaboration d'une préforme par la méthode de ligature de tresse		135
1	Automatisation du préformage par ligature de tresse	136
1.1	Rappel sur le préformage par ligature de tresse.....	136
1.2	Cahier des charges du dispositif automatisé.....	138
2	Séquençage du préformage	141
2.1	Enfiler la tresse	141
2.1.1	Objectif	141
2.1.2	Critère de succès de la fonction	141
2.1.3	Défauts potentiels	141
2.1.4	Solutions envisagées	142
2.1.5	Validation.....	142
2.2	Serrer la tresse.....	142
2.2.1	Objectif	142
2.2.2	Critère de succès de la fonction	143
2.2.3	Défauts potentiels	146
2.2.4	Solutions envisagées	146
2.2.5	Validation.....	148
2.3	Former le pli	152
2.3.1	Objectifs.....	152
2.3.2	Critère de succès de la fonction	152
2.3.3	Défauts potentiels	152
2.3.4	Solutions envisagées	153
2.3.5	Validation.....	156
2.4	Etude du mouvement du contre-moule.....	158
2.4.1	Paramétrage du mouvement du contre moule.....	159

2.5	Compacter le pli	160
2.5.1	Objectif	160
2.5.2	Critère de succès de la fonction	160
2.5.3	Défauts potentiels	160
2.5.4	Solutions envisagées	160
2.5.5	Validation.....	161
2.6	Empiler les plis.....	161
2.6.1	Objectif	161
2.6.2	Critère de succès de la fonction	161
2.6.3	Défauts potentiels	161
2.6.4	Solutions envisagées	161
2.6.5	Validation.....	162
3	Automatisation du préformage : Bilan.....	163
Chapitre 5 : Conclusions / Perspectives		165
Bibliographie.....		171

Table des illustrations

Figure 1 : Système d'injection RTM.....	15
Figure 2 : Etapes de l'injection RTM.....	15
Figure 3 : Coupe de missile [1]	20
Figure 4 : Fond arrière de missile (vue en coupe) [1].....	21
Figure 5 : Fond arrière de propulseur [1]	21
Figure 6 : Strates formées au cours de l'ablation [7]	23
Figure 7 : Coupe B-B transversale [1]	23
Figure 8 : Coupe B-B longitudinale [1].....	24
Figure 9 : Mandrin à base conique	24
Figure 10 : Protection thermique "brute"	25
Figure 11 : Protection thermique usinée (épaisseur finale 6 mm env.).....	25
Figure 12 : Définition des σ_{Vf}	26
Figure 13 : Tableau récapitulatif du cahier des charges.....	27
Figure 14 : Cône de drapage.....	28
Figure 15 : Anneaux découpés et empilés.....	28
Figure 16 : Evolution du diamètre extérieur de tresse soumise au cisaillement.....	28
Figure 17 : Tresse de carbone	29
Figure 18 : Tresse cisailée.....	29
Figure 19 : Paramètres constitutifs des tresses (à gauche : tresse à plat, cisaillement nul - à droite : vue 3D)	30
Figure 20 : Définition des notions d'épaisseur de la tresse et du pli	31
Figure 21 : Paramètres constitutifs des tresses	31
Figure 22 : Tresseuse tubulaire simple [35]	32
Figure 23 : Procédé de tresse tressée sur le mandrin [41].....	32
Figure 24 : Influence de la vitesse de dépose sur la préforme [38]	33
Figure 25 : Influence du diamètre du mandrin sur l'état de déformabilité de la tresse [38]	33
Figure 26 : Tresseuses [23]	33
Figure 27 : Préformes tressées 3D [35]	34
Figure 28 : Pièces de connexion tressées [36]	34
Figure 29 : Géométrie préliminaire de tressage 3D [45].....	35
Figure 30 : a) Machine de tressage 3D - b) Géométrie préliminaire de tresse 3D [47]	35
Figure 31 : Etapes du procédé de préformage par ligatures.....	36
Figure 32 : Préforme non conforme (tresse de silice).....	37
Figure 33 : Préformage des plis - vue en coupe	37
Figure 34 : Sollicitations possibles sur tresse ligaturée.....	38
Figure 35 : Schéma d'une tresse mise à plat.....	39
Figure 36 : Préforme vue en coupe (tomographie X à 7,5 μm) [20]	40
Figure 37 : Paramètres "procédé" du préformage.....	40
Figure 38 : Tableau des paramètres constitutifs des tresses testées	41
Figure 39 : Tresse de silice.....	41
Figure 40 : Comportement des renforts fibreux en compaction [79].....	45

Figure 41 : Nesting (a) sans ; b) avec) [78]	45
Figure 42 : Configurations des tresses (A : fermée ; B : ouverte).....	46
Figure 43 : Configurations expérimentales d'empilements de la tresse.....	46
Figure 44 : Dispositif de compaction	47
Figure 45 : Empilement entre poinçons - Essai de compaction	47
Figure 46 : Maitrise de la largeur des échantillons (gauche : fermée ; droite : ouverte).....	48
Figure 47 : Gabarits pour garantir un état de cisaillement nul	49
Figure 48 : Echantillon de tresse fermée posée à plat	49
Figure 49 : Echantillon de tresse découpée ouverte.....	50
Figure 50 : Echantillons - configurations A et C.....	50
Figure 51 : Influence monopli/multipli sur l'allure des courbes de compaction (tresse ouverte ou fermée)	51
Figure 52 : Identification de la loi de comportement - cas du monopli.....	52
Figure 53 : Identification de la loi de comportement - cas du multipli	52
Figure 54 : Courbe typique d'essai de compaction de renforts [85].....	54
Figure 55 : Courbe typique de compaction d'un renfort tissé (monopli et multipli) [56].....	55
Figure 56 : Epaisseur en fonction de la pression.....	56
Figure 57 : a) Bias Extension Test ; b) Picture Frame Test [66]	58
Figure 58 : Eprouvettes de « Bias Extension Test » (a) état initial ; b) état cisailé) [60]	59
Figure 59 : Eprouvette de « Picture Frame Test » (a) état initial ; b) état cisailé) [67]	59
Figure 60 : Picture Frame Test [63]	60
Figure 61 : Force de cisaillement (renfort tissé) [64]	60
Figure 62 : Eprouvette de Bias Est - Tresse carbone (état initial)	61
Figure 63 : Moule pour éprouvette de Bias Test (fermé).....	62
Figure 64 : Moule de Bias Test (ouvert)	62
Figure 65 : Eprouvette sur le dispositif de Bias Test	63
Figure 66 : Dispositif de traction pour essai de Bias Test.....	63
Figure 67 : Eprouvette de Bias TEST - Tresse de carbone (apparition des plis)	64
Figure 68 : Loi de comportement - cisaillement - (Tresse carbone).....	65
Figure 69 : Angle de blocage [20].....	66
Figure 70 : Caractéristiques géométriques des tresses.....	67
Figure 71 : Echelle du pli ; échelle mésoscopique (maille élémentaire)	67
Figure 72 : Mesure de cisaillement - gabarits cylindriques (gauche) et octogonaux (droite).....	69
Figure 73 : Tresse sur gabarit : a) plat, b) cylindrique, c) octogonal	70
Figure 74 : Zones des points mesurables - gabarits cylindriques et octogonaux.....	71
Figure 75 : Evolution du cisaillement - Résultats expérimentaux	72
Figure 76 : Evolution du cisaillement -Tresse de carbone.....	72
Figure 77 : Evolution du cisaillement - Tresse de silice	73
Figure 78 : Classement des méthodes de représentation de la déformation de la tresse	73
Figure 79 : Influence du cisaillement sur l'épaisseur d'un renfort tissé [87]	75
Figure 80 : Epaisseur moyenne par couche en fonction du nombre de plis. Tresse de carbone	76
Figure 81 : Evolution de l'épaisseur en fonction du cisaillement.....	77
Figure 82 : A : Echelle macroscopique (préforme), B : échelle du pli, C : échelle mésoscopique (maille élémentaire)	83
Figure 83 : Maille élémentaire (B) dans l'empilement de plis droit (A)	84

Figure 84 : Position des mèches sur un pli conique	84
Figure 85 : Maille élémentaire - mèches courbes	84
Figure 86 : Maille élémentaire – Approche linéarisée	85
Figure 87 : Paramètres du modèle de la maille.....	85
Figure 88 : Indices des paramètres du modèle de la maille	86
Figure 89 : Définition de la maille élémentaire (tresse drapée sur le cône)	86
Figure 90 : Position de la maille sur le cône d'angle α	86
Figure 91 : Paramètres liés à la tresse	87
Figure 92 : Paramètres liés au procédé	87
Figure 93 : Paramètres constitutifs de tresse.....	87
Figure 94 : Tresse drapée sur cône	91
Figure 95 : Engauge Digitizer – Création du référentiel	91
Figure 96 : Mesures de la distance entre mèches.....	92
Figure 97 : Position des mailles sur le pli conique.....	93
Figure 98 : Evolution expérimental de l'angle de cisaillement- Carbone drapé sur cône.....	94
Figure 99 : Evolution expérimentale de l'angle cisaillement - Carbone, méthodes des gabarits	94
Figure 100 : Evolution du cisaillement - Comparaison carbone drapé/modèle.....	95
Figure 101 : Influence du choix de matériau.....	96
Figure 102 : Paramètres constitutifs de la tresse de carbone.....	97
Figure 103 : Paramètres à l'échelle du pli	100
Figure 104 : Schéma détaillé pour approche théorique (modèle droit)	100
Figure 105 : Coefficients des perméabilités	103
Figure 106 : Evolution de la fraction volumique de fibre en fonction du rayon	104
Figure 107 : Perméabilité (m^2) (gauche : planaire ; droite : transverse) en fonction de la fraction volumique de fibre [94].....	104
Figure 108 : Influence de l'épaisseur du pli sur la distance entre ligatures (modèle).....	105
Figure 109 : Influence de l'épaisseur du pli sur le diamètre extérieur (modèle)	106
Figure 110 : Influence de l'épaisseur de renfort sur la fraction volumique de fibre dans le pli (modèle)	107
Figure 111 : Influence de la distance entre ligatures sur le diamètre extérieur (modèle)	108
Figure 112 : Influence de l'orientation des plis sur le diamètre extérieur	110
Figure 113 : Influence du pas sur le diamètre extérieur	111
Figure 114 : Variation de la fraction volumique de fibre avec l'orientation des plis	112
Figure 115 : Influence de l'orientation des plis sur l'angle de cisaillement	113
Figure 116 : Dispositif d'injection en moule transparent.....	115
Figure 117 : Données relevées sur les prototypes	116
Figure 118 : Prototype - vue en coupe	117
Figure 119 : Création du référentiel sous Gimp	118
Figure 120 : Mesures de diamètres des ligatures sous Gimp.....	118
Figure 121 : Mesure du pas avec Gimp	118
Figure 122 : Etude de la forme des plis sur vue en coupe des prototypes	119
Figure 123 : Allure de la forme des plis des prototypes.....	119
Figure 124 : Influence du pas sur le diamètre (A = 3,2 mm ; B = 3 mm ; C = 2,8 mm ; D = 2,4 mm)...	120
Figure 125 : Préforme de silice ($e_{tresse} = 0,8$ mm) (Gauche : sèche - Droite : injectée)	121
Figure 126 : Pièce finale, vues en coupe (zoom sur la zone utile)	122

Figure 127 : Préforme sèche (compaction des plis faible) obtenue par tomographie à rayons X à 7,5µm [20]	122
Figure 128 : Orientation des plis autour des ligatures	123
Figure 129 : Compréhension du phénomène de courbure des plis	123
Figure 130 : Définition du paramètre Rc	124
Figure 131 : Influence du pas sur Rc	124
Figure 132 : Plis jointifs	125
Figure 133 : Modèle "courbe"	126
Figure 134 : Vue en coupe de préforme sèche par tomographie X à 7,5 µm	127
Figure 135 : Modèle « courbe/droit » [20]	128
Figure 136 : Etude le forme des plis, vue en coupe, plis surlignés)	129
Figure 137 : Plis vus en coupe - Relevé expérimental + Modèle	129
Figure 138 : Modèle « droit/droit »	130
Figure 139 : Vue en coupe de pièce injectée, compaction des plis importante	131
Figure 140 : Modèles envisagés - vue en coupe	132
Figure 141 : Modèles envisagés - vue en 3D	133
Figure 142 : Etapes du procédé de préformage par ligature de tresse	137
Figure 143 : Séquençage d'élaboration manuelle de composite	137
Figure 144 : Modélisations d'un automate pour le préformage	140
Figure 145 : Tresse plaquée sur la partie cylindrique du mandrin	141
Figure 146 : Tresse vrillée	142
Figure 147 : Dispositif de mesure de l'effort de serrage des ligatures	144
Figure 148 : Ligatures élastiques	147
Figure 149 : Gabarit de distance entre ligatures	148
Figure 150 : Dispositif de caractérisation de la raideur des élastiques	149
Figure 151 : Caractérisation de la raideur des élastiques	149
Figure 152 : Caractérisation du diamètre théorique de l'élastique	150
Figure 153 : Préforme non conforme - Fermeture de moule impossible	153
Figure 154 : Utilisation des bagues pour la maîtrise du diamètre extérieur	153
Figure 155 : Utilisation des bagues	154
Figure 156 : Poussoir conique	154
Figure 157 : Utilisation du poussoir conique	155
Figure 158 : Défauts potentiels	155
Figure 159 : Bague de serrage	156
Figure 160 : Bague de serrage à poussoir conique intégré	156
Figure 161 : Bague et gabarit en cours de préformage	157
Figure 162 : Fermeture de moule en cours de préformage	158
Figure 163 : Joint torique	159
Figure 164 : Séquençage du préformage automatisé	163

INTRODUCTION

La possibilité de réaliser des pièces structurales en matériaux composites est classiquement démontrée notamment dans le domaine de l'aéronautique [8-13]. La tendance actuelle dans l'industrie des matériaux composites à haute performance, appliquée plus particulièrement aux structures aéronautiques, est de produire des pièces aux dimensions de plus en plus importantes avec des géométries de plus en plus complexes afin d'intégrer de nombreuses fonctionnalités à la pièce mise en œuvre.

Le projet ANR LCM3M (2008-2012) s'inscrit prioritairement dans la problématique de compréhension des mécanismes multi-physiques de mise en forme des matériaux composites appliqués aux procédés LCM « Liquid Composite Molding ». Ce projet s'inscrit également dans une démarche de développement durable, on peut par exemple citer le remplacement de résines phénoliques pour les applications de résistance à haute température par des résines moins toxiques, utilisables sous certaines conditions avec des procédés LCM dans le cadre des réglementations européennes sur l'utilisation de substances chimiques [14].

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet LCM3M : « Procédés Liquid Composite Molding (LCM) nouveaux, Analyse multi-échelles » financé par la société ROXEL et l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche). Le projet LCM3M rassemble des partenaires académiques (Université d'Orléans, Mines de Paris, INSA Lyon, Université du Havre) ainsi que des partenaires industriels (Hexcel, EADS, Snecma, Roxel, l'Onera, Tensyl).

Ce programme est dédié aux procédés de fabrication des composites de la famille LCM, très répandue dans la production de pièces composites. Ce mode d'élaboration offre de nombreux avantages, notamment dans le cadre de la réduction des émanations de solvants grâce à la fabrication en moule fermé. La qualité des pièces obtenues, la répétitivité de ces procédés et la potentielle automatisation de la fabrication [15] sont des raisons qui expliquent l'attrait des industriels pour ce procédé mais aussi du point de vue des études de la littérature.

Dans le cadre de la fabrication de composites à l'aide de procédé appartenant aux technologies de « moule fermé », le renfort fibreux est mis en place dans un moule qui demeure fermé jusqu'à l'obtention du composite final rigidifié [16-18]. Cette famille LCM regroupe de nombreux procédés [19] dont le procédé de moulage par transfert de résine (ou Resin Transfer Molding pour RTM), qui est l'un des plus utilisés (Figure 1).

Le moulage par transfert de résine (RTM) est un procédé de fabrication des composites dans lequel une résine liquide de faible viscosité est injectée à basse pression à travers un renfort préalablement préformé dans une empreinte constitué du moule et du contre moule [22-25].

Celui-ci est amené à remplacer les procédés dits « au contact » ou de « projection simultanée » pour lesquels les émissions de composés polluants sont trop importantes pour être compatibles avec la législation européenne.

Le procédé de fabrication de composites par RTM se déroule en deux étapes distinctes (Figure 2).

La première phase, dite de préformage, est associée à la mise en place du renfort dans le moule. C'est à l'issue de cette étape que le moule est fermé pour le reste de la fabrication. Cette étape conditionne le placement des fibres dans le composite final ainsi que le taux volumique de fibre du composite rigide. Cette étape est suivie de la seconde étape du procédé de fabrication, l'injection de résine au travers du renfort, le plus souvent comprimé dans le moule. S'en suit la phase de polymérisation de la résine pour former le composite.

Nous pourrions voir sur le schéma de la Figure 1 suivante le système d'injection RTM :

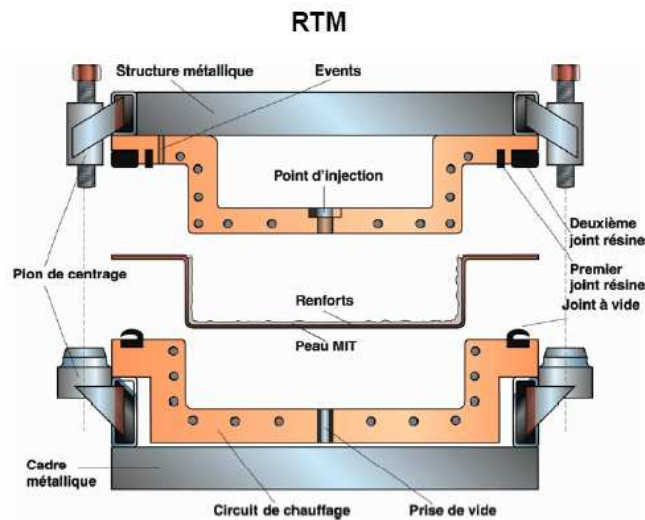


Figure 1 : Système d'injection RTM

Les étapes du procédé RTM sont définies sur les schémas de la Figure 2 :

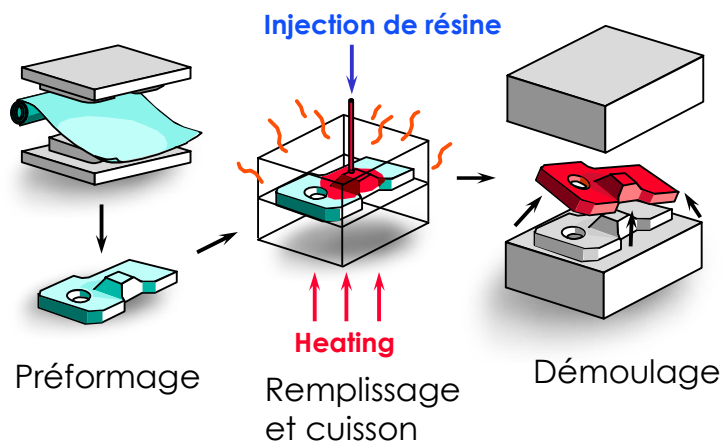


Figure 2 : Etapes de l'injection RTM

Bien que ce procédé soit relativement ancien, sa mise en œuvre reste complexe et nécessite un savoir-faire important fondé le plus souvent sur l'expérience acquise. De plus, il reste de nombreux verrous scientifiques et technologiques au niveau de la compréhension des phénomènes occurrents en cours de fabrication et pour lesquels les outils sont encore peu étudiés dans la littérature.

L'objectif de ce projet est une modélisation multi-échelle des procédés de mise en forme et une prise en compte du couplage fluide/solide déformable ainsi que de l'apparition de micro et macro vides. L'objectif majeur de cet outil concerne l'analyse fine des défauts inhérents aux procédés et aux renforts employés. En effet, traditionnellement, l'élaboration et le calcul des propriétés mécaniques des structures composites sont deux domaines traités séparément, pour des raisons culturelles et scientifiques, bien que l'élaboration et les propriétés structures soient liées. L'objectif de ce projet LCM3M est de développer une analyse multi-échelle du procédé à la structure : les hétérogénéités ne seront plus incluses sous forme d'hypothèses simplificatrices avant le calcul de structure mais directement issues d'une modélisation fine du procédé de mise en forme des composites. Ceci

permettant à terme de proposer un dimensionnement du procédé par la définition de critères géométriques et de santé matière.

Les enjeux scientifiques et technologiques consistent en :

- le développement de démonstrateurs de laboratoire et de nouvelles méthodes de caractérisation pour l'analyse de l'écoulement et de préformage. L'analyse structurale sera basée sur l'imagerie et sur la modélisation de mailles élémentaires
- la définition de critères de santé matière pour l'optimisation des procédés LCM et de la performance des matériaux composites
- la réalisation de démonstrateurs industriels tels que le développement de nouveaux matériaux 3D sur mesure, de nouvelles formulations résine/renfort et de nouveaux procédés LCM pour de nouvelles architectures des matériaux composites
- le développement de solutions transférables par des PME (notamment des bureaux d'étude) vers d'autres domaines avec une chaîne numérique ajustable en fonction du niveau de précision des résultats attendus

Les impacts de ce projet sont multiples, ils concernent :

- la démonstration des technologies nouvelles permettant de proposer une rupture dans l'utilisation des procédés LCM
- une meilleure compréhension des phénomènes et donc une amélioration des procédés existants
- une augmentation de la fiabilité des structures en matériau composite et la possibilité d'utiliser des préformes sur mesure
- la réduction des coûts dans la conception des produits par l'utilisation d'outils numériques innovants

La contribution du laboratoire Prisme et de la société ROXEL dans ce projet passe par le biais de deux thèses. Le premier travail de thèse, intitulée « Analyse expérimentale et numérique de la fabrication de pièces composites par le procédé RTM » [20], soutenue par Romain Agogué le 17 février 2011 à l'Université d'Orléans, financée par la société ROXEL et le Conseil Général du Loiret traite de la seconde phase de la fabrication de composite par le procédé RTM, l'étape d'imprégnation et les couplages fluide/solide déformable associés. L'approche multi-échelle y est abordée au travers d'outils que sont le pilote de laboratoire assurant l'imprégnation à l'échelle macroscopique et le développement de modèles analytiques et numériques à l'échelle mésoscopique et macroscopique.

La seconde thèse, traitant de la première étape du procédé de fabrication par RTM, le préformage des fibres, fait l'objet de l'étude présentée dans ce manuscrit.

L'objectif de ce travail de thèse est triple : il faut tout d'abord développer le protocole de fabrication pour garantir l'obtention de préformes conformes de manière répétable et à l'aide d'un procédé de fabrication viable du point de vue industriel. Pour cela, une compréhension et une maîtrise des phénomènes survenant en cours de process sont nécessaires. Le second objectif consiste à prévoir la faisabilité d'une forme de pli donnée à partir d'un matériau connu et de paramètres procédés.

Le dernier objectif est le développement d'un outil permettant, de manière théorique et prédictive :

- d'assurer la faisabilité d'une pièce donnée (dont on connaît les dimensions, avec un matériau identifié et connu)

- de fournir les paramètres « procédé » optimum qui permettront sa fabrication future

Cet outil sera par exemple indispensable pour valider un changement de matériau (paramètres des tresses), de géométrie, de cahier des charges, ...

A l'issue de ces deux travaux de thèse effectués au laboratoire Prisme en collaboration avec la société ROXEL, les objectifs du projet d'étude LCM3M pour le laboratoire Prisme et la société ROXEL sont atteints. Les résultats obtenus permettent donc des avancées technologique et scientifique conséquentes dans le domaine de la compréhension des phénomènes physiques apparaissant en cours de fabrication de pièces composites particulières par le procédé RTM. Les causes de défauts potentiels liés à l'une ou l'autre des étapes du procédé RTM sont identifiées et connues. Le lien entre les étapes de préformage et d'injection ainsi que le couplage hydromécanique en cours d'injection sont identifiés, de même que les conséquences sur la santé matière du composite final obtenu. Les étapes du procédé ont été expérimentalement optimisées à l'aide de pilotes de laboratoire et pilotes industriels et des paramètres procédés optimum sont accessibles en fonction des matériaux utilisés et des résultats attendus.

Dans le cadre de cette thèse, il faut répondre à la problématique industrielle relative à la faisabilité du procédé RTM pour la fabrication de protections thermiques tout en étudiant les phénomènes multi-échelles sur les déformations subies par le renfort en cours du procédé de préformage pour satisfaire les objectifs du projet LCM3M. Ce manuscrit est découpé en quatre chapitres.

Le contexte industriel, les contraintes liées à l'activité particulière de la société ROXEL et plus particulièrement un état des lieux des composites actuellement utilisés dans la fabrication des protections thermiques sont traités dans le **Chapitre 1**.

Les études préliminaires aux travaux de thèse, notamment en ce qui concerne le choix de matériau sous forme de tresse et la détermination du protocole de préformage ainsi que les critères permettant de qualifier les préformes obtenues y sont présentés.

Un état de l'art sur la fabrication, les utilisations les plus courantes des tresses ainsi que les paramètres associés à la fabrication des tubes de protections thermiques concluent ce premier chapitre.

Dans le cadre de cette étude, le préformage présente deux étapes distinctes au cours desquelles la tresse est soumise à des sollicitations en cisaillement puis en compaction, le **Chapitre 2** expose donc un état de l'art des études bibliographiques menées sur la caractérisation du comportement des tresses soumises à ces types de sollicitations. Au cours de ce même chapitre, ces aspects bibliographiques sont suivis de la présentation des résultats des essais menés pour caractériser expérimentalement le comportement des tresses lors de sollicitations en compaction et en cisaillement.

La détermination de ces lois de comportement est primordiale pour modéliser les déformations subies par le renfort en cours de préformage.

Dans le **Chapitre 3**, nous cherchons dans un premier temps à établir des modèles géométriques qui prédisent, à l'échelle de la maille sur le pli, l'état de déformation du renfort due au cisaillement ; ainsi que la quantité de renfort et sa répartition dans le pli. Ces aspects étant des critères prépondérants dans la validation de la faisabilité du procédé. La seconde partie traite de la modélisation du préformage à l'échelle du pli dans la préforme. La forme géométrique globale du pli est étudiée à partir de nombreuses données expérimentales issues de la fabrication de prototypes. En effet, une

campagne expérimentale d'élaboration de 22 prototypes est mise en place et l'étude détaillée de la forme des plis en cœur de pièces de ces prototypes permet la compréhension des phénomènes de déformation du pli. Les paramètres liés au matériau et au procédé qui régissent la forme globale du pli sont donc mis en évidence et leur influence sur les résultats obtenus est étudiée.

Ces modèles multi-échelles peuvent être concaténés pour constituer un outil prédictif global de validation de faisabilité du procédé de préformage. Cet outil vise à permettre une fabrication future des protections thermiques par le procédé RTM optimisée et adaptable en cas de changement de géométrie de pièce ou de changement de fournisseur de matières premières.

Toujours dans une optique de mettre en place la fabrication des protections thermiques par le procédé RTM au sein de la société ROXEL, le détail de la mise en œuvre concrète est exposé dans le **Chapitre 4**. Le protocole de préformage y est détaillé, avec les outillages utilisés, leur fonction, leur mode d'utilisation, les améliorations apportées ainsi que les recommandations issues de l'expérience acquise pendant les campagnes d'élaboration de prototypes. Les paramètres « procédé » et « matériau » optimum y seront listés. Les modes de contrôle et de maîtrise des paramètres « procédé » en cours de préformage sont aussi présentés.

La fin du manuscrit décrit les étapes de conception préliminaire explorées pour prévoir une approche industrielle d'automatisation éventuelle du procédé et offre une ouverture vers les perspectives envisagées pour optimiser le préformage.

Ce manuscrit se termine par un dernier chapitre consacré à l'ensemble des conclusions et des travaux qui en découleraient.

CHAPITRE 1 : Du contexte industriel aux objectifs de la thèse

1 Introduction générale

Ces travaux de recherche se sont inscrits dans le cadre du programme ANR LCM3M, présenté en introduction de ce manuscrit, sur des problématiques de la société Roxel.

1.1 Contexte industriel

La société Roxel conçoit, développe et produit une grande variété de propulseurs. Ils sont utilisés dans l'assemblage de missiles, d'armements aéroportés, de munitions ainsi que de nombreux composants pyrotechniques (tels que des impulseurs, allumeurs, éjecteurs de sous munitions et autres générateurs de gaz).

La principale activité développée en France au sein de la société Roxel réside essentiellement dans la partie propulsion des missiles, c'est-à-dire le moteur et l'allumeur. Les activités de la société sont étroitement liées à la réalisation des structures de propulseurs (Figure 3) et les protections thermiques, pour des missiles d'une large gamme d'application (air-air, air-sol, sol-air, anti-navires, anti-pistes, anti-chars, ...).

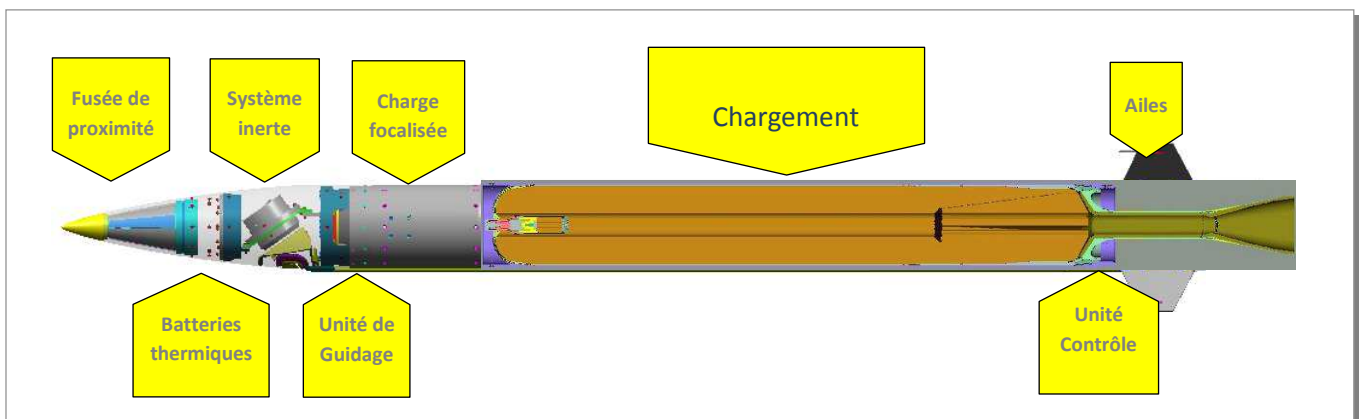


Figure 3 : Coupe de missile [1]

Les propulseurs développés par la société Roxel comportent deux parties distinctes contenues dans une enveloppe métallique globale. La première partie est constituée du chargement, la plupart du temps, un bloc usiné de propergol solide de plusieurs dizaines de kilogrammes qui a pour but de créer la poussée nécessaire au tir. Cette étude est plus particulièrement axée sur la seconde partie du propulseur, le fond arrière (Figure 4).

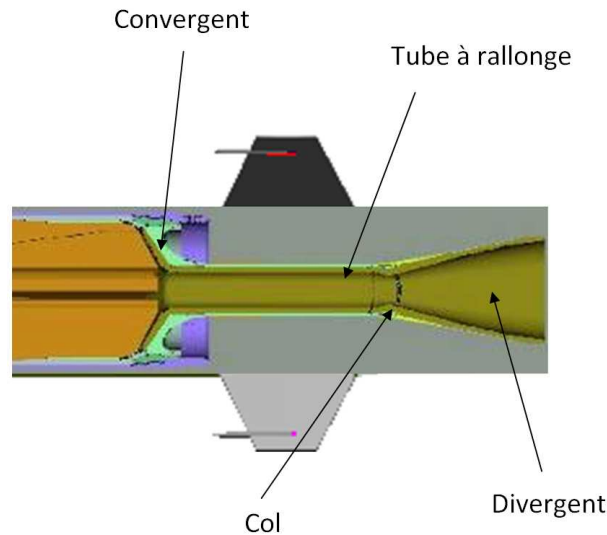


Figure 4 : Fond arrière de missile (vue en coupe) [1]

Il est constitué de plusieurs parties de protections thermiques : le convergent, le tube à rallonge, le col et le divergent. Leur géométrie permet de contenir et d'accélérer le flux gazeux selon des lois régies par la mécanique des fluides. Par exemple, au passage du col situé entre le tube à rallonge et le divergent, le flux de gaz passe d'un état subsonique à un état supersonique. De même, l'angle d'ouverture du divergent aura une influence sur la vitesse du propulseur et donc sur sa portée.

Ces pièces, appelées protections thermiques, sont donc des pièces maîtresses du propulseur qui n'ont donc pas uniquement une fonction de protection de la température.

Les protections thermiques doivent supporter un flux de gaz à des températures allant de 1250 à 2700°C pour des durées de quelques secondes à quelques minutes. Elles seront donc constituées de matériaux ablatifs se consommant sous l'action conjuguée d'un flux gazeux très chaud et de l'érosion mécanique.

Comme nous l'avons vu précédemment, il est indispensable que les protections thermiques restent conformes à leur géométrie d'origine. Pour se faire, il faut que leur résistance à l'ablation soit optimisée. Cette résistance est liée à la fois au type de matériau utilisé et à leur mise en place dans le matériau composite. Actuellement, les protections thermiques sont en composites fabriqués à partir de renforts tissés et l'orientation des fibres est donc une des principales contraintes de la fabrication des protections thermiques.

Les orientations optimales des fibres sont symbolisées sur la Figure 5 :

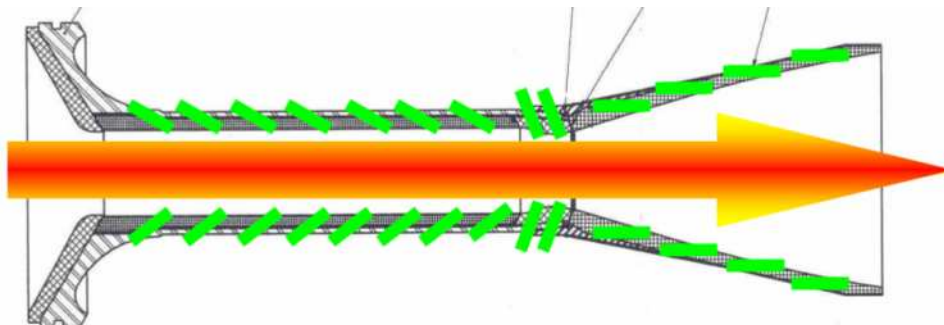


Figure 5 : Fond arrière de propulseur [1]

Ainsi, dans le tube à rallonge, il est nécessaire que les fibres soient orientées à 15° par rapport au flux de gaz.

1.2 Caractéristiques des matériaux ablatifs

Les protections thermiques, notamment dans le cadre de leur utilisation dans les zones chaudes telles que les cols de tuyères ou les divergents, ont pour intérêt majeur de protéger la structure métallique des propulseurs. Les protections thermiques ont été développées pour permettre l'absorption d'une partie du flux de chaleur, elles doivent également résister à l'érosion mécanique du flux gazeux transportant des particules. La réaction endothermique de pyrolyse ayant lieu sur la surface de la protection thermique augmente encore son érosion, tout en formant un bouclier thermique protégeant la structure [2-6].

Les matériaux ablatifs sont donc des matériaux se consommant sous l'action conjuguée d'un flux gazeux très chaud et de l'érosion mécanique [21].

En effet, l'énergie nécessaire pour échauffer puis pour pyrolyser le matériau, ajoutée à l'énergie de réaction avec les gaz de tuyère à la surface des protections thermiques, permet d'évacuer une partie importante de l'énergie thermique créée par le passage à très haute vitesse des gaz chauds issus de la combustion de propergol, responsables de la poussée. Encore faut-il que la partie intacte des protections thermiques, non attaquée par ces réactions d'ablation, soit suffisamment importante et solide pour que l'intégrité de la tuyère soit assurée jusqu'à la fin du tir du propulseur.

À partir d'une certaine température dépendant de la matrice et de la vitesse de chauffe (en général entre 300 °C et 400 °C), la résine se décompose avec production d'espèces gazeuses et formation d'un résidu poreux. Ce résidu est constitué des produits de pyrolyse de la matrice, principalement du carbone vitreux.

A ce propos, la société Roxel classe les qualités ablatives des résines qu'ils utilisent à l'aide de leur taux de coke, ce taux de coke est directement lié à la quantité d'atomes de carbone présents dans les chaînes du polymère, surtout du nombre de cycles aromatiques. Cette grandeur est mesurée par la quantité de matière imbrûlée sous azote.

Pour un matériau subissant un échauffement en paroi, l'état actuel des connaissances permet de proposer une structuration du matériau en six zones décrites en se rapprochant de la surface échauffée. Ces zones sont présentées sur la Figure 6.

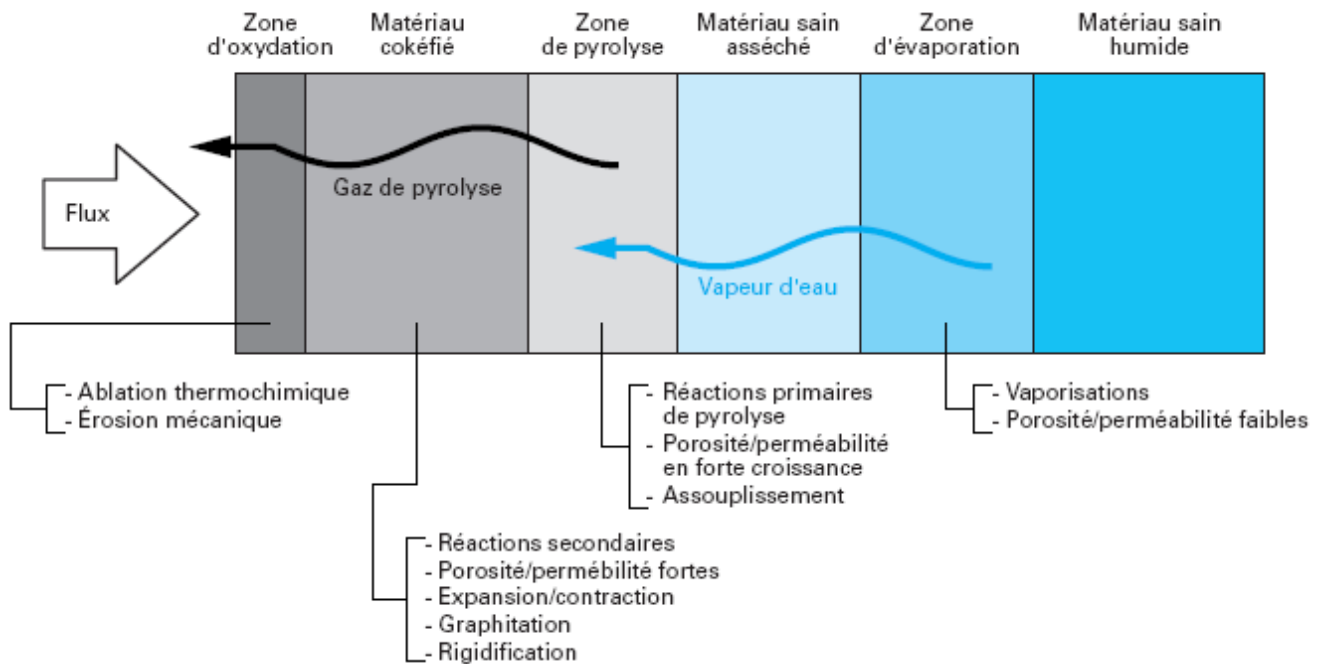


Figure 6 : Strates formées au cours de l'ablation [7]

La protection thermique, matériau isolant, absorbe l'énergie thermique transférée et protège ainsi les parties structurales froides du propulseur.

Sur la vue en coupe (Figure 7), nous pouvons constater l'érosion importante de la protection thermique après un tir pour un tube à rallonge de fond arrière de propulseur fabriqué par la société Roxel :

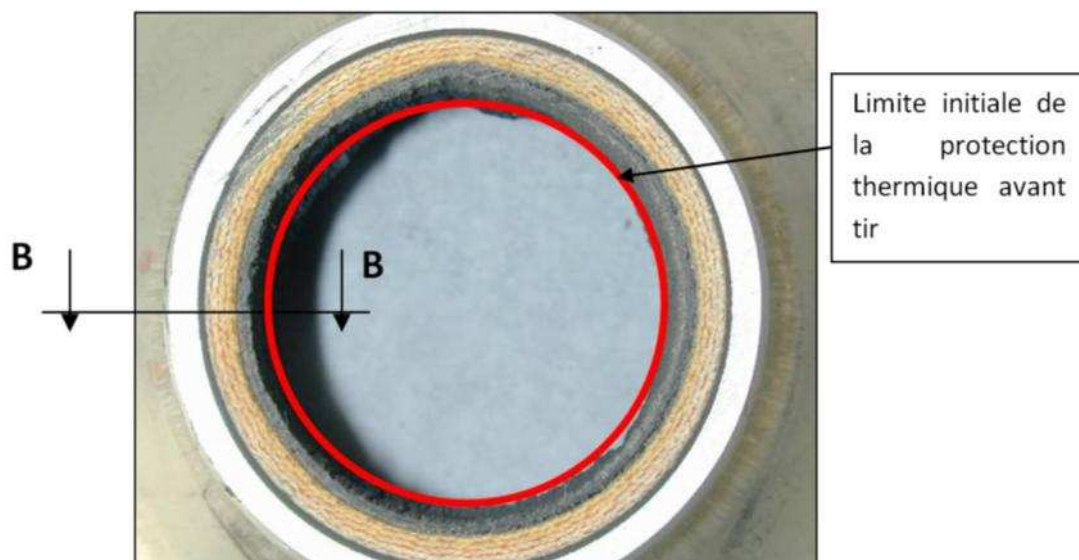


Figure 7 : Coupe B-B transversale [1]

Comme nous avons pu le découvrir sur la Figure 6 précédente, le matériau soumis à un important flux de chaleur se décompose en différentes zones de plus en plus dégradées en se rapprochant de la surface échauffée.

La Figure 8 montre distinctement quatre d'entre elles (flèches rouges) :

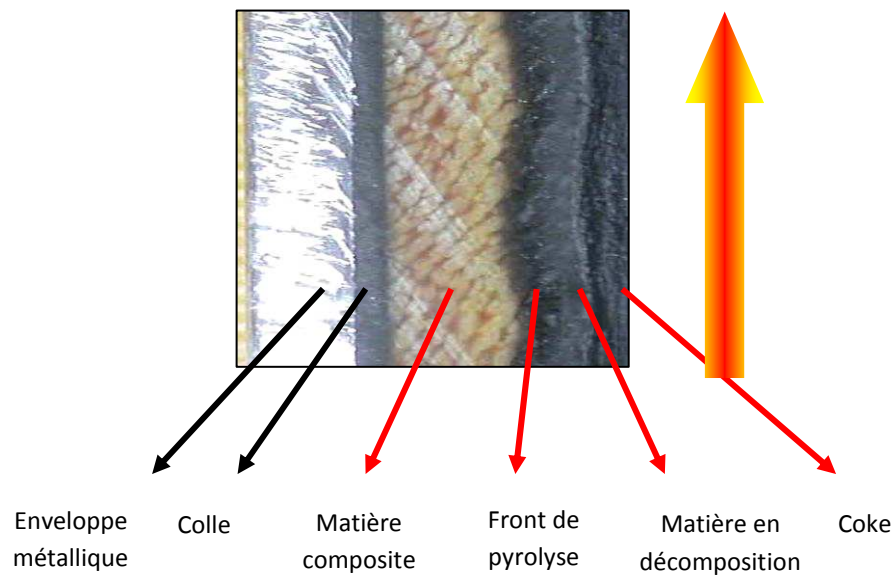


Figure 8 : Coupe B-B longitudinale [1]

Le cahier des charges de la société Roxel en ce qui concerne les protections thermiques stipule qu'à la fin du tir, l'épaisseur de matière composite « intacte » restante doit être au moins égale à la moitié de l'épaisseur initiale de la protection thermique. Cette caractéristique dépendra à la fois du choix des matériaux mais aussi de l'arrangement des renforts dans le composite final.

2 Analyse des procédés de fabrication des pièces composites

2.1 Procédé actuel

Actuellement, les protections thermiques de la société Roxel sont fabriquées à l'aide de pré imprégnés (tissu de silice / résine phénolique). Les tubes à rallonge sont obtenus par enroulement sur un mandrin à base conique (Figure 9) de bandes de pré imprégnés découpées à 45° dans un tissu.

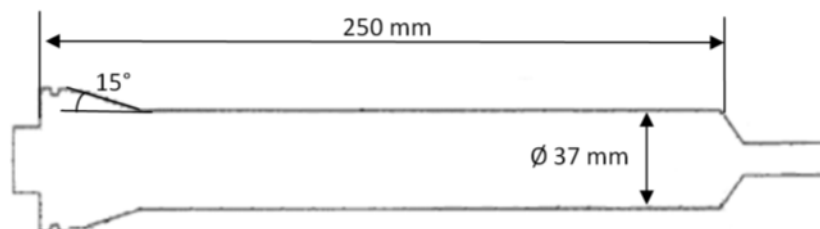


Figure 9 : Mandrin à base conique

L'enroulement détermine le pas d'empilement des plis coniques dans la préforme. Ce paramètre est prépondérant pour la quantité de matière introduite dans le moule à l'issue de l'étape de préformage.

Les résines des pré-imprégnés contiennent des additifs de type élastomères afin de les rendre plus « souples » pour supporter la forte déformabilité sur le bord externe induite par l'enroulement conique. Les préformes ainsi obtenues sont ensuite recouvertes de tissu d'arrachage pour faciliter le démoulage ; le tout est introduit dans un tube de caoutchouc souple, fermé à ses extrémités par des « tissus-filtres » au travers desquels sera retenue la résine en excédent au cours de la cuisson en autoclave sous pression négative.



Figure 10 : Protection thermique "brute"

Les pièces ainsi obtenues sont ensuite usinées afin d'obtenir une protection thermique conforme aux contraintes physiques et métriques définies au cours de la conception (Figure 11) :

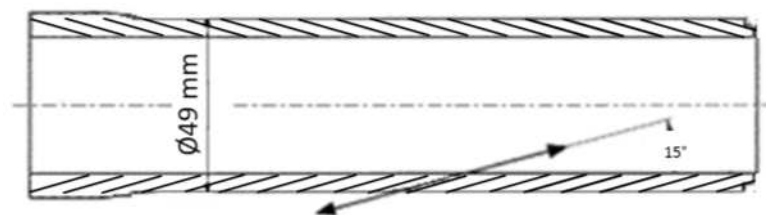


Figure 11 : Protection thermique usinée (épaisseur finale 6 mm env.)

Cette technique est longue et nécessite de nombreux essais pour obtenir des pièces composites de qualité, conformes aux contraintes liées à leur utilisation future en tant que protection thermique. La principale difficulté de cette méthode est l'utilisation de matière première très spécifique préparée sur mesure qui entraîne un coût important ainsi qu'une certaine dépendance par rapport au fabricant. Cette modification de procédé de fabrication permet aussi la maîtrise des dégagements de composés polluants (type COV) grâce à l'utilisation d'un moule « fermé ».

De plus, le choix des matériaux associés dans le pré imprégné est limité aux propositions des fournisseurs de ces produits et il n'est donc pas possible de fabriquer un composite « à la carte ». Le stockage des pré imprégnés doit se faire au froid et la conservation ne doit pas excéder quelques mois, rarement plus d'un an.

Toutes ces limites des procédés actuellement utilisés ont conduit la société Roxel à étudier d'autres modes de fabrication de pièces composites, notamment le procédé RTM (Resin Transfer Molding).

2.2 Utilisation du RTM : Importance du choix de matériau

Le choix de la résine est fortement lié au procédé de fabrication, en effet, il est impossible d'utiliser une résine très visqueuse dans un système RTM afin d'augmenter les interactions résine/fibre au cours de l'injection et donc de s'affranchir de potentiels défauts tels que des porosités voire des zones sèches. Le choix du renfort quant à lui est lié à la fois au procédé de fabrication mais aussi à la

géométrie de la pièce à concevoir. La faisabilité de l'étape d'injection de la résine est aussi dépendante de la structure de la préforme, du positionnement des fibres dans le moule, de leur homogénéité et surtout de la fraction volumique de fibres.

2.3 Fabriquer un tube à rallonge par RTM : Objectifs et contraintes

Dans le cadre des travaux de thèse en partenariat avec la société Roxel, l'objectif est de démontrer la faisabilité puis d'optimiser le procédé pour la fabrication de protections thermiques de tubes à rallonge par RTM, afin de répondre aux exigences du cahier des charges de Roxel.

Les propriétés attendues, notamment de résistance à l'ablation, seront liées au choix du couple de matériaux composant le tube associés à des contraintes de mise en place des fibres dans le composite.

Les discussions avec la société Roxel ont permis de lister les contraintes techniques à prendre en considération afin d'éviter les défauts. Les préformes prêtes à l'injection devront satisfaire les conditions suivantes :

- Orientation des plis dans le tube : 15° ($+5^\circ$ de tolérance) par rapport à l'axe du tube
- Fraction volumique de fibres V_f : $60\% \pm 10\%$
- Homogénéité de la fraction volumique : ΔV_{f_i} max = 10% entre volumes élémentaires de référence

Trois types de variation de fraction volumique de fibre sont définis (Figure 12):

- ΔV_{f_r} : l'homogénéité dans le sens radial de la préforme (volume élémentaire de référence = épaisseur de la préforme * pas d'empilement, voir chapitre 3.5)
- ΔV_{f_h} : l'homogénéité dans le sens longitudinal de la préforme (volume élémentaire de référence = hauteur de la préforme * pas d'empilement)
- $\Delta V_{f_{pli}}$: l'homogénéité le long d'un pli (volume élémentaire de référence = volume du pli)
- Porosités : taux surfacique de porosité maximal admis : 15% sur coupe test en cœur de pièce ; Taille maximale admise : diamètre = 0,5 mm

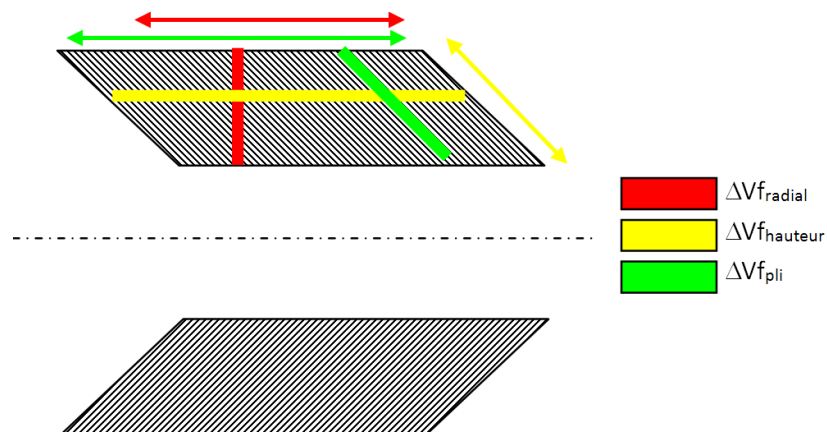


Figure 12 : Définition des ΔV_f

Le critère de porosité est essentiellement piloté par la seconde étape du procédé RTM, l'injection de résine. Toutefois, la qualité de la préforme (via la quantité de matière introduite et l'homogénéité de la répartition principalement) détermine un élément essentiel de l'injection, la perméabilité de la

préforme qui est l'un des paramètres clés de l'étape d'injection. Il faut donc veiller à fournir une préforme « injectable » (où l'écoulement de résine est possible) [20].

Cette étude concerne la première étape du procédé RTM, le préformage du renfort dans le moule, le cahier des charges industriel peut être « traduit » du point de vue de la préforme :

- Orientation des plis dans la préforme : 15° ($+5^\circ$ de tolérance) par rapport à l'axe du mandrin
- Fraction volumique de fibres introduites dans le moule : $60\% \pm 10\%$
- Fraction volumique de fibres homogène d'après les trois types de ΔV_f
- Le diamètre extérieur de la préforme ne doit pas excéder le diamètre intérieur du contre-moule afin de permettre l'installation de l'outillage pour l'injection

Un usinage de la pièce composite finale (1mm à l'intérieur et à l'extérieur) est envisagé avant l'intégration dans le propulseur afin de donner à la pièce une géométrie particulière pour son intégration, cette possibilité donne un certain nombre de libertés quant à la qualité de la préforme (au sens des contraintes énoncées ci-dessus) sur ses bords.

Les contraintes du cahier des charges à respecter sur la préforme sont rassemblées dans le tableau de la Figure 13 suivante :

Paramètres à maîtriser (cahier des charges)	Valeur cible	Tolérance
Orientation des plis par rapport à l'axe du tube	15°	$+5^\circ$
Fraction volumique globale introduite dans le moule	60%	$\pm 10\%$
<i>Homogénéité de la fraction volumique</i>		
Dans le sens radial ΔV_{fr}		10%
Dans le sens longitudinal ΔV_{fh}		10%
Le long du pli ΔV_{fpli}		10%
Diamètre extérieur de la préforme	54 mm	- 1 mm
<i>Porosités</i>		
Taux surfacique sur coupe longitudinale maximal	15%	
Diamètre maximal admis des porosités	0,5 mm	

Figure 13 : Tableau récapitulatif du cahier des charges

La première étape de l'étude de faisabilité consiste à trouver un couple matériau/procédé de préformage permettant de fabriquer un tube à rallonge conforme aux contraintes énoncées précédemment.

3 Choix du couple « Matériau /Procédé »

3.1 Choix du renfort

Le choix de la matière première constituant le renfort est piloté par les propriétés ablatives attendues pour le composite final. Pour l'étude, ce sont la silice, le basalte et le carbone qui pourront être retenus. Il faut néanmoins définir la structure sous laquelle doivent se présenter ces matériaux pour permettre la fabrication des protections thermiques de tube par RTM.

Afin de maîtriser l'orientation des plis inclinés à 15° par rapport à l'axe du tube, le renfort est drapé sur un mandrin à base conique (Figure 9) dont les dimensions de la partie conique sont reportées sur la Figure 14 suivante :

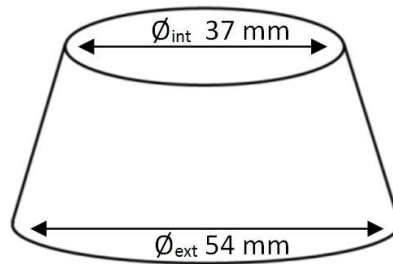


Figure 14 : Cône de drapage

La structure de renfort choisie doit être suffisamment déformable pour supporter les déformations sur la partie externe tout en permettant simultanément un ajustement serré dans la partie interne du tube pour garantir la fraction volumique de fibres et l'homogénéité.

Certaines solutions, telles que l'utilisation d'une machine à tricoter pour faire des préformages sur mesure en 3D, l'utilisation de fibres courtes ou encore l'enroulement de bandes de feutre sont rapidement écartées du fait de la difficulté de mise en œuvre ou de leur incapacité à maîtriser une orientation à 15° des renforts dans le tube.

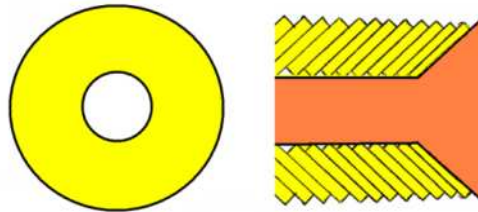


Figure 15 : Anneaux découpés et empilés

Avec des anneaux découpés dans une structure « feutre » (Figure 14), l'orientation est parfaitement maîtrisée dans le cadre de l'empilement sur un mandrin à base conique. Cette solution est cependant inenvisageable du point de vue industriel en termes de quantité d'essais et préparation.

Nous devons garder à l'esprit que le mode de déformation privilégié des renforts avec mèches entrelacées est le cisaillement. Dans le cadre de structures de type tresses, le cisaillement se traduit par un élargissement ou un rétrécissement du diamètre (Figure 15 et Figure 16), l'hypothèse de non-glissement des mèches autour de leur intersection, communément admise pour les renforts tissés, est faite ici.

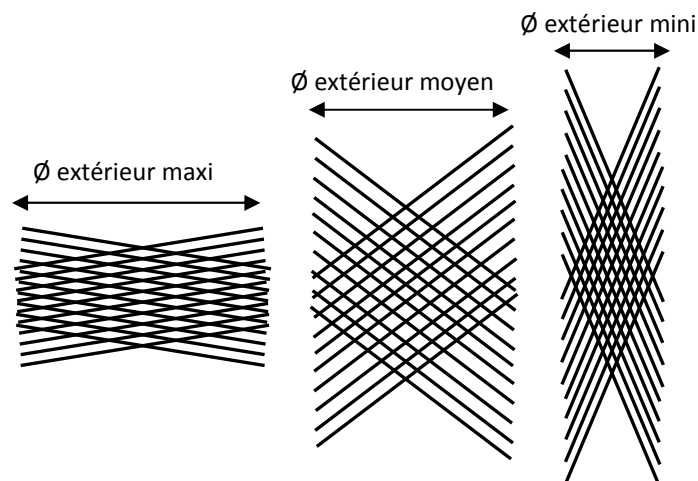


Figure 16 : Evolution du diamètre extérieur de tresse soumise au cisaillement

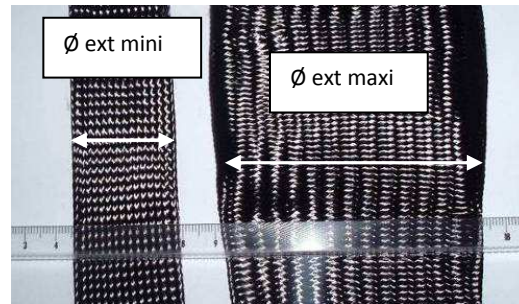


Figure 17 : Tresse de carbone

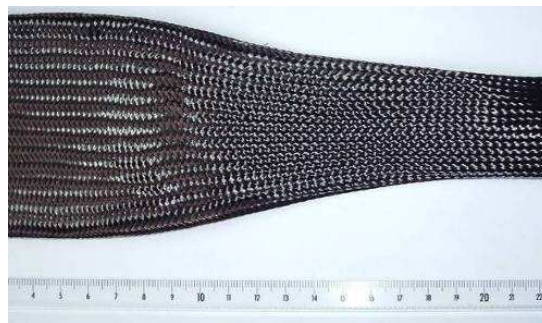


Figure 18 : Tresse cisailée

Une forme conique est donc naturellement obtenue à partir d'une tresse (Figure 18). Le choix de ce type de structure est ainsi bien adapté aux contraintes techniques liées à la maîtrise de l'orientation des plis.

La structure « tresse » pour le renfort est par conséquent choisie pour la fabrication des tubes de protections thermiques par le procédé RTM.

Au cours des études mises en œuvre dans ce manuscrit, deux tresses sont testées, une tresse de carbone et une tresse de silice.

3.2 Etat de l'art sur les structures de type « tresse »

De nombreuses publications portent sur les structures composites à base de tresses [26]. Les applications de ces tresses se retrouvent dans différents secteurs : l'aéronautique et l'aérospatial, la marine ou la construction de bâtiments [27,28]. Parmi ces publications, un certain nombre concernent la prédiction des caractéristiques mécaniques de ces structures [29 -34].

Dans cette partie, les paramètres constitutifs des matériaux sont présentés ; un bref état des lieux des modes de fabrications des différentes tresses, des utilisations associées est ensuite proposé, notamment avec quelques exemples de réalisations particulières. Enfin nous ferons le point sur les contraintes liées aux spécificités techniques de l'étude et verrons quelles sont les solutions envisageables.

3.2.1 La fabrication des tresses

a. Les paramètres constitutifs

Il s'agit de paramètres intrinsèques au matériau, qui permettent de le définir très précisément et sont liés à son mode de fabrication, à sa structure ainsi qu'aux matières premières utilisées.

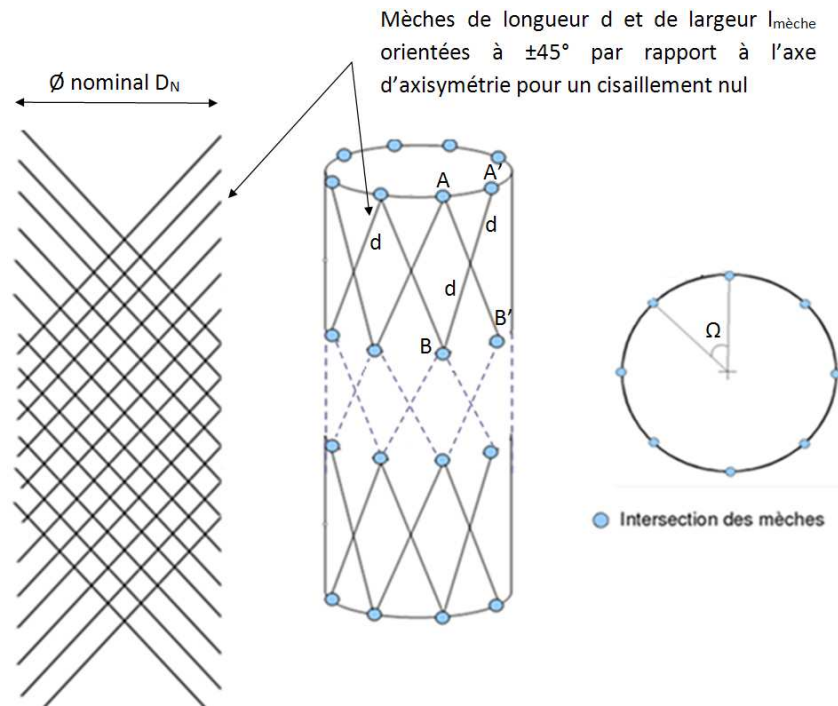


Figure 19 : Paramètres constitutifs des tresses (à gauche : tresse à plat, cisaillement nul - à droite : vue 3D)

i. Le diamètre nominal de la tresse

Il s'agit du diamètre pour lequel le cisaillement entre les mèches constituant la tresse est nul, c'est-à-dire lorsque les mèches forment un angle droit. Il est noté D_N et s'exprime en millimètres. C'est le paramètre prépondérant dans la description d'un matériau de type tresse.

ii. Le nombre de mèches sur la circonférence

Il est noté N_M . Cet aspect des tresses est rarement mis en avant par les constructeurs. Il influence la taille des mailles élémentaires. Le nombre de mèche sur la circonférence dépend entre autres de la largeur et de la constitution des mèches.

iii. La longueur entre intersections de mèches

Cette longueur, notée d (Figure 19) et exprimée en millimètres, est déterminante au niveau de la taille des mailles élémentaires.

iv. La largeur des mèches

Notée $l_{\text{mèche}}$ (Figure 19) et exprimée en millimètres, elle est une des conséquences du choix de *rovings* utilisés lors de la fabrication de la tresse. Elle est mesurée en cours de préformage, sa variation est faible avec le cisaillement dans le domaine de déformation tolérable par la tresse.

v. La masse linéique des mèches

Notée $m_{l_{\text{mèche}}}$, elle est une autre des conséquences du choix de *rovings* utilisés lors de la fabrication de la tresse. Elle est exprimée en grammes par mètre linéaire de mèche.

vi. L'épaisseur de la tresse

Elle est liée à la taille des mèches de *roving* utilisé pour former les mèches mais aussi à l'arrangement des mèches au moment du tressage. On parlera essentiellement de deux types d'épaisseurs : celle

d'une couche « matériau » e_{tresse} et une épaisseur dite de « tresse repliée » (contenant deux couches) ou de pli e_{pli} qui sera supposée égale au double de l'épaisseur dite « matériau ». Ces épaisseurs sont représentées sur Figure 20 suivante :

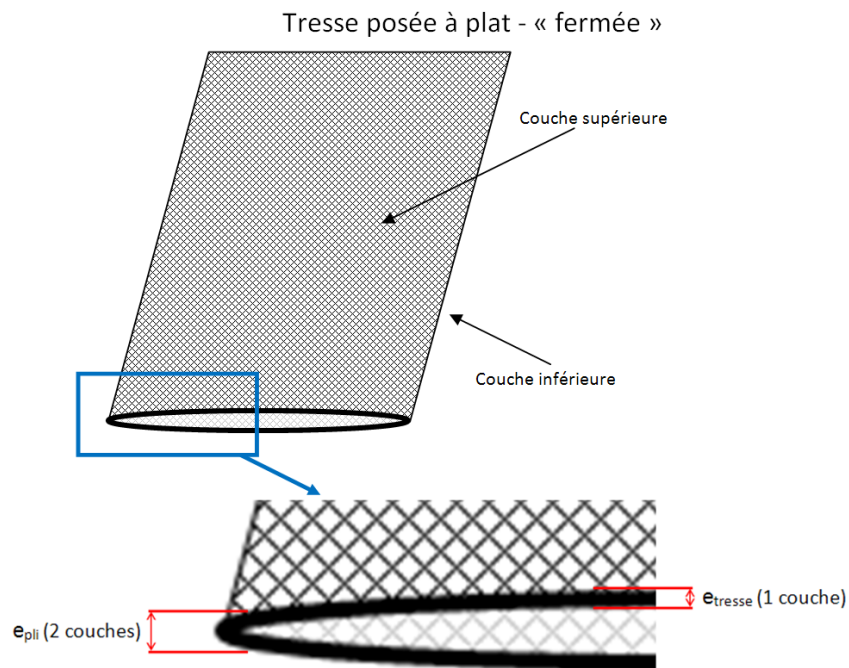


Figure 20 : Définition des notions d'épaisseur de la tresse et du pli

Les paramètres constitutifs des tresses sont donc résumés dans le tableau de la Figure 21 suivante :

Paramètres constitutifs des tresses	unités
Diamètre nominal D_N	mm
Nombre de mèches sur la circonférence N_M	-
Longueur entre intersections de mèches d	mm
Largeur de mèches $l_{\text{mèche}}$	mm
Masse linéique des mèches m_l	gr/mlinéaire
Epaisseur de la tresse e_{tresse}	mm

Figure 21 : Paramètres constitutifs des tresses

b. La fabrication des tresses

Les tresses sont fabriquées à l'aide de tresseuses (Figure 17 et Figure 18) qui entrecroisent des mèches, le plus souvent du *roving* [35] :

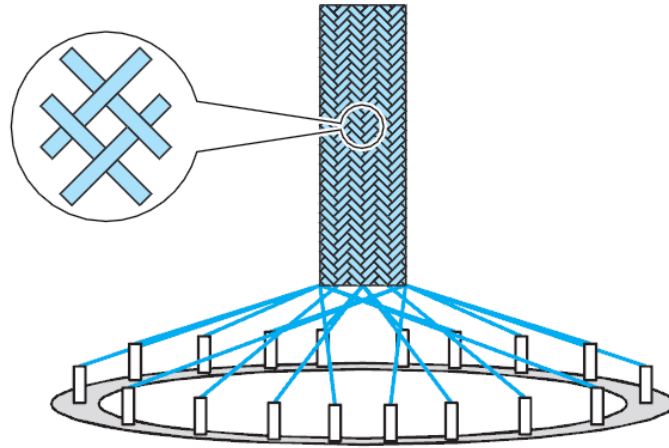


Figure 22 : Tresseuse tubulaire simple [35]

Ces tresseuses comprennent un ensemble de supports de bobines des mèches, les fuseaux, qui se déplacent à l'intérieur d'un guide. L'angle entre les mèches et l'axe du cylindre (« Braid angle ») est un paramètre essentiel du procédé.

Il est souhaité constant sur mandrin cylindrique, et est déterminé [37] à partir des paramètres procédé, notamment à l'aide du rapport entre la vitesse de la traverse et la vitesse de rotation du support des fuseaux.

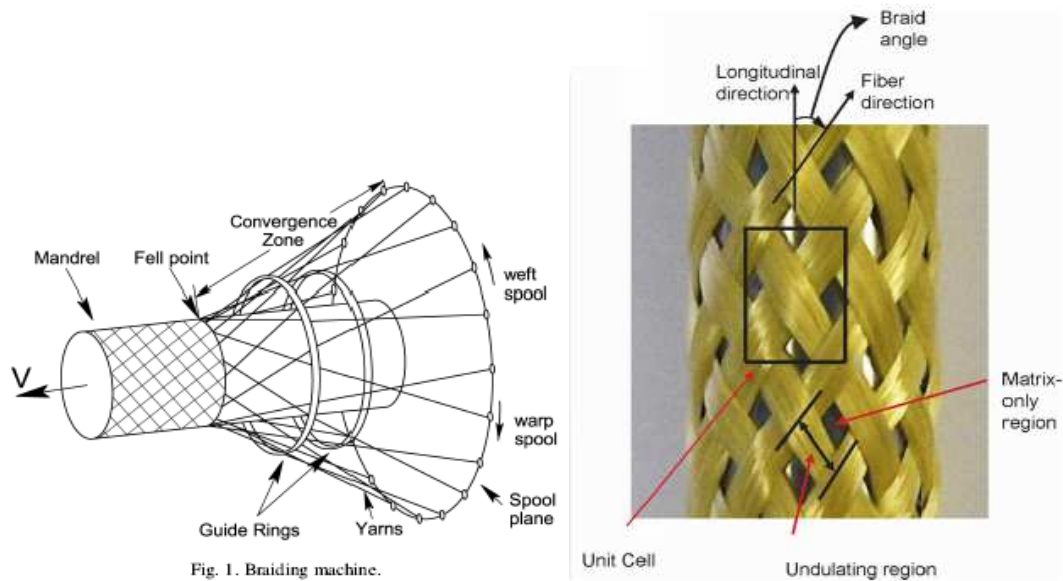


Figure 23 : Procédé de tresse tressée sur le mandrin [41]

Sur ces aspects liés au procédé de dépose, des modèles sont développés et permettent d'étudier l'influence des paramètres procédé en fonction des préformes obtenues (Figure 24 et Figure 25 [38]).

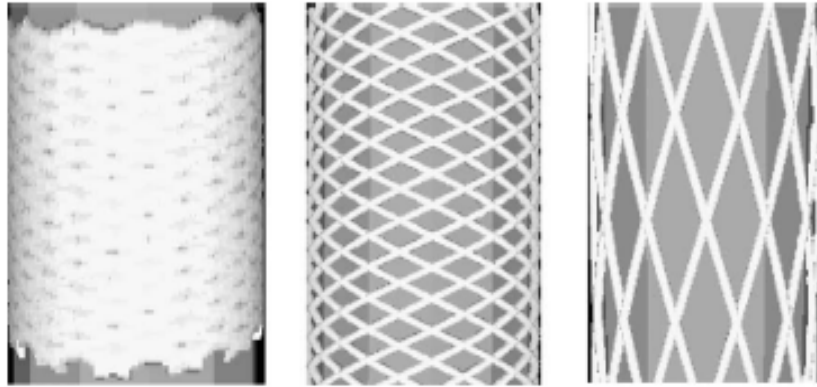


Figure 24 : Influence de la vitesse de dépose sur la préforme [38]

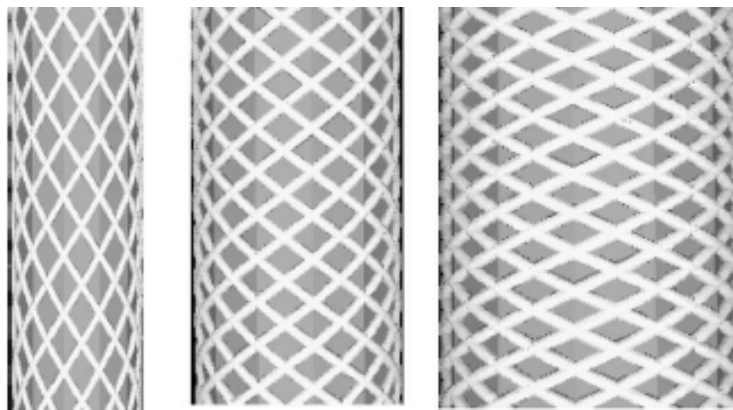


Figure 25 : Influence du diamètre du mandrin sur l'état de déformabilité de la tresse [38]

3.2.2 Les procédés de fabrication à l'aide de tresse

a. Le préformage par tressage sur outillage de mise en forme

La facilité à mettre en forme les tresses, d'un seul tenant et directement sur un mandrin fait partie des avantages de leur utilisation [40,41]. Le renfort est alors tressé directement sur l'outil, pour des géométries de mandrin, le plus souvent cylindriques (Figure 23 [40]) mais également pour des formes plus complexes (Figure 24 [41]).

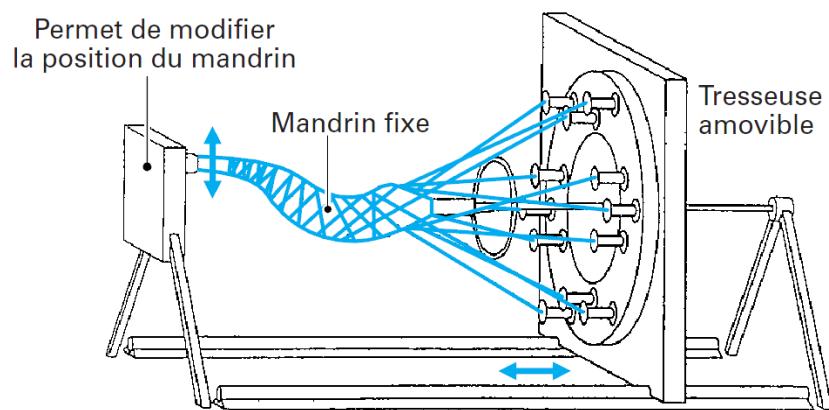


Figure 26 : Tresseuses [23]

Les formes de préformes sont multiples (Figure 27 [35]) et les tresses peuvent être manufacturées en 3D :

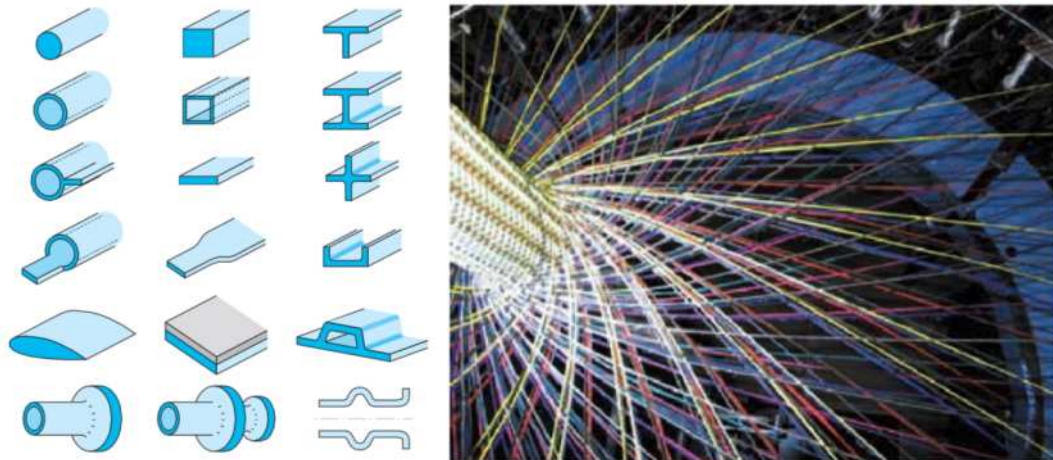


Figure 27 : Préformes tressées 3D [35]

Certaines pièces possédant des formes particulières sont tressées sur mesure (Figure 28 [36]).

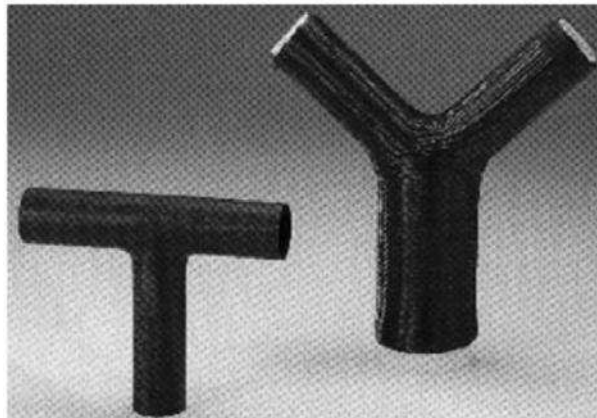


Figure 28 : Pièces de connexion tressées [36]

b. Le préformage de tresses existantes

Il existe aussi des cas où les préformes sont effectuées à partir de tresses déjà fabriquées qui sont mise en forme avant d'être liées à la résine, c'est le cas de canalisations ou conduites de fluides, de tubulaires à section variable ou encore d'équipements sportifs.

Quel que soit leur mode d'utilisation ou de fabrication, les tresses sont couramment utilisées et font l'objet de nombreuses études, le plus souvent des simulations par éléments finis, à l'échelle de la maille élémentaire pour des caractérisations mécaniques. Cet aspect microstructure est relativement bien décrit [35,42 - 44] pour comprendre soit la constitution soit l'influence des échelles inférieures sur, par exemple, l'évolution des fractions volumiques des renforts dans une pièce. Enfin pour clore cet état de l'art, notons que la détermination de la perméabilité des tresses est également décrite [27,43,44].

Dans toutes ces études les tresses sont plaquées longitudinalement sur le mandrin, éventuellement sur plusieurs épaisseurs (Tresses 3D), dans le cas de structures épaisses. En effet, les outils de tressage en 3D sont de plus en plus courants [45 – 47] et permettent l'obtention de tresses épaisses

sur-mesure. Sur la Figure 29 et la Figure 30, les mèches sont entrelacées pour augmenter l'épaisseur finale de la tresse, les mèches sont donc partiellement inclinées dans l'épaisseur mais la distribution est répartie sur des orientations diverses et n'est pas privilégiée comme il le faudrait pour l'obtention d'une préforme particulière pour la fabrication de tubes de protection thermique.

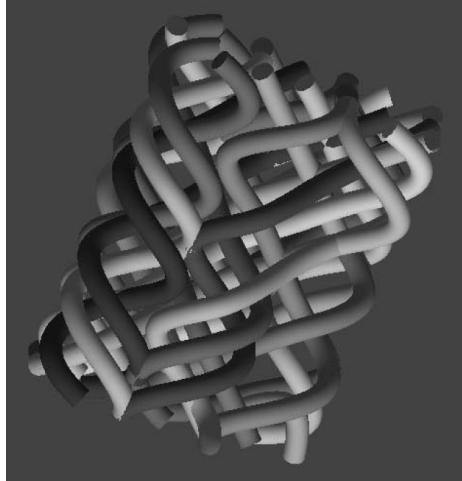


Figure 29 : Géométrie préliminaire de tressage 3D [45]

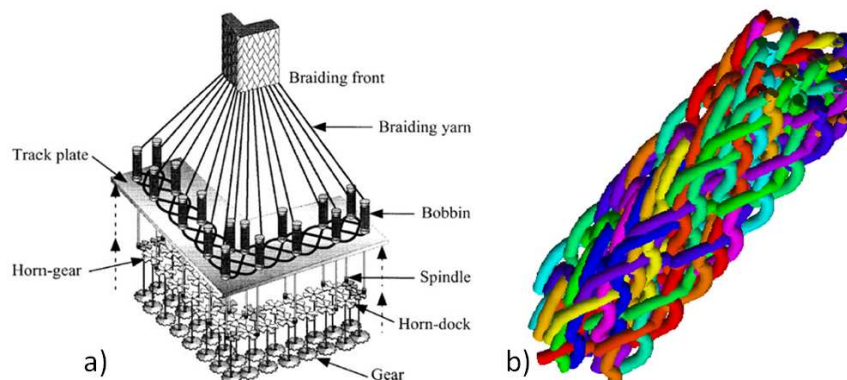


Figure 30 : a) Machine de tressage 3D - b) Géométrie préliminaire de tresse 3D [47]

Ces avancées technologiques du tressage en 3D favorisant la présence de mèches orientées dans l'épaisseur de la tresse sont considérables et permettent un essor important de l'utilisation de tresses dans les composites dits de structure. Toutefois, les orientations exposées ici, bien que présentes dans l'épaisseur, ne permettent pas l'obtention d'une tresse épaisse donc toutes les mèches seraient orientées à 15° par rapport à l'axe longitudinal tel que le cahier des charges (Figure 13) l'impose pour le préformage de tubes de protections thermiques.

En effet, le préformage des tubes étudiés ici requiert non seulement l'obtention d'une préforme à l'épaisseur importante mais nécessite surtout que toutes les mèches du pli présentent un angle particulier et strict de 15° par rapport à l'axe du tube. En outre, la société ROXEL souhaite ne pas avoir recours à un tressage sur mesure dans le cadre de la réduction des coûts de mise en œuvre et pour faciliter l'approvisionnement de matière première. L'impossibilité de trouver chez les fabricants une tresse particulière d'épaisseur importante et dont les mèches sont orientées à 15° par rapport à l'axe du tube associée à la volonté de la société d'utiliser des fournitures standards ont conduit à

développer un procédé de préformage particulier et adapté utilisant une tresse disponible sur le marché. Le principe du procédé retenu est exposé dans la sous-partie suivante. La description en détails du procédé de préformage ainsi que les outils utilisés en cours de procédé feront l'objet du dernier chapitre de ce manuscrit.

3.3 Principe du procédé retenu

Le procédé innovant choisi [7] est une méthode dite de ligature de tresse, elle a été adoptée pour respecter l'orientation particulière que doivent avoir les plis par rapport à l'axe du tube. Le procédé de fabrication industriel prévoit l'usinage (de l'ordre du millimètre) de la partie interne du tube avant l'assemblage de la protection thermique dans son enveloppe.

Dans un premier temps, la tresse est enfilée sur le mandrin à base conique et elle est plaquée sur la partie cylindrique du mandrin, son diamètre est égal à celui du mandrin à cette étape du préformage (Figure 31 a).

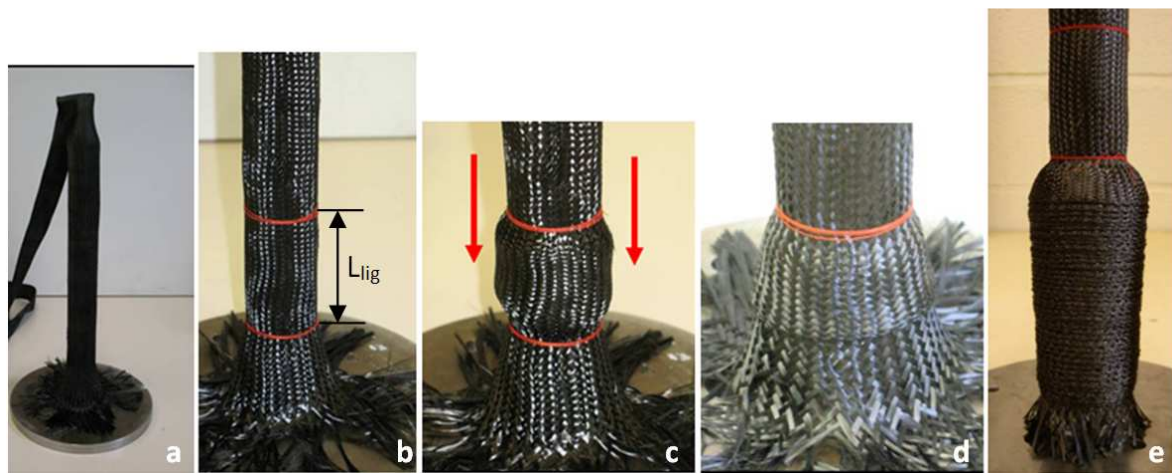


Figure 31 : Etapes du procédé de préformage par ligatures

La tresse est ensuite « serrée » autour du mandrin. Cette étape de serrage est réalisée par les ligatures (en rouge sur la Figure 31 b) dont l'espacement est un des paramètres clés du préformage puisqu'il détermine la quantité de matière (tresse) introduite dans un pli.

Les plis sont formés en faisant glisser l'ensemble « tresse + ligature » vers le bas (Figure 31 c), le long du mandrin pour venir au contact de la ligature (immobile) inférieure. La tresse se replie alors petit à petit sur elle-même, jusqu'à venir se replier complètement sur la base conique (Figures 6 et 13), formant ainsi le pli orienté (Figure 31 d). Ces opérations sont ensuite répétées (Figure 31 e) autant de fois que nécessaire pour former l'empilement du nombre de plis (environ 120) constituant une pièce complète.

Pour résumer, ce protocole particulier de préformage est scindé en deux étapes primordiales du point de vue de la déformation de la tresse :

- Former le pli (étapes a, b, c de la Figure 31) : la tresse est soumise à des sollicitations en cisaillement
- Empiler et compacter les plis (étapes d et e de la Figure 31) : la tresse est alors sollicitée en compaction

Ce procédé semble permettre d'obtenir des préformes conformes aux exigences liées à l'étape de préformage. Malgré tout, la tresse est soumise à de nombreuses sollicitations et le résultat obtenu n'est pas toujours satisfaisant, notamment avec la tresse de silice (Figure 32) :

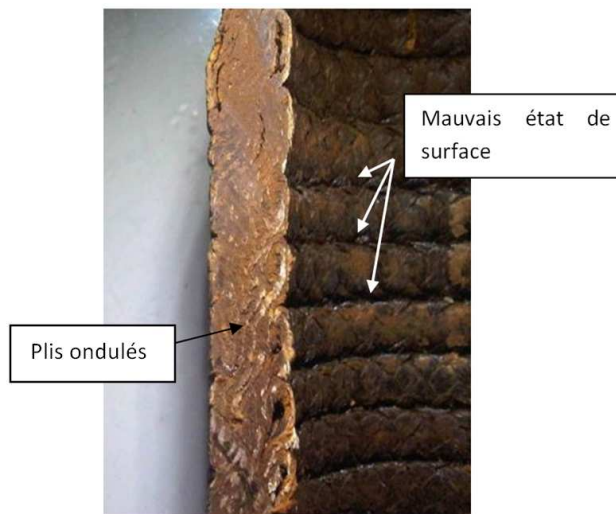


Figure 32 : Préforme non conforme (tresse de silice)

Il faut donc comprendre, analyser et valider les ensembles de paramètres procédé/matériau/géométrie afin de prévoir la faisabilité et la répétabilité de la fabrication des pièces.

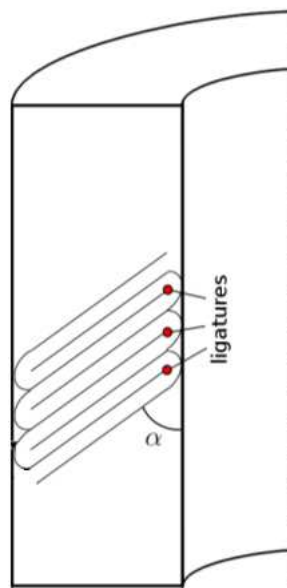


Figure 33 : Préformage des plis - vue en coupe

Un des objectifs de la thèse est la compréhension des phénomènes se produisant en cours de préformage et l'analyse des déformations subies par la tresse pendant sa mise en forme. L'observation des étapes principales du préformage à l'aide la Figure 31 permet de mettre en évidence trois états clés de la tresse en cours de préformage. Sur la Figure 31 a et la Figure 31 b, la gaine est déformée par cisaillement pour adapter son diamètre au diamètre de la partie cylindrique

du mandrin à base conique (Figure 9). Par la suite, au moment des étapes c et d (Figure 31), la tresse est à nouveau déformée par cisaillement pour venir prendre la forme conique imposée par la base du mandrin ; pour finir, l'opération est répétée plusieurs fois et les plis sont empilés pour venir former la préforme globale. Cet empilement de plis coniques les uns sur les autres implique que la tresse soit soumise à une sollicitation en compaction.

L'étude détaillée des sollicitations subies par la tresse est présentée dans la suite de ce chapitre.

3.4 Les différentes sollicitations subies par le renfort en cours de préformage

Dans un premier temps, seules les sollicitations modifiant l'état de la tresse sont considérées (Figure 34). Les tensions, dans la direction longitudinale de la tresse ainsi que dans les mèches, ne sont pas prises en compte car elles ne sont appliquées qu'en cours de procédé mais ne sont pas maintenues une fois le pli formé en raison de son repli sur le bord externe de la préforme laissé « libre ».

Les sollicitations mécaniques liées aux particularités du procédé de préformage sont ainsi les suivantes :

- Cisaillement lors du drapage sur un cône (Figure 14)
- Compaction (lors du repli et de l'empilement des plis) :
 - Compactage des plis pour assurer un V_f correct
 - Locale au niveau de la ligature
- Flexion au niveau du repli aux extrémités

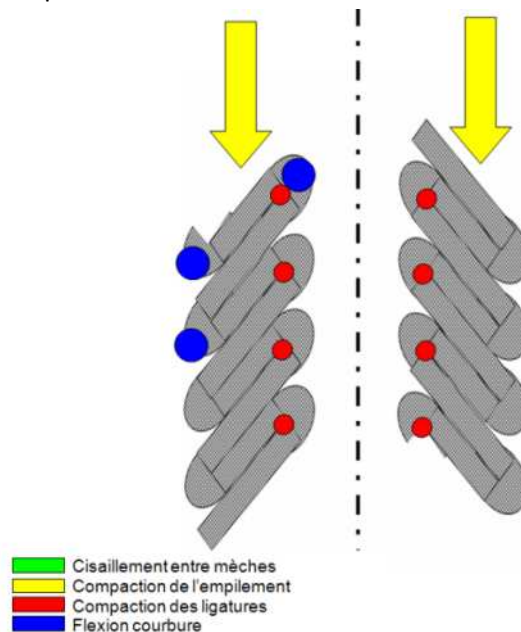


Figure 34 : Sollicitations possibles sur tresse ligaturée

Les sollicitations de flexion seront négligées dans la suite de l'étude. En effet, elles ne sont observables qu'aux extrémités, et ces parties de la pièce sont supprimées par l'usinage à la fin de la fabrication de la protection thermique. Si les usinages prévus sont insuffisants, il est envisageable de fabriquer une pièce composite brute plus épaisse sur laquelle l'usinage serait plus profond.

De plus, les écarts de comportement en flexion entre les différentes tresses ont un impact très faible sur le procédé ainsi que sur les caractéristiques de la pièce finale. Il reste donc à étudier les

sollicitations prépondérantes apparaissant en cours de préformage, plus précisément pour l'étape de mise en forme conique du pli, suivie de celle de compaction des plis entre eux.

Ces deux étapes sont régies par des paramètres, ceux-ci sont présentés dans la partie suivante.

3.5 Les paramètres associés à la fabrication des tubes

La partie suivante détaille l'ensemble des paramètres, à la fois liés au procédé et au matériau qui régissent les deux étapes clés du procédé de préformage présenté dans cette étude. Ces paramètres ne sont accessibles que par des mesures directes. Ces mesures sont effectuées sans contact, par méthode optique dont le procédé sera détaillé dans cette partie.

3.5.1 Les paramètres procédé

a. La distance entre ligatures

Cette distance, notée L_{lig} (Figure 31 et Figure 35), est un des paramètres clés de cette technique innovante de préformage, en effet, elle régit la quantité de matière introduite dans un pli et la taille du pli.

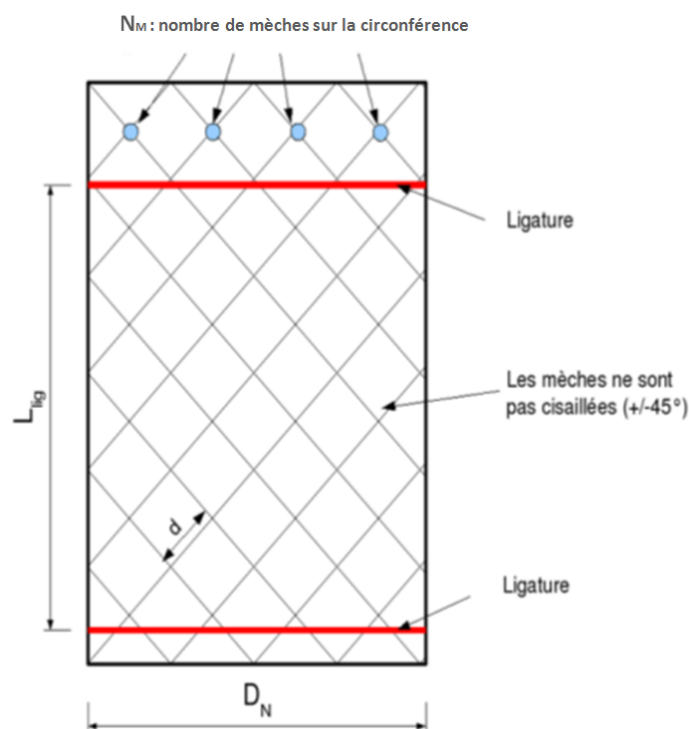


Figure 35 : Schéma d'une tresse mise à plat

b. Le diamètre des ligatures

Autour de la ligature, l'orientation du pli n'est pas respectée (présence de boucles - Figure 36), il sera donc indispensable que son diamètre soit le plus faible possible pour limiter l'étendue des perturbations d'orientation et pour s'assurer qu'elle sera éliminée complètement à l'usinage (d'environ 1 mm) à la fin de la fabrication de la protection thermique (Figure 11).

Le diamètre des ligatures D_{lig} est mesuré avant le préformage mais aussi après injection sur pièce coupée dans le sens longitudinal. Elle est ensuite polie et prise en photo pour permettre les études à l'aide de logiciels d'analyse d'image.

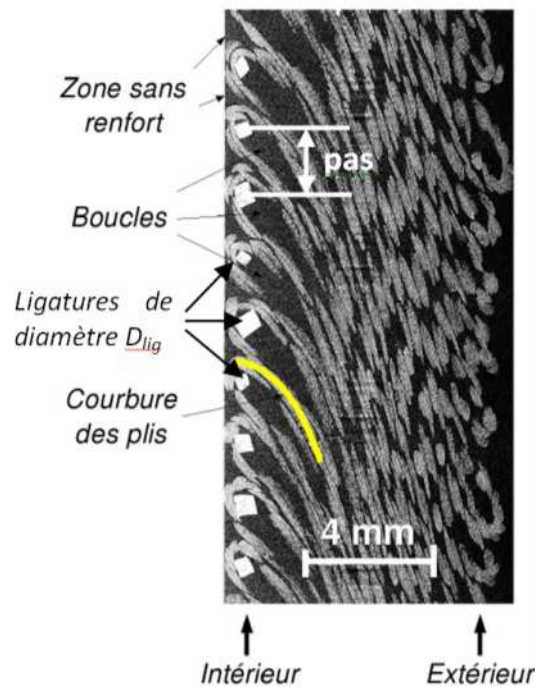


Figure 36 : Préforme vue en coupe (tomographie X à 7,5 µm) [20]

c. Le pas

Le pas (Figure 36) est directement lié à la compaction de la préforme (et donc plus généralement au taux de renfort du composite fabriqué), il s'agit en effet de la distance séparant les plis dans l'empilement constituant la préforme.

Les paramètres « procédé » de l'étape de préformage sont rassemblés dans le tableau de la Figure 37 suivante :

Paramètres procédé du préformage	unités
Distance entre ligatures L_{lig}	mm
Diamètre des ligatures D_{lig}	mm
Pas d'empilement des plis p	mm

Figure 37 : Paramètres "procédé" du préformage

3.6 Procédé de préformage par ligature de tresse : Résultats préliminaires

3.6.1 Les matériaux utilisés

Les essais préliminaires de préformage par ligature ont été réalisés à l'aide de deux tresses, une tresse de carbone Siltex (Figure 16) et une tresse de silice Dalfratex (Figure 39) dont les paramètres sont présentés dans le tableau de la Figure 38 suivante :

Paramètres constitutifs des tresses			
Désignation	Notation	Références	
		Carbone (Siltex)	Silice (Dalfratex) S44
Diamètre Nominal (mm)	D_N	50	65
Nombre de mèches	N_M	120	80
Epaisseur matière de la tresse (mm)	e_{tresse}	0,3	0,8
Type de mèches	-	roving	Brins entrelacés (3)
Masse linéique des mèches (g/m)	M_{lf}	0,2	nc
Masse linéique de la tresse (g/m)	M_{lt}	50	75
Largeur des mèches (mm)	$l_{mèche}$	1,5	2

Figure 38 : Tableau des paramètres constitutifs des tresses testées

Les résultats associés ont permis d'étudier la faisabilité de fabrication d'un tube à rallonge avec le préformage par ligature de tresses en tant que première phase du procédé RTM pour certains matériaux, ces essais préliminaires ont confirmé l'importance du choix des paramètres matériaux dans la faisabilité du préformage spécifique étudié ici.

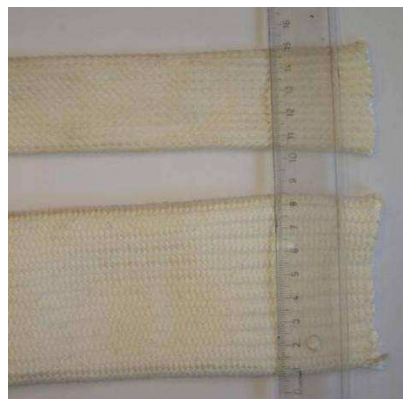


Figure 39 : Tresse de silice

3.6.2 Les observations effectuées

A ce stade, l'objectif est d'obtenir une préforme dont les dimensions correspondent au contre moule, donc injectable et dont la quantité de matière globale moyenne (masse de renfort introduite dans le moule rigide dont le volume est figé et connu) est cohérente avec le taux volumique de fibre attendu et une orientation relativement correcte des plis.

Les résultats démontrent l'influence des paramètres liés au choix du matériau, en effet, les préformes obtenues à partir de la tresse de silice ne sont pas conformes (présence de plis, répartition hétérogène du matériau, taux de fibre très faible (Figure 32) alors que les préformes à base de carbone (Figure 17) sont correctes. L'étude sera donc réalisée à partir de la tresse de carbone.

4 Conclusion

Le contexte industriel, les contraintes liées à l'activité particulière de la société ROXEL ont été exposés dans ce premier chapitre.

Les besoins de la société concernant la fabrication de protections thermiques sont développés, de même que les défauts couramment rencontrés lors de la fabrication de composites et qu'il faudra veiller à éviter avec le nouveau protocole d'élaboration. A ces aspects « défauts » sont ajoutés les critères de qualité qui serviront de paramétrage pour la validation de faisabilité du procédé de préformage.

Les études préliminaires aux travaux de thèse, notamment en ce qui concerne le choix de matériau sous forme de tresse et la détermination du protocole de préformage sont présentées.

Les renforts de structure tresse sont définis : un état de l'art sur leur élaboration ainsi que sur leurs utilisations les plus courantes a été écrit.

Les paramètres constitutifs des tresses, dit « matériau », sont listés. Après une brève présentation du protocole particulier de préformage développé pour cette étude, les paramètres « procédé » associés à l'élaboration de préformes de tubes de protections thermiques sont aussi présentés.

Des essais préliminaires de préformage ont permis de mettre en avant l'importance de la maîtrise des ces paramètres « procédé » ainsi que l'influence des paramètres « matériau » pour obtenir des préformes conformes. Toutefois, la maîtrise du protocole de fabrication, notamment du point de vue de la déformation de tresse pendant le procédé, passe par la compréhension des phénomènes physiques majeurs associés.

En effet, les sollicitations principales à laquelle est soumise la tresse en cours de préformage sont le cisaillement au moment du drapage du pli sur la forme conique puis la compaction lorsque les plis sont empilés les uns sur les autres pour obtenir la préforme.

Il faut donc caractériser le comportement de la tresse soumise à ces sollicitations pour comprendre les phénomènes et maîtriser les phénomènes de déformation intervenant sur le renfort en cours de procédé.

Les lois de comportement ainsi déterminées serviront ensuite de base pour modéliser et donc prédire ces déformations apparaissant en cours de procédé. Les paramètres « procédé » et « matériau » seront donc des leviers pour adapter le protocole et faire en sorte que ces déformations soient tolérables par le renfort, et donc valider la faisabilité du procédé ainsi défini.

Nous avons décrit dans ce chapitre les étapes préliminaires du procédé de préformage. Nous reviendrons sur celles-ci et sur les préformages expérimentaux réalisés dans le chapitre 3 pour introduire des modèles décrivant les états de déformations aux échelles des mailles et des plis. Mais également dans le chapitre 4 afin d'optimiser la réalisation de ces préformes dans une optique d'industrialisation.

CHAPITRE 2 : Caractérisation et modélisation du comportement mécanique de la tresse

La première étape du procédé RTM, le préformage, consiste à draper des renforts sur des géométries particulières. Dans le cadre de cette étude, le préformage est séparé en deux étapes distinctes au cours desquelles le renfort est drapé sur le cône, engendrant une sollicitation en cisaillement puis empilé où intervient la compaction. Ce drapage des renforts secs est possible du fait de la capacité des renforts à se déformer, notamment en cisaillement, lorsque les mèches entrelacées qui le constituent peuvent, dans une certaine mesure, tourner librement autour de leurs intersections [69, 70]. La compréhension des phénomènes intervenants sur le renfort au cours du procédé de préformage étudié dans ce manuscrit passe donc par une étude du comportement de la tresse soumise aux sollicitations de cisaillement notamment mais aussi de compaction [20,71]. Il s'agit des deux modes de sollicitations du procédé décrit dans le Chapitre 1 qui induisent des déformations sur la tresse.

Une étude globale du comportement de la tresse soumise à ces sollicitations, au-delà des bornes d'utilisation imposées par le procédé de préformage, est présentée dans ce chapitre. Cette étude plus générale nous permet d'identifier les limites caractéristiques du renfort. Les lois de comportement ainsi écrites seront ensuite utilisées pour modéliser le comportement du renfort dans les intervalles de sollicitation propres au préformage étudié. Une identification du comportement en compaction/cisaillement est donc indispensable pour modéliser le procédé.

En effet, cette caractérisation du comportement de la tresse soumise au cisaillement puis à la compaction est essentielle pour s'assurer que les déformations atteintes en cours de procédé sont admissibles par le matériau.

L'étude du comportement en compaction est d'abord présentée, afin de mettre en évidence l'évolution de la fraction volumique de fibres en fonction de la pression de compaction. Vient ensuite une sous-partie sur la variation d'épaisseur du renfort. La suite fait état du comportement en cisaillement. Une étude sommaire du couplage compaction/cisaillement sera aussi présentée à la fin de ce chapitre pour connaître son influence sur les lois établies auparavant. Cette étude a pour but d'affiner si besoin les lois de comportement introduites dans le modèle de déformation du renfort dont fait l'objet la troisième partie.

1 Compaction

Classiquement, les études de comportement des matériaux en compaction traitent de l'évolution de l'épaisseur des empilements [78-86] en fonction des pressions imposées. Ces données sont primordiales pour l'étude du comportement de la tresse dans le cadre de cette étude. Toutefois, nous nous intéresserons aussi aux méthodes permettant d'accéder à l'évolution de la fraction volumique de renfort, critère prépondérant du cahier des charges de la fabrication des tubes de protections thermiques qu'il est indispensable de maîtriser pour valider le procédé.

1.1 Variation de la fraction volumique de fibres induite par la compaction

a. Résultats issus de la littérature

Le comportement des renforts, mis en place en monocouche ou pour un empilement de couches, soumis à la compaction est couramment étudié dans la littérature [79-85].

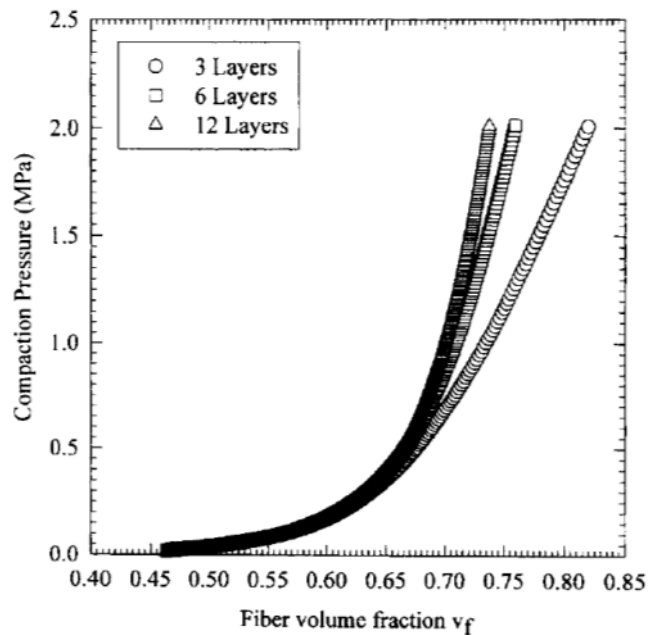


Figure 40 : Comportement des renforts fibreux en compaction [79]

Les évolutions de la fraction volumique de fibre en fonction de la pression couramment observées sont divisées en trois parties : linéaire – exponentiel – linéaire (Figure 40) [79,80].

On y note une forme globale des lois qui varie en fonction du nombre de couches contenues dans l'empilement. En effet, la position des couches est très difficile à maîtriser pour les renforts secs. En s'écrasant, les empilements peuvent prendre des configurations différentes (Figure 41, [78]) qui conduisent à des variations d'épaisseur de l'ensemble. Il apparaît classiquement que dans le cas de l'empilement de plusieurs couches, les épaisseurs par pli sont plus faibles que les résultats obtenus pour des essais en monopli. Les épaisseurs plus faibles des multiplis sont dues au phénomène de *nesting* ou réarrangement des mèches dans l'empilement (Figure 55, [78]).

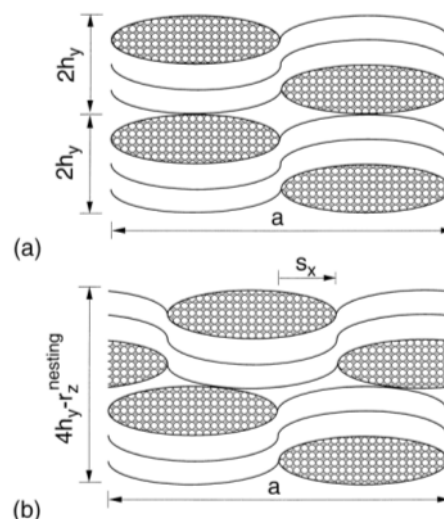


Figure 41 : Nesting (a) sans ; b) avec [78]

Il est donc indispensable de vérifier si ce phénomène de nesting est présent pour le cas des essais en monopli d'une tresse fermée posée à plat car cette configuration est assimilable à un empilement de

deux couches de renfort. Des essais de compaction ont été menés à différentes configurations pour le nombre de couches mais aussi pour l'arrangement de la tresse.

b. Configurations expérimentales pour mettre en évidence le nesting et résultats

Afin de mettre en évidence l'influence des types d'empilement sur le comportement en compaction, plusieurs configurations d'empilements sont testées.

Pour la suite des essais de compaction, quatre types d'empilements ont donc été expérimentés :

- Tresse « fermée » (posée à plat)
 - mono pli (une tresse soit deux couches) (configuration A - Figure 43)
 - multi pli (cinq tresses soit dix couches) (configuration B - Figure 43)
- Tresse « ouverte » (découpée assimilable à un tissu)
 - mono pli (une couche) (configuration C - Figure 43)
 - multi pli (cinq couches) (configuration D - Figure 43)

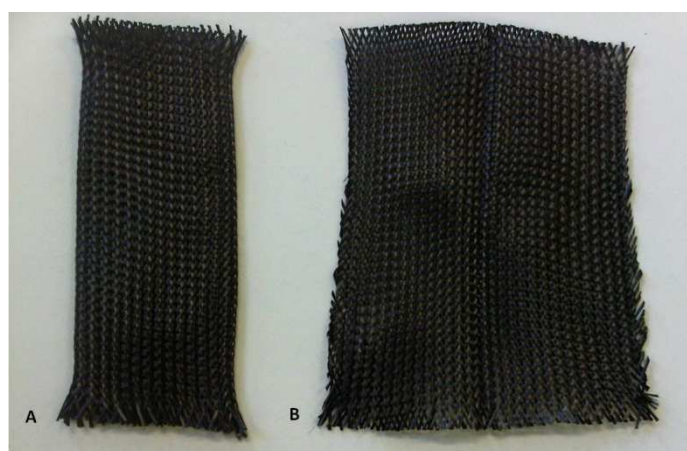


Figure 42 : Configurations des tresses (A : fermée ; B : ouverte)

Config.		Schéma de l'empilement (vue en coupe)	Nombre de plis	Nombres de couches
A	Tresse fermée		1	2
B			5	10
C	Tresse ouverte (découpée)		1	1
D			5	5

Figure 43 : Configurations expérimentales d'empilements de la tresse

Ces configurations prennent en compte le nombre de couches contenues dans l'empilement (mono pli, cas A et C - Figure 43/multi pli cas B et D - Figure 43) mais aussi tresse « fermée » (posée à plat) (cas A et B - Figure 43) ou tresse « ouverte » (assimilable à une couche « simple » de tissu) (cas C et D - Figure 43) sont présentés par la suite.

Les essais présentés par la suite de ce chapitre ont un intérêt double. Tout d'abord, il s'agit de déterminer et identifier la loi de comportement en compaction et d'en comparer les tendances avec les résultats issus de la littérature pour les publications qui concernent les renforts tissés. Ensuite, ces essais visent à mettre en évidence l'apparition du phénomène de nesting notamment pour le cas

particulier des tresses fermées et posées à plat (configurations A et B) et observer si l'effet du nesting est comparable pour les empilements multipliés dans les configurations fermée (B) et ouverte (D).

c. Protocole expérimental : Présentation du matériel et préparation des échantillons

Présentation du matériel :

Les essais sont effectués à l'aide d'un dispositif INSTRON 4411 de traction/compression dont le capteur de force est limité à 4800 N (Figure 44). La machine est pilotée en déplacement par le logiciel Bluehill.



Figure 44 : Dispositif de compaction

Les tresses empilées sont placées entre deux poinçons (Figure 45). Le poinçon inférieur (de diamètre 100 mm) sur lequel l'empilement est déposé est fixe ; le pilotage en déplacement est donc limité au poinçon supérieur (de diamètre 70 mm).



Figure 45 : Empilement entre poinçons - Essai de compaction

L'épaisseur nulle a été initialisée lorsque les poinçons sont en contact avant la mise en place de l'échantillon. L'essai est piloté en déplacement à une vitesse de 0,1 mm/minute afin de s'affranchir de tout effet dynamique. Les données de sortie obtenues sont la force de compaction en fonction de la distance séparant les poinçons. Cette distance diminue en cours d'essai et permet donc d'obtenir en fin d'essai l'épaisseur des couches de fibres compactées. Ainsi on obtient une loi décrivant la variation de la fraction volumique de fibres en fonction de la pression de compaction.

En effet, la masse surfacique de la tresse ayant été déterminée expérimentalement à

$$\text{Masse surfacique} = 400\text{g/m}^2/\text{couche}$$

La masse de fibre compactée par le poinçon, (de surface $S_{\text{poinçon}} = 3,84.10^3 \text{ mm}^2$), est connue et calculée à 1,45g de renfort compacté par couche.

Le renfort est constitué de mèches T3000, constituées de 3000 filaments, de densité de $1,76.10^{-3} \text{ g/mm}^3$ (donnée fournisseur).

Ainsi nous pouvons déterminer à 825 mm^3 le volume de chacune des couches de renfort compacté pendant l'essai. Ce volume de fibre étant constant pendant l'essai.

Le taux de fibre est obtenu à partir de la quantité de matière présente dans le volume défini par le mouvement des deux plaques d'une machine utilisé en compression (Figure 45). Le volume de fibre introduit (constant et noté V_{fibre}) dans la machine est donc mis en rapport avec le volume total, noté ΔV_{tot} , compris entre les plaques de la machine qui diminue au cours de l'essai de compaction. Du point de vue expérimental, la variation du taux volumique de fibre est donc définie par la relation suivante :

$$\Delta V f = \frac{V_{\text{fibre}}}{\Delta V_{\text{tot}}} \quad (2.1)$$

Préparation des échantillons :

L'objectif de ces essais est de caractériser la tresse soumise à une sollicitation de compaction pure. La préparation des échantillons est donc une étape cruciale pour s'assurer que la tresse est dans un état non cisailé. Pour cela, il faut déterminer expérimentalement les largeurs (de tresse fermée posée à plat) imposant aux mèches qui la constituent de former un angle à 90° pour être orientées à $\pm 45^\circ$ par rapport à l'axe, ce qui garantit un cisaillement nul. Dans le cas de la tresse de carbone étudiée ici, la largeur de tresse fermée a été déterminée à 73 mm. Dans le cas de la tresse ouverte, l'état de cisaillement ne peut être piloté par la largeur de l'échantillon de tresse (Figure 46).



Figure 46 : Maitrise de la largeur des échantillons (gauche : fermée ; droite : ouverte)

En effet, les bords « libres » découpés ne permettent pas de faire un lien fiable et répétable entre la largeur de l'échantillon et l'orientation des mèches dans celui-ci. La maîtrise de l'état de cisaillement nul dans les échantillons de tresse ouverte est donc obtenue au moment de la mise en place du renfort dans le gabarit.

Pour le cas des tresses en configuration fermée, des gabarits de l'empreinte de largeur adaptée ont été découpés et préparés à l'identique pour chacun des échantillons testés (Figure 47).



Figure 47 : Gabarits pour garantir un état de cisaillement nul

La tresse est ensuite déposée dans l'empreinte à la largeur souhaitée et fixée à l'aide de bandes adhésives sur ses extrémités (Figure 48).

Pour le cas de tresses ouvertes, l'orientation des mèches à $\pm 45^\circ$ est donc contrôlée et figée au moment de la mise en place des bandes adhésives.

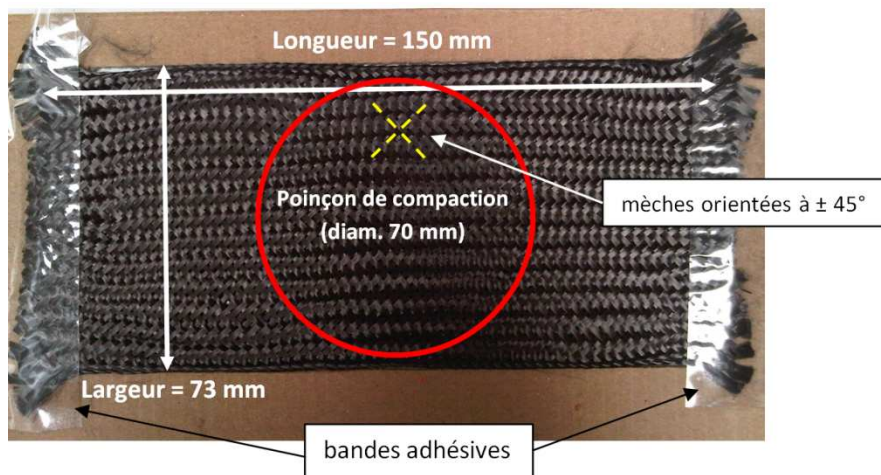


Figure 48 : Echantillon de tresse fermée posée à plat

La longueur de l'empreinte a été choisie à 150 mm pour limiter les effets des bandes adhésives sur la zone compactée et pour s'affranchir d'éventuels effets de bords sur lesquels la maîtrise de l'orientation des mèches est plus complexe. Ainsi le poinçon supérieur cylindrique de diamètre 70 mm est positionné au cœur de l'échantillon pour limiter les divers effets perturbants (épaisseur du repli sur les bords, orientation des mèches moins bien maîtrisée aux extrémités, présence des bandes adhésives). Le poinçon inférieur quant à lui a un diamètre de 125 mm qui permet le maintien de l'empilement à la fois sur le renfort mais aussi sur le gabarit autour, ce qui garantit le maintien de l'orientation des mèches au moment de la mise en place.

La préparation des échantillons est similaire pour toutes les configurations choisies. Toutefois pour les essais sur tresse découpée et ouverte, la maîtrise de l'orientation des mèches par la largeur du gabarit est moins évidente et le positionnement des mèches à $\pm 45^\circ$ a été contrôlé en cours de mise en place de l'échantillon sur le gabarit et fixé à l'aide des bandes adhésives (Figure 49), la largeur d'empreinte étant juste une aide à la mise en position souhaitée.

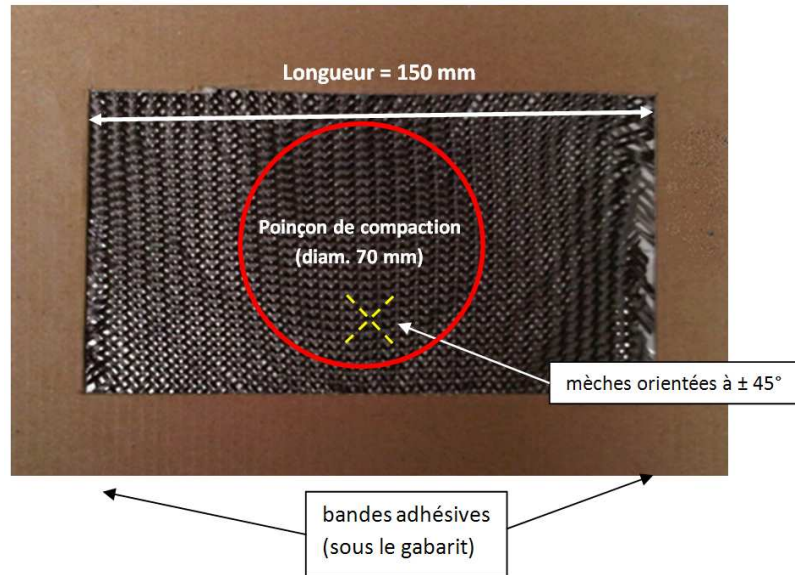


Figure 49 : Échantillon de tresse découpée ouverte

Les échantillons ainsi obtenus pour les quatre configurations (Figure 50) ont été testés en compaction.



Figure 50 : Échantillons - configurations A et C

d. Résultats obtenus

Les essais précédemment décrits ont été réalisés quatre fois pour chacune des configurations. La répétitivité des résultats a été validée et les résultats présentés sont issus de la moyenne des quatre essais mis en œuvre.

La relation décrivant l'évolution du taux de fibres de la tresse de carbone mise à plat, déterminée par la relation (2.1) suit de façon très satisfaisante la forme classique obtenue pour les renforts fibreux avec une évolution en trois parties « linéaire – exponentielle – linéaire ».

Du point de vue de l'influence du nombre de plis dans l'empilement, les résultats présentés sur la Figure 51 sont cohérents avec les tendances observées classiquement dans la littérature [79]. En effet, on peut observer une différence dans les tendances entre l'essai « Monopli – Tresse ouverte » (configuration C) où l'on visualise le tissu en une seule couche et les autres configurations (Tresse fermée – Monopli et multipli et Tresse ouverte – Multipli) qui sont des empilements multicouches où le phénomène de nesting apparaît.

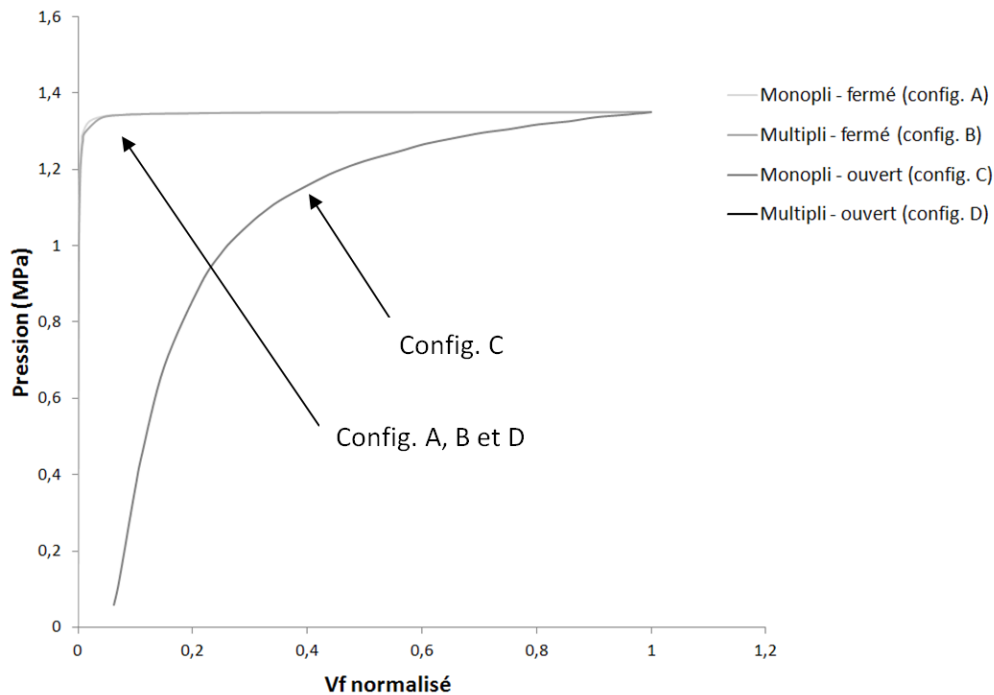


Figure 51 : Influence monopli/multipli sur l'allure des courbes de compaction (tresse ouverte ou fermée)

Il apparaît donc nécessaire de mettre en évidence deux lois de comportement selon les empilements. On distinguera le type monopli, obtenu après étude d'un pli de tresse ouverte (une couche de tresse – configuration C) et le multipli, obtenu dès l'instant que la tresse est fermée, en monopli (deux couches, configuration A) ou en multipli (5 plis = 10 couches - configuration B) ou pour un empilement de tresses ouvertes (5 plis = 5 couches – configuration D).

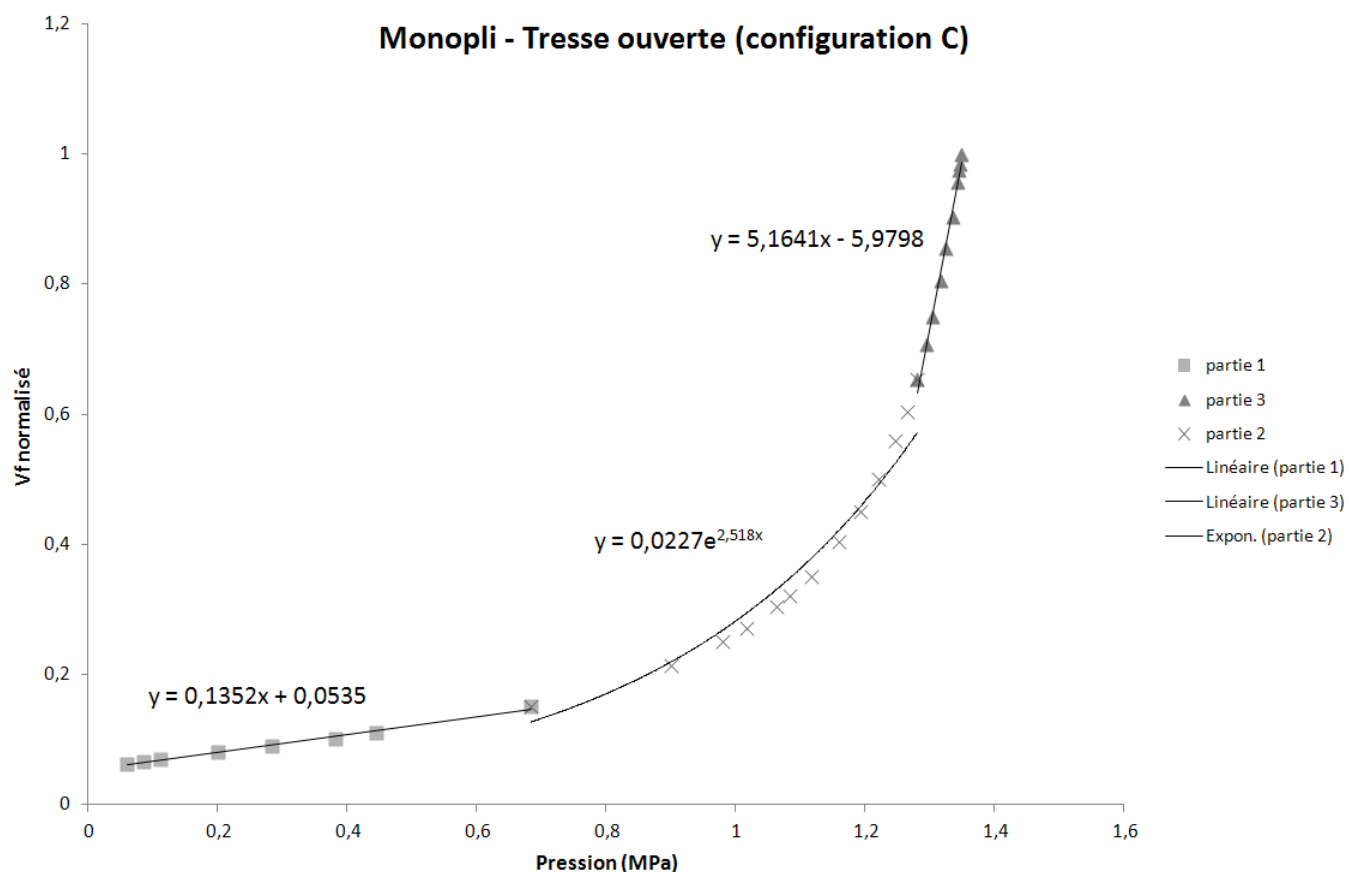


Figure 52 : Identification de la loi de comportement - cas du monopli

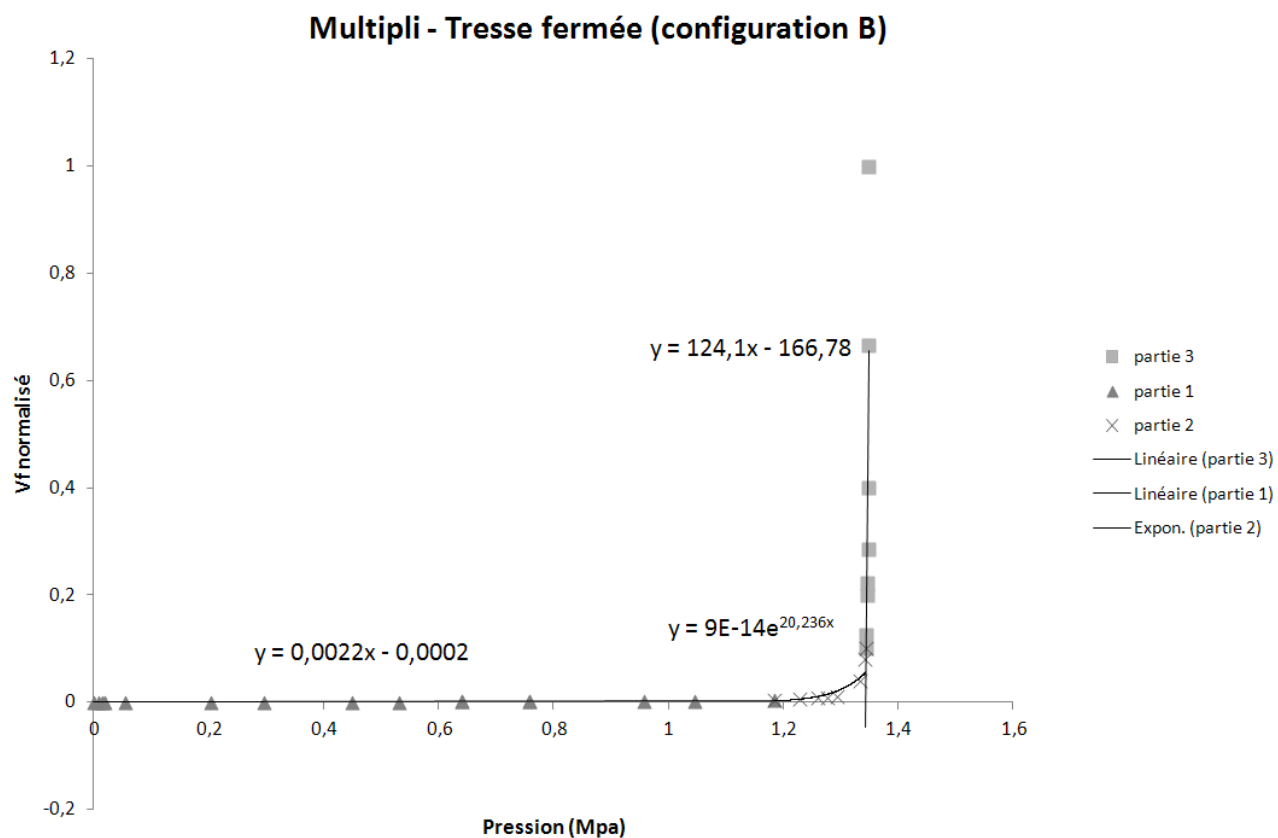


Figure 53 : Identification de la loi de comportement - cas du multipli

Dans le cadre de la tresse de carbone, le comportement en compaction est régi par les conditions suivantes :

en monopli (Figure 52)

$$\begin{cases} \text{si } P \in (0; 0,68 \text{ MPa}): Vf = 0,135P + 0,05 \\ \text{si } P \in (0,68; 1,28 \text{ MPa}): Vf = 0,0227e^{2,518P} \\ \text{si } P > 1,28 \text{ MPa} : Vf = 5,16P - 5,98 \end{cases} \quad (2.2)$$

en multipli (Figure 53)

$$\begin{cases} \text{si } P \in (0; 1,2 \text{ MPa}): Vf = 0,0022P - 0,0002 \\ \text{si } P \in (1,2; 1,34 \text{ MPa}): Vf = 9.10^{-14}e^{20,236P} \\ \text{si } P > 1,34 \text{ MPa} : Vf = 124,1P - 166,78 \end{cases} \quad (2.3)$$

avec P [MPa] la pression appliquée sur le renfort et Vf la fraction volumique de fibres.

Dans le cadre de l'étude du préformage par ligature de tresse, la compaction entre en jeu au moment de l'empilement des plis les uns sur les autres. Il s'agit donc clairement d'une configuration « multipli ». La loi de comportement utilisée pour modéliser le phénomène de compaction en cours de préformage sera celle obtenue à l'issue des essais d'empilements multipli (Figure 53) décrite en équation 2.3.

Les différences observables sur les allures des courbes des configurations A, B et D sont négligeables. Ces résultats mettent toutefois en évidence l'influence des empilements monopli/multipli sur l'épaisseur d'un empilement de couches de tresse.

La configuration « fermée » de la tresse s'apparente à un empilement multipli, même dans le cas de la configuration A avec un seul pli de tresse fermée.

Le comportement des empilements multipli est par contre similaire pour les renforts de type tresse, qu'ils soient en configuration « tresse ouverte » ou « tresse fermée ».

1.2 Conclusion

Le comportement en compaction de la tresse, mais aussi l'évolution de la fraction volumique et les variations dues au nesting dans les configurations du préformage ont été identifiées expérimentalement. Les résultats indiquent une variation de l'évolution de la fraction volumique en fonction du nombre de plis dans l'empilement, due au phénomène de nesting. Ce phénomène de nesting est présent dès l'instant que la tresse est positionnée fermée et posée à plat, dans ce cas, un seul pli représente deux couches, ce qui justifie le réarrangement des mèches des deux couches constituant le pli. Dans le cadre du préformage étudié ici, les plis empilés les uns sur les autres sont constitués de deux couches de tresse repliée sur elle-même ; le cas qui nous intéresse pour la modélisation est donc celui du multipli dont l'identification a été faite à partir des données expérimentales de la Figure 53. La loi qui sera utilisée dans le modèle est donc celle obtenue en équation (2.3).

Toutefois, l'évolution du taux volumique de fibres n'est pas suffisante et dans le cadre de l'étude du procédé, l'évolution de l'épaisseur de la tresse et par conséquent l'évolution de l'épaisseur du pli (considéré comme étant le double de l'épaisseur de la tresse) doivent être connues.

1.3 Variation de l'épaisseur induite par la compaction

Il est nécessaire de connaître la variation d'épaisseur maximale admise par la tresse. En effet, une préforme sera conforme si les plis qui constituent son empilement sont jointifs (voir Chapitre 3). Dans le cadre d'étude du préformage particulier, l'étude de l'évolution de la fraction volumique de fibre permet de caractériser le taux de fibre, critère prépondérant dans la caractérisation de la préforme, qui est fixé par le cahier des charges à 60% en volume et dont la variation sur le pli ne doit pas excéder 10%. La variation d'épaisseur en fonction de la pression est le mode de caractérisation de l'épaisseur des plis dans la préforme obtenue par empilement. La valeur moyenne de l'épaisseur en fonction du nombre de couches, ainsi que la variation autour de cette valeur moyenne seront des données essentielles pour la compréhension et la modélisation du procédé de préformage.

a. Résultats issus de la littérature

Dans la littérature, les résultats typiquement obtenus pour la variation d'épaisseur en fonction de la pression de compaction présentent trois zones (linéaire – exponentielle – linéaire) (Figure 54 [85]).

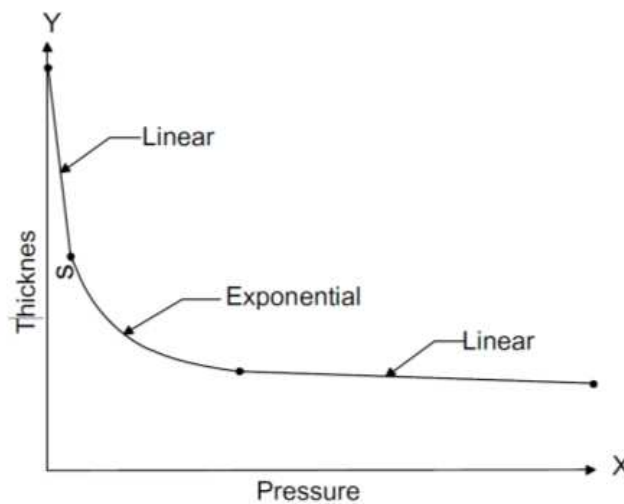


Figure 54 : Courbe typique d'essai de compaction de renforts [85]

La difficulté majeure de ces essais est la mesure de l'épaisseur initiale des renforts mais aussi la détermination de la première partie de la courbe. En effet, l'état de surface inhomogène des renforts ainsi que leur rigidité très faible à faible déformation rendent difficile la détermination de la valeur seuil à partir de laquelle le poinçon est en contact avec la surface du renfort avant que débute la phase de compaction et donc l'application par le poinçon d'une force sur le renfort. L'influence du nesting est d'autant plus visible sur les mesures d'épaisseur des renforts soumis à la compaction (Figure 55 [78]). Ces variations d'épaisseur sur les renforts tissés sont présentées sur la Figure 55 suivante :

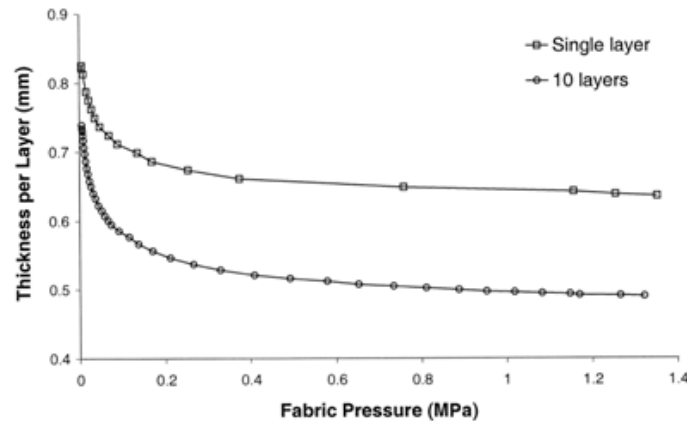


Figure 55 : Courbe typique de compaction d'un renfort tissé (monopli et multipli) [56]

Les dispersions associées à la mesure de la variation d'épaisseur en fonction de la pression en mono et multicouches sont souvent importantes. Une autre approche utilisant la simulation à l'échelle mésoscopique [82-85,90] permet d'avoir des résultats prometteurs, notamment en terme d'évolution du taux de fibre mais ces calculs sont complexes, souffrent de la même incertitude liée à la mesure de l'épaisseur initiale et demandent un investissement très important. Les lois recherchées seront donc obtenues expérimentalement.

b. Essais et résultats

Les résultats expérimentaux choisis pour l'obtention de la variation d'épaisseur en fonction de la compaction sont issus des essais effectués pour la description des lois de comportement en compaction dans les différentes configurations présentées dans ce chapitre. Pour ces essais les échantillons de tresse sont dans un état non cisailé. En effet, pour les essais de compaction, les données obtenues sont l'évolution de la distance entre les poinçons en fonction de la force appliquée. L'initialisation et la mise à zéro de cette distance entre poinçons ayant été effectuée lorsque les poinçons sont en contact avant la mise en place de l'échantillon.

Conformément à ce qui est observé pour le taux volumique de fibres, les essais de compaction montrent que les renforts s'écrasent d'abord très facilement puis avec une rigidité plus grande lorsque les vides entre les fibres se combient. L'influence du nesting est bien évidemment présente dans le cas de la tresse repliée en monopli et multipli tout comme pour l'évolution de la fraction volumique de fibres (Figure 51).

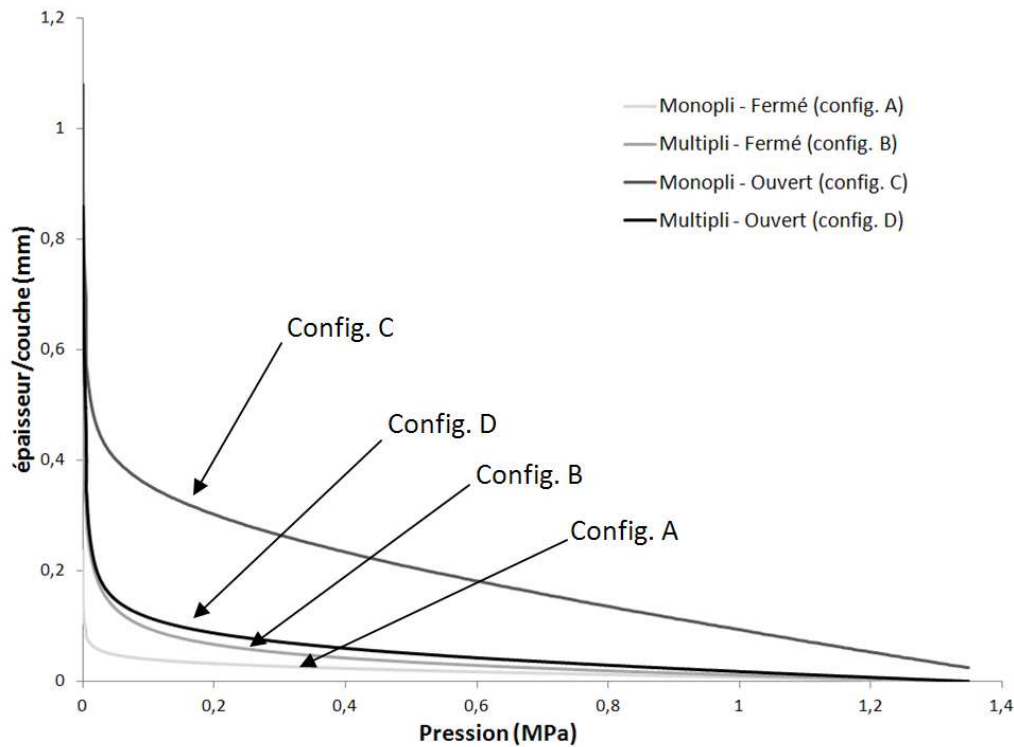


Figure 56 : Epaisseur en fonction de la pression

La forme de la loi d'évolution de l'épaisseur en fonction de la pression est globalement respectée par rapport aux données de la littérature (Figure 54 [85] et Figure 55 [78]). Comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe précédent, la mesure de l'épaisseur initiale est délicate. Toutefois, les résultats obtenus montrent une certaine répétitivité et permettent donc d'obtenir une bonne approche de l'épaisseur d'une couche et de sa variation en fonction de la pression.

Les évolutions de l'épaisseur de la tresse seront donc identifiées à partir des observations expérimentales (Figure 56). L'évolution de l'épaisseur en fonction de la pression de compaction présente trois zones (Figure 54) et peut donc s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \text{en zone 1 (linéaire)} : e = -a_1 P + b_1 \\ \text{en zone 2 (exponentielle)} : e = a_2 e^{-b_2 P} \\ \text{en zone 3 (linéaire)} : e = a_3 P - b_3 \end{cases} \quad (2.3)$$

où e est l'épaisseur de l'empilement et P la pression de compaction appliquée ; chaque couple de coefficients a_i et b_i varie en fonction des configurations d'empilements et est identifiable expérimentalement.

Les zones 1 et 3 présentent une évolution de l'épaisseur linéaire par rapport à l'évolution de la pression de compaction, elles sont donc représentées par des fonctions affines. En revanche, dans la zone centrale, la zone 2, l'évolution de l'épaisseur en fonction de la pression de compaction est de type exponentiel comme nous pouvons le noter en (2.3).

Pour la suite de l'étude, notamment pour la compréhension et la modélisation du préformage, la donnée fondamentale est la variation d'épaisseur admise par la tresse. La capacité de la tresse à se comprimer a donc été identifiée à l'aide des essais précédents. Toutes configurations confondues, son épaisseur présente une variation possible comprise entre 0,5 mm et 0,05 mm par couche dans

les conditions de compaction allant de 0 à 1,4 MPa. Ce domaine de pression est atteignable pour la compaction des plis en cours de préformage pour le procédé tel qu'il est défini.

1.3.1 Conclusion

Un dispositif pour l'étude expérimentale des tresses en compaction a été présenté. Dans la littérature, le comportement en compaction des tresses est étudié relativement au procédé, notamment lors de l'imprégnation [38, 39]. Néanmoins le comportement en compaction des tresses, en tant que renfort « sec », est bien moins décrit que celui des renforts tissés.

Les caractérisations expérimentales ont permis de déterminer l'évolution, d'une part de l'épaisseur, essentielle pour modéliser l'empilement des couches au cours du procédé et d'autre part du taux volumique de fibre, paramètre directement impliqué dans les critères de conformité du composite définis dans le premier chapitre.

Dans le cadre du développement du modèle prédictif, le taux volumique de fibres sera calculé d'après la loi identifiée en (2.2).

Le comportement de la tresse, sous forme d'empilement de plis, soumise à une sollicitation en compaction est désormais identifié et connu. Ainsi, cette loi de comportement sera utile lors de la modélisation des déformations de la tresse en cours de préformage, lorsqu'il s'agira de modéliser la compaction des plis entre eux au moment du préformage.

2 Cisaillement

Le cisaillement est le mode de déformation principal des renforts à mèches entrelacées dans les applications de mise en forme. En effet, le cisaillement permet le drapage, sans plisser ni froisser le renfort, soit sur des formes non développables, soit sur des formes développables de type conique par exemple. La formabilité d'un renfort est par conséquent essentiellement liée à son comportement en cisaillement.

2.1 Généralités pour les renforts tissés

Ainsi, le comportement en cisaillement des renforts fibreux est très couramment étudié expérimentalement, le plus souvent à l'aide de deux essais spécifiques [57 - 65] qui sont le « Bias Extension Test » (Figure 57 [66], Figure 58 [60]) et le « Picture Frame Test » (Figure 57 [66], Figure 59 [67]).

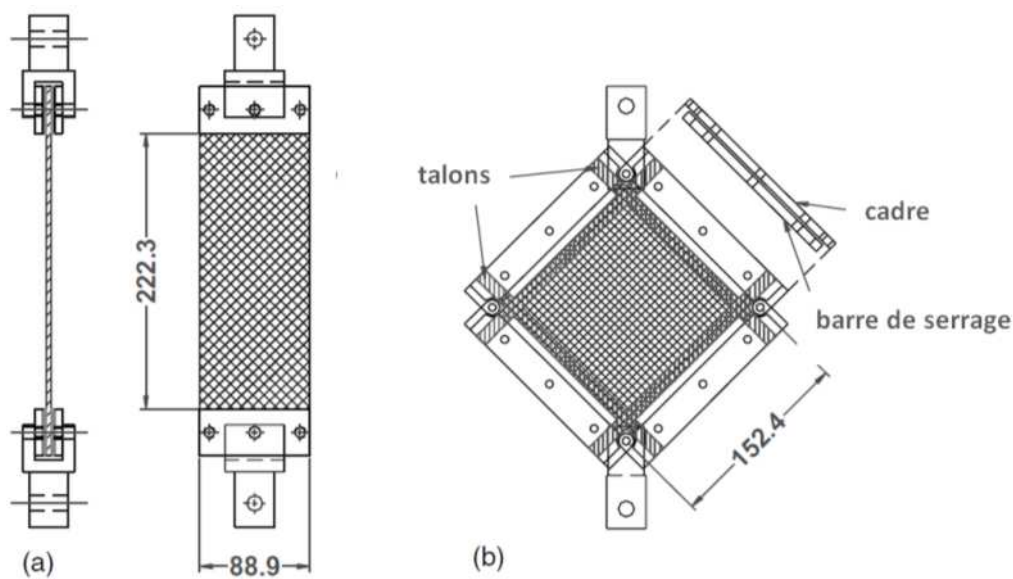


Figure 57 : a) Bias Extension Test ; b) Picture Frame Test [66]

a. Présentation du « BIAS TEST »

Pour les essais de « Bias Extension Test », l'éprouvette de renfort tissé, préparée de telle sorte que les mèches soient orientées à $\pm 45^\circ$, est soumise un effort de traction.

L'éprouvette (Figure 58) peut être divisée en trois zones, la zone A où les mèches sont libres, le cisaillement y est supposé pur car les mèches ne subissent pas d'effort longitudinal [88]. Dans les zones B, les mèches sont libres uniquement d'un côté, le cisaillement mesuré dans ces zones sera donc toujours égal à la moitié de celui de la zone A [60]. La zone C reste quant à elle non déformée, ses mèches étant bloquées par le collage du talon de l'éprouvette [67].

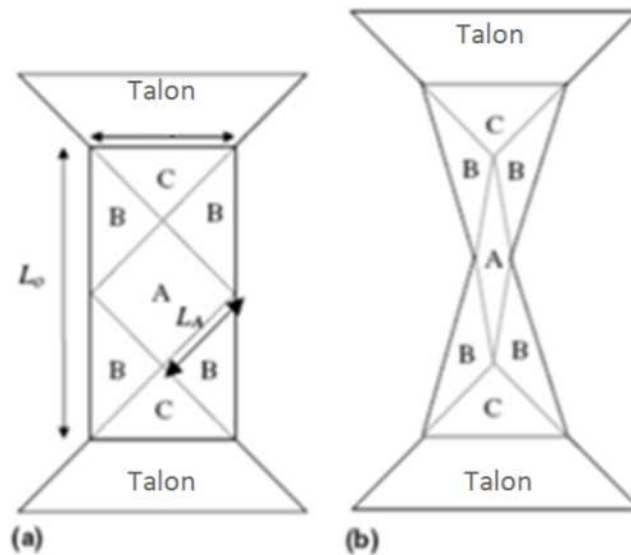


Figure 58 : Eprouvettes de « Bias Extension Test » (a) état initial ; b) état cisailé) [60]

La variation de l'angle de cisaillement est obtenue par suivi et analyse du mouvement de rotation des mèches entre elles dans la zone A en cours d'essai. Les résultats mettent en évidence la variation du cisaillement en fonction de la force de traction exercée sur l'échantillon.

b. Présentation des essais de « Picture Frame »

Dans le cadre des essais par « Picture Frame », les mèches du renfort tissé sont pincées sur les quatre côtés d'un cadre articulé. Le cadre, soumis à un effort de traction, se déforme et cisaille le renfort qu'il maintient. La sollicitation obtenue est supposée être un cisaillement pur du renfort au sens où aucune déformation longitudinale ne se produit [88].

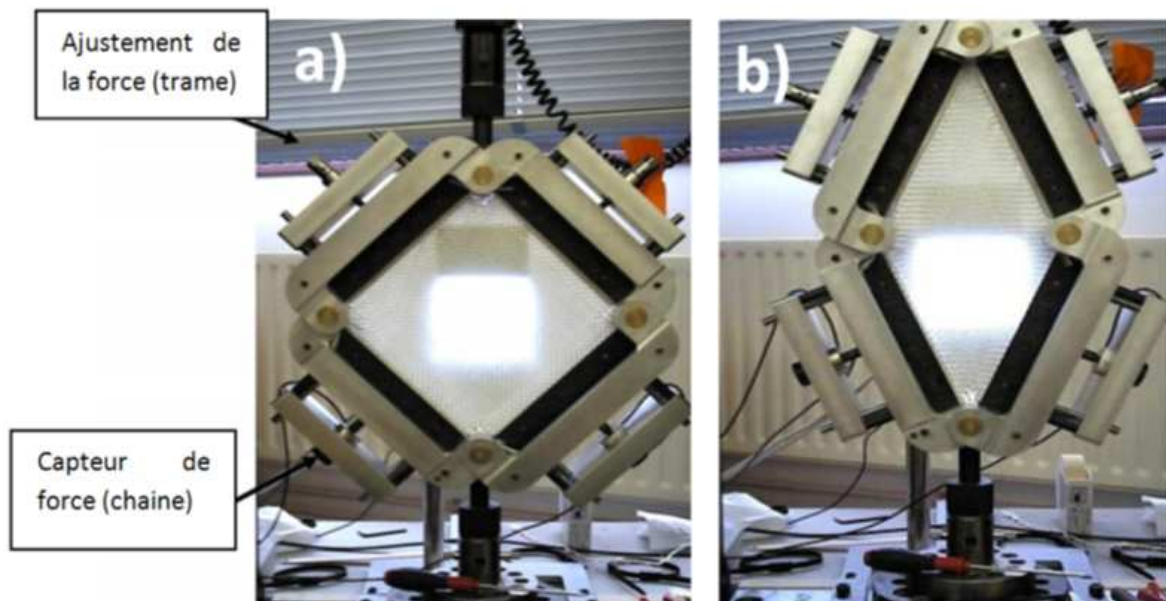


Figure 59 : Eprouvette de « Picture Frame Test » (a) état initial ; b) état cisailé) [67]

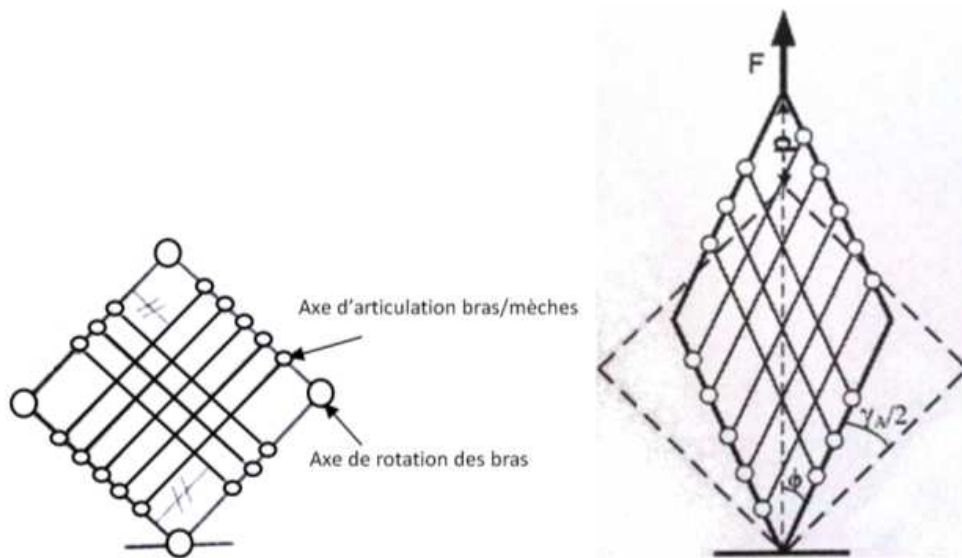


Figure 60 : Picture Frame Test [63]

Ces méthodes de caractérisation des renforts en cisaillement sont les plus répandues. Les résultats couramment obtenus [64,67] pour le comportement de cisaillement plan des renforts tissés montrent que les lois de comportement se composent de trois zones distinctes (Figure 61 [64]):

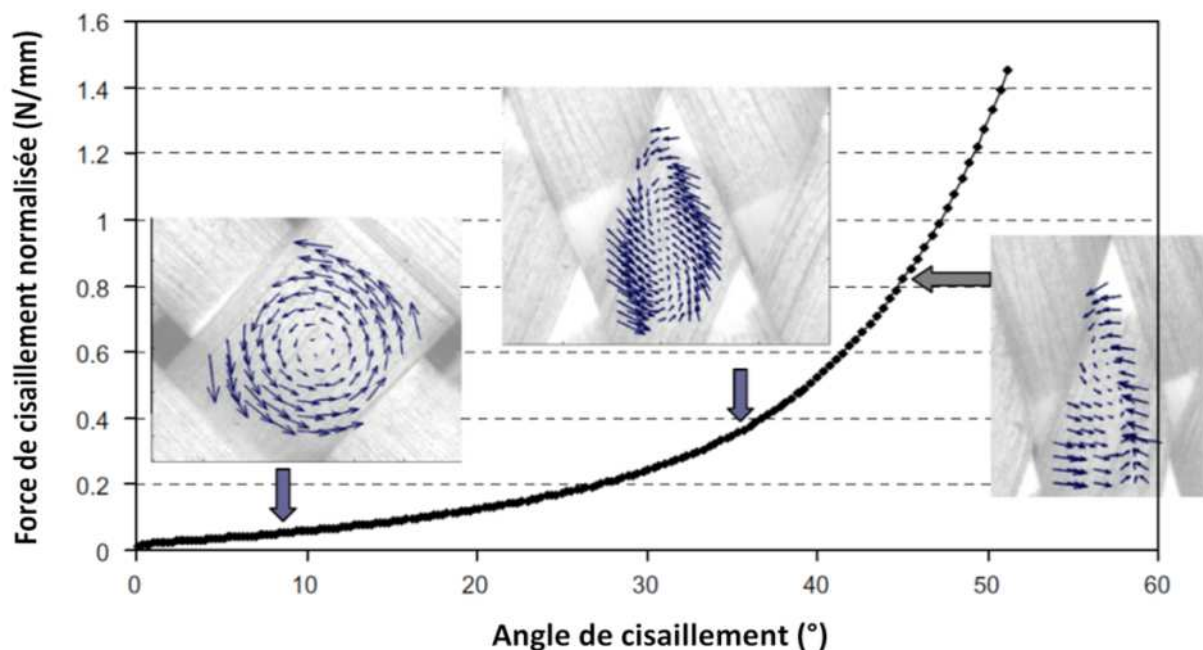


Figure 61 : Force de cisaillement (renfort tissé) [64]

- Dans la première zone, les mèches tournent les unes par rapport aux autres. L'effort de cisaillement reste faible car la rigidité de cisaillement est uniquement due au frottement entre les mèches de trames et de chaînes.
- Dans la zone intermédiaire, les mèches viennent en contact latéral ce qui se traduit par une rigidification importante du tissu. On appelle angle de blocage, l'angle de cisaillement des mèches dans cette configuration.
- Dans la dernière zone, les mèches se compactent transversalement d'où une augmentation importante de l'effort de cisaillement et en conséquence de la rigidité de cisaillement, cette dernière

devient prépondérante devant celle de flexion et on voit potentiellement apparaître des plis sur le renfort [64].

Les plis apparaissent donc à partir de l'angle de blocage. Ces plis sont bien sûr à éviter afin de prévenir la présence de défauts et donc garantir l'homogénéité de la préforme. C'est pour cette raison que l'angle de blocage est une caractéristique fondamentale à identifier pour chaque renfort étudié. Ceci afin de ne pas utiliser le matériau dans des conditions de cisaillement s'apparentant à celles décrites dans la zone de compaction transversale des mèches, au-delà de l'angle limite.

Un benchmark a été mené par différents laboratoires sur ce sujet [68]. Les résultats sont assez dispersés, ce qui montre toute la difficulté de mesurer le comportement mécanique des renforts, même sur un cas apparemment simple comme le cisaillement pur [88]. L'un des éléments clés est la préparation et la mise en place des échantillons, celle-ci doit donc être particulièrement soignée afin que la traction soit équilibrée sur l'ensemble des mèches de l'échantillon et que celles-ci puissent, dans un premier temps, tourner librement. Or la fabrication d'éprouvettes pour des essais de Bias ou de Picture Frame à partir d'une tresse est plus délicate qu'à partir d'un renfort tissé. En effet, les mèches de la tresse se détissent si elle est coupée et ouverte en deux pour en étudier son comportement comme un renfort tissé « simple » ; un protocole classique conduit ainsi à des résultats trop peu précis. C'est la raison pour laquelle un protocole particulier devra être appliqué.

2.2 Etude du comportement mécanique en cisaillement de la tresse

Etant donné la particularité de la structure du renfort étudié, les essais de Picture Frame ne sont pas envisageables. En effet, les dimensions de la tresse ne permettent pas de produire d'échantillon adaptable aux dimensions du cadre articulé utilisé dans ce type d'essai. Notre choix s'est naturellement porté sur les essais de type Bias Test pour caractériser le comportement de la tresse lorsqu'elle est soumise à des sollicitations de cisaillement.

a. Protocole expérimental

Préparation des éprouvettes :

Pour les éprouvettes de Bias Test, la préparation des échantillons a dû être adaptée à la structure de la tresse. De ce fait, les essais de BIAS test ont été réalisés sur le renfort sous sa forme « tresse fermée », l'éprouvette de traction est constituée d'un échantillon de tresse posée à plat sur lequel sont collés des talons (Figure 62).

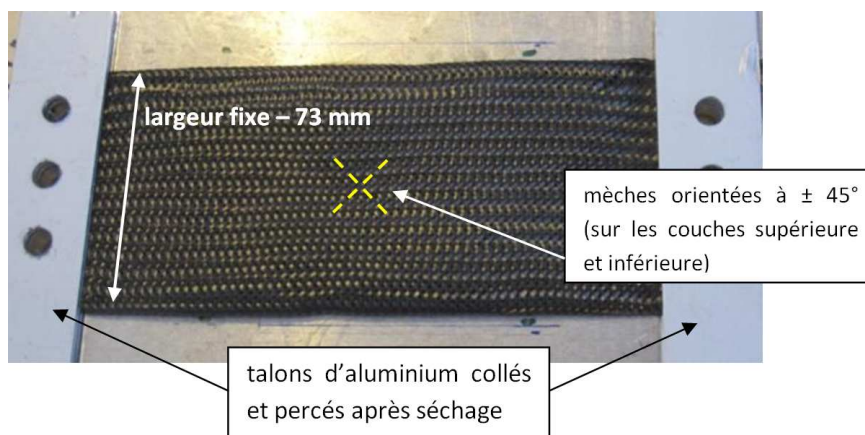


Figure 62 : Epreuve de Bias Est - Tresse carbone (état initial)

La difficulté majeure dans la préparation est le positionnement et le maintien de l'orientation des mèches à $\pm 45^\circ$ pour garantir l'état de cisaillement nul en début d'essai. Pour se faire, l'éprouvette est fabriquée dans un moule (Figure 63 et Figure 64).

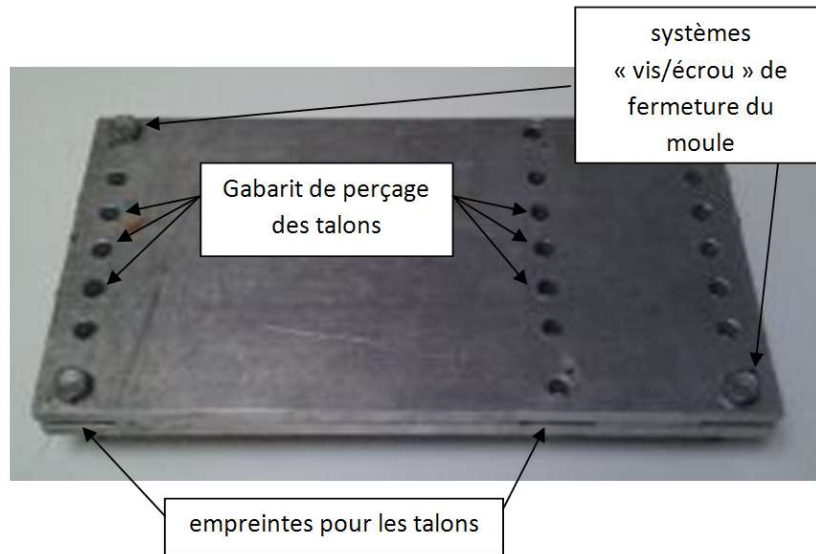


Figure 63 : Moule pour éprouvette de Bias Test (fermé)

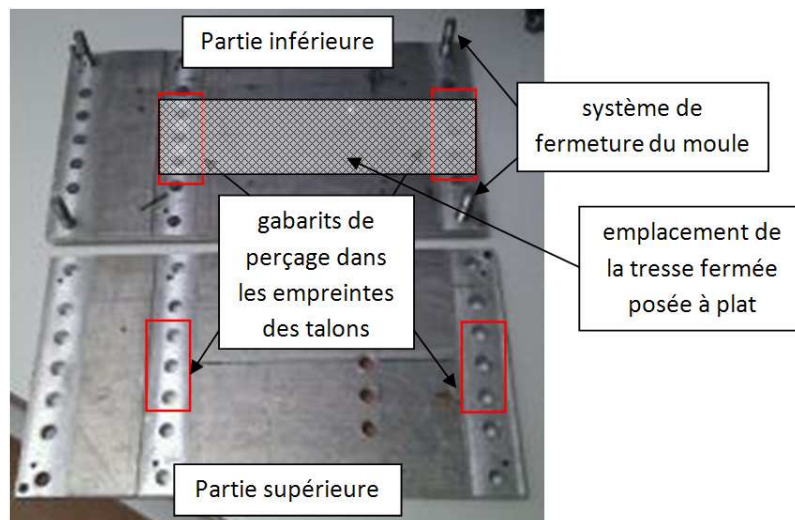


Figure 64 : Moule de Bias Test (ouvert)

La préparation des éprouvettes demande rigueur et précision pour garantir le bon fonctionnement et la fiabilité des essais pratiqués :

- Les talons inférieurs sont positionnés dans les empreintes de la partie inférieure du moule (Figure 64)
- La tresse, découpée à la longueur adaptée à l'écartement entre les empreintes, est positionnée à plat à l'emplacement indiqué.

A cette étape, il est indispensable de veiller à ce qu'elle soit d'une largeur de 73mm, qui correspond à un état non cisailé. Une fois la largeur imposée, l'orientation des mèches est contrôlée pour s'assurer qu'elles forment bien un angle à $\pm 45^\circ$, c'est-à-dire que la tresse est non cisailée. Il faut aussi veiller à ce que la tresse n'ait pas subi de torsion sur elle-même, ce qui engendrerait des plis « parasites » avant même le début de l'essai de cisaillement.

- Les talons de la partie inférieure du moule sont enduits de colle époxy en soulevant l'extrémité de la tresse avec précaution, les talons de la partie supérieure enduits de colle sont placés sur la tresse en face des talons du dessous
- Le moule est refermé et maintient l'ensemble en position serrée à l'aide des quatre systèmes « vis/écrou » situés dans les angles du moule
- Après 24h de séchage, les perçages sont effectués sur les extrémités de l'éprouvette. Ces perçages ont pour but de fixer l'éprouvette sur le dispositif de Bias test (Figure 65).



Figure 65 : Epreuve sur le dispositif de Bias Test

Les éprouvettes ainsi obtenues sont installées sur le dispositif pour les essais de Bias Test.

Présentation du dispositif d'essai :

Les essais de Bias Test sont effectués sur un dispositif expérimental de traction comprenant trois parties :

- Deux mors installés sur un système hélicoïdal permettant de modifier leur écartement manuellement,
- Une camera pilotée par un logiciel d'acquisition assurant les prises de vue en cours d'essai,
- Un dispositif de contrôle du déplacement et de mesure de la force à laquelle est soumis l'échantillon.

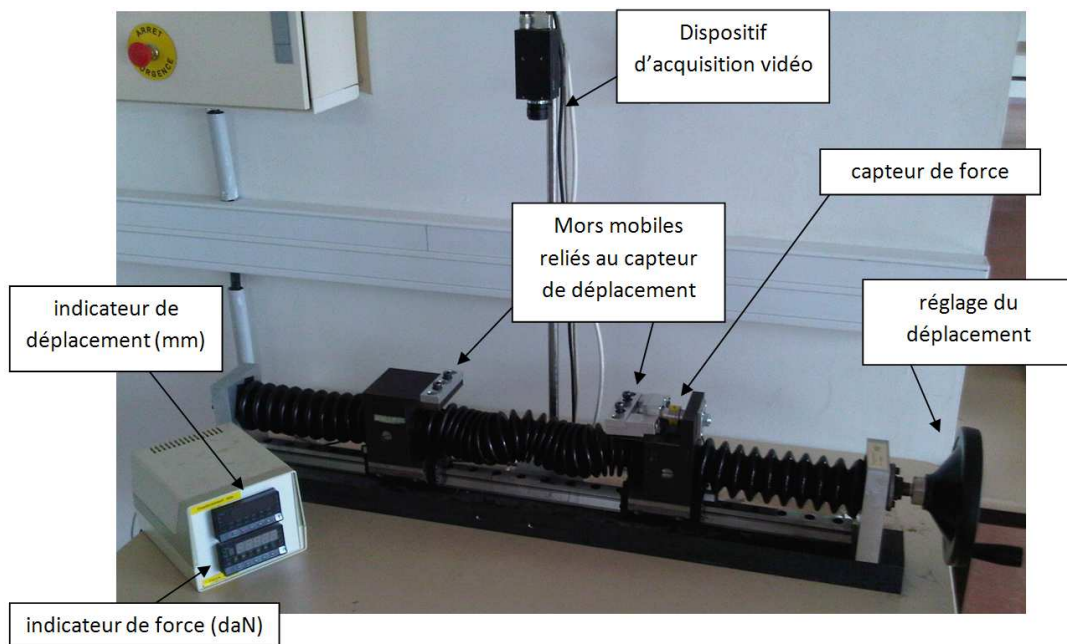


Figure 66 : Dispositif de traction pour essai de Bias Test

L'éprouvette est installée sur le dispositif à l'aide de vis sur les mors. Au départ, le renfort doit être tendu et ne doit pas fléchir sous son propre poids, la mise sous tension de l'échantillon est calibrée à l'aide des capteurs présents sur le dispositif : il faut écarter les mors pour tendre le renfort de l'éprouvette jusqu'à l'augmentation de la force relevée sur le capteur. A partir du moment où la force relevée est non nulle, l'essai peut débuter.

L'essai est piloté manuellement en déplacement, les mors sont petit à petit écartés pour créer une tension dans l'éprouvette. L'orientation des mèches à $\pm 45^\circ$ au moment de la préparation de l'échantillon induit une déformation du renfort en cisaillement lorsque l'éprouvette est soumise à un effort de traction.

Une photographie de l'éprouvette est prise régulièrement avec l'augmentation du déplacement des mors induisant un effort dans l'éprouvette. Ces photographies sont prises en zone centrale de l'éprouvette où nous observons du cisaillement pur. Les angles de cisaillement sont ensuite mesurés numériquement sur les photographies à l'aide du logiciel d'analyse d'images *Gimp*. Un motif calibré a été mis en place sous l'éprouvette afin de servir de référence pour trouver la corrélation entre les distances mesurées numériquement (en pixels) et les distances réelles (en millimètres et en degrés) sur les images prises en cours d'essai.

Si les précautions de préparation des éprouvettes ont été respectées, les phénomènes apparaissent simultanément sur la couche supérieure de la tresse (visible sur les prises de vue) et la couche inférieure de la tresse. Toutefois il faut veiller en cours d'essai à ce que des plis n'apparaissent pas préférentiellement sur une couche, ce qui indiquerait que la préparation de l'éprouvette est insuffisamment précise. Les efforts de frottement entre les deux couches de matériaux sont négligeables par rapport aux efforts mis en jeu pour l'essai. Toutefois les efforts mis en jeu sont très faibles (Figure 68) puisque l'angle de blocage est atteint pour un effort de traction aux alentours de 1 N. La valeur de l'angle de blocage ainsi déterminée est donnée à 30° . Ensuite des plis apparaissent rapidement du fait de la faible rigidité en flexion de la tresse (Figure 67). L'échantillon, fabriqué à partir de tresse dans la configuration fermée, est symétrique. Son comportement est identique sur les deux faces. En effet les plis apparaissent au même moment sur la couche inférieure et sur la couche supérieure de l'échantillon de tresse fermée.

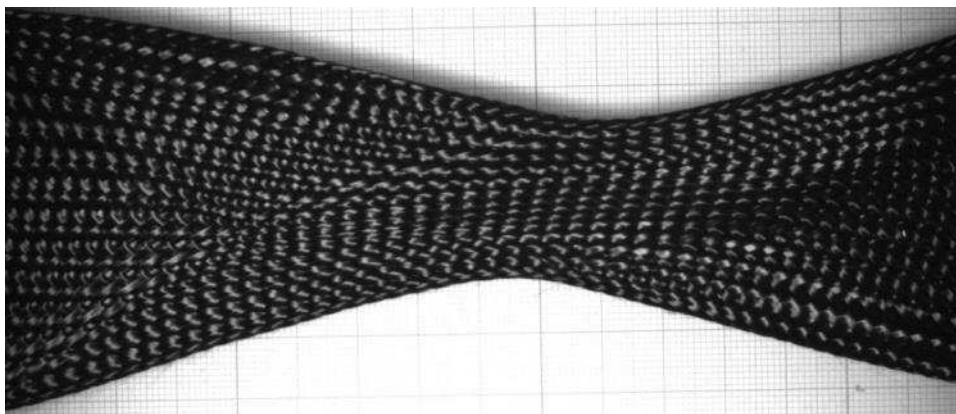


Figure 67 : Eprouvette de Bias TEST - Tresse de carbone (apparition des plis)

b. Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont conformes aux formes globales des lois de comportement en cisaillement des renforts tissés issues de la bibliographie (Figure 61) comme on peut le constater sur la Figure 68

suivante. Les résultats présentés ici sont issus de la moyenne de deux échantillons testés avec le même type de préparation des éprouvettes et un protocole expérimental identique avec des mesures en zone centrale où le cisaillement est pur. Il faut noter que la rotation des mèches des tresses est favorisée du fait de leur structure particulière. Cet effet d'architecture implique que les efforts mis en jeu soient bien moindres pour atteindre l'angle de blocage pour la tresse par rapport aux valeurs rencontrées pour les renforts tissés. En effet, les efforts atteints dans les caractérisations de ce type pour les renforts tissés sont de l'ordre de 10 N [67] tandis qu'ils sont inférieurs à 1N pour la tresse. Les renforts tressés sont donc plus déformables que les renforts tissés. A ce titre, l'apparition de l'angle de blocage est associée à l'augmentation soudaine de l'effort (Figure 68) et non par projection de la seconde pente obtenue graphiquement comme c'est le cas classiquement pour les renforts tissés [64].

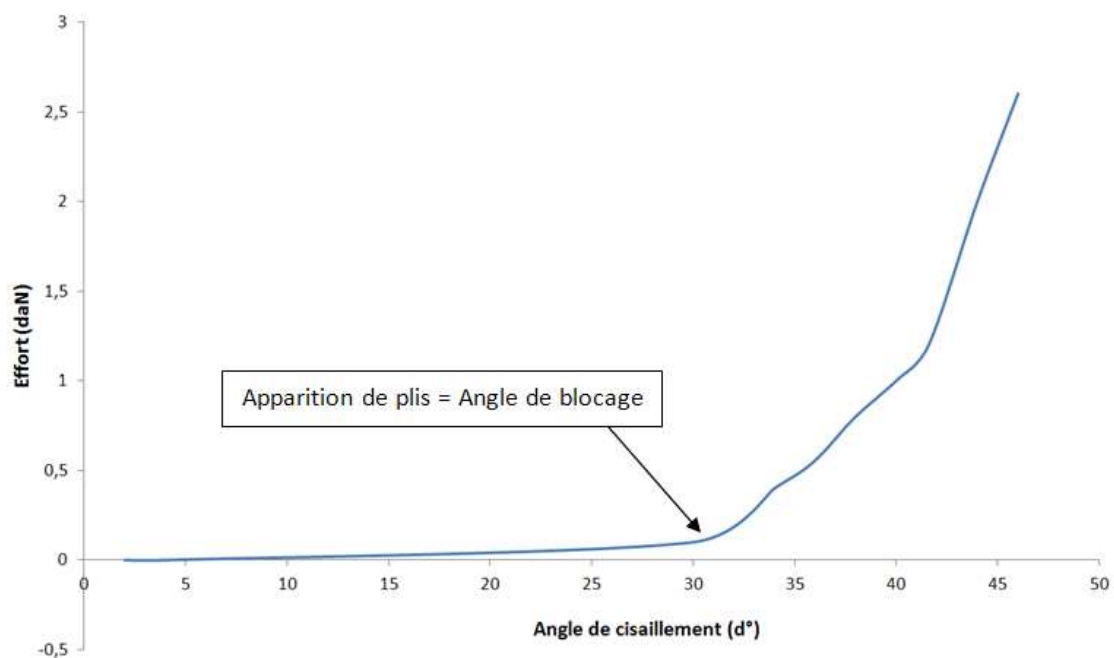


Figure 68 : Loi de comportement - cisaillement - (Tresse carbone)

Le comportement en cisaillement des renforts tissés est influencé par les tensions pouvant régner dans les mèches du renfort [67,89]. Au cours de préformage par ligature de tresses, les tensions mises en jeu dans les mèches de la tresse sont faibles ainsi leur potentiel impact sur le comportement de la tresse en cisaillement sera négligé. Cela permet d'envisager un modèle simple de comportement en cisaillement de la tresse en deux étapes : le cisaillement libre jusqu'à l'angle de blocage, suivi d'un verrouillage favorisant l'apparition de plis.

La détermination de l'angle de blocage peut ainsi être obtenue expérimentalement pour les tresses étudiées mais on peut également essayer de le déterminer à partir d'un modèle analytique et des caractéristiques intrinsèques du renfort.

2.3 Détermination théorique de l'angle de blocage

On peut obtenir une valeur approchée par méthode analytique en considérant que l'angle de blocage est l'angle de fermeture des pores entre les mèches (Figure 69).

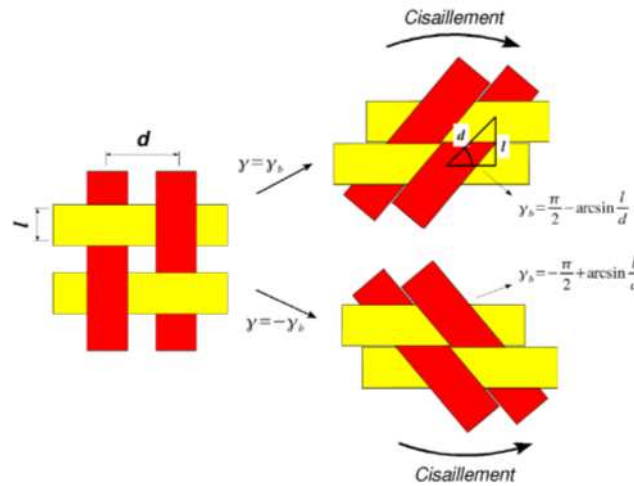


Figure 69 : Angle de blocage [20]

Dans le cadre de ce modèle, l'angle de blocage γ_b est atteint lorsque les mèches sont en contact latéralement (2.4) :

$$\gamma_b = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{l}{d} \quad \text{et} \quad \gamma'_b = -\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{l}{d} \quad (2.4)$$

avec l la largeur d'une mèche (mm) et d la distance entre intersections de mèches (mm).

La distance d est définie par la relation suivante

$$d = \frac{D_N \cdot \pi \cdot \sqrt{2}}{N_M} \quad (2.5)$$

où D_N et N_M , grandeurs caractéristiques intrinsèques du renfort, représentent diamètre nominal et le nombre de mèches sur sa circonférence. Ces paramètres dit « matériau » font l'objet d'une présentation détaillée en Chapitre 3. Il y a deux valeurs pour l'angle de blocage, suivant le sens dans lequel le renfort est cisailé. Ainsi, pour vérifier si l'angle de blocage n'est pas atteint, il faut que l'angle de cisaillement vérifie les inéquations suivantes :

$$-\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{l}{d} < \gamma(r) < \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{l}{d} \quad (2.6)$$

Pour les tresses étudiées, les valeurs théoriques de l'angle de blocage sont obtenues à partir de grandeurs caractéristiques connues (D_N , N_M , donc d) mais aussi à partir de la largeur de mèches. Ces grandeurs sont répertoriées (Figure 70) pour les tresses de carbone et de silice utilisées pour les études du préformage.

Caractéristiques	Carbone	Silice
Diamètre nominal D_n (mm)	50	65
Largeur de mèches l (mm)	1,5	2,3
Nombre de mèches sur circonférence N_m	120	80
Distance entre mèches d (mm)	1,85	3,61
Angle de blocage γ_b (°)	35,88	38,02

Figure 70 : Caractéristiques géométriques des tresses

Ces valeurs conduisent donc à l'obtention d'angles de blocages théoriques de $-35,88^\circ$ et $35,88^\circ$ pour la tresse de carbone et de $-38,02^\circ$ et $38,02^\circ$ pour la tresse de silice. Contrairement aux observations effectuées classiquement pour les renforts tissés, ces valeurs sont moins restrictives que les angles de blocage observés expérimentalement. En effet, lors des essais de BIAS Test effectués sur la tresse de carbone, les plis sont apparus à partir d'un angle de 30° (Figure 68). De ce fait, on peut affirmer que la rigidité initiale en compaction latérale des mèches est importante, les plis apparaissent donc dès le contact latéral des mèches entre elles. L'approche expérimentale mise en œuvre a donc conduit à l'obtention de résultats dans la même gamme de valeurs que l'approche théorique.

Les résultats précédents ont permis d'identifier l'angle de blocage de la tresse de carbone, ainsi que la courbe de comportement en cisaillement. Pour la compréhension et la modélisation du préformage, il est indispensable de connaître la réponse en cisaillement, non plus à une sollicitation en traction mais en fonction de l'état de déformabilité de la tresse en cours de préformage.

2.4 Modèle d'étude du cisaillement mésoscopique

Lorsqu'un renfort est sous forme de tresse, il existe une relation entre l'angle de cisaillement et le diamètre de la tresse d'après les relations (2.4) et (2.5). La caractérisation du comportement en cisaillement consiste également à identifier cette loi d'évolution. Cette relation est essentielle lors du procédé de formage envisagé ici puisque les différentes mailles du renfort se positionnent sur un pli conique. La tresse est donc déformée par cette géométrie particulière dont le diamètre et l'angle entre les mèches évoluent en fonction du rayon du fait de la géométrie conique du mandrin sur lequel est plaqué le pli (Figure 71).

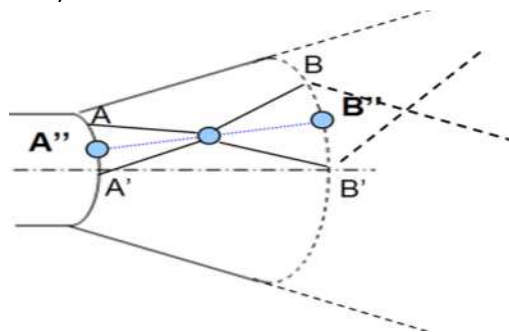


Figure 71 : Echelle du pli ; échelle mésoscopique (maille élémentaire)

La connaissance de cette loi d'évolution du cisaillement en fonction de la position de la maille sur le pli est donc essentielle pour la modélisation du préformage. Cette loi permettra de prévoir si la limite physique de l'angle de blocage est atteinte pour un matériau donné pour une géométrie conique donnée et sera donc un premier critère de choix de matériau pour assurer un préformage de qualité sans risque d'apparition de plis.

a. Influence sur la fraction volumique

Outre l'apparition de plis, le cisaillement, en diminuant la surface de l'échantillon et donc de la maille élémentaire conduit à une augmentation du taux volumique de fibre, et à une modification du diamètre dans le cas particulier des tresses (Figure 16). L'influence du cisaillement sur la fraction volumique de fibres a été investiguée par différents auteurs, par exemple Long [38] ou Smith [72]. Il existe une relation pour déterminer la fraction volumique de fibres après cisaillement (noté $V_{f\gamma}$) à partir de la fraction volumique de fibres du renfort non cisailé (noté V_{f0}) et de l'angle de cisaillement (noté γ) [38] :

$$V_{f\gamma} = \frac{V_{f0}}{\cos \gamma} \quad (2.7)$$

Cette équation est valable dans le cas du cisaillement pur. Elle a été vérifiée expérimentalement par différents auteurs, pour des tissus [63 - 68] et pour des tresses [73]. La connaissance de l'évolution de l'angle de cisaillement en cours de procédé est donc indispensable. En effet, une variation de cisaillement aura une influence sur la fraction volumique locale du pli, il faudra donc s'assurer que les critères d'admissibilité en termes de fraction volumique ($60\% \pm 10$) sont toujours respectés. De plus, du point de vue du procédé, l'angle de blocage ne devra pas être atteint pour éviter l'apparition de plis.

Avant de développer un modèle prédictif de la variation de cisaillement en fonction de la position de la maille sur le pli conique (Chapitre 3), l'évolution du cisaillement en fonction de l'état de déformation de la tresse doit être observée expérimentalement.

b. Evolution expérimentale du cisaillement en cours de préformage

Il est nécessaire d'obtenir l'évolution de l'angle de cisaillement en fonction des différents états de déformation de la tresse. En effet, lorsqu'elle est mise en position pour former le pli conique, la tresse passe successivement par différents états de déformation correspondant à l'évolution de son diamètre sur la forme conique. C'est cette évolution des différents états qui nous intéresse ici. Ces déformations successives de la tresse subies pendant le préformage sur un cône ont été reproduites à l'aide de gabarits cylindriques et octogonaux (Figure 72) qui représentent les différents diamètres successifs pris par la tresse le long du pli conique, on pourra ainsi représenter graphiquement l'évolution de l'angle de cisaillement en fonction du rayon du cône.

Les gabarits cylindriques sont un moyen de représenter les diamètres successifs pris par la tresse lorsqu'elle est drapée sur la forme conique. Les gabarits octogonaux quant à eux ont été conçus pour déformer et cisailier la tresse au même titre que les gabarits cylindriques tout en optimisant les zones « planes » de mesure des angles entre les mèches, situées sur les faces de l'octogone.



Figure 72 : Mesure de cisaillement - gabarits cylindriques (gauche) et octogonaux (droite)

Des essais de tresses posées à plat, à différentes largeurs correspondant aux états de déformation équivalents aux diamètres des gabarits cylindriques et octogonaux ont été également effectués. Les essais de caractérisation de la tresse en cisaillement en fonction des diamètres pris par celle-ci ne nécessitent donc pas d'installation expérimentale fixe.

Contrairement aux essais de caractérisation de comportement en cisaillement pour les renforts tissés dont font l'objet de nombreuses études de la littérature, notamment les essais de Bias Test et de Picture Frame [57-65], les protocoles d'essais pour caractériser le comportement en cisaillement des tresses en fonction de l'état de déformation sont peu voire pas décrits.

Il existe toutefois des études dans la littérature qui mettent en lumière l'évolution numérique de certaines grandeurs caractéristiques telles que l'épaisseur d'un pli de renfort dans un empilement en fonction de l'angle de cisaillement pour les tresses [30,74] ou le « nesting factor » [75] qui illustre la variation de l'épaisseur d'un pli de tresse 2D ou 3D en fonction du nombre de plis présents dans l'empilement.

Il a donc fallu mettre en place un protocole d'essai permettant de déterminer l'évolution du cisaillement de la tresse de carbone caractérisée dans cette étude en fonction de son état de déformation. Le protocole retenu réside donc dans l'utilisation des gabarits (plats, cylindriques et octogonaux). Chaque état de déformation étudié est obtenu par les trois méthodes pour faciliter la comparaison des résultats obtenus afin d'en valider la pertinence.

Préparation des échantillons

Une préparation soignée des échantillons est primordiale pour ces essais. En effet, celle-ci comporte peu d'étapes mais nécessite quelques précautions sur la mise en place de la tresse sur les gabarits. Les recommandations sont identiques, qu'il s'agisse de la mise en place sur un gabarit plat (Figure 73 a), cylindrique (Figure 73 b) ou octogonal (Figure 73 c).

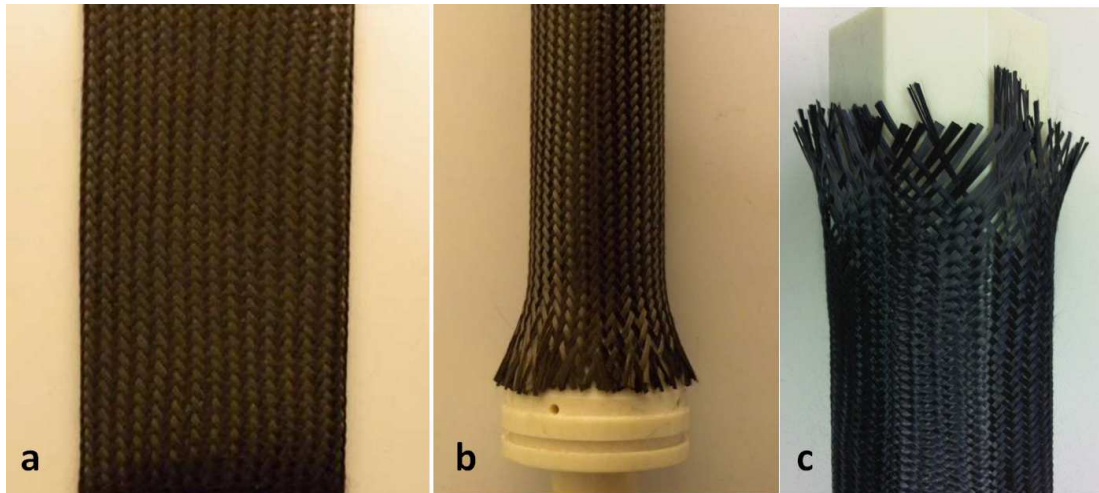


Figure 73 : Tresse sur gabarit : a) plat, b) cylindrique, c) octogonal

La tresse doit être convenablement plaquée sur les gabarits afin que son état de déformation « réel » soit conforme à celui imposé par la taille du gabarit. Cette vérification est indispensable pour s'assurer que l'état de déformation associé à l'angle de cisaillement est conforme mais aussi que les résultats issus des mesures avec les trois types de gabarits imposant théoriquement le même état de déformation restent comparables.

Il faut aussi veiller à ce que la tresse ne présente pas de zones de torsion sur la longueur des gabarits. Ces vérifications sont effectuées manuellement au moment de la mise en place de la tresse sur les gabarits. Une fois la tresse plaquée sans torsion, elle est maintenue en position sur les gabarits par des bandes adhésives.

A ce titre, la longueur des gabarits cylindriques et octogonaux est fixée à 200 mm et 150 mm pour les gabarits plats afin de conserver une zone d'étude, vierge de tout système de fixation de la tresse et dont le maintien en position des mèches est garanti, de l'ordre de 100 mm sur la hauteur.

Déroulement des essais

Une fois les éprouvettes ainsi préparées, elles sont disposées sur un support propre et de couleur neutre et claire afin d'être photographiées.

La prise de vue s'effectue sur la zone centrale de la hauteur de l'échantillon sur le gabarit afin de s'affranchir de tout effet de bord sur ses extrémités. Ces effets de bord peuvent être notamment causés par la présence des bandes adhésives. Pour restituer un maximum de détails, les photographies couvrent une zone utile de 100mm pour permettre la multiplication des points de mesure. L'élaboration et l'utilisation des gabarits octogonaux vont aussi dans ce sens. En effet, sur un gabarit cylindrique, la zone des points mesurables sur la prise de vue se limite à une ligne, alors qu'elle est plus étendue sur une des faces d'un octogone (Figure 74).

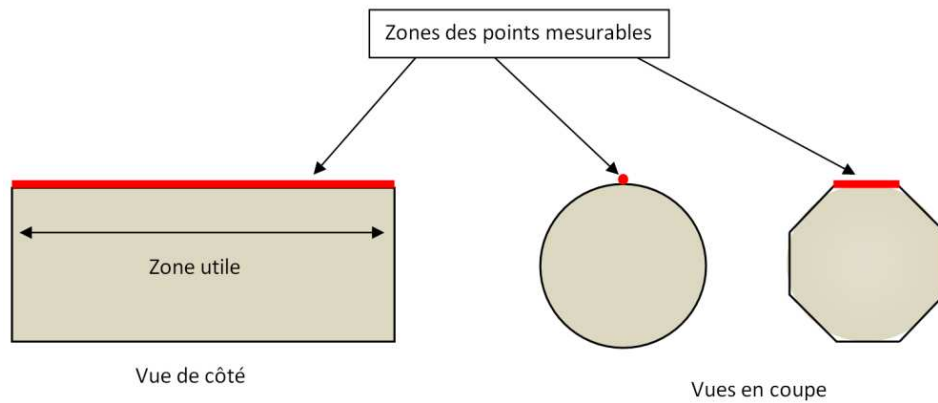


Figure 74 : Zones des points mesurables - gabarits cylindriques et octogonaux

En effet, chaque point expérimental présenté dans les résultats de l'étude est issu de la moyenne de cinq points de mesure au minimum dont l'écart-type ne doit pas excéder 8% afin de garantir l'obtention de résultats fiables et répétables. Au delà de cette valeur, une nouvelle éprouvette est préparée puis photographiée jusqu'à atteindre la cohérence souhaitée entre les mesures pour un même état de déformation. Les mesures sont obtenues par analyse d'image avec le logiciel *Engauge Digitizer* qui fournit la distance séparant des marqueurs numériques placés manuellement sur les images. Les angles de cisaillement sont donc mesurés à l'aide de ces marqueurs numériques à partir des photographies. Un objet de référence dont les dimensions sont connues est placé à côté de l'échantillon sur chaque photographie pour permettre de faire le lien entre les distances mesurées numériquement en pixels à partir des marqueurs et les distances réelles en millimètres. Cette opération doit être répétée pour chaque image analysée.

Les trois types de gabarits (à plat, cylindrique et octogonale) ont été utilisés pour caractériser la tresse de carbone en cisaillement. La comparaison de ces résultats sera donc utilisée pour valider la cohérence des résultats issus des mesures avec les différents types de gabarits dans la caractérisation du comportement des tresses en cisaillement.

Les résultats de caractérisation du comportement en cisaillement de la tresse de silice avec des gabarits à plat et cylindrique sont également présentés. Ainsi, l'utilisation de gabarits de même type sur les deux tresses permet de comparer les différences de comportement en cisaillement des renforts étudiés.

Résultats obtenus

Quel que soit le type de gabarit utilisé, les données expérimentales concernant l'état de déformation de la tresse sont ramenées à un rayon. Ainsi, l'évolution de l'angle de cisaillement de la tresse est présentée comme étant la fonction de l'évolution du rayon, assimilable à l'évolution du rayon du pli conique formé par la tresse en cours de préformage (Figure 75).

Les gabarits octogonaux sur lesquels la tresse est plaquée pour ces essais présentent des arêtes. Les renforts mis en forme avec des outillages présentant des arêtes peuvent subir un écrasement de mèches sur ces arêtes. Ce phénomène n'est pas visible sur les gabarits octogonaux. Cette absence d'écrasement des mèches sur les arêtes s'explique par le fait que la tresse n'est pas soumise à un effort de traction dans ses mèches pour être plaquée sur les gabarits octogonaux, la tresse est juste maintenue en position sans tension à l'aide des bandes adhésives. L'utilisation des gabarits octogonaux n'implique donc pas de déformation supplémentaire sur le renfort par rapport à l'utilisation de gabarits cylindriques.

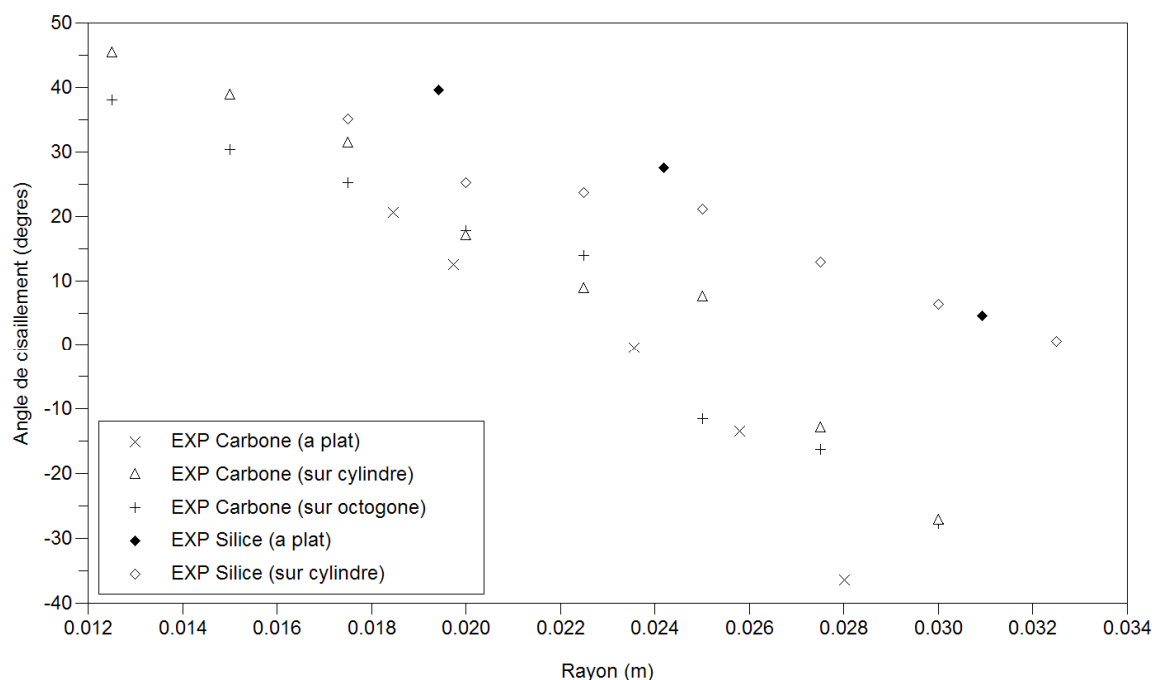


Figure 75 : Evolution du cisaillement - Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus sur la Figure 75 permettent deux types d'analyses. Dans un premier temps, la comparaison des résultats obtenus avec les différents gabarits pour un même matériau ; puis les différences de comportement lors du passage d'un renfort à l'autre dans les mêmes conditions de préformage.

Qu'il s'agisse de la tresse de silice ou de carbone, les résultats issus des différentes méthodes de mesure ne présentent pas de variation significative. Cette cohérence entre les résultats permet donc de valider l'équivalence en termes de fiabilité des trois types de gabarits pour obtenir une évolution de l'angle de cisaillement en fonction de l'état de déformation des tresses.

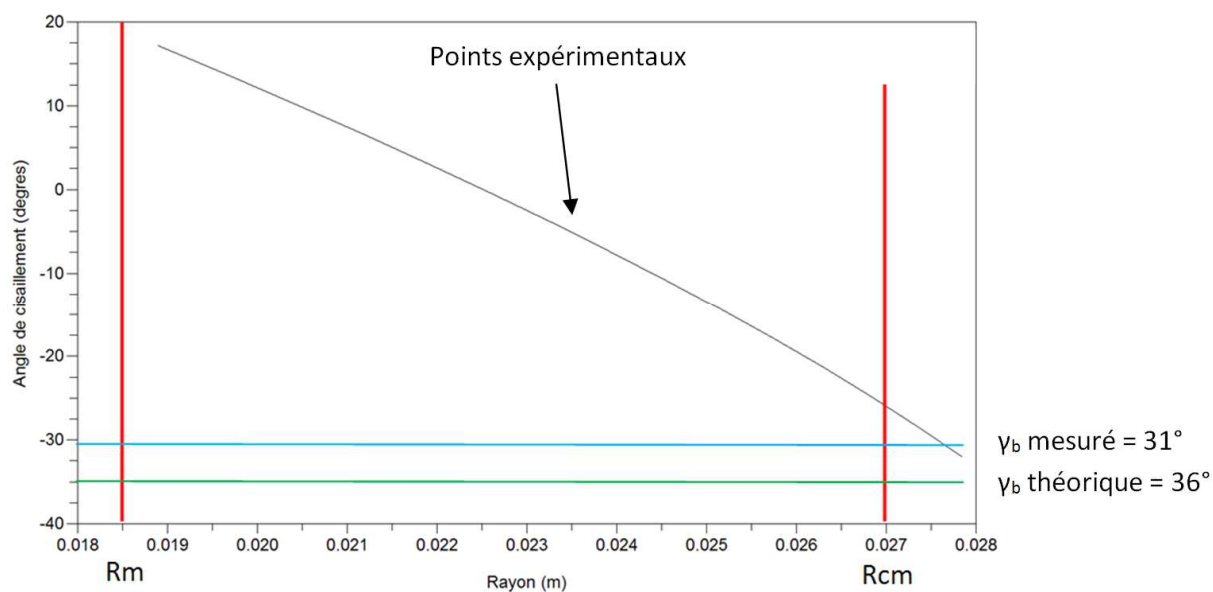


Figure 76 : Evolution du cisaillement - Tresse de carbone

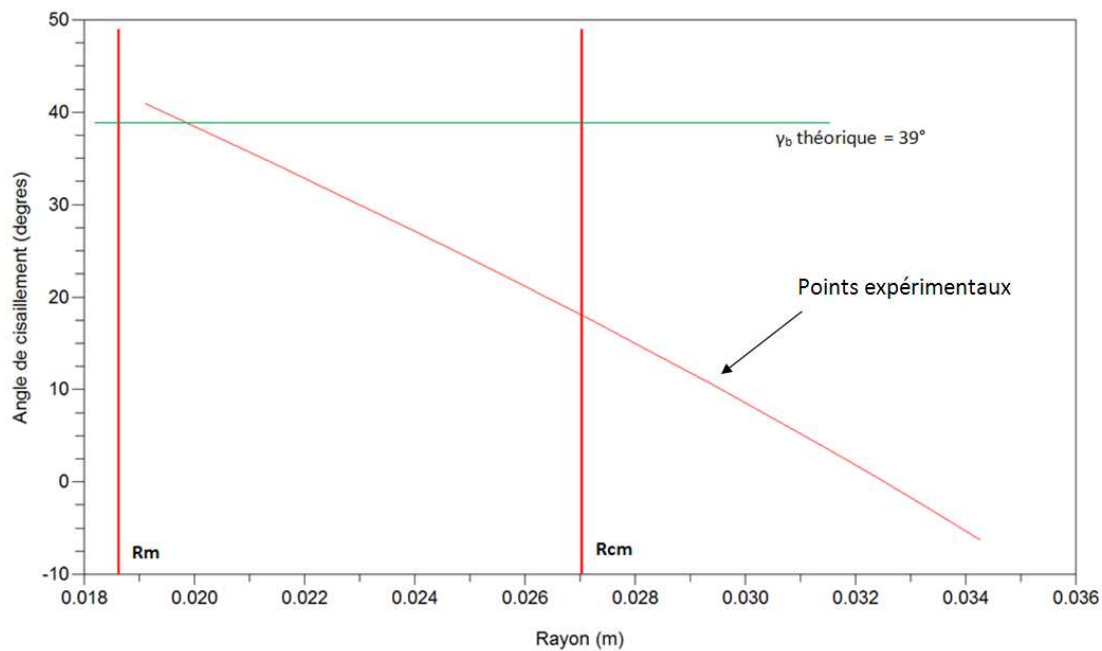


Figure 77 : Evolution du cisaillement - Tresse de silice

On reporte dans la Figure 76 et la Figure 77 une moyenne, pour chaque matériau, des points expérimentaux obtenus précédemment (de la Figure 75) auxquels on superpose les angles de blocages déterminés lors de la caractérisation du comportement en cisaillement (Figure 68 et Figure 70).

Les résultats permettent de constater l'importance du choix de matériau dans le cadre du préformage. En effet, dans le domaine d'utilisation de cette étude, pour un rayon variant de 18,5 à 27 mm, l'angle de cisaillement varie entre 15 et 40° pour la gaine de silice (Figure 77) et entre -10 et 25° pour la tresse de carbone (Figure 76).

Pour une géométrie donnée, les angles de cisaillement sont plus importants pour la tresse de silice que pour la tresse de carbone. La silice subit donc une plus grande déformation, il y a donc un risque plus important d'atteindre l'angle de blocage en cours de préformage et d'engendrer l'apparition de défauts. Ces observations confirment donc le choix de poursuivre les études de ce manuscrit avec la tresse de carbone uniquement.

Le tableau récapitulatif des avantages et inconvénients suivant (Figure 78) peut servir de base pour le choix de l'un ou l'autre des gabarits pour des potentiels nouveaux essais de caractérisation de cisaillement d'une tresse.

	Mise en position	Maintien en position	Qualité des prises de vue	Facilité de fabrication	BILAN
PLAT	-	+	+	+	+
CYLINDRIQUE	+	+	-	=	=
OCTOGONAL	=	+	+	-	=

Figure 78 : Classement des méthodes de représentation de la déformation de la tresse

Les critères retenus sont dans un premier temps la facilité à approvisionner ou faire fabriquer à moindre coût les gabarits. De ce point de vue, il est clair que la méthode « à plat » est à privilégier ; les gabarits octogonaux étant ceux susceptibles d'être les plus délicats à obtenir.

Viennent ensuite des critères liés à l'essai à proprement parler, notamment en ce qui concerne la mise et le maintien en position de la tresse, qui garantissent une maîtrise du positionnement des mèches et optimisent ainsi l'obtention de résultats fiables et répétables. A ce niveau, les gabarits cylindrique et octogonal présentent de très bons résultats, contrairement à la méthode du gabarit à plat.

Le gabarit octogonal présente de plus l'avantage considérable de faciliter les prises de vue qui permettent la mesure numérique des angles de cisaillement.

Le dernier critère de classement se réfère à la qualité de la prise de vue possible, cet aspect est aussi prépondérant dans l'obtention de résultats fiables et répétables. Pour ces critères liés à l'essai, les gabarits « à plat » et octogonal sont les meilleurs.

Pour conclure, il apparaît que la meilleure méthode, tous critères confondus, soit celle du gabarit à plat, il faut cependant garder en tête les excellents résultats du gabarit octogonal pour la garantie de l'obtention de résultats de qualité.

Conclusion

A l'issue de ces essais, la caractérisation du comportement en cisaillement des tresses a été effectuée. De manière indépendante du procédé de préformage, à l'image des essais réalisés sur les renforts tissés, mais également à l'aide de protocoles spécifiques qui reproduisent l'état de cisaillement lors du procédé de préformage. Ces méthodes d'obtention de l'évolution de l'angle de cisaillement en fonction de l'état de déformation des tresses ont été comparées et validées.

L'évolution du cisaillement de la tresse de carbone en fonction du rayon du cône sur lequel elle est drapée a donc été déterminée expérimentalement. Connaissant l'angle de cisaillement, l'évolution de la fraction volumique associée est directement obtenue grâce à la relation (2.7).

Les limites physiques d'utilisation du matériau, plus particulièrement l'angle de blocage, ont été identifiées théoriquement ainsi qu'à l'aide d'essais de Bias Test pour la détermination expérimentale.

3 Couplages compaction/cisaillement : Influence sur l'épaisseur des plis

Les comportements respectivement en compaction et en cisaillement ont été étudiés séparément, afin de valider la modélisation du préformage écrite avec les lois déterminées précédemment, il faut étudier le couplage de la compaction et du cisaillement et en déterminer l'influence sur l'épaisseur des plis dans l'empilement.

3.1 Observations dans la littérature

Les études disponibles sur l'effet du cisaillement sur l'épaisseur portent majoritairement sur les renforts tissés [87]. Ces études sont peu nombreuses mais tendent à montrer une influence du cisaillement sur l'épaisseur du renfort (Figure 79 [87]).

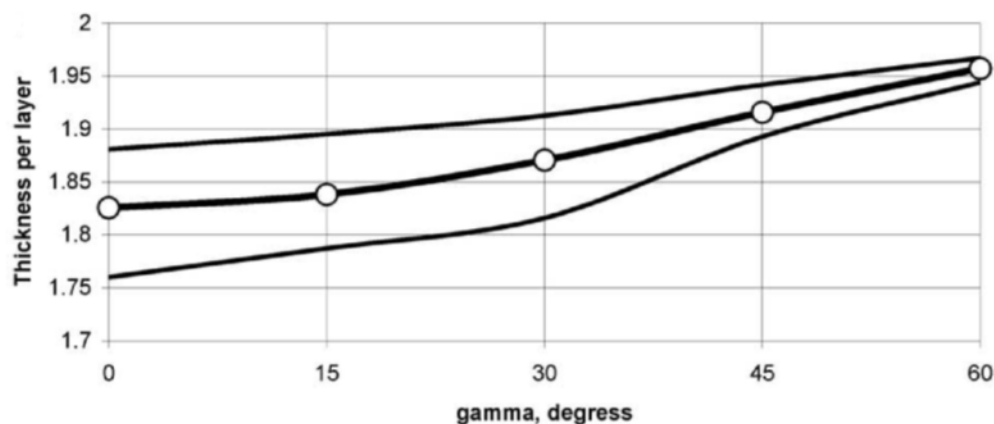


Figure 79 : Influence du cisaillement sur l'épaisseur d'un renfort tissé [87]

Il apparaît que l'épaisseur d'une couche de renfort augmente de l'ordre de 7% lorsque le cisaillement passe de 0 à 60°. Il faut noter que cette valeur de 60° pour l'angle de cisaillement est importante et dépasse le seuil défini par l'angle de blocage déterminé pour la tresse de carbone.

D'autres études [75-77] confirment que dans le cas particulier des tresses 2D, l'effet du nesting diminue lorsque l'angle de cisaillement augmente. Les effets du couplage sur l'épaisseur du pli restent limités (de l'ordre de quelques pourcents) pour les tresses 2D.

3.2 Essais et résultats

Les caractérisations propres aux tresses de l'étude sont toutefois à mener. Ces essais sont délicats tant sur la préparation des échantillons que sur la mesure de l'épaisseur des tresses cisillées mais aussi dans leur état initial. Les essais ont été effectués sur un empilement de une à quatre tresses fermées et posées à plat. Contrairement aux essais de caractérisation en compaction précédents effectués pour un cisaillement nul, les essais de compaction présentés dans cette partie ont été mis en œuvre avec des échantillons de tresse présentant un état de cisaillement variable. Les différents états de cisaillement ont été obtenus en imposant aux tresses empilées et posées à plat quatre largeurs différentes qui induisent les états de cisaillement à étudier (5°, 16°, 32° et 47°). La pression de compaction imposée pour toutes les configurations d'empilements est constante et de l'ordre de 0,1 MPa. En effet, cette valeur, en limite du comportement asymptotique observé lors des essais de compaction, permet de couvrir la fourchette d'efforts de compaction subis par la tresse en cours du procédé de préformage.

Les résultats expérimentaux des essais de couplage menés sur la tresse de carbone (Figure 80) présentent l'évolution de l'épaisseur du renfort en fonction du nombre de couches. On parlera ici de l'épaisseur e_{tresse} d'une couche « simple » de tresse (ouverte) mais aussi de la grandeur caractéristique du procédé, l'épaisseur d'un pli e_{pli} . Par convention dans cette étude, l'épaisseur d'un pli est égale au double de l'épaisseur d'une couche. En effet, le procédé de préformage consiste à former un pli en repliant la tresse sur elle-même.

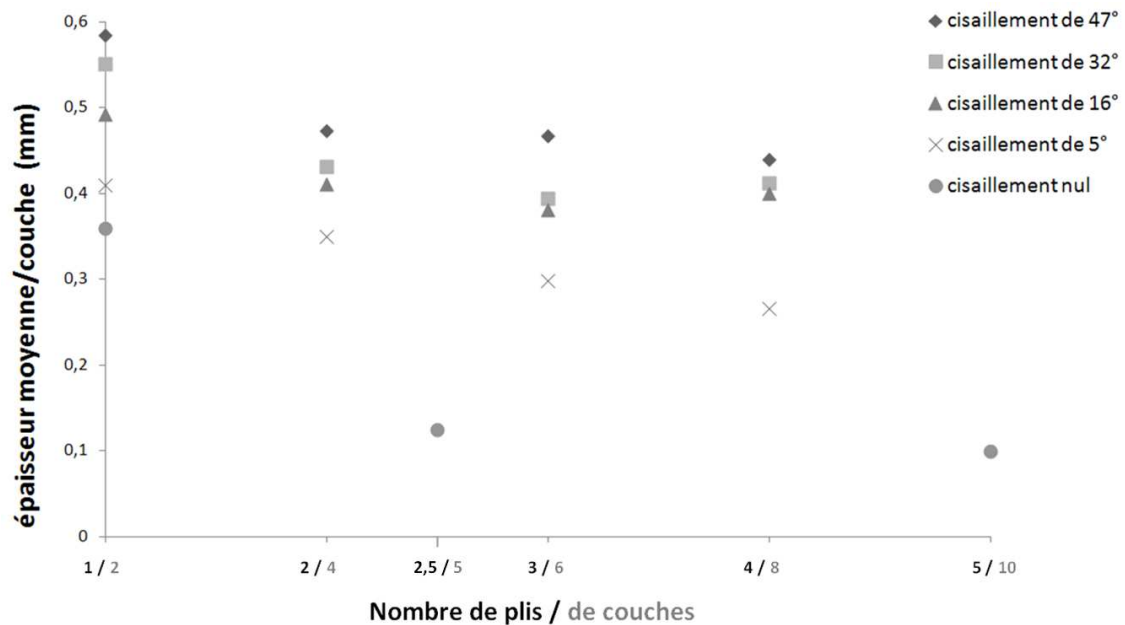


Figure 80 : Épaisseur moyenne par couche en fonction du nombre de plis. Tresse de carbone

Les courbes de la Figure 80 présentent l'évolution de l'épaisseur d'une couche dans l'empilement à différents états de cisaillement. On y observe l'effet du cisaillement sur l'épaisseur d'une couche dans les empilements. Cet effet diminue lorsque l'état de cisaillement augmente. En effet, l'épaisseur des empilements varie de 25% selon que le cisaillement entre 5° et 16° alors que cette variation n'est que de 11% en moyenne pour un cisaillement allant de 16° à 47°.

De la même manière, hormis pour des cisaillements faibles (5°), la variation d'épaisseur par couche n'est que très peu affectée par le cisaillement dès que le nombre de couches augmente.

Les résultats de la Figure 81 suivante présentent l'évolution de l'épaisseur de deux types d'empilement en fonction du cisaillement. Ces résultats indiquent que l'épaisseur par couche de la tresse dans un empilement varie avec le cisaillement. Ces observations sont cohérentes avec les tendances observées dans la bibliographie (Figure 79) dans le cas des renforts tissés. Il apparaît donc que les renforts de structures tresse sont soumis au même type de comportement que les renforts tissés lorsqu'il s'agit de l'évolution de leur épaisseur en fonction du cisaillement. Toutefois des études [77] ont montré que le comportement couplé compaction/cisaillement apparaît pour des valeurs de compaction plus faible que pour les renforts tissés.

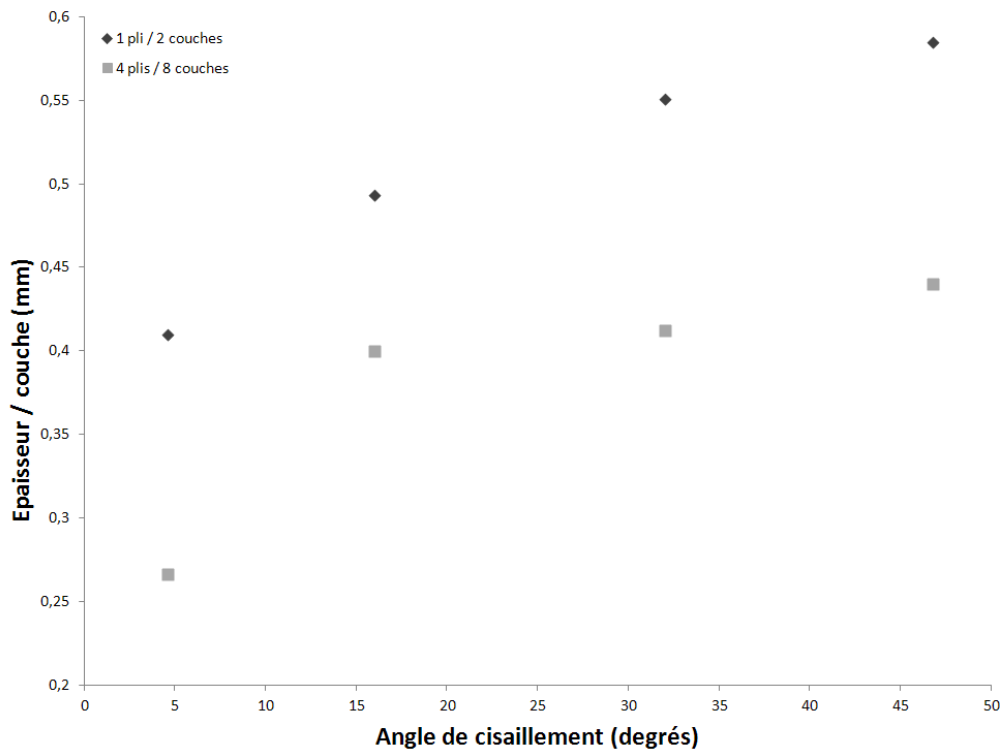


Figure 81 : Evolution de l'épaisseur en fonction du cisaillement

Nous pouvons observer sur la Figure 81 les évolutions de configurations extrêmes d'empilements. Les résultats obtenus confirment pour le cas de la tresse qu'une variation de l'état de cisaillement a une influence sur l'épaisseur des couches de l'empilement. On remarque toutefois que l'influence du cisaillement sur la variation d'épaisseur des couches dans les empilements est très atténuée pour les cisaillements importants. En effet, dans le cas du monoplis, la variation d'épaisseur par couche varie de 42% si le cisaillement varie entre 5° et 47° alors que cette variation n'est plus que de 23% si le cisaillement varie entre 16° et 47°. Ce phénomène est d'autant plus flagrant pour le cas des empilements multipli. La variation d'épaisseur de 69% lorsque l'angle de cisaillement varie de 5° à 47° passe à 10% lorsque l'angle de cisaillement ne varie plus qu'entre 16° et 47°.

Pour résumer, pour le cas du monoplis, l'état cisailé n'est pas suffisant pour empêcher le réarrangement des mèches par nesting lors de la compaction ; dans le cas de multiplis (4 plis / 8 couches), la compaction entre les couches prend le pas sur le cisaillement et le mouvement des mèches n'est guère possible.

3.3 Bilan des études sur le couplage

Le préformage étudié ici consiste en un empilement de 120 plis, la tendance globale est donc proche de la variation modérée observée par l'empilement multicouche avec une variation d'épaisseur de 10%. De plus, ces essais pour caractériser l'influence du couplage sont effectués à faible pression de compaction or les résultats présentés en Figure 56 indiquent que les épaisseurs des couches tendent vers une valeur minimale commune, quelle que soit la configuration de l'empilement lorsque la pression de compaction augmente. On peut en déduire qu'il en sera de même pour l'évolution de la fraction volumique de fibres. Les effets du couplage semblent ici être négligeables dans les circonstances du procédé étudié.

Pour la suite de l'étude, notamment pour l'étape de modélisation du procédé de préformage, le phénomène de couplage entre la compaction et le cisaillement sera donc négligé.

4 Conclusion de la caractérisation et de la modélisation du comportement de la tresse

Lors du procédé de préformage, la tresse est plaquée sur une forme conique, avec pour conséquence une sollicitation majeure en cisaillement. Les plis sont ensuite empilés les uns sur les autres pour constituer la préforme. La tresse est alors majoritairement soumise à une sollicitation en compaction. A l'issue de cette partie consacrée à un état de l'art sur le comportement des renforts composites, et plus particulièrement les tresses, soumis à des sollicitations de compaction et de cisaillement et aux essais menés pour caractériser la tresse, son comportement en compaction et cisaillement a été déterminé.

L'évolution de l'angle de cisaillement en fonction de l'état de déformation de la tresse est connue, de même que l'influence de cette dernière sur l'évolution de la fraction volumique dans le pli.

Dans le cadre des sollicitations en compaction, l'évolution de la fraction volumique de fibre en fonction de la pression appliquée est connue pour différents types d'empilements. L'influence du nombre de plis contenus dans l'empilement soumis à la compaction a aussi été explorée. De la même manière, l'évolution de l'épaisseur des plis dans l'empilement est désormais connue en fonction de la pression de compaction pour différentes configurations d'empilements.

Les lois d'évolution de compaction et de cisaillement utiles à la compréhension et à la modélisation du préformage sont donc décrites et identifiées.

La cohérence des résultats obtenus expérimentalement avec les données issues de la bibliographie sur le comportement en compaction et cisaillement des tresses non imprégnées, bien que très peu décrit dans la littérature, est vérifiée. Les résultats obtenus expérimentalement sur le comportement des tresses en compaction et en cisaillement ont aussi montré une bonne cohérence avec les résultats issus de la littérature pour les renforts tissés.

Les limites d'utilisation de la tresse en cisaillement via l'angle de blocage ainsi que la variation de l'état de cisaillement en cours de préformage sont connues. Les modalités d'utilisation de ces lois pour la modélisation du procédé, notamment en ce qui concerne un potentiel couplage, ont été définies. Ce couplage est étudié pour un effort de compaction figé, une étude de ce couplage compaction / cisaillement pour différents efforts de compaction [77] serait intéressante à explorer pour la suite éventuelle de ces études.

Après avoir consacré ce deuxième chapitre à la caractérisation du comportement de la tresse pour en déterminer les lois associées, le chapitre suivant traite de la modélisation du préformage basé sur les caractérisations observées.

CHAPITRE 3 : Analyse de l'étape de préformage : Modélisation et validation expérimentale

Au cours du procédé de préformage décrit dans le Chapitre 1, nous avons constaté que la tresse est principalement soumise à deux modes de sollicitation. Lors de la première phase du préformage, le drapage sur la forme conique, la tresse est sollicitée en cisaillement ; pendant la seconde étape, l'empilement des plis, la sollicitation prépondérante est la compaction. L'étude et l'identification du comportement des tresses soumises à ces sollicitations, indépendamment du procédé, a fait l'objet du Chapitre 2.

Le présent chapitre est consacré à l'élaboration d'un modèle géométrique associé à l'étape de préformage. L'objectif de ce modèle est de pouvoir prendre en compte les paramètres pour prédire dans un premier temps, puis pour optimiser dans un second temps, la déformabilité des tresses lors du procédé. Basé sur des considérations géométriques afin de rester simple contrairement à des approches par éléments finis, ce modèle permet d'estimer le long des plis constituant la préforme des quantités telles que l'état de cisaillement ou la fraction volumique de fibre. Ces paramètres permettant soit, pour le cisaillement d'analyser les niveaux de cisaillement requis pour le procédé, soit dans le cadre des fractions volumiques de comparer les résultats par rapport au cahier des charges souhaité. Dans le premier paragraphe de ce chapitre, ce modèle sera détaillé ainsi que les corrélations expérimentales menées sur les préformes.

En plus des paramètres propres aux tresses, ce modèle s'appuie sur des hypothèses relatives à la modélisation de la forme des plis qui, en fonction des paramètres spécifiques au procédé, évolue. A partir de campagnes expérimentales menées sur des coupes de préformes et d'analyses des formes de pli, les différents modèles seront proposés.

1 Modélisation du cisaillement : Développement d'un modèle d'analyse de la déformabilité

Lors de l'opération de dépose qui s'effectue manuellement, la tresse est soumise à diverses sollicitations. L'objectif de ce chapitre s'inscrit dans la prédiction, la quantification de la déformation du renfort, à partir de données relatives au procédé et à la géométrie de la pièce à fabriquer mais surtout du matériau utilisé conformément aux critères définis en paragraphe 2.4 de la Chapitre 1. L'objectif est d'obtenir la position et l'orientation du pli, son épaisseur ainsi que l'orientation des mèches à l'intérieur, mais aussi la fraction volumique de fibres et sa variation. Enfin, une conclusion sur la faisabilité d'une préforme sans défauts sera donnée, notamment concernant la limite d'utilisation des renforts en cisaillement avec γ_b l'angle de blocage obtenu de manière théorique et expérimentale dans le Chapitre 2.

1.1 Les différentes échelles de l'étude

Une préforme (échelle macroscopique) obtenue par le procédé de dépose envisagé est constituée d'un ensemble de plis faisant un angle précis relativement à l'axe du mandrin. Chaque pli est constitué d'un ensemble de mailles élémentaires (échelle mésoscopique) formées par les mèches de la tresse (échelle microscopique). Ces 3 échelles sont représentées sur la Figure 82 :

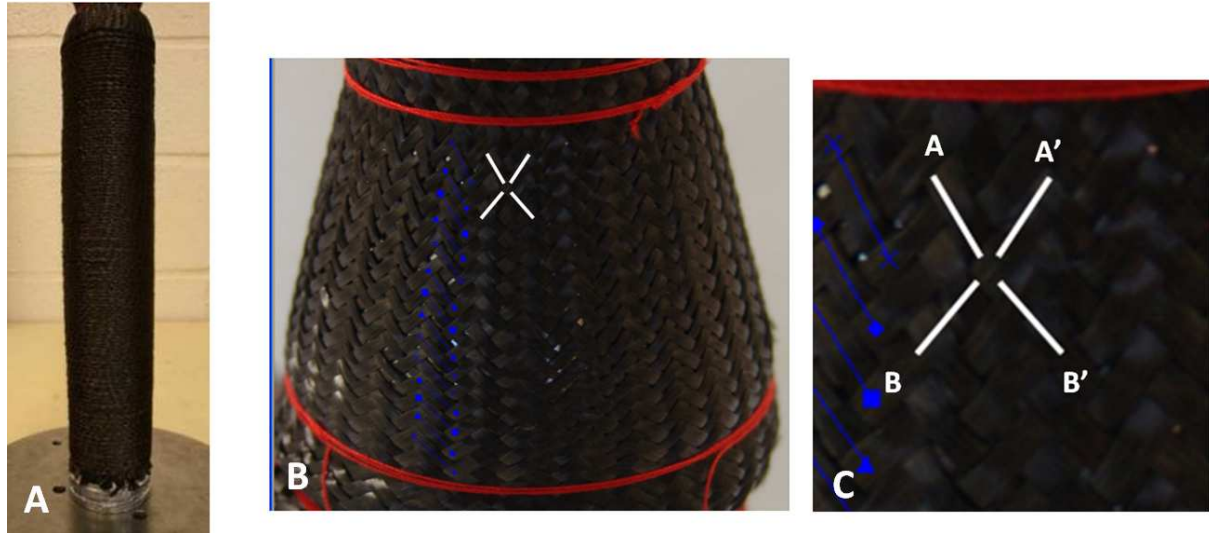


Figure 82 : A : Echelle macroscopique (préforme), B : échelle du pli, C : échelle mésoscopique (maille élémentaire)

L'étude de déformation des renforts de type tresse lors du préformage par ligatures est un problème multi-échelles. La géométrie de la préforme est définie à l'échelle macroscopique, les autres critères liés aux paramètres procédés appartiennent à l'échelle du pli tandis que les variations de cisaillement étudiées dans ce chapitre seront conjointement liées à l'échelle de la maille élémentaire et du pli.

1.2 Paramètres du modèle mésoscopique

La modélisation présente, à l'échelle du pli, la position des mèches grâce à la prédiction de l'angle de cisaillement entre les mèches sur chacune des mailles successives formant le pli. Ce modèle géométrique est construit à l'échelle de la maille et est indépendant de la forme du pli. Dans cette première approche, nous nous plaçons donc dans le cas idéal d'un pli droit orienté à 15° par rapport à l'axe du tube (Figure 83).

Lorsqu'elle est drapée sur le mandrin à base conique, la tresse est cisailée (Figure 84). En effet, les nœuds (situés aux extrémités de la maille) ne sont plus sur le même rayon ce qui se traduit par une variation de diamètre de la tresse directement associé au cisaillement du renfort (Figure 16). Outre la variation d'angle de l'angle de cisaillement, les mèches se courbent pour suivre la forme conique du pli (Figure 84).

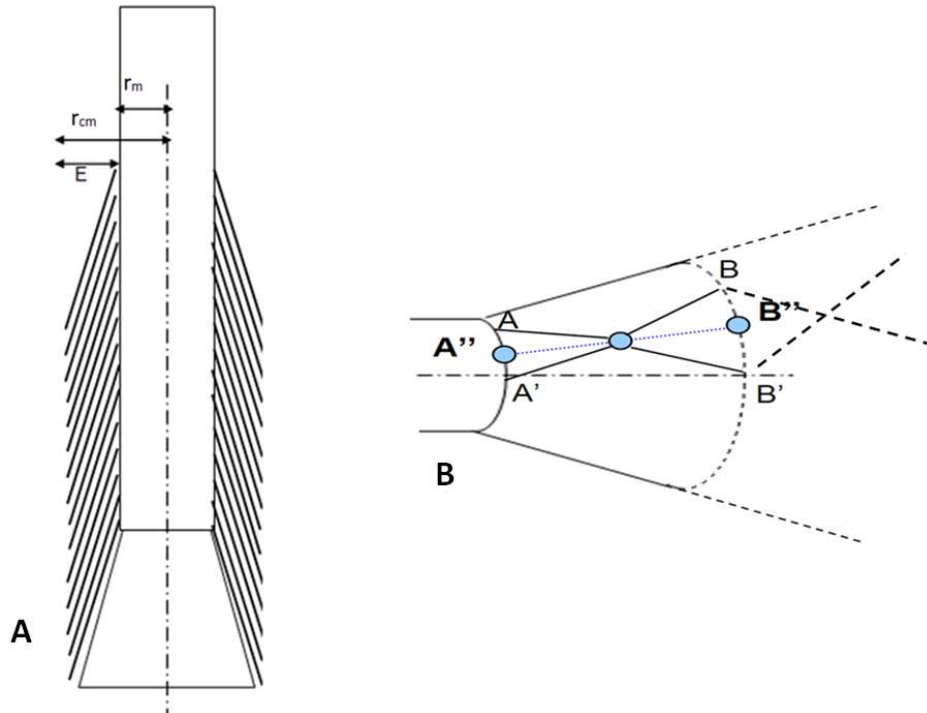


Figure 83 : Maille élémentaire (B) dans l'empilement de plis droit (A)

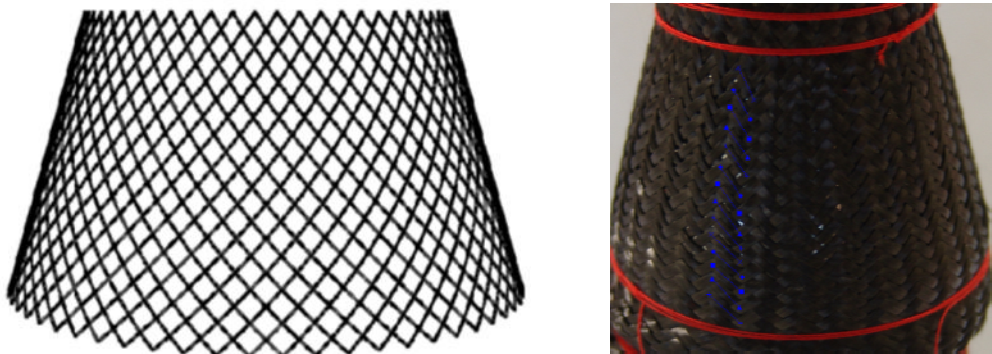


Figure 84 : Position des mèches sur un pli conique

Une maille élémentaire peut ainsi être initialement représentée par la Figure 85, la largeur de la maille $L(r)$ évoluant le long du pli.

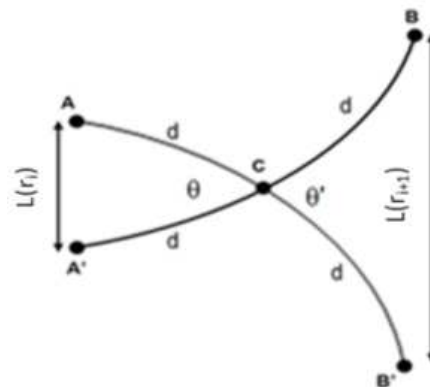


Figure 85 : Maille élémentaire - mèches courbes

Etant donnée la structure des mèches de ce type de tresse, la courbure doit rester faible ; dans le cas contraire, un flambement de la mèche se produit, conduisant à un défaut de type boucle [91].

Cependant, étant donné le nombre de mailles sur la circonférence du cône ainsi que les angles envisagés, la courbure entre deux intersections reste faible devant la taille de la maille. Une approche linéarisée (Figure 86) est donc suffisante. L'angle de cisaillement classiquement utilisé et identifié dans les essais pour les renforts est un angle de cisaillement moyen entre deux intersections de mèches. En conséquence, une approche linéarisée nous permettra donc de simplifier l'approche et d'augmenter l'efficacité de l'outil en fournissant les résultats souhaités. Une validation expérimentale de la cohérence de cette linéarisation sera présentée par la suite. Bien sûr, la prise en compte de la courbure pourrait être implémentée si cela s'avérait nécessaire.

L'approche simplifiée (linéarisée) consiste en une succession de barres droites, associée à l'hypothèse de non glissement des mèches entre elles, hypothèse classique pour les renforts tissés [92,93]. Ce modèle linéarisé conduit à décomposer la maille en deux demi-mailles.

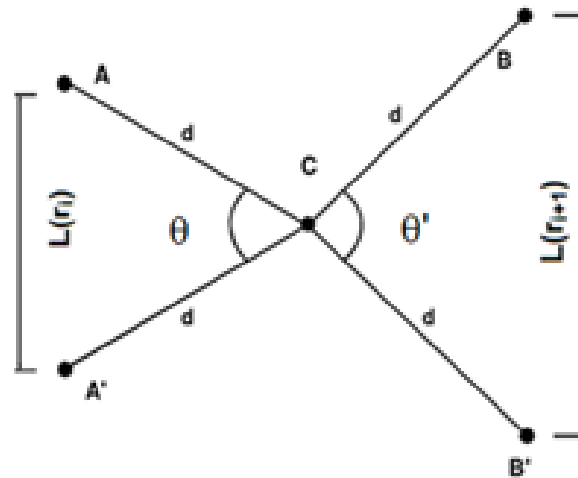


Figure 86 : Maille élémentaire – Approche linéarisée

La conséquence directe de l'hypothèse de non-glissement est que la distance entre intersections de mèches d est constante au cours de la déformation. Les mailles sur le pli conique (Figure 89 et Figure 90) sont donc définies par les paramètres suivants (Figure 87) :

Paramètres du modèle de la maille		Unités
Angle de conicité du mandrin	α	d°
Rayon déterminant la position de la maille sur le pli	r	mm
Largeur de la maille (à plat) ou longueur d'arc (drapé sur cône)	$L(r)$	mm
Angle de cisaillement	$\gamma(r)$	d°
Angle entre mèches	$\theta(r)$	d°
Distance entre intersections de mèches (constante par hypothèse sur la maille)	d	mm
Longueur des demies mailles sur le pli incliné	h	mm

Figure 87 : Paramètres du modèle de la maille

Les quantités sont calculées itérativement pour chacune des positions successives de la maille sur le pli. Les paramètres sont donc associés à des indices pour repérer la position de la maille étudiée sur le pli incliné.

Indices des paramètres du modèle de la maille			
Paramètre	Première demi-maille	Intersection	Deuxième demi-maille
r	r_i	$r_{i+1/2}$	r_{i+1}
$L(r)$	$L(r_i)$	$L(r_{i+1/2})$	$L(r_{i+1})$
h	h_i		h'_i
Angles calculés à l'intersection des demi-mailles			
	Première demi-maille	Deuxième demi-maille	
γ	$\gamma_{i+1/2}(r_i)$	$\gamma'_{i+1/2}(r_{i+1})$	
θ	$\theta_{i+1/2}(r_i)$	$\theta'_{i+1/2}(r_{i+1})$	

Figure 88 : Indices des paramètres du modèle de la maille

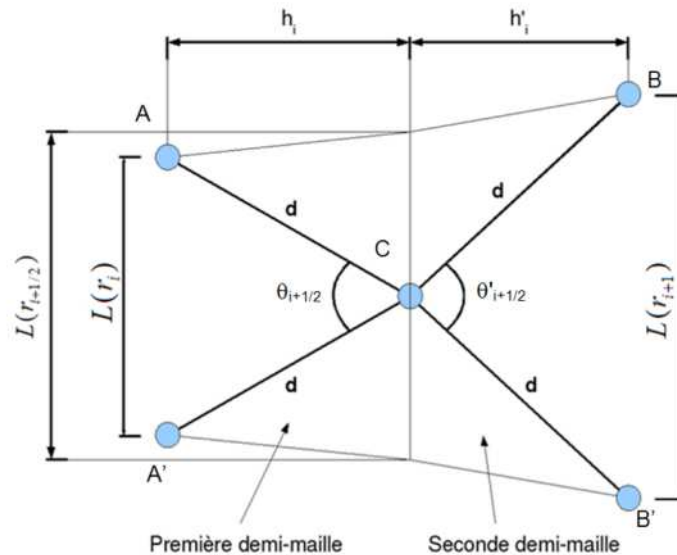


Figure 89 : Définition de la maille élémentaire (tresse drapée sur le cône)

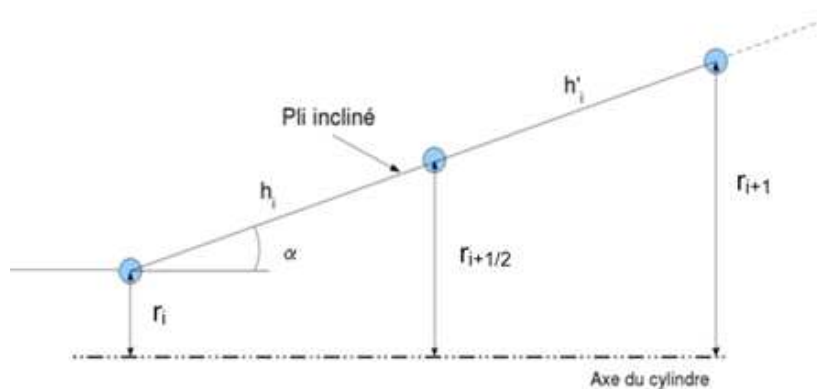


Figure 90 : Position de la maille sur le cône d'angle α

Nous avons ainsi défini et paramétré le modèle de maille élémentaire du modèle à l'échelle mésoscopique. Ce modèle, dont l'objectif est de déterminer l'angle de cisaillement en fonction des

paramètres constitutifs de la tresse et des paramètres liés au procédé, sera défini dans le paragraphe suivant.

1.3 Modèle à l'échelle de la maille élémentaire

L'objectif est de déterminer les paramètres du modèle pour aboutir à la détermination de l'angle de cisaillement en fonction des paramètres « matériau » liés à la tresse et « procédé ».

Les paramètres du modèle sont obtenus à partir des grandeurs caractéristiques de la tresse (Figure 91) et du procédé (Figure 92) qui sont :

Paramètres du modèle liés à la tresse		Unité
Diamètre nominal de la tresse	D_N	mm
Nombre d'intersections de mèches sur la circonférence	N_M	-
Epaisseur du pli	e_{pli}	mm

Figure 91 : Paramètres liés à la tresse

et des paramètres liés au procédé :

Paramètres du modèle liés au procédé		Unité
Distance entre ligatures	L_{lig}	mm
Diamètre des ligatures	D_{lig}	mm
Pas d'empilement des plis	p	mm

Figure 92 : Paramètres liés au procédé

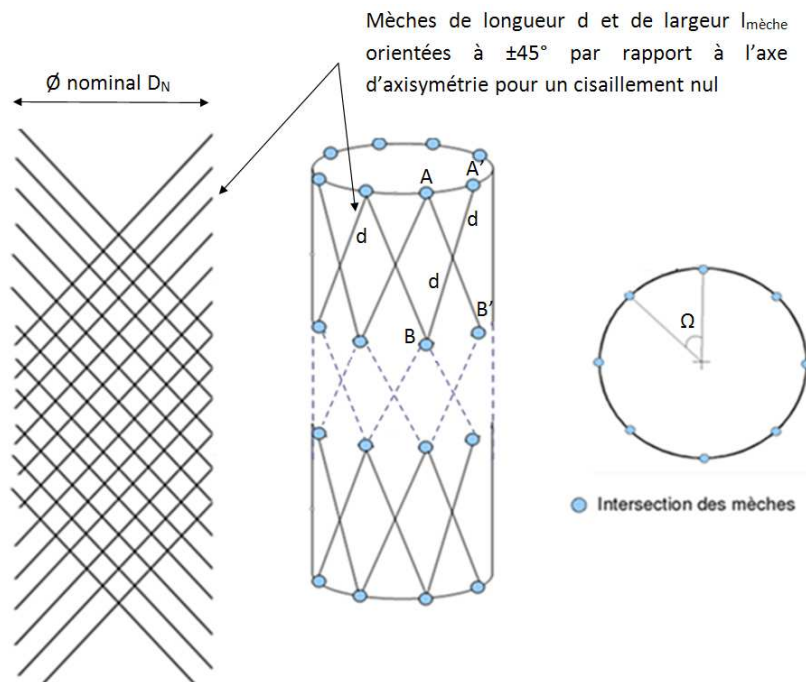


Figure 93 : Paramètres constitutifs de tresse

Ainsi, l'angle d'arc Ω (Figure 93) ainsi que la longueur d'arc $L(r)$ sont définis par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega = \frac{\pi}{N_M} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L(r) = \frac{\pi \cdot r}{N_M} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

La distance entre intersections de mèches d , supposée constante par hypothèse, s'écrit :

$$d = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot D_N}{N_M} \quad (3.3)$$

D'après Figure 89 et Figure 90, pour respectivement les deux demi-maillages, dont les positions sont définies par les rayons mais également par les longueurs « inclinées » sur le pli des demi-maillages h_i, h'_i , on peut écrire :

$$\begin{cases} h_i = \frac{r_{i+1/2} - r_i}{\sin \alpha} \\ h_i = \sqrt{d^2 - \frac{L(r_i)^2}{4}} \end{cases} \quad (3.4)$$

et

$$\begin{cases} h'_i = \frac{r_{i+1} - r_{i+1/2}}{\sin \alpha} \\ h'_i = \sqrt{d^2 - \frac{L(r_{i+1})^2}{4}} \end{cases} \quad (3.5)$$

A l'issue de cette étape, les positions des mailles sont donc paramétrées en fonction des caractéristiques de la tresse utilisée, les paramètres « matériau ». Il faut désormais obtenir l'expression de l'angle de cisaillement à partir des paramètres caractéristiques de la tresse et du modèle défini dans le chapitre précédent.

1.3.1 Détermination des rayons r_i le long du pli conique

Le paramètre principal, dont on cherche l'évolution (itérative) pour tout point de la géométrie de forme conique du pli, est le rayon du cône.

Les relations (2.8) à (2.10) permettent d'écrire les relations d'itération sur le rayon r_i suivantes :

$$\begin{cases} r_{i+\frac{1}{2}} = r_i + \sin \alpha \sqrt{d^2 - \left(\frac{r_i \cdot \pi}{2 \cdot N_M}\right)^2} \\ r_{i+\frac{1}{2}} = r_{i+1} - \sin \alpha \sqrt{d^2 - \left(\frac{r_{i+1} \cdot \pi}{2 \cdot N_M}\right)^2} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\text{Soit encore : } r_{i+1}^2 \cdot \left(1 + \frac{\pi^2}{4 \cdot N_M^2} \cdot \sin^2 \alpha\right) - r_{i+1} \cdot (2 \cdot r_{i+1/2}) + r_{i+1/2}^2 - d^2 \cdot \sin^2 \alpha = 0$$

Dont la solution discriminée est alors :

$$r_{i+1} = \frac{r_{i+1/2} + d \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{4 \cdot N_M^2} \left(\sin^2 \alpha - \left(\frac{r_{i+1/2}}{d}\right)^2\right)}}{1 + \frac{\pi^2}{4 \cdot N_M^2} \cdot \sin^2 \alpha} \quad (3.7)$$

Cette grandeur d'itération est liée aux contraintes du procédé avec l'angle d'inclinaison des plis mais aussi aux paramètres « matériau ».

Par le modèle sont désormais définis d'une part les angles de cisaillement, pour chaque maille de renfort et qui dépendent de la position, et d'autre part l'évolution de la position le long du cône. Ce modèle a été programmé sous Scilab. Le premier rayon de l'itération est celui du mandrin, $r_0 = r_m$ pour la suite de l'étude.

A l'aide des relations établies précédemment, l'algorithme calcule les positions successives des mailles sur le pli conique, soit:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{i+\frac{1}{2}} = r_i + \sin \alpha \sqrt{d^2 - \left(\frac{r_i \cdot \pi}{2 \cdot N_M} \right)^2} \\ r_{i+1} = \frac{r_{i+\frac{1}{2}} + d \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{4 \cdot N_M^2} \left(\sin^2 \alpha - \left(\frac{r_{i+\frac{1}{2}}}{d} \right)^2 \right)}}{1 + \frac{\pi^2}{4 \cdot N_M^2} \cdot \sin^2 \alpha} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

1.3.2 Détermination de l'angle de cisaillement en fonction du rayon r_i

D'après la Figure 89, sur chaque demi-maille, on peut exprimer l'angle entre les mèches à l'aide des paramètres décrits ci-dessus:

$$\theta_{i+\frac{1}{2}}(r_i) = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{L(r_i) / 2}{d} \right) \quad (3.9)$$

et

$$\theta'_{i+\frac{1}{2}}(r_{i+1}) = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{L(r_{i+1}) / 2}{d} \right) \quad (3.10)$$

Les largeurs des demi-mailles s'écrivent :

$$L(r_i) = \frac{r_i \cdot \pi}{N_M} \text{ et } L(r_{i+1}) = \frac{r_{i+1} \cdot \pi}{N_M} \quad (3.11)$$

Du point de vue des angles entre mèches, on a :

$$\theta_{i+\frac{1}{2}}(r_i) = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{r_i \cdot \pi}{2 \cdot d \cdot N_M} \right) \quad (3.12)$$

$$\text{et } \theta'_{i+\frac{1}{2}}(r_i) = 2 \cdot \arcsin \left(\frac{r_{i+1} \cdot \pi}{2 \cdot d \cdot N_M} \right) \quad (3.13)$$

L'angle de cisaillement γ est obtenu à partir de l'angle entre les mèches par

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (3.14)$$

A ce stade l'angle de cisaillement de chaque maille élémentaire de renfort (constituée de 2 demi-maillages) est exprimé en fonction des paramètres constitutifs de la tresse et de la position (par le rayon) sur le pli. L'évolution théorique du cisaillement en fonction du diamètre de tresse est donc connue.

La variable d'itération r_i est désormais définie et connue.

L'angle de cisaillement est donc désormais caractérisé par les paramètres de la tresse, les paramètres « procédé » ainsi que les paramètres du modèle avec les relations (3.15) suivantes :

$$\begin{cases} \gamma_{i+\frac{1}{2}}(r_i) = \frac{\pi}{2} - 2\arcsin\left(\frac{\sqrt{2}.r_i}{D_N}\right) \\ \gamma'_{i+\frac{1}{2}}(r_{i+1/2}) = \frac{\pi}{2} - 2\arcsin\left(\frac{\sqrt{2}.r_{i+1}}{D_N}\right) \end{cases} \quad (3.15)$$

L'angle de cisaillement est désormais connu pour toutes les positions de la maille sur le pli. Avec l'angle de cisaillement, la position des mèches du renfort est connue pour toutes les mailles en fonction de leur position sur le pli.

Ces calculs prédictifs doivent être comparés à des observations expérimentales pour être validés.

1.4 Comparaison avec les résultats expérimentaux

Le modèle mésoscopique, tel qu'il est défini au début de ce chapitre, permet de prédire l'évolution de l'angle de cisaillement de la tresse le long du pli conique. La comparaison des résultats ainsi obtenus avec les relevés expérimentaux va permettre de valider ce modèle ainsi que les hypothèses émises pour le décrire.

1.4.1 Validation du modèle

Les caractérisations expérimentales détaillées dans le Chapitre 2 ont permis de déterminer l'évolution du cisaillement de la tresse en fonction de son état de déformation. Des études ont également été menées pour effectuer des mesures de variation d'angle de cisaillement lorsque la tresse est drapée sur la forme conique du mandrin. Lors de ces essais, l'hypothèse consistant à estimer que la distance entre les intersections de mèches d a été vérifiée.

La tresse est positionnée sur la base conique du mandrin. Elle est drapée et maintenue en position par des ligatures sur les extrémités du cône. Une photographie du cône complet est effectuée en mode macroscopique (Figure 94).



Figure 94 : Tresse drapée sur cône

Les mesures des angles entre les mèches, pour obtenir l'angle de cisaillement, ainsi que la distance entre intersection de mèches, sont effectuées par analyse d'image à l'aide du logiciel Engauge Digitizer.

Dans le cadre d'études sur les renforts, les méthodes de mesure sans contact sont très couramment utilisées [48-54], elles permettent le suivi de champs de déformations dans le cadre de l'étude de comportement des renforts soumis à diverses sollicitations mais constituent également un moyen efficace d'identifier leurs grandeurs caractéristiques ainsi que les paramètres liés au procédé de fabrication.

Dans le cadre des études sur la tresse drapée sur le cône, les grandeurs mesurées ici par analyse d'image sont à la fois une grandeur caractéristique de la tresse avec la distance entre intersections de mèches, mais également une caractérisation de l'évolution du cisaillement lorsque la tresse est drapée sur un cône.

Ces grandeurs sont mesurées numériquement sur les photographies de la tresse drapée sur le cône. Les photographies doivent être centrées et doivent permettre de visualiser le cône dans son intégralité et d'éviter les effets de distorsion qui modifient les apparences des longueurs réelles (fish eye). De plus, la photographie utilisée pour faire les mesures par analyse d'image doit faire apparaître une zone ou une pièce de dimension connue pour permettre de créer le référentiel avec le logiciel Engauge Digitizer pour établir la correspondance entre le nombre de pixels mesurés numériquement sur l'image et la distance réelle en millimètres.

La première étape de l'utilisation du logiciel lors de l'analyse d'image est la création du référentiel (Figure 95).

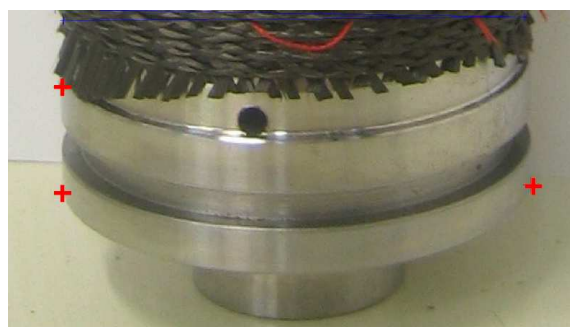


Figure 95 : Engauge Digitizer – Création du référentiel

1.4.2 Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus à l'issue des caractérisations de la tresse drapée sur le cône sont de deux types. Dans un premier temps, la distance entre intersections de mèches d a été mesurée le long du pli conique. L'objectif est de vérifier que l'hypothèse émise sur le fait que cette distance est constante quelque soit le cisaillement est valable.

Les résultats des mesures de la distance d pour toutes les mailles le long du pli sont présentés sur la Figure 96 suivante :

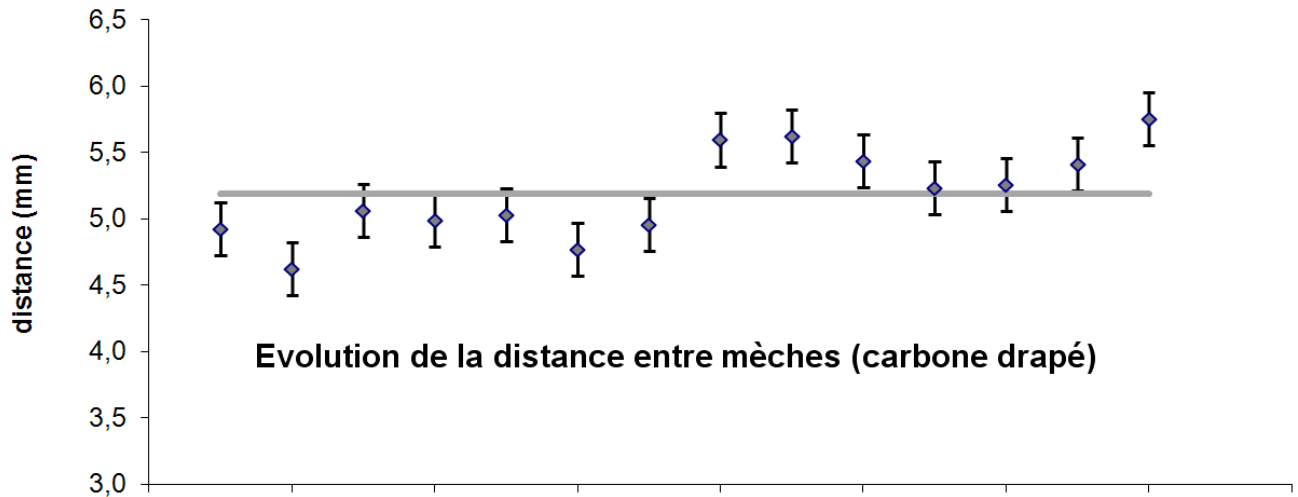


Figure 96 : Mesures de la distance entre mèches

Les résultats montrent une certaine homogénéité entre les valeurs mesurées et permettent donc de valider l'hypothèse prise pour considérer la distance entre intersections de mèches comme constante.

La seconde partie des caractérisations de tresse drapée sur le cône consiste en l'étude de l'évolution du cisaillement le long du pli. Cette caractérisation est toujours obtenue par analyse d'image.

Il faut mesurer, pour chaque position de maille sur le pli, l'angle de cisaillement associé. L'angle de cisaillement est obtenu à partir de l'angle entre les mèches θ mesuré sur l'image grâce à la relation

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (3.16)$$

Pour chacun des angles, la position sur l'image est repérée par la distance L prise à partir du sommet du cône (Figure 97).

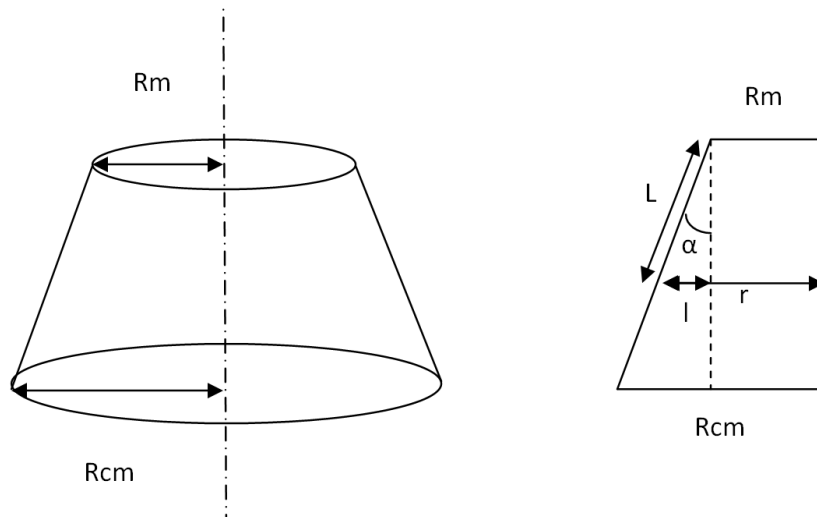


Figure 97 : Position des mailles sur le pli conique

où R_m et R_{cm} sont respectivement le rayon du mandrin et du contre-moule.

La position de la maille, en fonction du rayon r , est donc obtenue par la relation suivante :

$$r = L \cdot \sin \alpha + R_m \quad (3.17)$$

avec pour la géométrie de l'étude de ce manuscrit :

$$\alpha = 15^\circ$$

$$R_m = 18,5 \text{ mm}$$

La fiabilité des résultats est donc liée à la précision de la mise en place des marqueurs numériques pour mesure la longueur L . En effet, le marqueur doit être placé au milieu de l'intersection des mèches dont on mesure l'angle numériquement. Cette position est délicate à repérer malgré la largeur des mèches relativement étroite ($l_{\text{mèche}} = 1,5 \text{ mm}$). Il faut donc porter la plus grande attention à cette étape pour obtenir des résultats satisfaisants.

Ces relevés, effectués pour l'ensemble des mailles successives sur le pli, ont été répétés trois fois. Les résultats présentés sur la Figure 98 suivante sont donc issus de la moyenne de ces essais dont la répétitivité est validée.

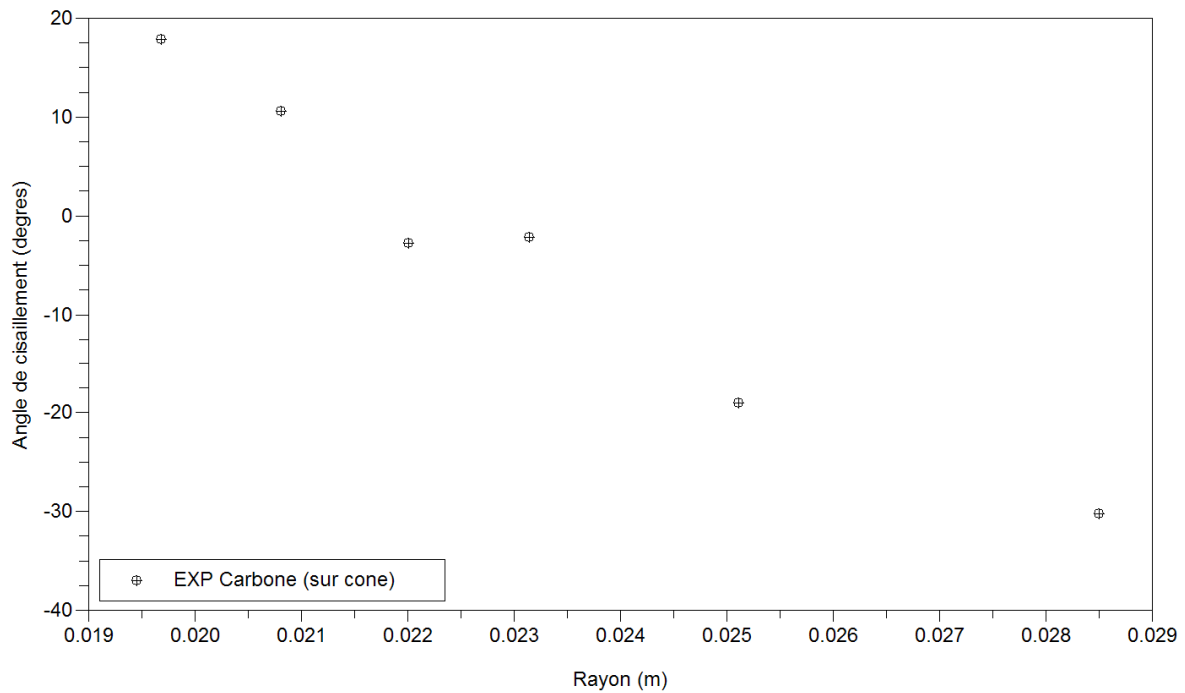


Figure 98 : Evolution expérimental de l'angle de cisaillement- Carbone drapé sur cône

Cette nouvelle méthode de caractérisation de l'évolution du cisaillement en fonction de l'état de déformation de la tresse de carbone est mise en comparaison avec les méthodes de gabarits (à plat, cylindrique et octogonale) détaillée au Chapitre 2 (Figure 99).

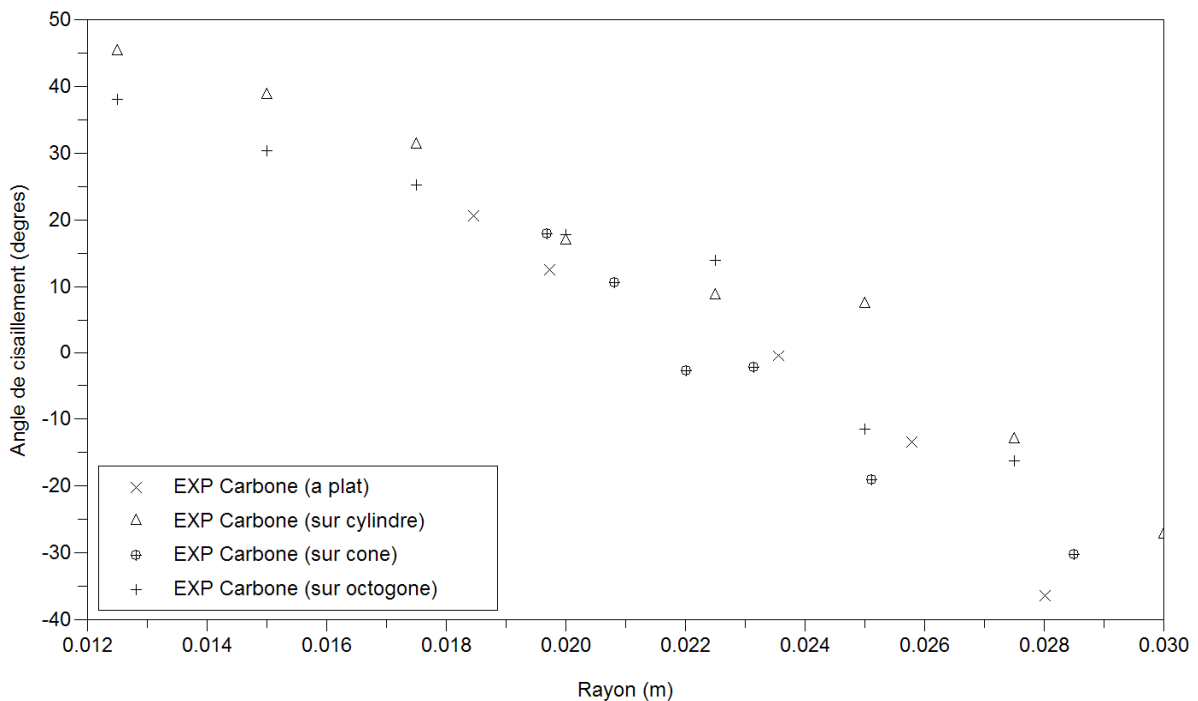


Figure 99 : Evolution expérimentale de l'angle cisaillement - Carbone, méthodes des gabarits

La comparaison des résultats obtenus par le biais des différentes méthodes exposées précédemment indique que la méthode de mesure de l'angle de cisaillement lorsque la tresse est drapée sur le cône permet d'obtenir des résultats dans la gamme de valeurs que pour les méthodes avec les gabarits.

Nous avons donc mis en évidence une manière supplémentaire pour mesurer l'évolution du cisaillement en fonction de la déformation de la tresse. Cette méthode « drapée » présente l'avantage d'être très fidèle aux déformations subies par la tresse pendant le préformage puisque la tresse est drapée directement sur l'outillage conique utilisé pour la mise en forme. Toutefois l'estimation de la position de la maille r est plus délicate et moins directe que pour les méthodes de mesure avec les gabarits. En effet, lorsque la tresse est drapée sur le cône, l'état de déformation, connu grâce au rayon r , est mesuré avec toutes les incertitudes potentielles dues aux manipulations possibles alors qu'avec les gabarits, l'état de déformation est connu et maîtrisé grâce à la dimension des gabarits.

L'évolution du cisaillement est désormais connue en fonction de l'état de déformation de la tresse. Les méthodes avec gabarits et lorsque la tresse est drapée sur le cône ont permis d'obtenir des résultats cohérents et présentent la même allure globale.

Il faut désormais comparer ces résultats expérimentaux à l'évolution théorique du cisaillement issue du modèle pour valider la cohérence de celui-ci. La Figure 100 suivante présente donc la comparaison entre les résultats théoriques issus du modèle prédictif présenté en début de ce chapitre (équation (3.16)) et la variation de l'angle de cisaillement mesurée sur le cône qui représente donc la déformation réelle de la tresse pendant le procédé de préformage :

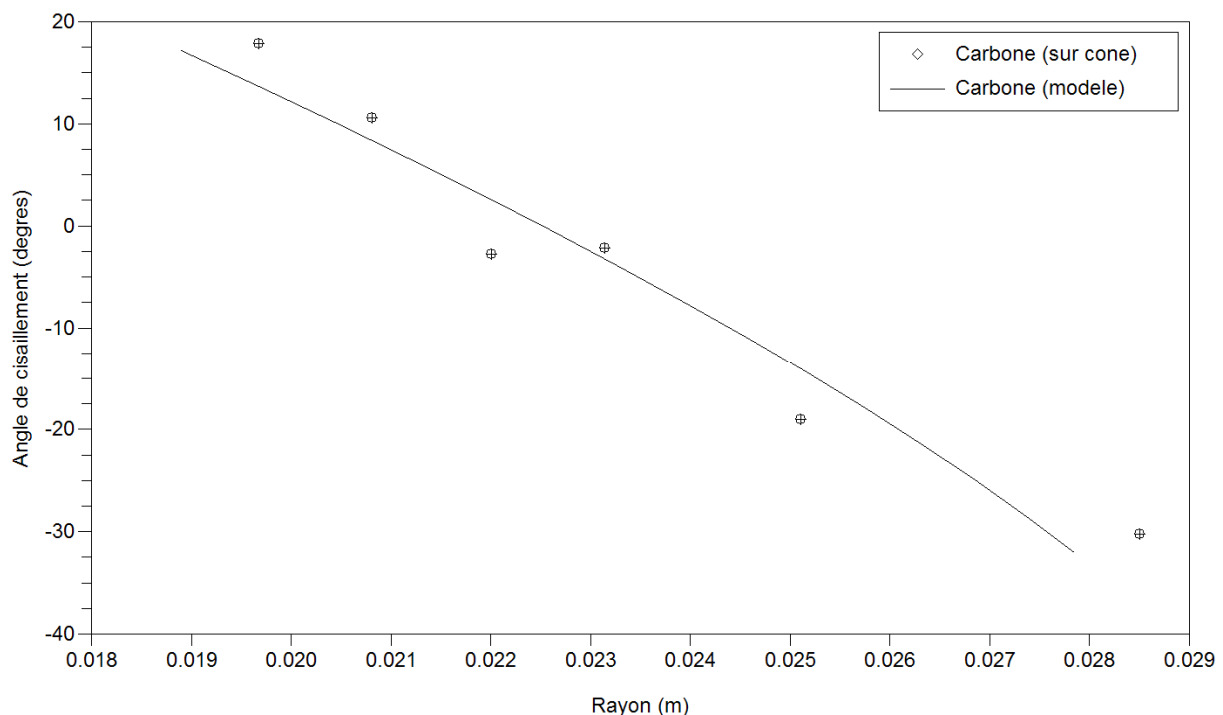


Figure 100 : Evolution du cisaillement - Comparaison carbone drapé/modèle

Cette comparaison permet de valider le modèle prédictif de déformation de la tresse en cisaillement. En effet, les évolutions du cisaillement théorique et expérimental sont de même allure. Les méthodes expérimentales sont donc désormais connues et validées. Tout comme le modèle prédictif de déformabilité de la tresse en cisaillement qui présente des résultats tout à fait conformes aux phénomènes apparaissant en cours de procédé.

1.4.3 Influence du choix de matériau

Le modèle prédictif en cisaillement précédant est établi à partir des données intrinsèques du matériau. Ainsi, un éventuel changement de matériau peut être évalué en amont. Les limites d'utilisation des tresses, notamment via l'angle de blocage, étant connues et facilement accessibles à l'aide de tests simples comme le Bias Test, il est possible de sélectionner un matériau pour ce procédé de mise en forme sans effectuer de tests de mise en forme.

En effet les caractérisations des matériaux effectués au Chapitre 2 ont permis de déterminer les grandeurs caractéristiques clés pour connaître le domaine d'utilisation optimal des tresses, en déterminant notamment les limites telles que l'angle de blocage.

Ces aspects, couplés au modèle prédictif à l'échelle de la maille sur le pli présenté en première partie de ce chapitre, sont autant d'outils qui permettent de sélectionner le matériau idéal pour une géométrie donnée. Il est possible de déterminer les limites de déformations tolérables par le matériau en calculant son angle de blocage tout en estimant l'étendue de l'évolution de l'angle de cisaillement pendant le préformage. Il conviendra donc de choisir un matériau dont le cisaillement maximal prédit n'est pas supérieur à l'angle de blocage calculé. Le choix du matériau a une forte influence sur la déformabilité. Sur le graphe ci-dessous (Figure 101) sont représentées les évolutions de l'angle de cisaillement en fonction du rayon du cône à 15° (pour la tresse de carbone et de silice), ainsi que les bornes d'utilisation dans le cadre de cette étude par les droites représentant les bornes d'utilisation avec le rayon du mandrin R_m et le rayon du contre-moule R_{cm} .

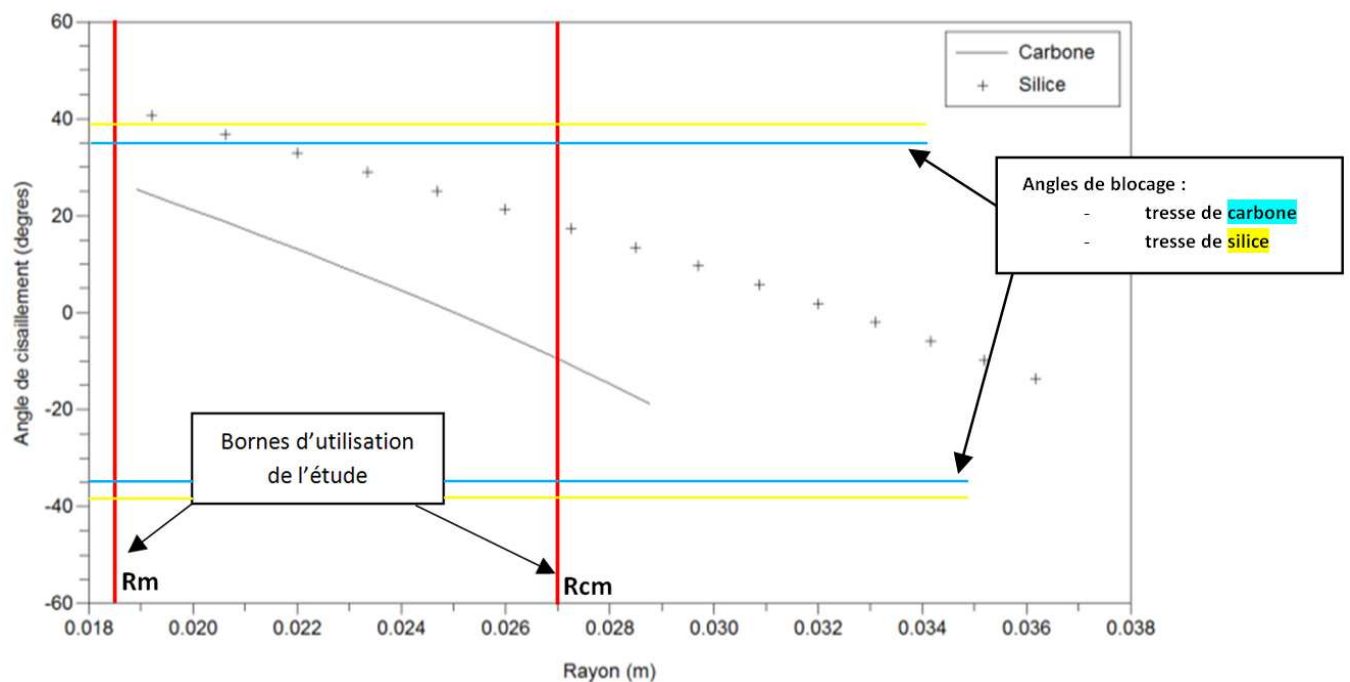


Figure 101 : Influence du choix de matériau

Dans ce domaine d'utilisation, pour la silice l'angle de cisaillement varie entre 15° et 40° alors que pour le carbone, dans les mêmes conditions, il varie entre -10° et 25° .

Les variations d'angles sont plus importantes dans le cas de la tresse de carbone mais la valeur maximale atteinte des angles de cisaillement est plus importante pour la tresse de silice par rapport à celle de carbone (pour la même géométrie de moule). Il y a donc un risque plus important d'atteindre l'angle de blocage à partir duquel on ne peut plus déformer la tresse, ce qui peut être à

l'origine de défauts (plis,...). En effet ici la silice subit un cisaillement plus important que le carbone, son angle de blocage théorique ($20,09^\circ$ d'après la Figure 70) est dépassé. Le risque d'appariation de plis dans ces circonstances est important. Ces observations permettent d'expliquer la non conformité des préformes obtenues à partir de la tresse de silice (Figure 32), le matériau n'est pas utilisé dans son domaine de déformabilité et des plis apparaissent, conduisant à une forme de plis non conforme aux attentes.

Le choix du matériau (en particulier grâce à son diamètre nominal), en relation avec les paramètres « procédé » et la géométrie de la pièce finale, est donc primordial pour s'assurer de la faisabilité d'un préformage particulier voire d'optimiser la qualité de la préforme obtenue.

Cet outil permet d'obtenir de manière prédictive l'évolution de l'angle de cisaillement d'une tresse quelconque, soumis au préformage conique à partir de ses caractéristiques intrinsèques. Il permet d'ores et déjà d'établir un premier critère de faisabilité du procédé via la comparaison de ces résultats avec une des caractéristiques du matériau choisi, l'angle de blocage en cisaillement (Paragraphe 4.2.2 – Chapitre 2 et Figure 68). Du fait de ces résultats préliminaires sur le choix de matériau, pour la suite de cette étude, toutes les modélisations ainsi que les observations expérimentales concernent la tresse de carbone dont les paramètres sont rappelés dans le tableau suivant (Figure 102) :

Paramètres constitutifs de tresse de carbone		
Désignation	Notation	Carbone (Siltex)
Diamètre Nominal (mm)	D_N	50
Nombre de mèches	N_M	120
Epaisseur matière de la tresse (mm)	e_{tresse}	0,3
Type de mèches	-	roving
Masse linéique des mèches (g/m)	M_{lf}	0,2
Masse linéique de la tresse (g/m)	M_{lt}	50
Largeur des mèches (mm)	$l_{mèche}$	1,5

Figure 102 : Paramètres constitutifs de la tresse de carbone

1.4.4 Premiers éléments de conclusion sur le modèle

Ce modèle géométrique permet la prédiction de la variation des angles de cisaillement des mailles successives le long du pli. Il est paramétré uniquement par la position des dites mailles grâce au rayon r . Il est donc indépendant de la forme globale du pli, paramétrée par le rayon r et l'altitude z de la maille sur le pli. C'est pour cette raison que le modèle a été décrit avec le cas simple d'un pli idéal, droit et incliné d'un angle de 15° par rapport à l'axe du mandrin. Ce modèle, à l'échelle mésoscopique, permet donc de prédire les angles de cisaillement.

Ces informations, bien qu'indispensables à la compréhension des phénomènes apparaissant en cours de préformage, ne sont pas suffisantes pour les études sur le procédé de préformage menées dans ce manuscrit.

En effet, il faut maintenant poursuivre l'étude à l'échelle du pli dans la préforme, l'échelle macroscopique. La forme globale des plis est l'un des critères de validation de la faisabilité du procédé de préformage, il est donc primordial d'en faire une étude approfondie afin de déterminer les paramètres de mise en œuvre à maîtriser pour s'approcher du cas idéal du pli droit.

Le modèle géométrique de la forme globale des plis fait l'objet de la partie suivante. Le couplage avec le modèle géométrique de la déformation des mailles défini précédemment aboutira au développement de l'outil prédictif global du positionnement des mèches du renfort dans la préforme à l'issue de l'étape de préformage. En effet le modèle mésoscopique défini précédemment sera utilisé dans les calculs des fractions volumiques de fibre sur le pli pour inclure l'influence de l'état de cisaillement de la tresse en fonction des positions de la maille sur le pli.

2 Modélisation à l'échelle du pli

La modélisation de la forme du pli est nécessaire pour la construction de l'outil prédictif global de positionnement des fibres dans la pièce à l'issue de la première étape de fabrication, l'étape de préformage. Ce paragraphe suivant traite essentiellement des phénomènes à l'échelle du pli. De la même manière que pour le modèle à l'échelle mésoscopique, les paramètres à l'échelle du pli sont présentés. Ceux-ci sont influencés par la forme du pli. Dans un premier temps, nous traiterons du cas idéal du pli droit.

Alors que la sollicitation majeure étudiée pour l'écriture du modèle à l'échelle des mailles était le cisaillement pur, ce modèle, à l'échelle du pli traite de la compaction et de son influence sur certains paramètres.

Pour l'étude de ce modèle, nous avons fait l'hypothèse que la préforme est constituée d'un empilement de plis identiques. Nous nous intéressons donc aux phénomènes apparaissant sur un pli. A partir de ces hypothèses de plis droits et identiques dans l'empilement, les grandeurs caractéristiques de la préforme vont être calculées. L'influence des paramètres « procédé » sur les grandeurs caractéristiques de la préforme est étudiée pour conclure sur la conformité de la préforme sous certaines conditions.

Les différentes itérations de modèles présentées sont scindées en deux parties. Dans un premier temps, les modèles sont testés avec un objectif de maîtrise du taux volumique de fibre à partir de la forme idéale des plis dans la préforme. Les résultats obtenus avec cette méthode ne donnant pas entière satisfaction, la seconde partie traite de la modélisation basée sur un objectif principal de maîtrise de la compaction des plis à l'aide de modèles issus des observations expérimentales effectuées en première partie. Dans tous les cas, les plis dans la préforme sont supposés identiques quelle que soit leur altitude dans l'empilement. En effet, parmi les objectifs poursuivis, l'homogénéité du taux volumique de fibre (Figure 12) impose au procédé de fournir des plis identiques sur toute la hauteur de la préforme.

L'objectif de ce chapitre est l'écriture d'un modèle de la géométrie du pli cohérent avec la forme de pli droite idéale attendu dans la préforme et surtout conformes aux observations expérimentales. Pour ce premier modèle, l'impact de la ligature sur la forme du pli est négligé. Cette hypothèse est d'autant plus raisonnable que la partie de la pièce comportant la ligature sera usinée par la suite avant l'intégration du composite dans le propulseur.

2.1 Maîtrise du taux volumique de fibres

2.1.1 Le modèle droit

Dans ce modèle (Figure 104), les plis sont considérés comme étant parfaitement droits et les replis de la tresse sur les bords extérieurs et intérieurs de la préforme sont pris en compte dans les estimations de quantité de matière contenue dans un pli (un « aller-retour »).

Les paramètres sont définis dans la Figure 103 comme suit :

Paramètres à l'échelle du pli		Unité
Rayon du mandrin	Rm	mm
Rayon du contre-moule	Rcm	mm
Epaisseur de la pièce imposée par l'entrefer du moule	E	mm
Epaisseur de la tresse	e _{tresse}	mm

Epaisseur de la tresse comprimée par la ligature	$e_{tresse0}$	mm
Epaisseur du pli (tresse repliée, un « aller-retour »)	e_{pli}	mm
Pas d'empilement des plis dans la préforme	p	mm
Longueur de tresse « repliée » = longueur du pli incliné	L	mm
Distance entre ligatures, paramètre régissant la quantité de matière dans le pli	L_{lig}	mm
Angle du cône de l'outillage	$\alpha_{mandrin}$	d°
Angle d'orientation réelle des plis dans la préforme	α_{pli}	d°

Figure 103 : Paramètres à l'échelle du pli

avec

$$E = R_{cm} - R_m \quad (3.18)$$

L'entrefer E , obtenu à partir de R_m et R_{cm} , est fixé par la géométrie de la pièce avec les dimensions du moule. De la même manière, l'angle α d'orientation des plis est fixé par le cahier des charges de la fabrication de protections thermiques et est imposé par l'angle de la base conique du mandrin. Lors du préformage, l'objectif est d'imposer $\alpha_{pli} = \alpha_{mandrin}$ pour garantir la bonne orientation des plis dans toute la hauteur de préforme.

Avec ce modèle, les plis étant jointifs, ce qui est nécessaire pour éviter les zones sans renfort, l'épaisseur du renfort est directement liée au pas d'empilement des plis ainsi qu'à leur orientation par la relation :

$$e_{pli} = 2e_{tresse} = p * \sin \alpha_{pli} \quad (3.19)$$

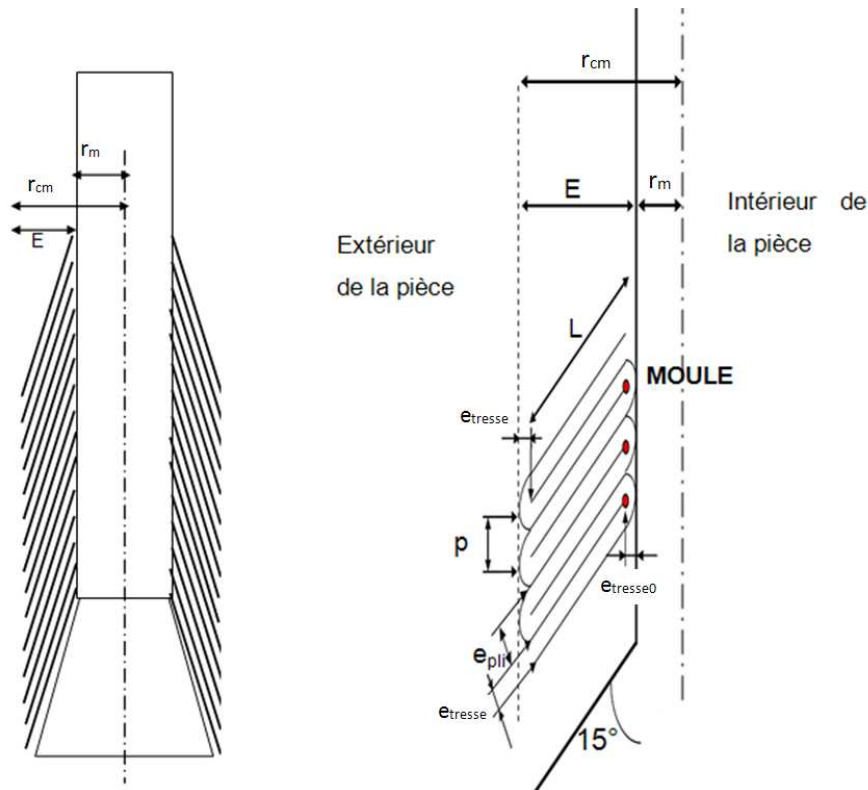


Figure 104 : Schéma détaillé pour approche théorique (modèle droit)

Dans cette partie, on cherche à déterminer les caractéristiques permettant de qualifier la préforme, ces caractéristiques sont le diamètre extérieur (D_{ext}), l'orientation des plis (α_{pli}) ainsi que le taux volumique moyen de fibres (V_f).

Une des hypothèses de ce modèle est l'aspect jointif des plis considérés comme tous identiques, ce qui implique $\alpha_{pli} = \alpha_{mandrin}$.

Dans un premier temps, la variation de l'épaisseur de tresse sous la ligature est négligée. En définissant une distance L_{lig} prise sur une « ligne moyenne », alors la quantité de matière introduite dans un pli, pilotée du point de vue du procédé par L_{lig} , la distance entre ligatures, devient :

$$L_{lig} = 2L + p + \pi e_{tresse} \quad (3.20)$$

Avec

$$L = \frac{E - 2e_{tresse}}{\sin \alpha} \quad (3.21)$$

La relation (3.19) liant directement le pas à l'épaisseur de la tresse suppose que le pas choisi est compatible avec les épaisseurs maximale et minimale accessibles par la tresse. Cette variation d'épaisseur tolérable par le matériau a été observée expérimentalement au cours des caractérisations exposées dans le Chapitre 2. Ainsi la fourchette de pas admissible par les variations d'épaisseur de la tresse est connue.

Le diamètre extérieur de la préforme est un paramètre géométrique clé de la qualité de la préforme obtenue. En effet, s'il est trop important, la préforme ne rentre pas dans le contre-moule et n'est donc pas injectable. Il est défini par :

$$D_{ext} = 2.(r_m + E) \quad (3.22)$$

Soit

$$D_{ext} = 2r_m + \sin \alpha . (L_{lig} - p - \pi . e_{tresse}) + 4e_{tresse} \quad (3.23)$$

Notons ici que le diamètre extérieur est principalement lié au choix des paramètres « procédé » et que seule l'épaisseur du renfort, paramètre constitutif du matériau choisi, a une influence sur cet aspect qualitatif majeur de la préforme finale obtenue. En effet, les paramètres prépondérants pour maîtriser le diamètre extérieur sont la quantité de matière introduite par pli (avec la distance entre ligatures L_{lig}) et le pas d'empilement des plis. Ce diamètre extérieur est une caractéristique majeure de la faisabilité du composite.

2.1.2 A l'échelle du pli – fraction volumique de renfort

Toutefois, au-delà de la faisabilité, on doit s'assurer de la conformité de la pièce composite à l'aide d'un paramètre incontournable du cahier des charges : la fraction volumique de fibre contenu dans le composite final qui doit être de l'ordre de 60%. L'évolution de la fraction volumique sur le pli est donc calculée ici à partir du modèle précédent.

Nous simplifions ainsi l'étude du couplage cisaillement/compaction vu au Chapitre 2, en termes de caractérisation du comportement, en ne prenant en compte la compaction que par son influence sur la variation de l'épaisseur du pli. L'influence de la compaction sur la variation du cisaillement est donc négligée. L'influence du cisaillement sur la fraction volumique de fibre est quant à elle prise en compte via la variation de la géométrie de la surface des mailles, obtenue à l'aide du modèle décrit dans la première partie de ce chapitre. Les plis étant considérés comme tous identiques par hypothèse, on raisonne ainsi sur un seul pli, en suivant l'évolution de la fraction volumique sur ce

dernier, que nous noterons $V_{f_{pli}}$. A ce titre, nous devons écrire le volume occupé par le renfort sur une maille $V_{renfort}$ et le volume de cette maille V_{maille} .

Le volume occupé par le renfort est obtenu à partir de la masse linéique des mèches constituant le renfort, notée $ml_{mèche}$, de la longueur de mèche sur la maille, notée d (Figure 89) et de la masse volumique du matériau constitutif des tresses, noté $\rho_{matériau}$.

Ainsi on a :

$$V_{renfort} = \frac{4d.ml_{mèche}}{\rho_{matériau}} \quad (3.24)$$

Or d'après l'expression de la distance entre intersections de mèches (3.3), il vient :

$$V_{renfort} = \frac{\sqrt{2} D_N . \pi . ml_{mèche}}{N_M . \rho_{matériau}} \quad (3.25)$$

Pour chaque maille constituant le pli, on pourra écrire :

$$V_{maille} = \frac{2\pi(r_{i+1}^2 - r_i^2) . e_{pli}}{N_M . \sin \alpha} \quad (3.26)$$

Le volume de la maille dépend de l'épaisseur du pli. Pour ces relations, l'épaisseur du pli est toujours liée à l'orientation du pli par rapport à l'axe du tube par la relation (3.18). Comme nous l'avons exposé au paragraphe 1.4 de ce chapitre, la surface de la maille évolue avec le cisaillement par l'intermédiaire des r_i et r_{i+1} .

Ainsi, pour chacune des mailles, la fraction volumique de fibres sur le pli s'écrit :

$$V_{f_{pli}} = \frac{V_{renfort}}{V_{maille}} \quad (3.27)$$

Le diamètre extérieur et la fraction volumique de fibre, critères prépondérants de la faisabilité et de conformité de la préforme, sont donc désormais connus.

A partir de ces données et relations, un programme a été mis en place afin de visualiser l'influence des paramètres entre eux ainsi que pour mettre en évidence les paramètres dont les dérivées ont des conséquences importantes sur la qualité des résultats et pour lesquels une attention toute particulière devra être portée pendant le protocole de fabrication pour garantir la faisabilité du procédé et l'obtention de résultats optimaux.

Par la suite, des comparaisons avec les relevés effectués expérimentalement permettront de valider le modèle et les hypothèses ayant conduit aux relations énoncées précédemment.

L'objectif est de tester le modèle en visualisant l'influence des paramètres qui le régissent et de comparer les résultats obtenus avec les données expérimentales issues de la campagne de fabrication de prototypes.

Ces tests de variation théorique sur les paramètres se font en deux temps : pour commencer, nous nous intéressons à l'impact d'une variation maîtrisée des paramètres d'entrée du modèle comme le choix de tresses d'épaisseurs diverses, une variation de paramètres du procédé de préformage comme la distance entre ligatures.

Par la suite, nous envisagerons aussi une déviance en cours de procédé de paramètres influençant le modèle. A ce titre, nous étudierons les résultats prédits lorsque le pas d'empilement des plis varie ou lorsque l'orientation des plis n'est pas maîtrisée et égale à 15°.

Tous ces résultats seront ensuite mis en perspective avec les tendances observées expérimentalement pour conclure sur la validité du modèle géométrique de forme globale des plis.

2.1.3 Influence sur l'étape d'injection

Un des objectifs de ces travaux de thèse est l'étude de la faisabilité du préformage par ligature de tresse pour la fabrication de tubes de protections thermiques par le procédé RTM.

Le but est de prédire les phénomènes apparaissant en cours de l'étape de préformage pour caractériser la préforme à l'issue de cette étape.

Certains critères permettant de caractériser la préforme ont pour seul intérêt de valider ou non sa conformité. Pour d'autres en revanche, il s'agit de faire état de la préforme dans son ensemble afin de l'inclure dans le procédé RTM global.

En effet, nous avons exposé au Chapitre 1 le principe global de la fabrication de composites par le procédé RTM en précisant que ce dernier comporte deux étapes principales. Le préformage est la première d'entre elles. Cette étape de préformage est toujours suivie de l'injection de résine. Or la connaissance de l'état de la préforme à l'issue du préformage est essentielle pour mettre en œuvre l'étape consistant à y injecter la résine pour former le composite.

Il est en effet primordial de connaître les caractéristiques de la préforme ainsi que le positionnement des mèches pour optimiser son injection.

L'un des paramètres clés de l'étape d'injection en lien avec ces grandeurs est le paramètre de perméabilité K de la préforme.

Ces aspects traitant de la perméabilité tant du point de vue bibliographique que sur les caractérisations expérimentales ont largement été développés dans le manuscrit de thèse de R. Agogué [20], notamment sur l'effet de la variation de la fraction volumique de fibre sur la perméabilité.

Pour la tresse de carbone étudiée ici, les caractérisations expérimentales ont permis de mettre en relation la fraction volumique de fibre V_f et la perméabilité K sous la forme :

$$K(V_f) = a \exp(-b \cdot V_f) \quad (3.28)$$

où a et b sont identifiés pour les deux cas (perméabilités planaire et transverse) par la méthode des moindres carrés à l'issue des résultats expérimentaux.

Les deux types de perméabilité ont été déterminés expérimentalement, les coefficients déterminés sont présentés dans le tableau de la Figure 105:

Coefficients de perméabilité		
	Planaire	Transverse
$a \text{ (m}^2\text{)}$	$8,88 \cdot 10^{-8}$	$4,46 \cdot 10^{-9}$
$b \text{ (-)}$	14,1	14,9

Figure 105 : Coefficients des perméabilités

Les courbes suivantes présentent l'évolution de la fraction volumique de fibre en fonction du rayon et l'évolution (Figure 106) de la perméabilité (planaire et transverse) sur le pli en fonction de la variation de fraction volumique de fibre (Figure 107).

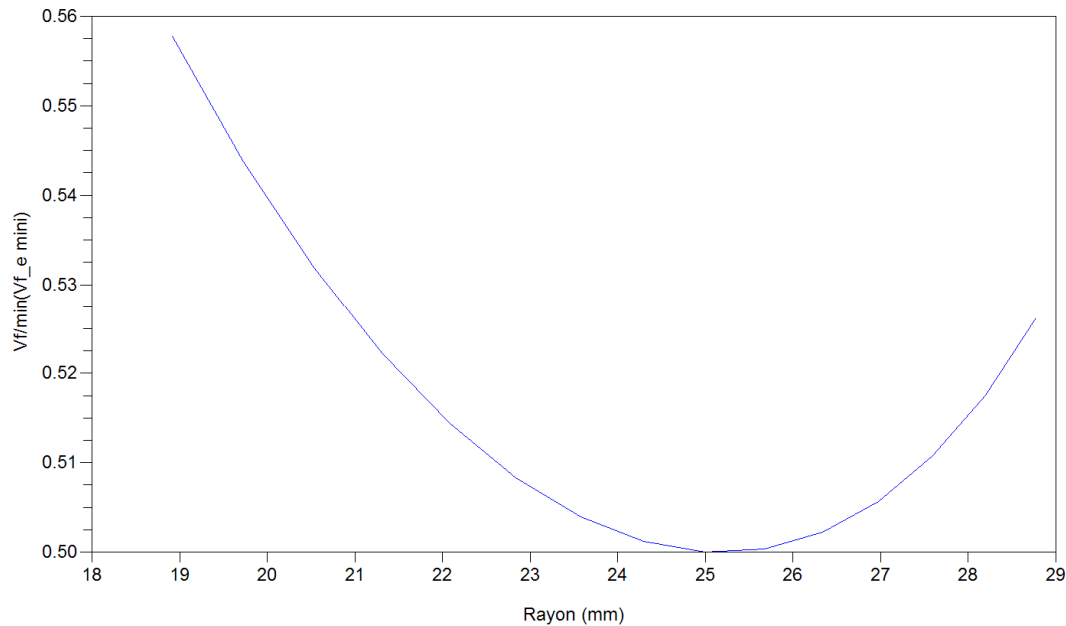


Figure 106 : Evolution de la fraction volumique de fibre en fonction du rayon

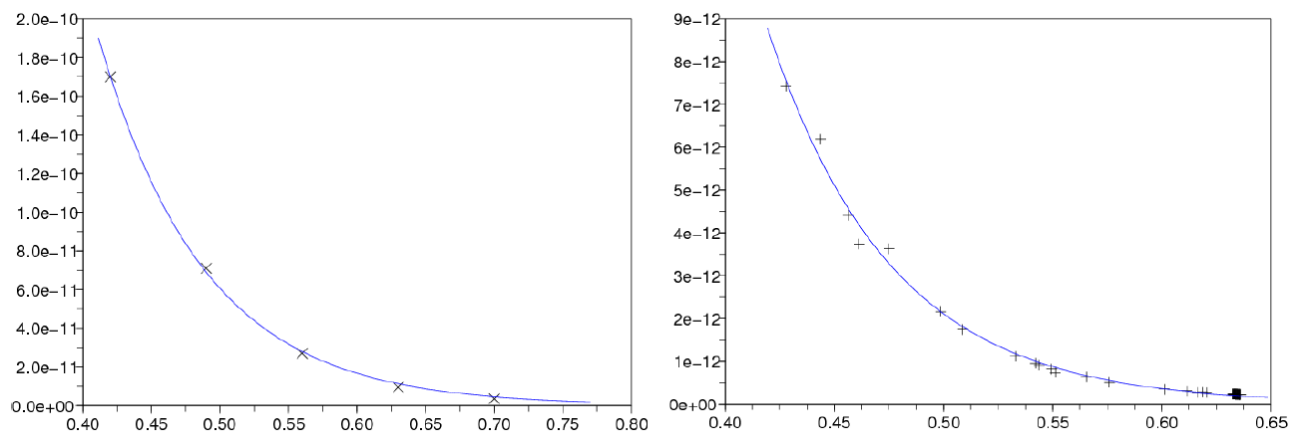


Figure 107 : Perméabilité (m^2) (gauche : planaire ; droite : transverse) en fonction de la fraction volumique de fibre [94]

Les études sur la perméabilité confirment donc qu'il est indispensable de maîtriser le positionnement des fibres dans la préforme et d'en prédire la fraction volumique afin d'optimiser l'étape d'injection en partie régie par la valeur de la perméabilité.

2.1.4 Influence des paramètres d'entrée du modèle

a. Epaisseur du renfort

Les paramètres du modèle ainsi construit sont la distance entre ligatures, le pas d'empilement des plis, lié à l'épaisseur du renfort par la relation (3.18). Dans la partie précédente, la variation d'épaisseur a été déterminée expérimentalement, l'épaisseur de la tresse varie donc entre 0,05 et 0,50 mm : on en déduit donc la variation d'épaisseur des plis allant de 0,10 à 1 mm.

Le modèle géométrique de la forme des plis permet de visualiser l'influence de la variation de ces paramètres sur les quantités permettant de qualifier la préforme : le diamètre extérieur et la fraction volumique de fibres. Ainsi, les paramètres seront idéalement définis par le modèle du point de vue de la conformité de la pièce en termes de « géométrie/faisabilité » et de « conformité » par rapport au cahier des charges défini dans le Chapitre 1 via le diamètre et fraction volumique de fibre.

Le premier critère testé est la variation de l'épaisseur du renfort choisi et son influence sur la faisabilité du procédé (avec l'influence sur le diamètre extérieur de la préforme) et sur un des critères de qualité finale de la pièce (avec la fraction volumique dans le pli). La variation globale de fraction volumique doit être maîtrisée et inférieure à 10% pour garantir une homogénéité des renforts dans le composite, comme le prévoit le cahier des charges.

Nous souhaitons dans un premier temps mettre en évidence l'influence d'une potentielle variation de l'épaisseur du renfort sur les grandeurs caractéristiques de la préforme, notamment son diamètre extérieur et la variation de la fraction volumique de fibre. L'objectif est de tester la cohérence du modèle. L'équation (3.22) relie l'épaisseur de la tresse au diamètre extérieur ; on remarque toutefois que la relation dépend aussi de la distance entre ligatures. Or dans le modèle tel qu'il a été construit avec l'équation (3.19), la distance entre ligatures est elle-même dépendante de l'épaisseur de la tresse.

Afin d'obtenir une vue d'ensemble de l'influence d'une potentielle variation de l'épaisseur de la tresse, nous observons l'influence sur la distance entre ligatures (Figure 108) puis sur le diamètre extérieur (Figure 109). Ces études sont effectuées avec la tresse de carbone. Les paramètres « matériau » sont donc figés par ce choix, notamment le diamètre nominal D_N pris à 50 mm et le nombre de mèches sur la circonférence $N_M = 120$.

La variation d'épaisseur de la tresse a été déterminée expérimentalement dans le Chapitre 2, la fourchette admissible physiquement par le renfort a donc été apposée sur la figure de la variation théorique pour cibler les résultats de variation de distance entre ligatures cohérents avec les capacités du renfort.

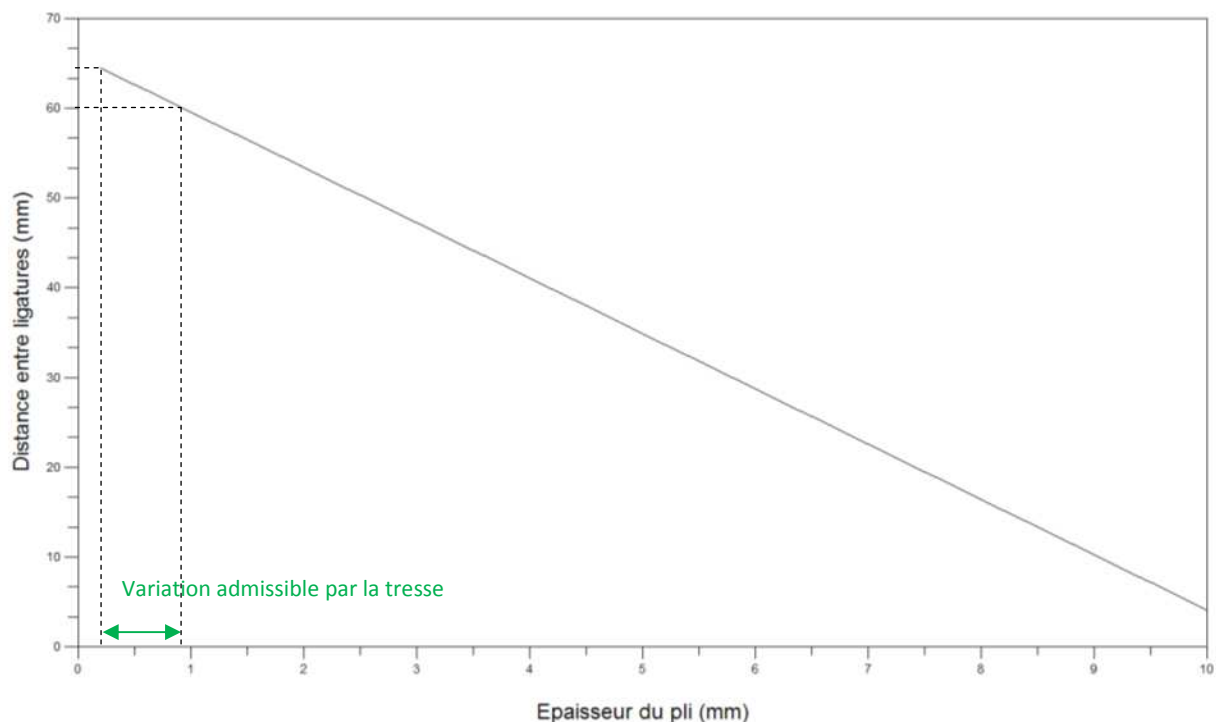


Figure 108 : Influence de l'épaisseur du pli sur la distance entre ligatures (modèle)

Dans la fourchette de valeurs admissibles par la tresse de carbone déterminée par les essais de compaction du Chapitre 2, la variation de distance entre ligatures L_{lig} est très faible et la valeur théorique est proche de 60 mm. C'est cette valeur qui a été fixée lors des campagnes de fabrication de prototypes. Cette valeur a permis d'obtenir des préformes correctes ; la pertinence des hypothèses du modèle à l'échelle des plis de ce point de vue est donc démontrée.

Sur la courbe suivante (Figure 109) apparaît la variation du diamètre extérieur en fonction de la variation d'épaisseur de renfort.

La fourchette des valeurs admissibles du diamètre extérieur pour garantir la faisabilité du procédé est très faible. En effet, la tolérance sur le diamètre extérieur n'est que de l'ordre du millimètre. Pour garantir la faisabilité du procédé de fabrication dans son intégralité (ie pour que la préforme puisse être introduite dans le moule pour l'injection de résine), le diamètre extérieur de la préforme doit être compris entre 53 et 54 millimètres.

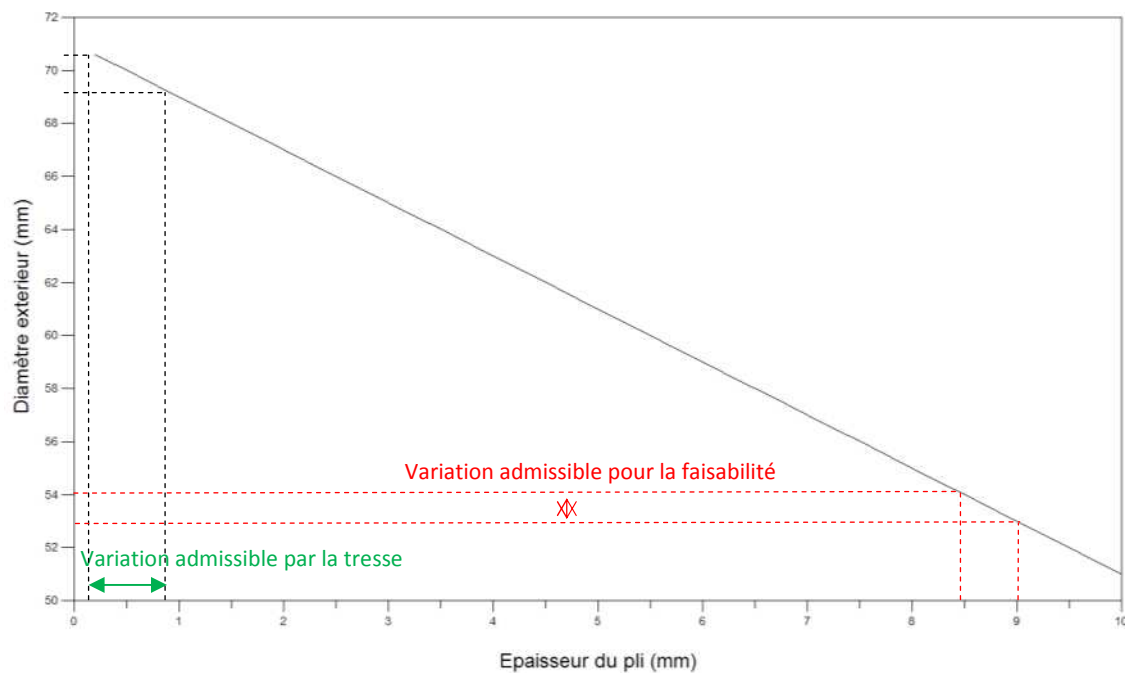


Figure 109 : Influence de l'épaisseur du pli sur le diamètre extérieur (modèle)

Les fourchettes de valeurs accessibles par la tresse de carbone sont, d'après ce modèle de forme globale des plis, très éloignées des valeurs théoriques de diamètre extérieur admissibles pour rendre la fermeture du moule possible. Les hypothèses du modèle sur la forme des plis sont donc a priori trop restrictives. Il apparaît donc une incohérence entre les tolérances acceptables du point de vue de la faisabilité et les capacités du matériau mises en relation par les équations du modèle. Ces résultats théoriques devront donc être comparés aux observations expérimentales effectuées avec des renforts d'épaisseurs différentes afin de conclure sur la validité du modèle macroscopique et de ses hypothèses.

Toutefois, avant de procéder aux comparaisons expérimentales, il faut observer les courbes théoriques sur l'influence de l'épaisseur du renfort sur la fraction volumique de fibre présente dans le pli (Figure 110). Cette courbe a été normalisée sur la base de l'épaisseur de renfort la plus faible pour mettre en relation les différences de variations entre les épaisseurs testées ainsi que les variations « d'amplitude » dans le pli pour une épaisseur choisie.

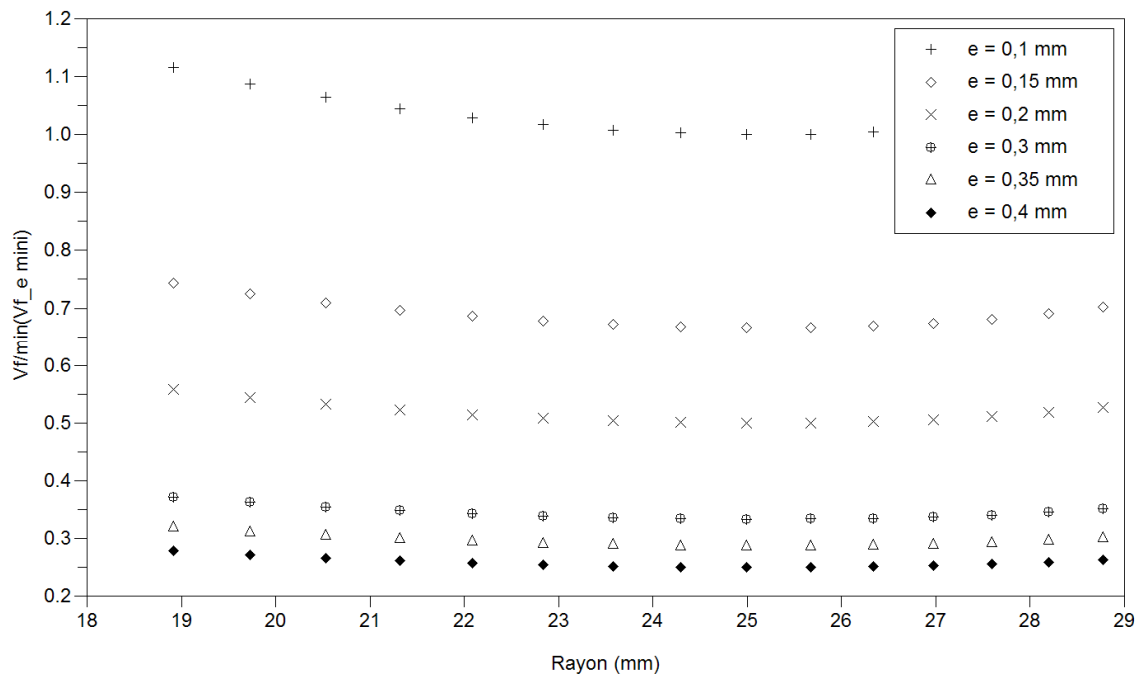


Figure 110 : Influence de l'épaisseur de renfort sur la fraction volumique de fibre dans le pli (modèle)

Ces résultats donnent deux tendances : la fraction volumique de fibre globale diminue à mesure que l'épaisseur du renfort augmente. Cependant, la variation de fraction volumique globale diminue lorsque l'épaisseur du renfort augmente. Cette seconde partie est intéressante du point de vue de la recherche d'homogénéité de renfort le long du pli. En effet, pour une variation de près de 12% lorsque le pli a une épaisseur de 0,1mm, la variation de fraction volumique est inférieure à 4% si le pli fait 0,4 mm d'épaisseur. Toutefois, dans l'intervalle de rayons de l'étude, entre $R_m = 18,5$ mm et $R_{cm} = 27$ mm, cette évolution de la variation globale de la fraction volumique de fibre est moins notable. A présent, l'influence de l'épaisseur du renfort e_{tresse} , directement liée à l'épaisseur des plis avec $e_{pli} = 2e_{tresse}$, considérée comme l'un des paramètres d'entrée du modèle a été exposée sur toutes les grandeurs caractéristiques de la préforme, qu'il s'agisse du diamètre extérieur pour la faisabilité ou de la fraction volumique de fibre pour la conformité des résultats avec les contraintes du cahier des charges défini au Chapitre 1.

Les résultats issus du modèle de forme globale des plis ont été comparés avec les observations expérimentales notamment sur l'impact d'une variation de l'épaisseur de la tresse sur l'un des paramètres, la distance entre ligatures afin de vérifier la validité des hypothèses émises sur l'aspect idéalement droit des plis. Sur cet aspect, le modèle à l'échelle du pli est cohérent avec l'expérience. En effet, pendant les campagnes d'élaboration de prototypes, le paramètre « procédé » de distance entre ligatures fixé à 60 millimètres tel que le modèle de forme globale de pli à l'échelle macroscopique l'optimise est bien la valeur qui a permis d'obtenir des préformes dont la géométrie est conforme pour la fermeture du moule pour l'injection.

Cependant, il apparaît en observant les résultats de la Figure 109 que l'on atteint les limites du modèle du point de vue de la compatibilité avec le domaine de faisabilité. En effet la variation d'épaisseur tolérable par le renfort donne d'excellents résultats pour prédire le paramètre « procédé » de distance entre ligatures (Figure 108) mais n'est pas en adéquation avec le domaine de faisabilité concernant l'influence sur le diamètre extérieur (Figure 109).

De la même manière, lorsque nous observons les résultats de la Figure 110, les tendances sont divergentes. Du point de vue de la fraction volumique globale, l'épaisseur du renfort doit être maximale, alors que pour atteindre une variation de fraction volumique optimale, il faudrait minimiser l'épaisseur de la tresse.

Le modèle macroscopique, prenant pour hypothèse majeure la forme droite du pli, ne permet pas de mettre en évidence des valeurs optimales de son paramètre d'entrée « épaisseur de tresse » pour garantir à la fois la faisabilité et la conformité de la préforme.

Il semble donc que les hypothèses du modèle macroscopique soit trop restrictives pour prédire de manière fiable la forme globale du pli. Une étude approfondie des formes de plis observables sur des prototypes issus d'une campagne expérimentale d'élaboration va permettre de mettre en évidence les limites du modèle et conduira ainsi à des hypothèses plus en lien avec l'expérience. Avant de passer à cette phase d'amélioration du modèle, il faut étudier l'influence de la variation d'un autre paramètre d'entrée du modèle, la distance entre ligatures.

b. Distance entre ligatures

Pour terminer, la Figure 111 présente l'influence d'une variation de la distance entre ligatures, autre paramètre du modèle, sur le diamètre extérieur de la préforme. Pour ces tests, les paramètres « matériau » sont inchangés : le diamètre nominal D_N est fixé à 50 mm et le nombre d'intersections de mèches sur la circonférence $N_M = 120$. Dans cette partie, l'épaisseur du renfort e_{tresse} n'est plus un paramètre d'entrée que l'on fait varier, la valeur prise pour ce paramètre est donc l'épaisseur native du renfort fournie par le constructeur soit $e_{tresse} = 0,3$ mm.

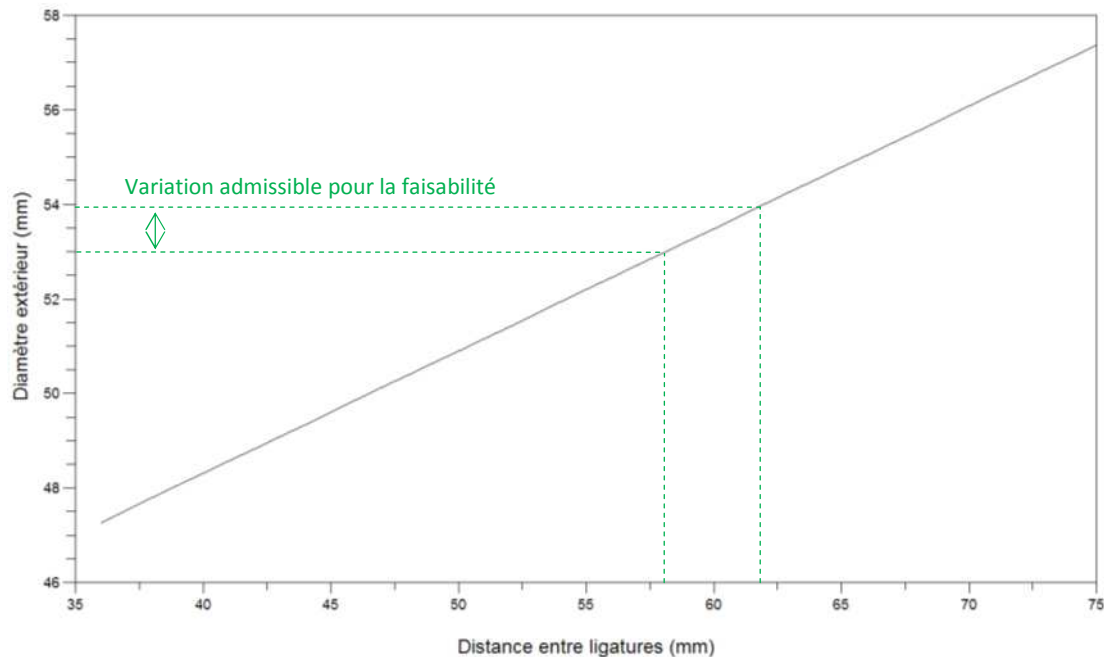


Figure 111 : Influence de la distance entre ligatures sur le diamètre extérieur (modèle)

Les résultats sont cohérents avec la fourchette de valeurs de la Figure 108. L'influence d'une variation des paramètres d'entrée du modèle macroscopique de forme globale des plis a donc été observée.

L'objectif de ce modèle prédictif macroscopique est de fournir les valeurs optimales de paramètres pour garantir des résultats expérimentaux conformes. Si nous nous basons sur le modèle tel qu'il est décrit, pour garantir la faisabilité (avec le diamètre extérieur), la distance entre ligatures devra être de l'ordre de 60 mm et l'épaisseur du pli comprise entre 8,5 et 9 mm. Du point de vue de la fraction volumique de fibre, elle est importante lorsque la tresse est très fine (avec une épaisseur de pli de l'ordre de 0,1 mm) mais sa variation est satisfaite car très faible lorsque l'épaisseur du pli augmente (entre 0,3 et 0,4 mm notamment). Il apparaît donc que du point de vue du paramètre « épaisseur de renfort », les résultats ne sont pas très cohérents sur les optima à viser, ce qui indique que les hypothèses sont à adapter.

Pour résumer, les paramètres optimaux sont :

- Distance entre ligatures = 60 mm
- Epaisseur du pli = 0,1 mm (du point de vue de la fraction volumique) ; 0,3 à 0,4 mm pour en limiter sa variation le long du pli et entre 8,5 et 9 mm (du point de vue du diamètre extérieur)

Nous atteignons ici les limites du modèle. En effet, pour garantir à la fois la faisabilité et la conformité de la préforme, l'épaisseur de la tresse devrait varier avec un ratio de 1 à 100 (pour aller de 0,1 à 10 millimètres).

Cette variation théorique optimale semble inenvisageable physiquement : par exemple, pour le cas de la tresse de carbone étudiée dans ce manuscrit, les essais de caractérisation en compaction ont permis d'estimer sa plage de variation d'épaisseur entre 0,05 et 0,50 millimètres.

D'autres résultats expérimentaux, issus de la campagne d'élaboration de prototypes menés sur différents renforts (dont les épaisseurs sont variables), permettront dans la suite de cette étude de valider ou non le choix des hypothèses du modèle de forme de pli droit.

Après avoir étudié la variation de paramètres maîtrisés en cours de procédé, nous allons maintenant nous intéresser aux prédictions du modèle sur la faisabilité et la conformité de la préforme en cas de déviance de certains autres paramètres en cours de préformage.

2.2 Déviations possibles du pas d'empilement et de l'orientation des plis en cours de procédé : Influences sur la qualité de la préforme obtenue

a. Pas d'empilement des plis

Dans la relation (3.22), le diamètre extérieur est déterminé à partir de l'orientation des plis, de l'épaisseur du renfort et de la quantité de matière introduite dans chaque pli (avec la distance entre ligatures L_{lig}).

Pour la suite de ce chapitre, nous allons visualiser l'influence que peuvent avoir des dérives sur les paramètres procédés dont la maîtrise est délicate en cours de préformage. Dans cette partie, les paramètres « matériau » sont ceux de la tresse de carbone et issus des données du constructeur, on aura donc toujours :

- Diamètre nominal : $D_N = 50$ mm
- Nombre de mèches sur la circonférence : $N_M = 120$
- Epaisseur du renfort : $e_{tresse} = 0,3$ mm

Les courbes suivantes permettent de visualiser l'évolution du diamètre extérieur en cas de variation de ces paramètres, par exemple, l'influence de l'orientation des plis (Figure 112) et celle du pas (Figure 113).

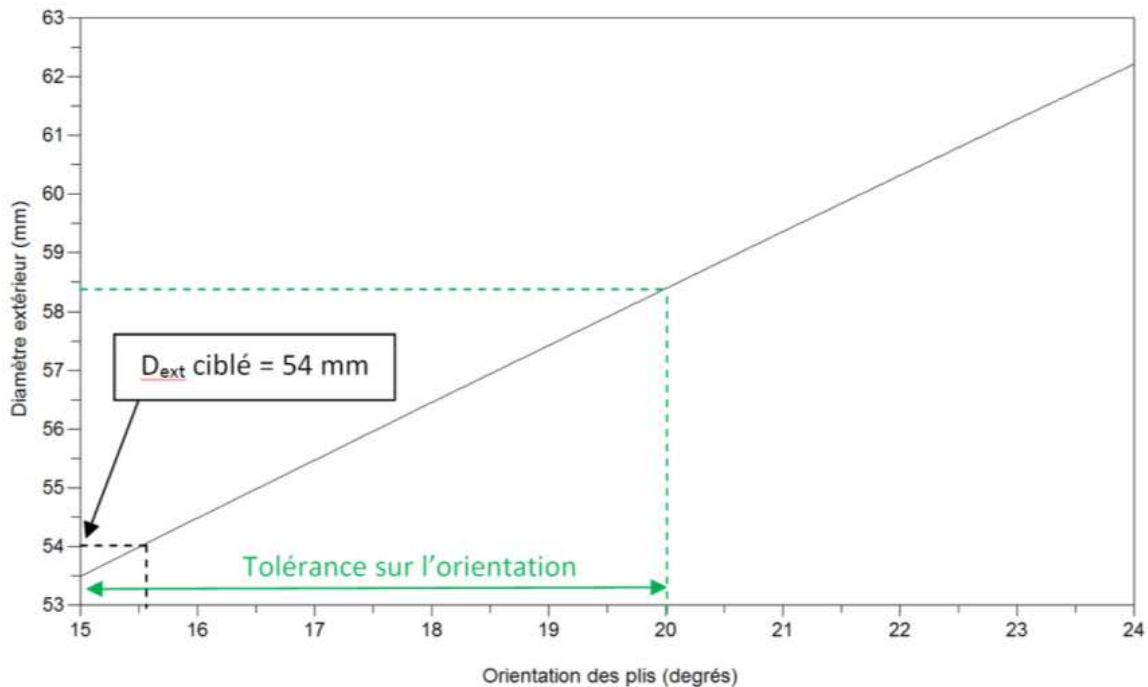


Figure 112 : Influence de l'orientation des plis sur le diamètre extérieur

D'après la courbe précédente, à une distance entre ligatures L_{lig} fixée aisément constante en cours de préformage, le modèle indique que pour obtenir un diamètre extérieur conforme (égale à 54 mm), l'angle d'orientation des plis ne doit pas excéder 15,5°. Cette courbe traduit donc un point bloquant sur le modèle considéré, en effet, s'il est conforme aux observations expérimentales et donc validé, il indique que la tolérance du cahier des charges défini en Chapitre 1 sur la valeur de l'angle d'orientation des plis (15°+5°) n'est pas exploitable puisqu'elle induit automatiquement des valeurs non-conformes pour le diamètre extérieur.

Ces résultats théoriques indiquent une dépendance forte, avec ces hypothèses, entre le diamètre extérieur et l'angle d'orientation des plis dans la préforme. Il apparaît donc qu'il faut maîtriser ce paramètre absolument pour obtenir une préforme conforme. Les observations expérimentales effectuées à ce sujet seront présentées dans la suite de ce chapitre 3.

Avant tout, il faut vérifier si le second paramètre procédé, le pas, est aussi influent sur le diamètre extérieur que l'angle des plis dans la préforme. La Figure 113 décrit ce phénomène modélisé. Pour ce paramètre, la valeur théorique idéale du pas pour obtenir une préforme conforme du point de vue de son diamètre extérieur est de l'ordre de 3,1 mm. On note que cette valeur n'est pas en adéquation avec la relation (3.18) liée à l'hypothèse de plis strictement droits qui nous donne, avec une épaisseur du pli de 0,6 mm d'après les données du constructeur et une orientation de 15° idéale recherchée, un pas de l'ordre de 2,3 mm. Pour la suite de l'étude, notamment les essais de préformage, afin de s'assurer de la jonction des plis entre eux dans l'empilement, c'est cette valeur de 2,3 mm qui est retenue.

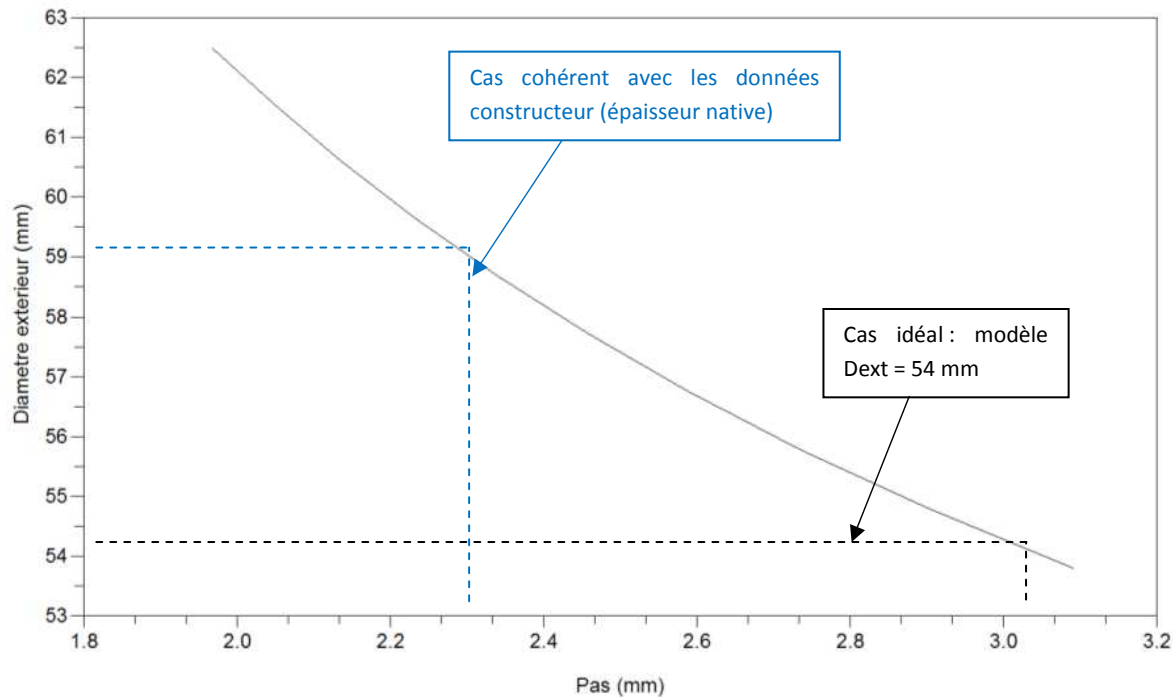


Figure 113 : Influence du pas sur le diamètre extérieur

On note toutefois que ce pas, s'il est pris à 2,3 mm, impliquera d'après le modèle un diamètre extérieur non-conforme et qu'il faudra sans doute trouver des solutions technologiques pour annuler cet effet. Ces aspects de préformage avec un pas garantissant des plis jointifs et de respect du diamètre extérieur seront développés en chapitre 5.

Il est donc important de noter que les hypothèses conjointes de plis strictement droits et jointifs sur toute leur longueur semblent difficile à garantir par le modèle ; ces hypothèses doivent donc être étudiées pour validation à partir des données obtenues expérimentalement.

A ce stade, il est donc possible de cibler des paramètres qui permettent théoriquement d'obtenir un diamètre extérieur conforme :

- Pas > 3,1 mm
- Orientation des plis < 15,5°

De la même manière, nous allons étudier l'évolution théorique d'un autre paramètre clé de la qualité de la préforme, le taux volumique de fibres. Le modèle décrit précédemment nous donne, dans les conditions « idéales » (au sens théorique du terme), l'évolution de la fraction volumique de fibres le long du pli en fonction du rayon.

b. Orientation des plis

Cette partie traite de l'influence d'une variation de l'orientation des plis sur les critères de conformité et de faisabilité de la préforme. Les paramètres « matériau » sont ceux de la tresse de carbone et issus des données du constructeur, on aura donc toujours :

- Diamètre nominal : $D_N = 50$ mm
- Nombre de mèches sur la circonférence : $N_M = 120$
- Epaisseur du renfort : $e_{tresse} = 0,3$ mm

Nous étudions ici l'influence d'une variation de l'orientation des plis dans la préforme sur les grandeurs qui la caractérisent. Nous avons présenté dans le Chapitre 1 les paramètres à maîtriser, issus du cahier des charges pour la fabrication de tubes de protections thermiques. Selon le cahier des charges, l'angle d'inclinaison des plis par rapport à l'axe du tube doit se situer entre 15 et 20°. Pour effectuer l'étude d'une déviance possible, nous avons élargi cet intervalle de tolérance du cahier des charges de $\pm 5^\circ$.

Les résultats de la Figure 114 ci-dessous, montrant l'évolution de la fraction volumique de fibre influencée par une modification de l'orientation des plis ont été normalisés par rapport à la courbe obtenue avec la plus faible épaisseur.

Les résultats concernant l'évolution de la fraction volumique de fibre théorique en fonction du rayon (Figure 114) montrent une variation de l'ordre de 12% pour la valeur idéale d'orientation des plis à 15°. Cette variation n'est pas acceptable à la vue des critères que doit remplir le composite final de protection thermique. En effet, la tolérance maximum sur la variation de fraction volumique de fibre sur le pli a été fixée à 10%.

On peut noter que cette variation maximale de la fraction volumique de fibre augmente lorsque l'orientation du pli augmente (Figure 114).

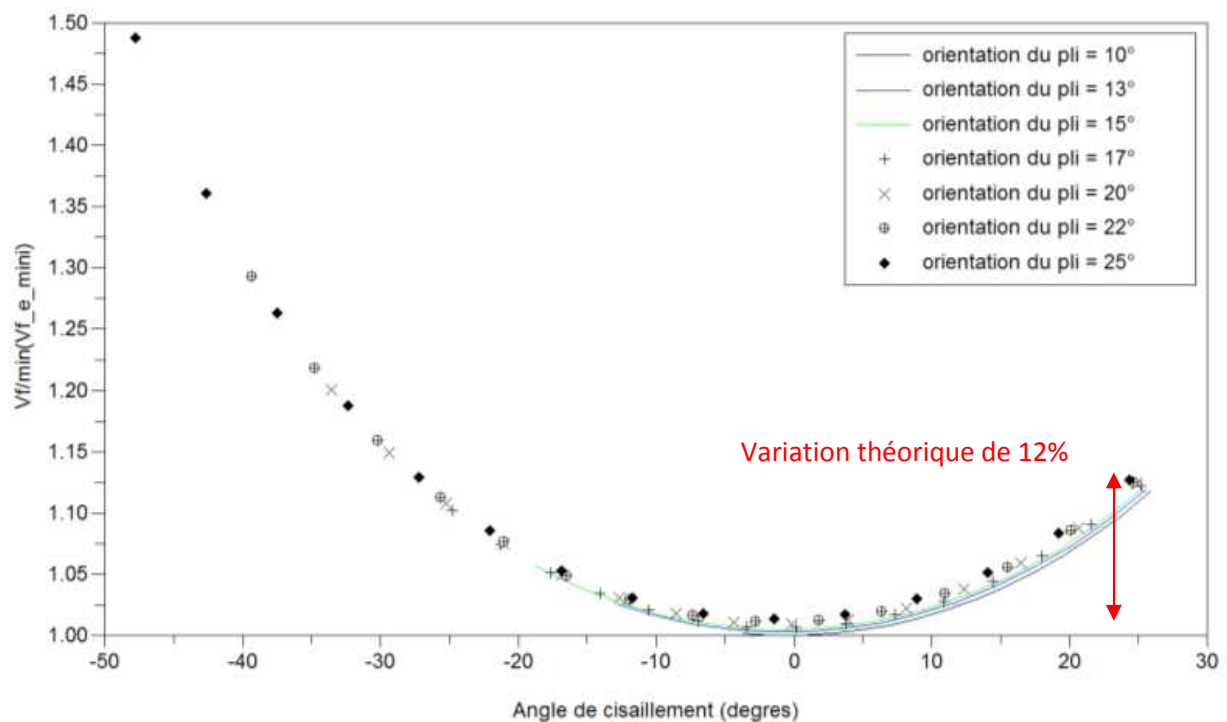


Figure 114 : Variation de la fraction volumique de fibre avec l'orientation des plis

Ces résultats confirment l'importance de la maîtrise de l'orientation des plis pour garantir la qualité de la préforme obtenue notamment en termes d'homogénéité des renforts à l'intérieur.

La modélisation a donc permis de cibler les paramètres procédés à maîtriser tels que l'orientation des plis et le pas d'empilement des plis pour obtenir une préforme conforme et cohérente avec le modèle énoncé. Ainsi, l'orientation des plis est le paramètre le plus sensible de ce point de vue.

En outre, l'influence de cette orientation des plis dans le calcul du cisaillement a aussi été mise en évidence dans la partie 1.3.2. En effet, nous pouvons observer sur la Figure 115 suivante l'impact

d'une variation sur les angles de cisaillement atteints en cours de préformage par la tresse. Les bornes d'utilisation liées à notre étude, R_m le rayon du moule et R_{cm} celui du contre-moule, ont été ajoutées au graphe.

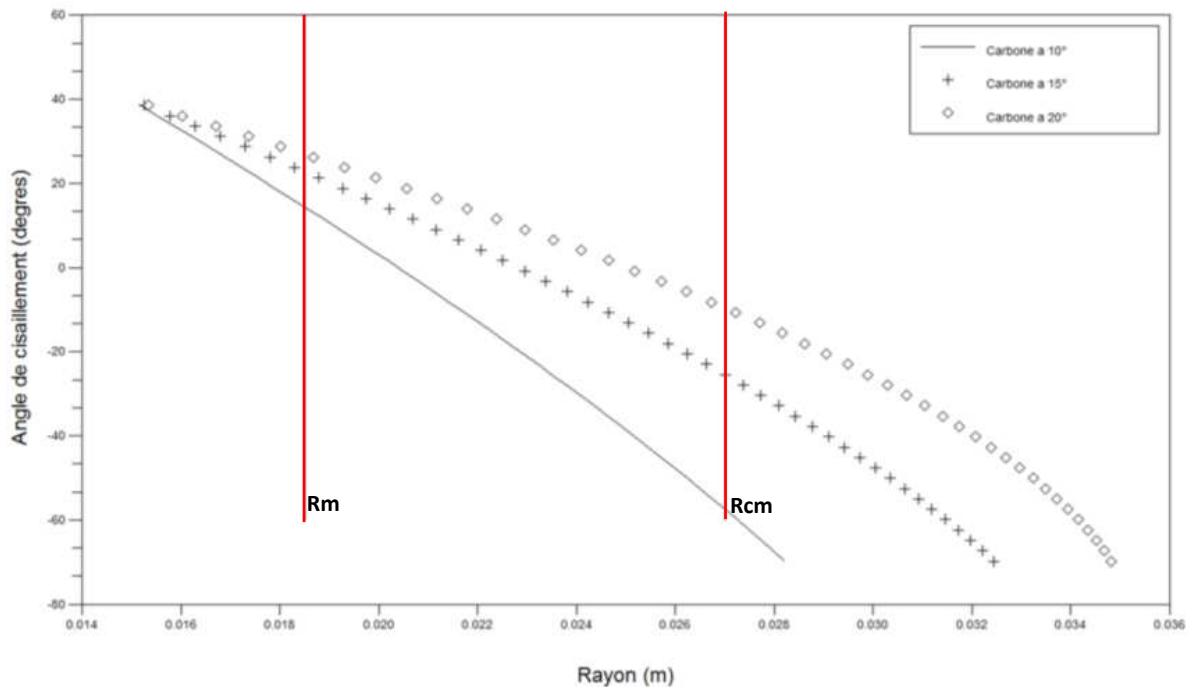


Figure 115 : Influence de l'orientation des plis sur l'angle de cisaillement

Ces résultats mettent en exergue le poids de l'orientation des plis dans la qualité de la préforme obtenue. Cette variation d'orientation est aussi prépondérante dans la variation de l'angle de cisaillement atteinte. En effet, on constate une forte variation du cisaillement pour une variation d'orientation du pli de plus ou moins 5° pour le cas de l'utilisation de la tresse de carbone. Sur la borne supérieure d'utilisation de notre étude, le rayon du contre-moule R_{cm} , l'angle de cisaillement varie de -50° à 0° lorsque l'on passe de 10° à 20° d'angle d'orientation des plis. Outre le fait que l'orientation des plis est un critère prépondérant de la qualité de la préforme obtenue, il apparaît que ce paramètre influence fortement les caractéristiques matériaux liées aux sollicitations en cisaillement ainsi que la forme globale de la pièce. Ainsi, une déviance de l'orientation des plis conduit à une préforme de mauvaise qualité, tant à cause de sa géométrie globale non conforme que par l'apparition potentielle de défaut dus à une utilisation du matériau non optimale si l'angle de cisaillement en cours de préformage dépasse l'angle de blocage.

Nous avons ainsi démontré l'influence de l'orientation des plis dans la préforme sur la déformation du renfort pendant le préformage ainsi que sur la qualité géométrique globale de la préforme. Certains résultats peu probants sur la cohérence des hypothèses de ce modèle particulier impliquent une vérification expérimentale sur la forme globale des plis obtenus.

3 Validation par l'expérience : Campagne d'élaboration de prototypes

Les études menées sur la modélisation macroscopique de la forme globale des plis en partie 2 de ce Chapitre ont permis de mettre en évidence les paramètres à maîtriser dans les conditions énoncées en hypothèses du modèle pour obtenir une préforme conforme. Sous condition que les plis soient identiques dans l'empilement constituant la préforme, les valeurs optimales à maîtriser du point de vue théorique sont :

- Distance entre ligatures = 60 mm
- Epaisseur du pli = 0,1 mm (du point de vue de la fraction volumique) et 0,3 à 0,4 mm (pour en limiter sa variation le long du pli) et entre 8,5 et 9 mm (du point de vue du diamètre extérieur)
- Pas > 3,1 mm
- Orientation des plis < 15,5°

Afin de valider les hypothèses émises pour la constitution du modèle macroscopique, il faut comparer les résultats obtenus expérimentalement, du point de vue du diamètre extérieur et de fraction volumique de fibre et vérifier si les résultats expérimentaux sont conformes aux prédictions issues de la modélisation macroscopique.

Une campagne d'élaboration de prototypes a donc été menée pour rassembler les données expérimentales nécessaires à la validation, par comparaison, des résultats prédictifs issus de la modélisation macroscopique de la forme de pli.

Cette campagne d'élaboration a été axée sur l'influence des paramètres « matériau » et « procédé » sur l'état global de la préforme, par sa géométrie et plus particulièrement sur l'influence de ces paramètres sur la forme globale des plis en cœur de pièce.

3.1 Campagne de fabrication de prototypes : protocole mis en œuvre

Pour valider le modèle prédictif, une campagne de fabrication de prototypes a été menée. L'objectif est de lister tous les paramètres caractérisant à la fois le protocole mais aussi la préforme obtenue et d'en étudier la variabilité.

Pour la géométrie de l'application industrielle, le mandrin à base conique doit accueillir une préforme de 120 plis. Un mandrin « d'étude » de plus petite dimension, contenant 100 plis, a été conçu pour les essais de laboratoire. Afin de faciliter la mise en œuvre et utiliser une quantité de matière raisonnable tout en garantissant des pièces cohérentes avec la grande dimension du mandrin industriel, le mandrin de laboratoire a été conçu pour la fabrication de préformes contenant un empilement de 100 plis. Pour cette campagne d'élaboration, le contre-moule est constitué d'un tube de plexiglas découpé aux dimensions du mandrin d'étude. Ces tubes sont à changer à chaque injection mais présentent l'intérêt majeur de permettre la visualisation de l'avancée du front de résine pendant l'injection (

Figure 116).

La campagne d'essai a permis l'élaboration de 22 prototypes de taille « d'étude ». Ils ont tous été préformés manuellement puis injectés afin de figer les plis et de permettre l'étude de la forme globale vue en coupe en cœur de pièce.

Les protocoles de préformage puis d'injection sont donc développés dans la suite de cette partie.



Figure 116 : Dispositif d'injection en moule transparent

3.1.1 Etape de préformage

Les préformes sont obtenues manuellement. La méthode utilisée est celle du procédé tel qu'il a été décrit dans le Chapitre 1 de ce manuscrit. La tresse est dans un premier temps enfilée sur la partie cylindrique du mandrin ; elle est ensuite serrée autour du mandrin avec les ligatures dont l'espacement, la distance entre ligatures, est l'un des paramètres clés du préformage. Le pli est formé en faisant glisser l'ensemble « tresse + ligature » vers le bas. La tresse se replie alors petit à petit sur elle-même, jusqu'à venir se replier complètement sur la base conique. Ces opérations sont ensuite répétées 100 fois pour former l'empilement du nombre de plis constituant une préforme d'étude complète. Les aspects du protocole de préformage, du point de vue des outillages utilisés et des précautions de mise en œuvre sont pas détaillés ici et feront l'objet du Chapitre suivant.

Dans le présent chapitre, nous nous consacrerons à l'aspect paramètre du procédé pour le protocole de préformage.

Les paramètres « procédé » qui influencent la forme globale des plis et l'état de la préforme en général sont la distance entre ligatures qui régit la quantité de matière introduite dans chacun des plis de la préforme, le pas d'empilement des plis qui est à la base du taux de compaction des plis, influençant donc à la fois la quantité globale de renfort introduite dans le moule à l'issue du préformage mais aussi la forme globale des plis en cœur de pièce.

L'objectif de cette campagne de fabrication de prototypes est d'optimiser le procédé de préformage pour garantir des résultats conformes aux exigences du cahier des charges mais surtout d'observer expérimentalement l'influence sur la qualité de la préforme et sur la forme globale des plis de la variation de certains paramètres « procédé ».

La campagne d'élaboration de prototypes a permis la fabrication de 22 prototypes en composite. Pour le préformage de ces 22 tubes, seule la distance entre ligatures a été fixée à 60 mm et maîtrisée grâce à l'utilisation d'un gabarit.

Afin de constituer une base de données expérimentales permettant la validation d'un modèle macroscopique de forme des plis, les pièces fabriquées ont été expertisées. Les données relevées sont listées dans le tableau de la Figure 117 suivante.

Données issues de la campagne expérimentale de fabrication de prototypes	Unité
Quantité de matière globale	g
Nombre de plis empilés	-
Pas théorique d'empilement	mm
Pas réel (mesuré sur vue en coupe et moyenné sur 12 plis)	mm
Diamètre de ligature (mesuré sur vue en coupe et moyenné sur 12 plis)	mm
Diamètre extérieur de la préforme	mm
Inclinaison globale des plis (mesurée sur vue en coupe et moyennée sur 12 plis)	d°
Fraction volumique de fibres (à partir de la densité de 5 échantillons répartis sur la hauteur)	

Figure 117 : Données relevées sur les prototypes

Les mesures de certains de ces paramètres ne sont possibles que sur le composite final ; les préformes ont donc été injectées systématiquement pour permettre l'étude approfondie des paramètres du tableau précédent.

3.1.2 Etape d'injection

Le procédé RTM est constitué de deux étapes majeures, le préformage du renfort puis l'injection de résine. Bien que ce manuscrit soit basé sur l'étude de l'étape de mise en forme des renforts dans le moule, il a fallu, pour tous les prototypes issus de cette campagne d'essai, mettre en œuvre l'étape d'injection de résine afin de mener les expertises sur des préformes injectées et solides.

Après avoir été mise en forme pour obtenir la préforme, le renfort et le mandrin à base conique sont introduits dans le contre-moule. Les prototypes étant élaborés sur le mandrin « d'étude », le contre moule utilisé est le tube en plexiglas.

L'ensemble « mandrin/préforme + contre-moule » est relié au système d'injection. Les préformes sont injectées avec de la résine polyester. Ce type de résine n'est pas celui de l'application industrielle, toutefois, l'objectif de ces injections est de figer les plis pour étudier le préformage, cette résine est choisie car elle présente de nombreux intérêts pour faciliter la mise en œuvre :

- faible coût
- approvisionnement rapide
- viscosité à température ambiante adaptée à l'injection RTM
- pas de cuisson grâce à l'ajout d'un catalyseur qui permet la solidification à température ambiante

Le but n'étant pas d'étudier les effets des paramètres procédés d'injection qui ont été explorés par R. Agogué [20], toutes les préformes ont été injectées avec le même protocole :

- Pression d'injection : $P = 3$ bars
- Catalyseur dosé à 2% en masse

Avec ces paramètres, le temps moyen d'injection est de 60 minutes. L'ensemble est ensuite laissé au repos 24h pour un séchage et une solidification complets puis démoulé, le plus souvent sous presse pour séparer le composite du mandrin à base conique.

3.1.3 Résultats obtenus et analyses

Chaque préforme a été injectée afin de figer les plis, découpée longitudinalement, polie et photographiée en mode macroscopique (Figure 118) pour visualiser une maximum de détails sur la santé matière.



Figure 118 : Prototype - vue en coupe

C'est sur ces photographies qu'ont été relevés, par analyse d'image, les paramètres « mesurés et moyennés sur douze plis » dans le tableau de la Figure 117.

Techniques de mesure

Les échantillons de tubes composites sont découpés dans le sens longitudinal et photographiés après avoir été polis. Les mesures des paramètres liés au procédé de préformage sont effectuées numériquement.

La largeur de pièce (connue et fixée par l'utilisation du moule rigide) est utilisée comme longueur de référence pour établir la correspondance entre le nombre de pixels mesurés numériquement sur l'image et la distance réelle en millimètres.

La photographie doit être centrée sur la zone à étudier afin de s'affranchir au maximum des effets de distorsion qui modifient les apparences des longueurs réelles (fish eye) qui sont encore plus marqués du fait de l'utilisation du mode macroscopique pour pouvoir restituer un maximum de détail de la santé matière ainsi que de l'orientation des couches de renfort sur la photographie étudiée ensuite.

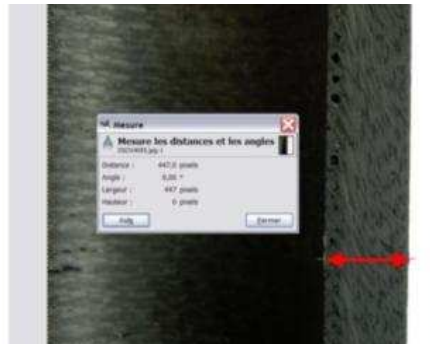


Figure 119 : Création du référentiel sous Gimp

La taille de la photographie prise dans les conditions permettant d'observer tous les détails nécessaires contient 12 plis « complets ». Nous définirons donc aussi pour chaque paramètre mesuré une moyenne sur ces 12 plis.

Cette méthode permet la mesure des diamètres des ligatures (Figure 120) :



Figure 120 : Mesures de diamètres des ligatures sous Gimp



Figure 121 : Mesure du pas avec Gimp

De la même manière que pour le diamètre des ligatures, le pas est mesuré sur l'échantillon image (Figure 121). Les relevés dont l'écart est supérieur à 10% ont été écartés des valeurs moyennées.

Le pas a été étudié sur des vues en coupe de pièces injectées (à l'aide de logiciels d'analyse d'image de la même manière que pour le diamètre des ligatures). Il s'agit de mesures sur pièce finie qui ne permettent pas une amélioration immédiate du protocole, toutefois, ce paramètre étant primordial

de par son impact sur la forme/silhouette des plis, il est très intéressant d'en observer les variations et afin d'y associer les variations en termes de forme de pli et d'en trouver les relations existantes. Toutes les données « procédé » sont donc relevées. L'objectif est de définir le lien entre ces paramètres et les résultats obtenus pour la préforme, notamment en ce qui concerne la forme globale des plis.

Pour chaque prototype étudié, la forme globale des plis a donc été analysée. Les plis ont été repérés par des marqueurs numériques (Figure 122).

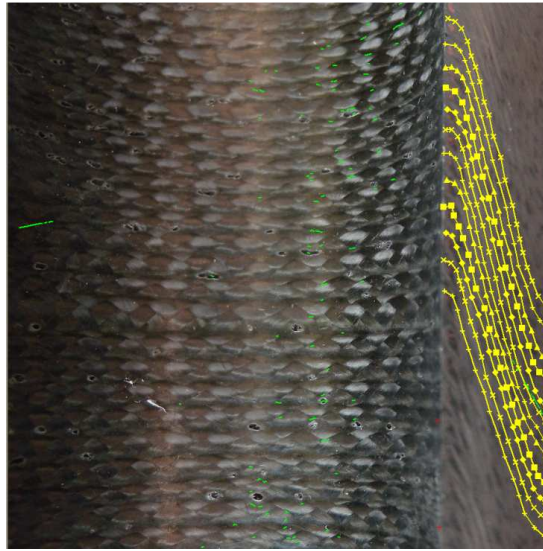


Figure 122 : Etude de la forme des plis sur vue en coupe des prototypes

Les coordonnées de ces points ont permis de tracer l'allure de la forme des plis pour chacun des 22 prototypes fabriqués pendant cette campagne d'essai dont un exemple de résultat obtenu est présenté en Figure 123 suivante.

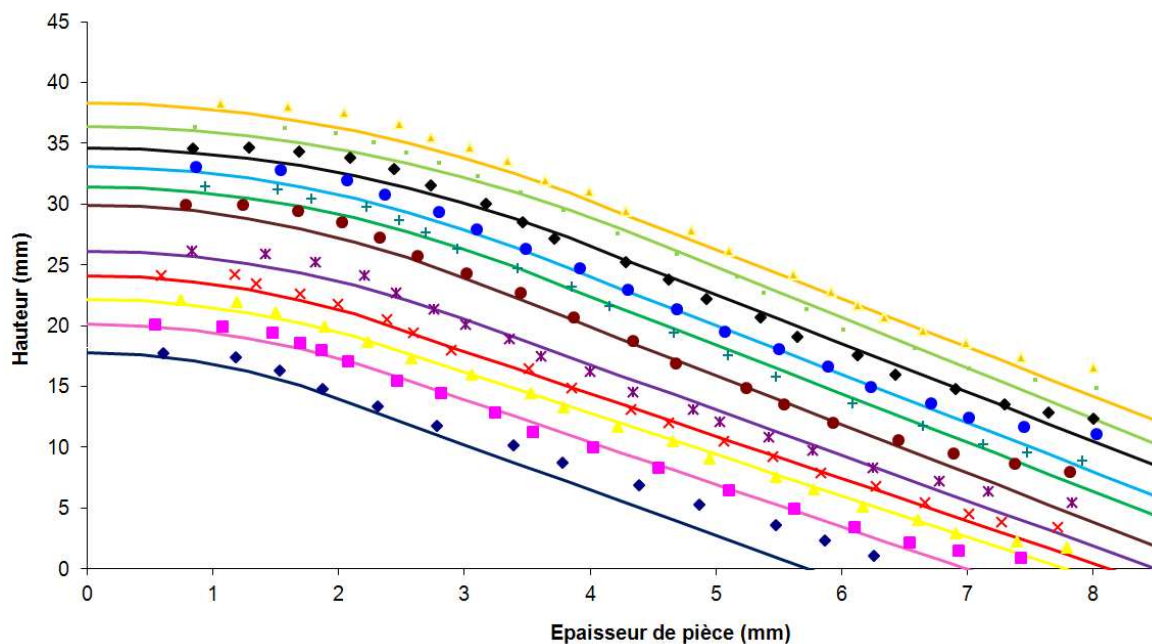


Figure 123 : Allure de la forme des plis des prototypes

Les relevés de tous les paramètres « procédé » associé à l'étude pour chacun des 22 prototypes, de la forme globale des plis présentent un double intérêt. Ces informations permettent dans un premier temps de déterminer l'influence des paramètres « procédé » sur l'état de la préforme et donc de la qualité du composite final une fois la préforme injectée. Ensuite ces données sont utiles pour valider les hypothèses énoncées pour modéliser et prédire la forme globale des plis à l'issue du préformage en fonction des paramètres « matériau » et « procédé ».

Cette campagne expérimentale permet d'emmagasiner un maximum de données, elle est donc indispensable dans le processus de validation du modèle de forme des plis. En outre, elle a été l'occasion d'acquérir une expérience notable du point de vue de la méthode de préformage et l'optimisation du procédé. Les aspects concrets du procédé de préformage, les outillages utilisés ainsi que les améliorations apportées au protocole sont exposées en Chapitre 4 de ce manuscrit.

a. Etude de l'influence du pas

Les premiers essais visent à observer l'évolution du diamètre extérieur en fonction de la variation du pas. Les résultats des préformes obtenues avec différentes valeurs de pas sont présentés sur la Figure 124.

Malgré la maîtrise du pas, le diamètre extérieur est variable même dans le « cas idéal théorique » (Préforme A - Figure 124 : pas > 3,1 mm), ce qui remet en cause à la fois les relations du modèle mais aussi l'hypothèse de plis tous identiques dans la hauteur de la préforme dans la configuration décrite par le modèle « droit ». En outre on remarque très clairement sur la Figure 124 que les plis prennent une forme particulière « bombée » qui n'est pas du tout cohérent avec l'hypothèse de plis parfaitement droits et confirme la non validité de la forme du modèle « droit » décrit en début de ce chapitre. Cette particularité fait l'objet d'une étude plus poussée dans la suite de ce chapitre.

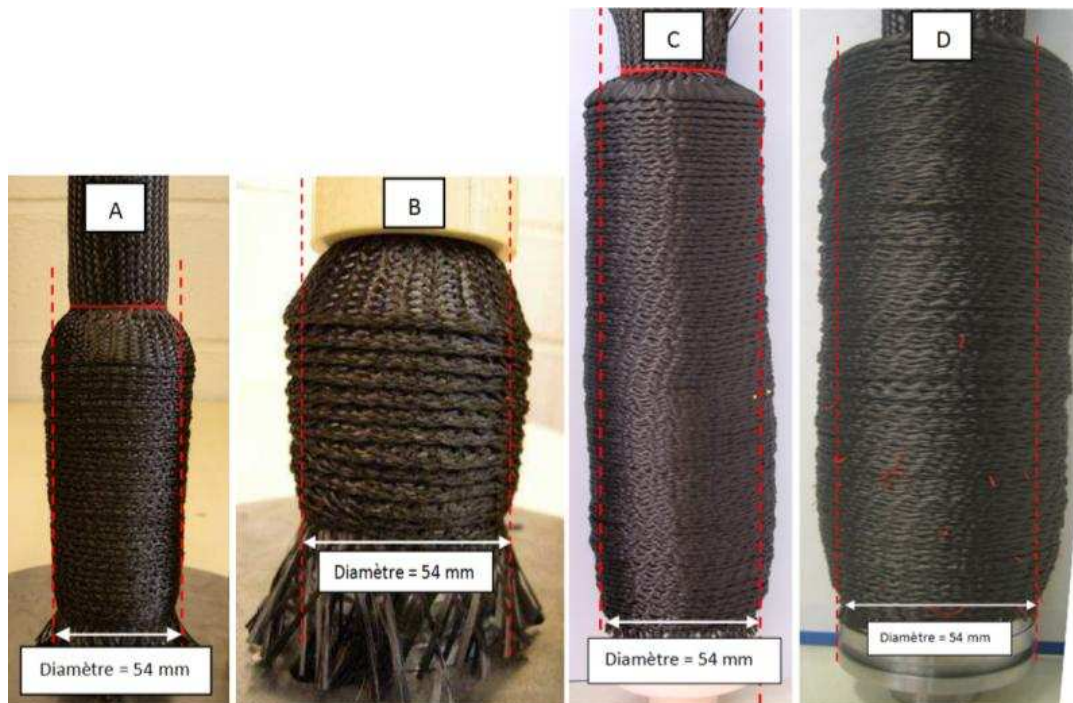


Figure 124 : Influence du pas sur le diamètre (A = 3,2 mm ; B = 3 mm ; C = 2,8 mm ; D = 2,4 mm)

Ces observations indiquent qu'une maîtrise du pas ne garantit pas, avec le procédé de préformage actuel, la maîtrise de l'orientation des plis dans la préforme et que le lien entre le pas et le diamètre extérieur établi avec la relation (3.22) du modèle droit n'est pas vérifiable expérimentalement.

De plus, dans le cas des valeurs de pas importantes ($\text{pas} > 3 \text{ mm}$) qui pourraient être favorable au respect du diamètre extérieur, la quantité de matière introduite dans le moule est insuffisante et non conforme au cahier des charges de la pièce composite finale à obtenir. Le modèle théorique et notamment les résultats prédictifs sur l'influence du pas sur le diamètre extérieur ne traduit pas tous les phénomènes observables expérimentalement.

b. Influence de l'épaisseur de la tresse

Concernant l'épaisseur du renfort, des tests ont été effectués avec une tresse de carbone et une tresse de silice dont l'épaisseur est plus importante. Les essais avec la tresse de silice d'épaisseur $e = 0,8 \text{ mm}$ n'ont pas abouti à des préformes conformes : les plis sont très épais et créent des hétérogénéités dans la préforme (Figure 125). De plus, la quantité de matière totale contenue dans la préforme est insuffisante : le pourcentage de fibre n'excède pas 35% en volume dans le composite pour une consigne à 60% fixée dans le cahier des charges de la fabrication de tubes de protection thermique en composite.



Figure 125 : Préforme de silice ($e_{\text{tresse}} = 0,8 \text{ mm}$) (Gauche : sèche - Droite : injectée)

Les résultats théoriques prédictifs du modèle ne sont pas cohérents avec ces observations expérimentales. Le modèle tel qu'il a été décrit dans la première partie de ce chapitre n'est pas satisfaisant de ce point de vue.

3.1.4 Observations expérimentales de la forme globale des plis en cœur de pièce

Afin de conclure sur la validité de ce modèle « droit », des observations de la forme globale du pli ont été effectuées sur des pièces fabriquées et coupées. Les résultats typiquement obtenus sont présentés sur la Figure 126. Une attention toute particulière est apportée à la zone autour de la ligature puisque c'est la présence de cette dernière qui donne la forme si spécifique aux plis en cœur de pièce. Les résultats obtenus indiquent que les modèles envisagés ne prédisent pas fidèlement la forme globale du pli ainsi que les relations « causes/conséquences » dans les relations qui régissent les influences des paramètres les uns par rapport aux autres.

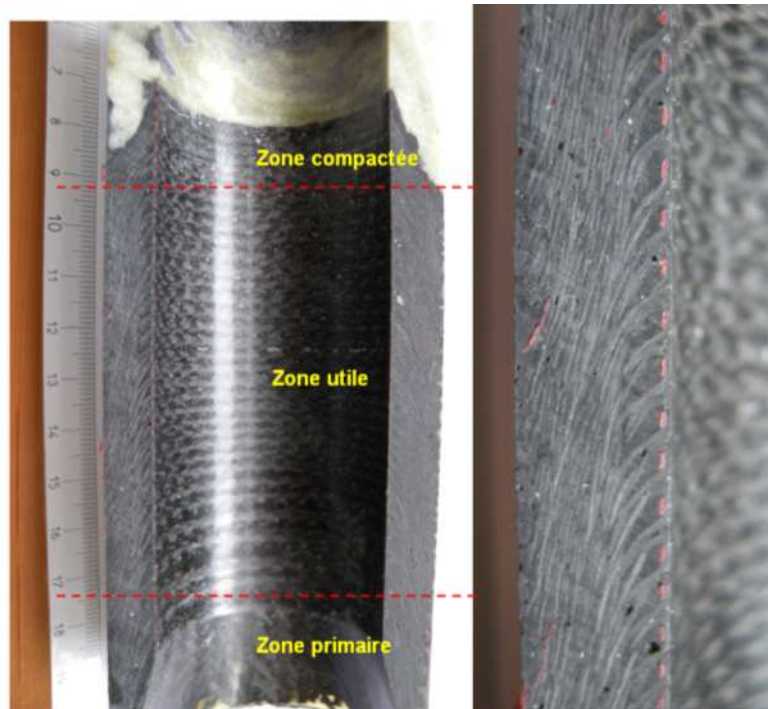


Figure 126 : Pièce finale, vues en coupe (zoom sur la zone utile)

Les observations ont permis de confirmer que les hypothèses effectuées pour l'écriture du modèle ne sont pas cohérentes avec l'expérience, les plis sont à priori tous identiques mais ne sont pas parfaitement droits. La présence de la ligature ne peut être négligée puisqu'elle donne au pli sa forme courbe caractéristique (Figure 127). La courbure issue de la présence de la ligature a un impact significatif sur la position et l'orientation des couches.

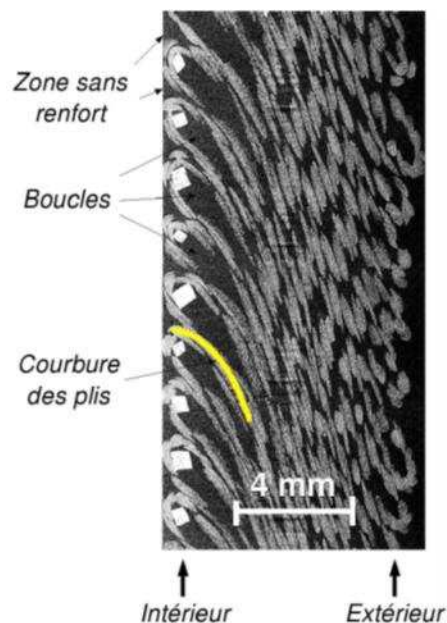


Figure 127 : Préforme sèche (compaction des plis faible) obtenue par tomographie à rayons X à 7,5 μ m [20]

En effet, un relevé local sur une préforme « quelconque » des angles d'orientation des plis à différents endroits confirment l'influence majeure de la présence de la ligature sur la forme particulière que prend le pli (Figure 128). Ce relevé a été effectué sur 33 plis consécutifs de la

préforme. L'angle moyen sur toute la largeur de pièce ainsi que dans la zone utile (« cœur de pièce ») sont proches de la cible des 15°. Toutefois les zones proches des ligatures sont hors des limites acceptables.

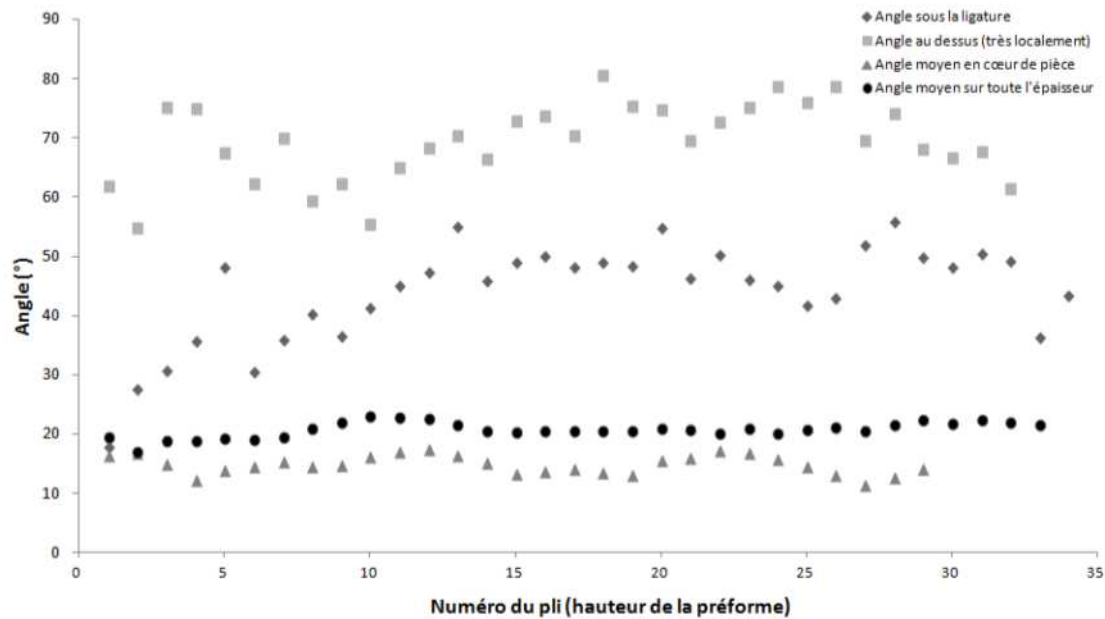


Figure 128 : Orientation des plis autour des ligatures

Le modèle actuel doit donc être modifié pour prendre en compte la présence de la ligature et envisager de prévoir son influence sur la forme globale des plis dans l'empilement.

3.2 Compréhension du phénomène de courbure des plis

Les courbures observées sur la forme globale des plis sont liées à la présence de la ligature (Figure 129). Les ligatures engendrent des zones vides sans renfort qui donnent la forme courbe particulière aux plis des prototypes étudiés. Il est indispensable de maîtriser ces zones sans renforts pour les diminuer au maximum car elles sont à l'origine d'hétérogénéités indésirables dans la répartition des fibres dans le composite final.

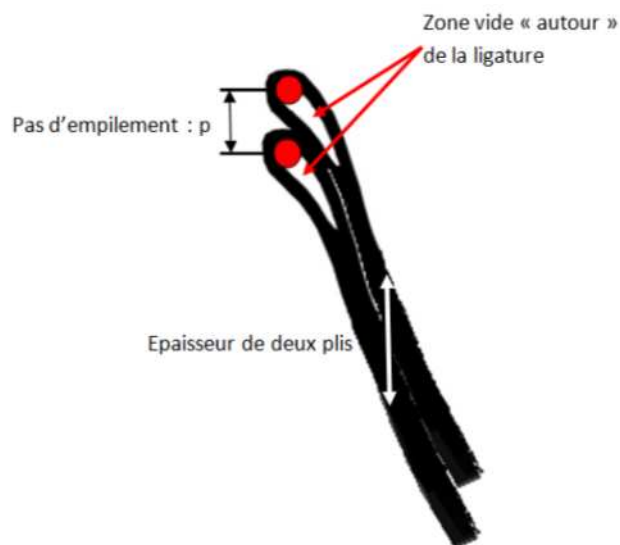


Figure 129 : Compréhension du phénomène de courbure des plis

Cette courbure des plis est limitée dans une zone autour de la ligature. La courbure des plis est visible en zone 1 de la Figure 130. On observe ensuite le passage en zone 2 où le pli est droit. Ce passage de la zone courbe du pli à la zone droite est régit par le paramètre R_c , qui représente la valeur du rayon à partir de laquelle la courbure du pli s'arrête.

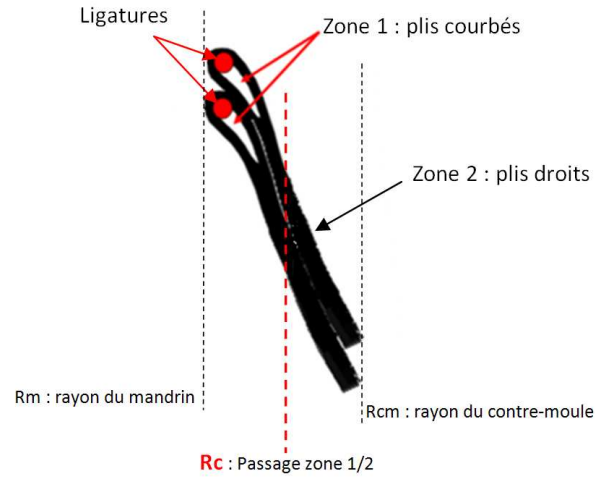


Figure 130 : Définition du paramètre R_c

Au cours de la fabrication des prototypes, des tests sont effectués avec différents pas d'empilement pour simuler des taux de compaction de plis différents. Ces observations expérimentales montrent que ces zones de vide sont d'autant plus importantes que la valeur de R_c est grande. Or les observations expérimentales (Figure 131) issues de l'étude de douze prototypes fabriqués avec des valeurs de pas d'empilement différentes montrent qu'une variation du pas a une influence sur la valeur de R_c qui a tendance à diminuer lorsque le pas diminue.

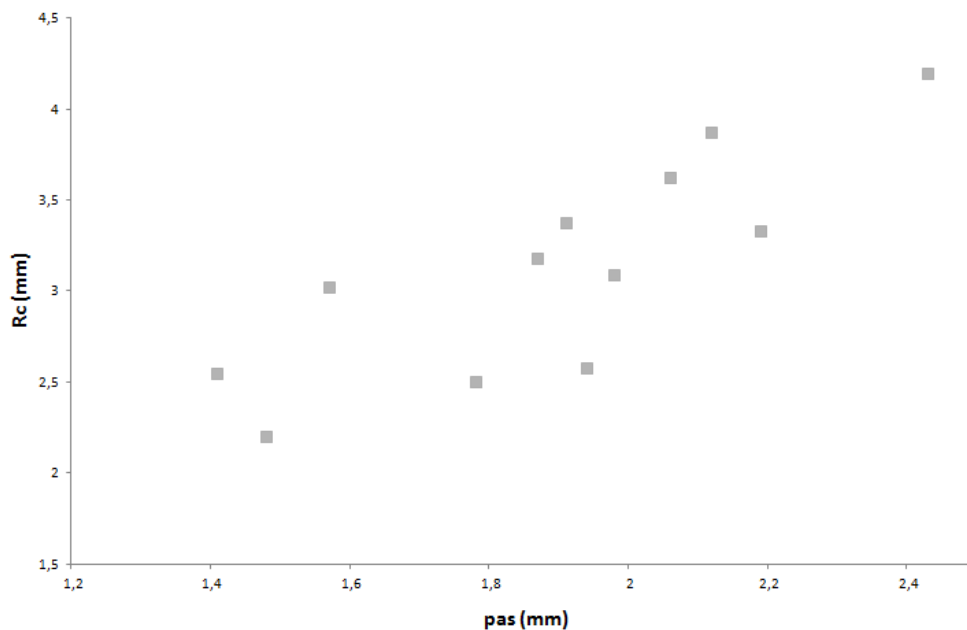


Figure 131 : Influence du pas sur R_c

3.3 Maîtrise de la compaction des plis

Dans cette seconde partie de chapitre, l'objectif annoncé est la recherche d'une compaction suffisamment importante pour tendre vers l'obtention de plis droits. L'objectif recherché est le même du point de vue expérimental, les avancées sont effectuées en parallèle sur le modèle et dans le procédé expérimental. Les modèles étudiés et testés sont issus de l'observation expérimentale. Ainsi la courbure due à la présence de la ligature est le point central de réflexion pour la modélisation. Dans le cadre du procédé de préformage, il faut augmenter la zone utile où le pli est droit. Cette diminution pourra donc être effectuée à l'aide d'un contrôle du pas puisqu'il apparaît que le vide autour de la ligature, présent « naturellement » peut être fortement atténué lorsque les plis sont plus compactés entre eux (Figure 139). En effet, ils deviennent jointifs sur une grande partie de leur longueur, augmentant ainsi l'étendue de la zone de positionnement idéal de pli droit, diminuant en même temps les vides entre plis autour des ligatures.

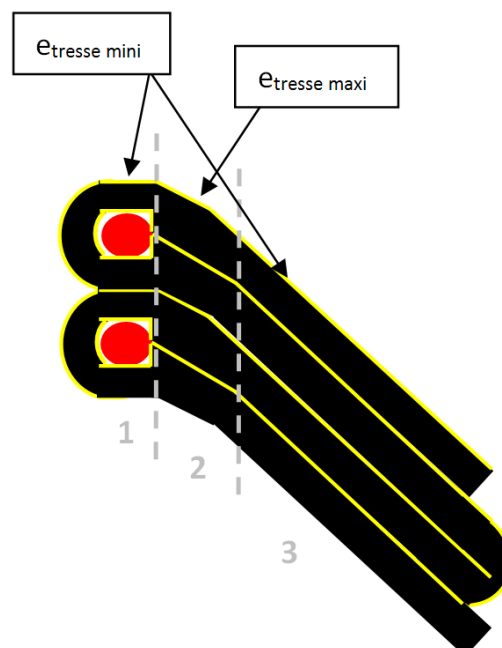


Figure 132 : Plis jointifs

Ainsi, en augmentant le taux de compaction des plis en cours de préformage, la forme globale des plis se rapprochent de la forme idéale droite et les vides créés à l'intérieur de la préforme à cause de la présence de la ligature sont minimisés car R_c diminue fortement, augmentant ainsi le taux volumique moyen de fibres contenu dans le composite final (Figure 132). De ce fait, le taux de compaction des plis entre eux doit être le plus important afin de contraindre les plis à adopter la forme droite sur une largeur maximale, donc en réduisant au maximum la valeur de R_c . Il faut donc veiller, du point de vue expérimental à appliquer une compaction suffisante sur le pli en cours de préformage. Ainsi, du fait de l'orientation à 15° , la tresse est compactée dans la partie droite (zone 3 - Figure 132) et jointive autour de la ligature, éliminant la zone de vide (zone 2 - Figure 132).

Il faut donc satisfaire deux conditions pour s'assurer de la conformité de la préforme obtenue tant du point de vue de la forme des plis que celui du taux volumique global de fibre. Dans un premier temps, le pas d'empilement des plis devra remplir la condition suivante :

$$pas \leq 2 e_{tresse} + 2 \cdot \frac{D_{lig}}{2} \quad (3.29)$$

avec e_{tresse} : épaisseur de la tresse

D_{lig} : diamètre de ligature

Le choix de la tresse devra donc être effectué à partir de sa capacité à tolérer une forte compaction dans la partie droite du pli (zone 3) afin que l'épaisseur inclinée des plis soit, une fois compactée, équivalente au pas (Figure 132). Elle devra alors « remplir » la zone de vide (zone 2) grâce à son épaisseur « naturelle », moins soumise à la compaction de l'empilement.

Si la tresse permet cette compaction importante, alors le modèle de la forme globale des plis s'écrit en considérant deux zones droites.

4 Les modèles théoriques envisagés

4.1 Modèle « courbe »

L'étude approfondie des prototypes de préformes a permis de mettre en évidence la forme particulière que peuvent prendre les plis. En effet, l'hypothèse de départ d'un pli idéal et droit n'est pas réaliste à la vue des formes de plis généralement obtenues.

Pour le cas de préformes obtenues au cours de la première campagne d'élaboration de prototypes, dont une sélection est présentée en Figure 124, les plis prennent une forme « bombée ».

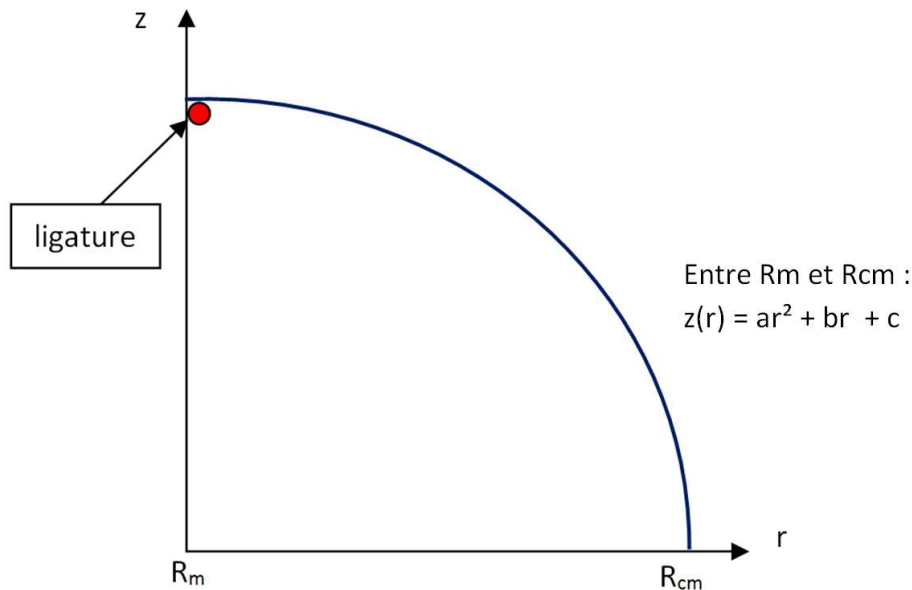


Figure 133 : Modèle "courbe"

Bien que cette forme globale soit observée sur les premières préformes fabriquées, ce modèle n'a pas été développé car cette forme est non souhaitable. En effet, l'orientation des plis doit être maîtrisée et l'angle formé avec l'axe du mandrin doit être égal à 15°.

Les préformes dont les plis sont cohérents avec le modèle courbe ne sont pas conformes et parallèlement à la recherche d'un modèle adapté aux observations expérimentales, le protocole

expérimental de préformage doit être optimisé pour que l'orientation des plis soit conforme aux attentes.

Dans cette optique, un modèle intermédiaire entre le modèle « droit » et le modèle « courbe » est développé, et les phénomènes responsables de la courbure des plis sont étudiés pour les maîtriser en cours de préformage et obtenir des plis dont l'orientation est convenable en cœur de pièce.

4.2 Modèle « courbe/droit »

Dans ce modèle, l'hypothèse réside sur le fait que le pli est divisible en deux zones distinctes : une zone courbe vers l'intérieur du tube, liée au repli et surtout à la présence de la ligature puis d'une zone dans laquelle le pli est droit, qui pourra être considérée comme la zone utile de la pièce. Cette partie droite suit l'orientation du pli précédent et donc de proche en proche, l'orientation idéale de 15° imposée par la base conique du mandrin de préformage. La zone utile doit couvrir la plus grande partie de l'épaisseur de la pièce pour valider la contrainte de l'orientation des plis maîtrisée formant un angle de 15° avec l'axe du mandrin. De ce fait, après l'usinage intervenant juste avant l'assemblage de la protection thermique dans son enveloppe, il ne devra rester que la partie droite. La partie courbe autour de la ligature doit donc être la plus étroite possible.

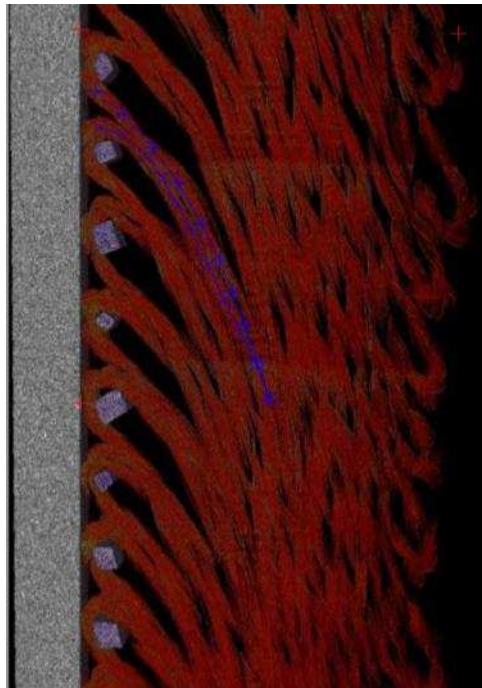


Figure 134 : Vue en coupe de préforme sèche par tomographie X à $7,5 \mu\text{m}$

L'image utilisée est issue de la tomographie effectuée à $7,5 \mu\text{m}$. La préforme utilisée pour les analyses de tomographie n'a pas été obtenue avec une compaction maximale. Les résultats permettent de bien visualiser la partie courbe due au contournement de la ligature par la tresse lors du repli le long du mandrin (Figure 134).

La particularité de ce modèle en deux parties est la présence d'un nouveau paramètre R_c qui correspond au rayon à partir duquel le pli passe de « courbe » à « droit ». Le modèle pourra donc être défini par le schéma et les relations de la Figure 135.

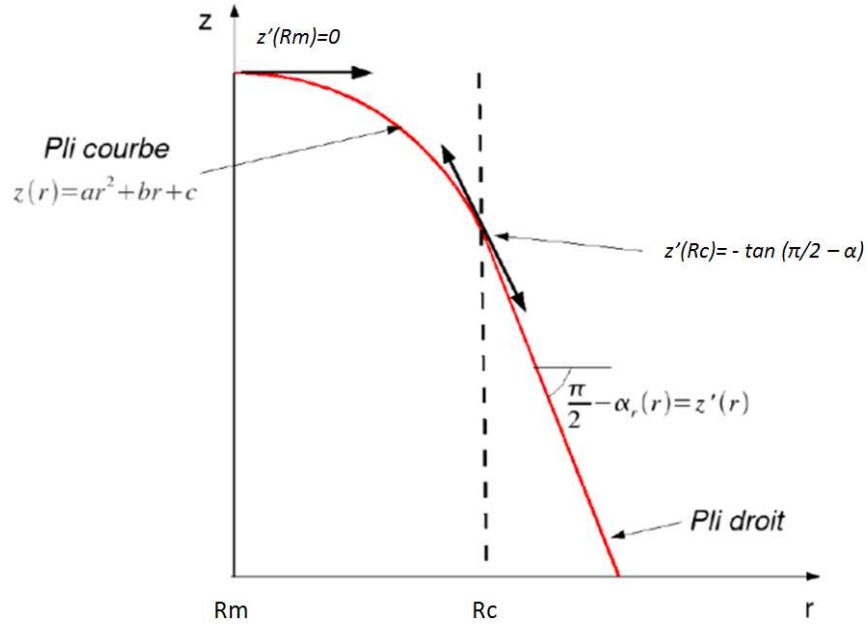


Figure 135 : Modèle « courbe/droit » [20]

Les équations du modèle « courbe/droit » sont données par :

$$z(r) = \begin{cases} ar^2 + br + c & \text{si } r < R_c \\ -\tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)r & \text{si } r > R_c \end{cases}$$

$$a = \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{2(R_c - R_m)} \quad \text{et} \quad b = \frac{R_m}{R_c - R_m} \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$$

Les points (r, z) , coordonnées de la trajectoire du pli, seront connus grâce aux données des relevés expérimentaux effectués à l'aide de marqueurs numériques par analyse d'image à partir de photographie de pièces composites coupées (Figure 136). Ces relevés sont effectués pour 12 plis consécutifs sur chacune des pièces observées.

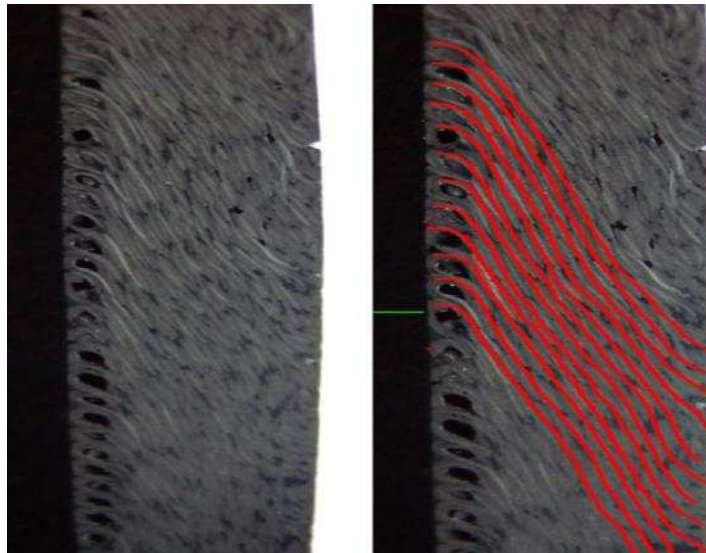


Figure 136 : Etude la forme des plis, vue en coupe, plis surlignés)

Les relevés expérimentaux d'une pièce composite conforme sont présentés sur le schéma suivant (Figure 137) :

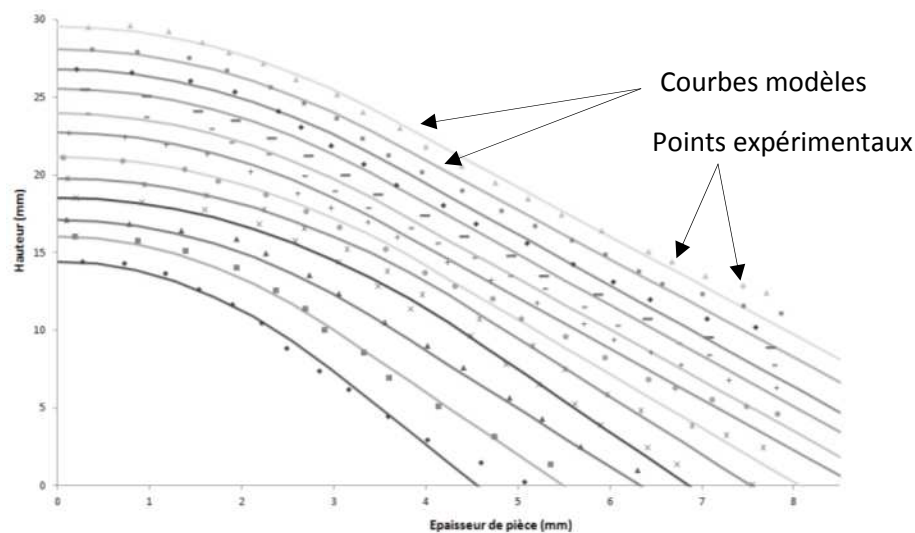


Figure 137 : Plis vus en coupe - Relevé expérimental + Modèle

Les paramètres R_m (rayon du mandrin) et R_{cm} (rayon du contre-moule) sont connus et figés par la géométrie de l'application industrielle. Seuls les paramètres R_c et α sont variables et permettent de décrire le modèle pour chaque cas. Les coefficients a , b et c sont calculés pour chacune des silhouettes pour obtenir le tracé des courbes modèles se superposant aux points expérimentaux (Figure 137). Ce modèle est fidèle aux observations expérimentales quelle que soit la valeur du pas d'empilement utilisée. Ce modèle permet une représentation fidèle de la forme du pli telle qu'elle a pu être observée expérimentalement (Figure 137).

Les observations expérimentales permettent de valider le modèle « courbe/droit » de la forme globale des plis. Le modèle « courbe/droit », pour les plis tels qu'obtenus précédemment, convient. Toutefois, les courbures autour de la ligature ainsi que les zones de vides qui en découlent ne sont pas satisfaisante du point de vue du cahier des charges. La zone utile de la pièce (où les plis sont droits, joints et avec la bonne orientation) est trop faible. Il faut donc comprendre les phénomènes se produisant en cours de procédé qui induisent cette forme particulière autour de la ligature. Ces

espaces vides de renfort sont à éliminer pour obtenir une préforme conforme aux exigences du cahier des charges.

4.3 Modèle « droit/droit »

Comme pour le modèle précédent, les plis sont considérés identiques.

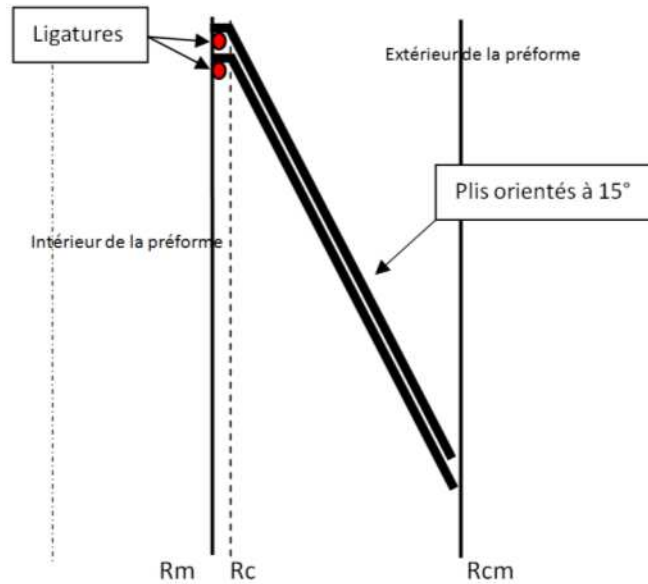


Figure 138 : Modèle « droit/droit »

avec

$$\begin{cases} \text{si } r < R_{mPlus} : z = z_0 \\ \text{si } r < R_c : z = z_0 + a(r - R_{mPlus})^2 \\ \text{si } r > R_c : Z_{Rc} = z_0 + a(R_c - R_{mPlus})^2 \text{ et } z = Z_{Rc} + a(R_c - R_{mPlus})(r - R_c) \end{cases}$$

La compaction maximale implique que les plis soient jointifs sur toute la partie droite, l'épaisseur compactée du renfort joue alors un rôle dans la limitation physique de cette compaction du fait de la capacité de la tresse à admettre une épaisseur permettant la compaction forte dans les zones 1 et 3 tout en garantissant la jointure des plis dans la zone 2 (Figure 132). De ce fait, la valeur de R_c , très proche du diamètre des ligatures, est constante et fixe. Ce point particulier est développé dans la suite des travaux, dans le cadre de la programmation d'un outil prédictif global basé sur le modèle « droit/droit ». Le pas quant à lui est fixé à la fois par les caractéristiques géométriques de la tresse et par son comportement en compaction.

Les observations expérimentales confirment les hypothèses de forme globale des plis droit/droit (Figure 139). Le modèle est ainsi validé et confirme l'importance de la prise en compte des caractéristiques du matériau choisi pour le procédé.

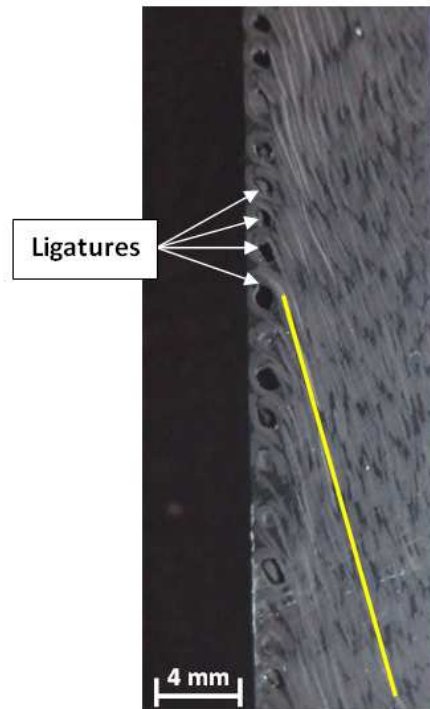


Figure 139 : Vue en coupe de pièce injectée, compaction des plis importante

Afin d'obtenir une préforme conforme aux exigences du cahier des charges ainsi qu'au modèle « droit/droit », il faut maîtriser la compaction des plis entre eux, ils sont ainsi jointifs et plaqués le long de la base conique du mandrin dont ils suivent l'inclinaison idéale de 15° . Le paramètre pilotant cette compaction est le pas d'empilement des plis, directement lié à l'épaisseur minimale admise par le matériau. De plus, il faudra veiller à utiliser des ligatures dont le diamètre n'excède pas cette épaisseur minimale de renfort afin que les plis soient jointifs juste après le contournement de la ligature (voir zone 2 - Figure 132).

4.4 Bilan

L'écriture de ce modèle, fidèle aux observations expérimentales, a permis une amélioration des conditions de préformage et donc du procédé de fabrication.

Il apparaît que le choix de la tresse, notamment via son épaisseur et sa capacité à être compactée, ne pourra être dissocié d'un calcul théorique de pas d'empilement. Les résultats sont encourageants du point de vue de la qualité des pièces composites obtenues. Cependant le taux volumique de fibre global ainsi que la quantité de matière introduite dans le moule à l'issue de l'étape de préformage ne sont pas des paramètres maîtrisés.

5 Conclusion de l'analyse de l'étape de préformage

Au cours de ce chapitre consacré à la modélisation du préformage, un modèle géométrique des mailles sur le pli a été écrit. Il permet de prédire l'état de cisaillement dans le pli en cours de préformage. Il sert aussi d'outil de validation de la faisabilité du procédé notamment en ce qui concerne les limites physiques de déformation en cisaillement admissible par la tresse avec l'angle de blocage. Cet outil de modélisation à l'échelle de la maille peut être applicable à des géométries différentes de celles qui nous intéressent ici. En effet, le modèle a été défini dans le cadre de cette étude pour une géométrie conique mais peut tout à fait prédire la déformabilité des mailles d'un renfort de type tresse dans d'autres types de drapages ou pour des déposes sur des outils de formes différentes.

De plus, grâce à ce modèle, il est possible de qualifier le préformage, à l'aide de paramètres « matériau » et « procédé », à partir de l'observation de l'état de cisaillement. Cet état de cisaillement lors du procédé a été comparé aux caractérisations de la tresse en cisaillement afin de s'assurer de la viabilité du process (l'angle de blocage en cisaillement étant un critère dans ce cas) et du choix du matériau.

La seconde partie du chapitre a été consacrée à la modélisation de la forme des plis. Quatre modèles (Figure 140 et Figure 141) ont été envisagés puis comparés aux observations expérimentales de la campagne de fabrication de prototypes. En effet, cette campagne d'élaboration de prototype a permis l'obtention de 22 pièces à étudier. Un protocole expérimental de mesure de la forme des plis à l'aide de moyens de mesure sans contact a été développé ; il permet d'étudier, en cœur de pièce, l'état de la préforme et donc la répétabilité de la dépose par la méthode de ligature de tresse.

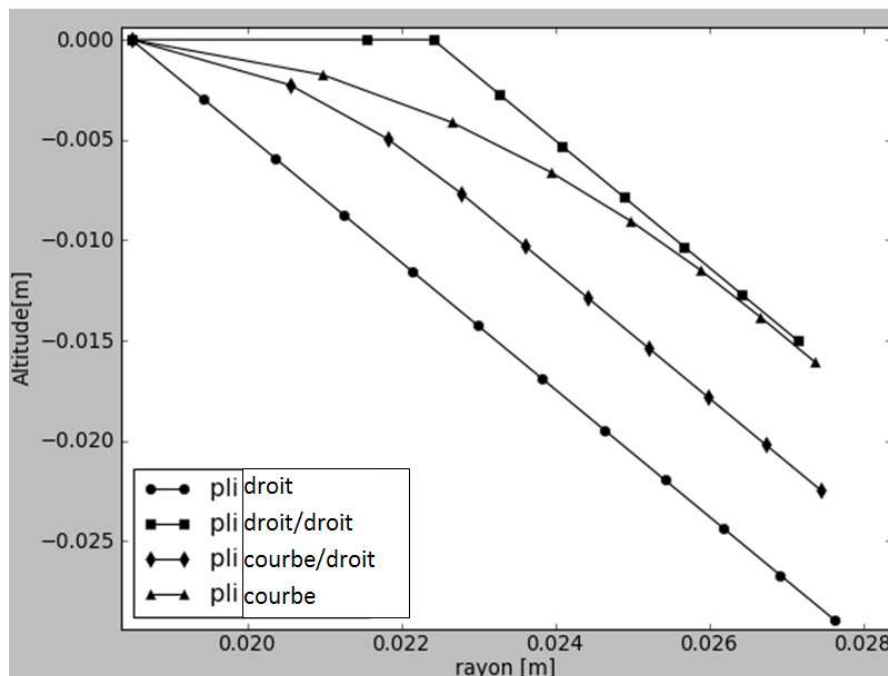


Figure 140 : Modèles envisagés - vue en coupe

La dépendance du modèle à l'échelle de la maille à la forme des plis a été analysée, plusieurs modèles de la forme des plis ont donc été envisagés. Le modèle à l'échelle de la maille est adaptable quelle que soit la forme globale du pli étudié. Toutefois l'observation de ces formes de plis en cœur

de préforme à l'issue du préformage est importante car elle est un moyen de contrôler l'état de compaction appliquée lors du procédé.

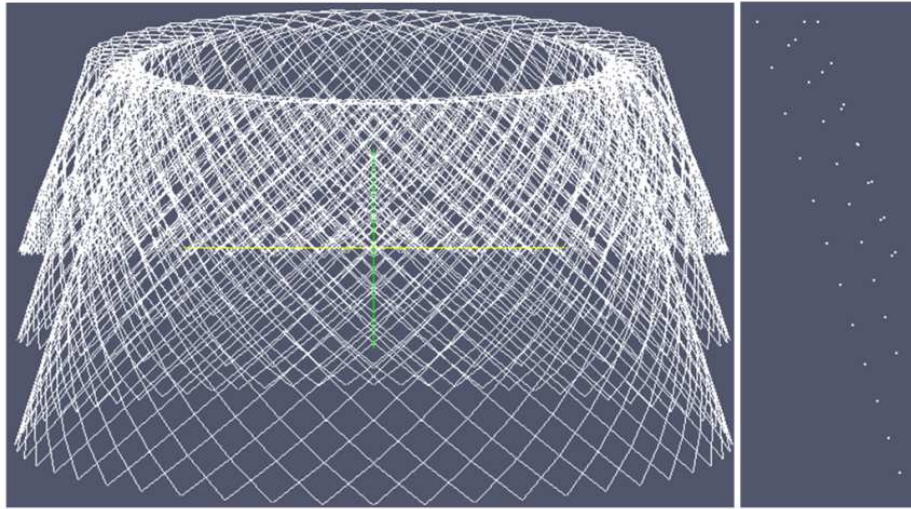


Figure 141 : Modèles envisagés - vue en 3D

Les études effectuées sur la modélisation ont conduit à l'obtention d'un modèle fidèle à la forme des plis observée expérimentalement et cohérent avec un procédé de fabrication optimal garantissant l'obtention de préformes conformes, le modèle « droit/droit ». Parallèlement, le procédé expérimental de préformage a été optimisé pour garantir un résultat conforme en termes de forme globale des plis mais aussi en ce qui concerne la quantité de matière introduite dans le moule et donc le taux volumique global de renfort dans le composite final. En outre, le modèle ainsi développé permet de connaître la position des mèches quelle que soit leur position dans la préforme.

Ce modèle sert donc de base au développement d'un outil prédictif sur la faisabilité du procédé de préformage. A partir de caractéristiques de la pièce composite attendue, telle que la géométrie de la pièce à fabriquer, l'inclinaison des plis souhaitée et des caractéristiques intrinsèques à la tresse comme ses dimensions, sa capacité à se déformer en compaction et en cisaillement ; cet outil peut, de manière prédictive, valider ou non la faisabilité du procédé à partir de critères tels que la forme globale des plis et le taux volumique de fibre dans le composite final.

Bien que les résultats obtenus à l'aide du modèle ainsi construit soient satisfaisants, il subsiste une voie d'amélioration importante pour cette modélisation. En effet, nous avons fait l'hypothèse que la préforme est constituée d'un empilement de plis identiques sur toute la hauteur. Ce postulat n'est pas aberrant en soi mais à la vue de certains relevés, notamment de variation de taux volumique de fibre dans la hauteur de la pièce composite finale [20], il pourrait être intéressant d'étudier les variations de formes de plis dans la hauteur et d'en déduire une loi d'évolution en fonction de la position du pli dans la préforme.

Chapitre 4 : Procédé d'élaboration d'une préforme par la méthode de ligature de tresse

Ce dernier Chapitre a pour objectif le détail de la mise en œuvre concrète du préformage par ligature de tresse. La mise en production au sein de la société ROXEL de protections thermiques par le procédé RTM n'est envisageable qu'à la condition que le préformage soit automatisable. En effet, le préformage manuel n'est pas adapté à une production industrielle pour une question de coût, notamment du fait de la nécessité de mobiliser un opérateur expérimenté et qualifié. L'automatisation du préformage permettrait d'élaborer des préformes en minimisant les interventions d'un opérateur, ce dernier n'étant plus obligatoirement expert dans la mise en place des tresses par la méthode de ligature. L'automatisation serait aussi gage de qualité, garantissant une faible variabilité dans la qualité des préformes obtenues.

Dans ce dernier chapitre, nous allons donc décrire le cahier des charges de l'automatisation du préformage tel qu'il a été étudié théoriquement précédemment. L'objectif est de décrire les étapes de cette partie automatisée en y détaillant les opérations qui seront effectuées manuellement par l'opérateur puis la séquence automatisée pour obtenir la préforme. Les fonctions de ce séquençage seront exposées et paramétrées. Les études de conception mises en œuvre ainsi que les tests préliminaires permettant la validation des solutions technologiques associées sont présentées. Le préformage automatisé est basé sur les étapes séquencées du préformage tel qu'il est effectué manuellement. Chacune de ces étapes est détaillée grâce à la fonction à réaliser, les critères de succès, les défauts potentiels, les solutions envisagées puis la validation de la solution retenue. L'ensemble permet donc d'obtenir un cahier des charges détaillé de préconception de l'automatisation du préformage par ligature de tresse.

1 Automatisation du préformage par ligature de tresse

Les préformes de tubes de protections thermiques sont obtenues à l'aide du procédé dit de ligature de tresse, cette méthode a été adoptée pour respecter l'orientation particulière que doivent avoir les plis par rapport à l'axe du tube. Cette orientation est primordiale pour respecter le cahier des charges de fabrication afin d'obtenir une préforme conforme aux exigences du cahier des charges dans le cadre de la fabrication de protections thermiques par le procédé RTM.

1.1 Rappel sur le préformage par ligature de tresse

Le procédé de préformage par ligature de tresse a été présenté dans le Chapitre 1. Nous y avons distingué deux phases : la formation du pli sur la partie conique (Figure 142 -a, b, c) où la tresse est sollicitée essentiellement en cisaillement et l'empilement des plis entre eux pour obtenir la préforme (Figure 142 -d, e) : le mode de sollicitation prépondérant étant à ce moment là la compaction.

Dans cette partie de l'étude, nous détaillons ces phases de préformage en étapes qui serviront à créer le séquençage automatisé du préformage.

Les principales étapes du séquençage du préformage manuel sont rappelées Figure 142 suivante. Le séquençage du préformage contient cinq étapes, validées et testées manuellement qui constitueront globalement les étapes du préformage à automatiser.

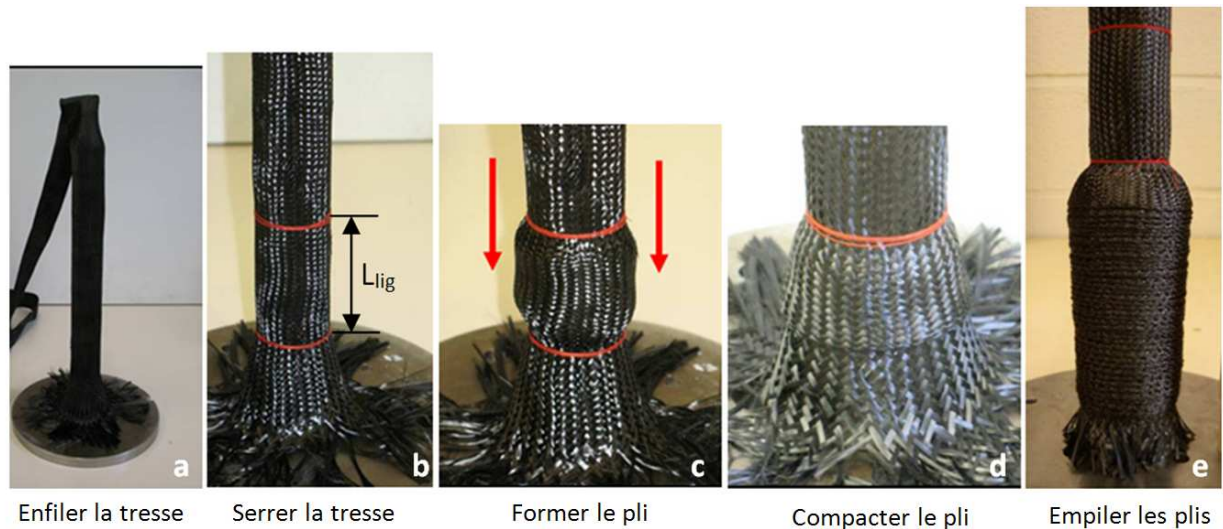


Figure 142 : Etapes du procédé de préformage par ligature de tresse

Lorsqu'il est réalisé manuellement, le préformage est séquencé de la manière suivante (Figure 143):

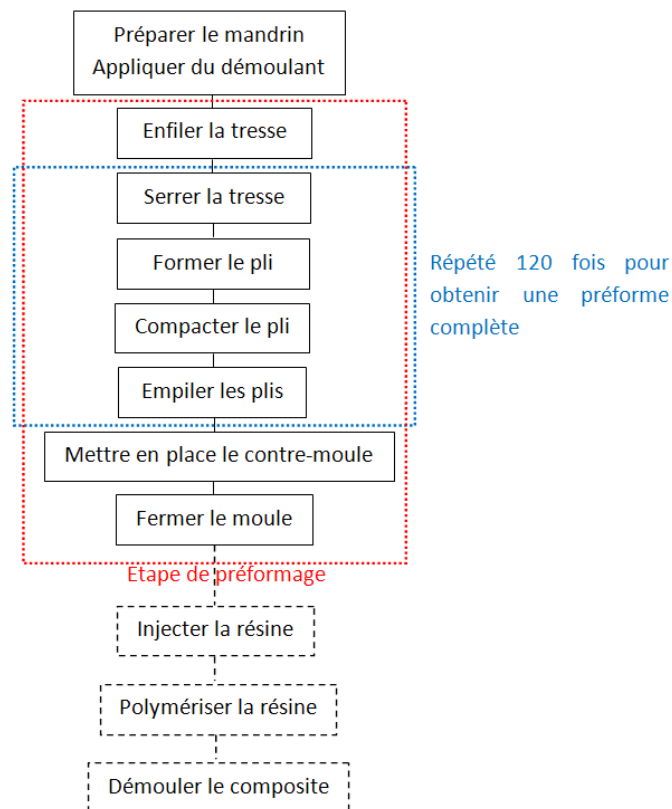


Figure 143 : Séquençage d'élaboration manuelle de composite

En effet, les étapes b à e (Figure 142) sont répétées autant de fois que nécessaire pour obtenir une préforme globale. Avec la géométrie de l'étude, il faut empiler 120 plis pour fabriquer la préforme d'un tube. Le diagramme de la Figure 143 présente le séquençage des étapes effectuées manuellement pour obtenir une préforme. Après l'application d'un démoulant sur le mandrin pour le préparer à la future injection, la tresse est enfilée sur le mandrin. Elle est ensuite serrée à l'aide de

ligatures positionnées manuellement. Ces ligatures vont déterminer la quantité de matière introduite dans chacun des plis de la préforme. La distance entre ligatures doit donc être identique pour chacun des plis de la préforme pour garantir l'homogénéité de cette dernière. Pour se faire, un gabarit est utilisé, cet aspect du préformage est détaillé dans les parties suivantes. Puis le pli est formé en repliant la quantité de tresse délimitée par les ligatures, le pli est compacté sur la base conique du mandrin à l'aide d'un poussoir conique pour s'assurer que le pli est orienté convenablement. L'empilement des 120 plis entre eux lors de la répétition des étapes de serrage de la tresse et de formation des plis suivant est aussi assuré par l'utilisation du poussoir conique.

La préforme ainsi formée est ensuite introduite dans le contre-moule manuellement. Le moule est ensuite fermé hermétiquement pour permettre l'injection.

Dans le cadre du préformage manuel, la mise en place du contre-moule sur la préforme a lieu une fois la préforme globale obtenue ; toutefois il est possible d'envisager, dans le cadre de l'automatisation du préformage, d'effectuer cette étape de mise en place du contre-moule d'une autre manière, notamment en cours de préformage comme nous le détaillons dans la suite de ce chapitre.

Avant cela, il nous faut mener la pré-étude de conception de l'automatisation de certaines des étapes du préformage.

Le cahier des charges prévoit en effet que les premières étapes « préparer le mandrin » et « enfiler la tresse » soient effectuées manuellement par un opérateur. Bien qu'elle ne fasse pas partie du processus d'automatisation, l'étape « enfiler la tresse » sera, au même titre que les suivantes, détaillée dans la partie suivante.

L'objectif de ce chapitre est de définir en détails l'automatisation du protocole de préformage par ligature de tresse pour le rendre viable du point de vue industriel. Les étapes du procédé de préformage, testé manuellement, sont présentées sur la Figure 142. Le dispositif automatisé imaginé pour reproduire ces étapes sans l'intervention d'un opérateur fait l'objet de la partie suivante.

1.2 Cahier des charges du dispositif automatisé

La méthode de préformage manuelle est testée et validée. Elle permet l'obtention de résultats satisfaisants du point de vue de la maîtrise des paramètres « procédé ». Elle reste toutefois fastidieuse et nécessite la présence d'un opérateur durant toute la fabrication. La conception d'un dispositif automatisé se révèle indispensable pour, d'une part éviter la mobilisation d'un opérateur pendant le processus d'élaboration et d'autre part, optimiser la qualité des produits finis en terme d'homogénéité de la qualité des préformes obtenues.

Ce dispositif a donc pour but de rendre le procédé de fabrication plus rapide, moins coûteux et plus fiable en termes de répétabilité.

L'objectif du dispositif est la mise en place de la tresse sur le mandrin en respectant la maîtrise des paramètres « procédé » qui garantissent l'obtention d'une préforme conforme.

Le dispositif doit donc effectuer les phases suivantes :

- Positionner les ligatures (pour la maîtrise du paramètre « procédé » L_{lig})
- Former le pli et le compacter (pour la maîtrise des paramètres D_{ext} , α , pas)

Ces opérations séquentielles sont répétées 120 fois pour obtenir une préforme conforme à la géométrie de l'étude.

Du point de vue du procédé, les paramètres de la préforme à maîtriser sont :

- la distance entre ligatures $L_{lig} = 60 (\pm 1 \text{ mm})$

- l'orientation des plis $\alpha = 15 (+ 5^\circ)$
- le diamètre extérieur $D_{\text{ext}} = 54 (- 1 \text{ mm})$
- le pas d'empilement des plis $p \leq e_{\text{tresse}} + 2 \cdot D_{\text{lig}}/2 (\pm 0,1 \text{ mm})$

La maîtrise de ces paramètres dans les intervalles de tolérance définis ici est primordiale. En effet, nous avons pu analyser et observer au paragraphe 2.2 du chapitre 3 les conséquences d'une déviance de ces paramètres sur la qualité de la préforme.

Ces paramètres sont maîtrisés convenablement lors du préformage manuel avec utilisation d'un gabarit pour maîtriser la distance entre ligatures, de bagues extérieures pour maîtriser le diamètre extérieur et d'un dispositif « bagues de serrage + poussoir conique » pour la maîtrise de l'angle d'orientation des plis et le pas d'empilement des plis.

Afin d'automatiser le procédé de drapage et d'empilement des plis, il faut séquencer les étapes à mettre en œuvre et définir des paramètres d'automatisation.

L'automatisation concerne les phases de drapage des plis sur la forme conique et l'empilement compacté des 120 plis pour obtenir la préforme complète.

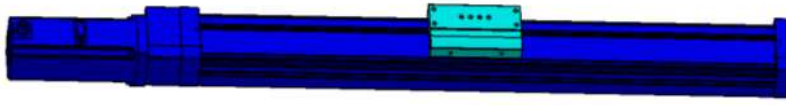
Les principaux éléments constituant potentiellement l'automate sont présentés sur la Figure 144 suivante. L'automate (Figure 144 - D) contient trois éléments :

- un axe et son chariot (Figure 144 - A)
- un poussoir conique (Figure 144 - B)
- des bagues de serrage (Figure 144 - C)

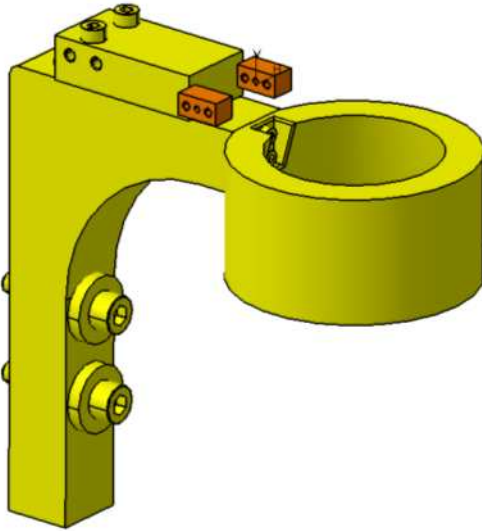
Sur la Figure 144 – D, l'automate est présenté avec le mandrin à base conique dans son état en fin de préformage.

C'est ce dispositif qui est à même de permettre d'accéder aux étapes préliminaires de l'industrialisation du préformage du tube de protections thermiques par la méthode de ligature de tresse. Les étapes sont donc séquencées pour l'automatisation.

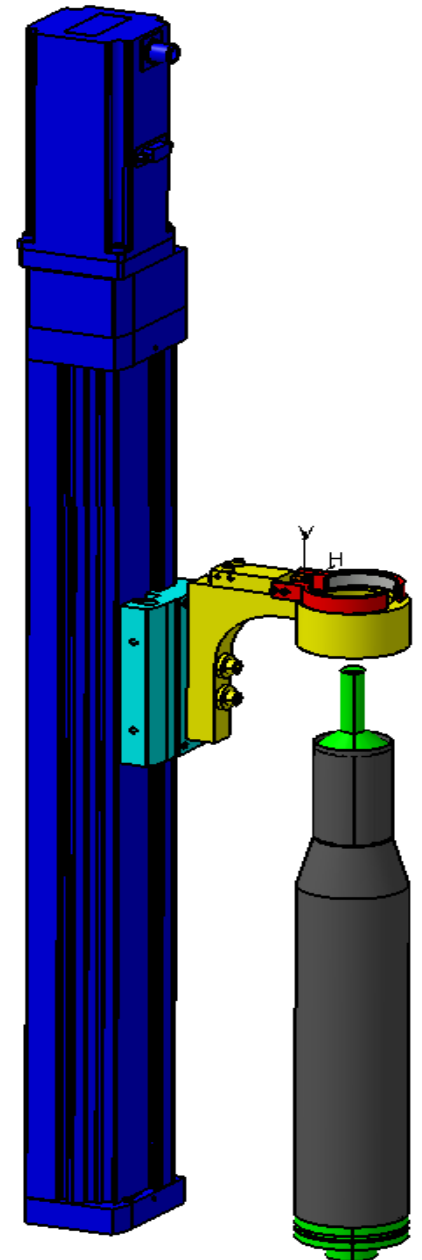
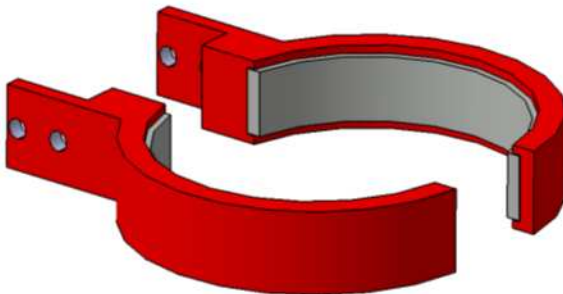
- Axe électrique fixe avec son chariot (A)



- Poussoir conique (B)



- Bagues de serrage (C)



Vue d'ensemble du dispositif (D)

Figure 144 : Modélisations d'un automate pour le préformage

Le séquençage se présente de la manière suivante :

- A - Positionner le dispositif pour mettre en place la ligature
- B - Serrer l'ensemble « tresse + ligature »
- C - Faire glisser l'ensemble « tresse + ligature »
- D - Desserrer l'ensemble « tresse + ligature »
- E - Remonter le dispositif pour positionner une nouvelle ligature

Ces étapes doivent être répétées 120 fois pour obtenir une préforme complète.

Pour parvenir à concevoir le dispositif automatisé, il faut paramétrer chacune des étapes du séquençage présenté précédemment. Afin d'accéder à ce paramétrage, les séquences vont être présentées sous forme d'une fonction à mettre en œuvre ; nous y associons un critère de succès, les défauts potentiels, les études menées pour exposer les solutions envisageables et enfin la validation de la solution choisie pour la conception d'un dispositif automatisé.

2 Séquençage du préformage

Dans cette partie, chaque étape du préformage est détaillée pour définir l'objectif et les contraintes liées à l'automatisation. Les solutions envisageables sont présentées ainsi que les tests et validation qui permettent de paramétrer la séquence.

Ces étapes sont donc détaillées dans la suite de cette partie. Nous y présentons pour chaque étape les objectifs et les résultats attendus, les défauts potentiels ainsi que les paramètres « procédé » associés à maîtriser pour les éviter. Enfin, nous présentons concrètement les outillages utilisés et les contrôles effectués pour parvenir à la maîtrise des paramètres et donc à l'optimisation des résultats.

2.1 Enfiler la tresse

2.1.1 Objectif

La tresse est enfilée sur la partie cylindrique du mandrin à base conique et elle est plaquée sur la partie cylindrique du mandrin (Figure 145). Cette étape est prévue pour être effectuée manuellement par l'opérateur avant le début du préformage automatisé.



Figure 145 : Tresse plaquée sur la partie cylindrique du mandrin

2.1.2 Critère de succès de la fonction

La tresse doit être plaquée sur la partie cylindrique du mandrin sur une longueur supérieure à la distance entre les ligatures. Elle ne doit présenter aucun pli ni hétérogénéité apparente.

2.1.3 Défauts potentiels

Il faut toutefois s'assurer que la tresse n'est pas vrillée autour du mandrin (Figure 146). Une mise en place non contrôlée de la tresse à cette étape peut être à l'origine de défauts de type pli ou boucle au moment de la formation du pli.



Figure 146 : Tresse vrillée

Le drapage d'un pli à partir d'une tresse vrillée entrainerait des hétérogénéités dans le pli, ce qui constituerait une source de défaut majeur pour la préforme.

2.1.4 Solutions envisagées

Les défauts sont visibles par un opérateur même inexpérimenté (Figure 146), aucun outillage spécifique n'est donc envisagé pour cette étape où le contrôle visuel est suffisant en termes de précision recherchée.

2.1.5 Validation

Au cours des nombreuses manipulations effectuées, cette étape n'a jamais été problématique. Les défauts potentiels cités ci-dessus ne sont jamais apparus malgré les différents opérateurs, même inexpérimenté, ayant manipulé la tresse pour la draper sur la partie cylindrique du mandrin. Le contrôle visuel est donc validé pour la mise en œuvre de cette étape qui sera effectuée manuellement.

2.2 Serrer la tresse

2.2.1 Objectif

A cette étape, la tresse est donc enfilée sur la partie cylindrique du mandrin. Cette étape de serrage s'effectue à l'aide de ligatures. La présence des ligatures a été traitée théoriquement. En effet, il s'agit d'une des difficultés majeures du préformage au cours de l'élaboration de préformes et les études théoriques effectuées dans les chapitres précédents ont montré que la présence des ligatures influence très fortement la forme globale du pli qui est l'un des critères fondamentaux de la qualité de la préforme. Cet aspect pose également des difficultés du point de vue de l'automatisation.

Des études ont donc été menées pour vérifier la nécessité de la mise en place de ces ligatures en cours de préformage [96-98]. Ces études ont eu lieu dans le cadre de projet de fin d'étude d'étudiants ingénieurs à Polytech'Orléans dans la spécialité de Conception de Systèmes Automatisés.

Les tests préliminaires de préformage sans ligature ont été effectués pour le préformage manuel. Le protocole de préformage utilisé est celui décrit dans la première partie de ce chapitre.

Le préformage mis en œuvre intègre l'utilisation des outils présentés dans cette première partie. La distance entre ligatures est maîtrisée avec l'utilisation d'un gabarit, les plis sont formés et compactés à l'aide d'un prototype du dispositif "bague de serrage + poussoir conique" et le diamètre extérieur

est maîtrisé par les bagues extérieures. Du point de vue théorique, l'utilisation de ces outils est une condition suffisante pour que les préformes obtenues avec ces outillages soient conformes.

Les tests sur un empilement de dix plis ont été mis en œuvre pour expérimenter le préformage sans ligatures.

Dès la formation des premiers plis, nous avons observé que les ligatures sont utiles à la détermination de la quantité de matière dans le pli, mais participent aussi grandement au maintien du taux de compaction de l'empilement. En effet, dès que le poussoir n'exerce plus la pression de compaction sur l'empilement, les plis se détendent et n'ont plus l'orientation indispensable à la conformité de la préforme. La compaction à l'issue de la formation des plis suivant n'est pas suffisante pour recomprimer l'ensemble, les plis n'ont pas la bonne orientation dans l'empilement et ne sont plus jointifs.

Les tests ont été répétés quatre fois en prenant soin de respecter le protocole de préformage. Les résultats ne donnent pas satisfaction et ont conduit à confirmer le caractère indispensable de la présence des ligatures.

Résultats obtenus

Ces tests n'ont pas permis de valider l'hypothèse d'un possible préformage sans ligatures. Les plis formés sans ligature ne restent pas compactés et leur orientation n'est pas stable. L'effort de compaction appliqué à la fin de la formation de chaque pli ne permet pas de reformer convenablement tous les plis de l'empilement. La préforme obtenue n'est alors pas conforme : ses plis ne sont pas jointifs et ne présentent pas la bonne orientation par rapport à l'axe du mandrin.

Ces tests ont donc permis de confirmer la nécessité de positionner les ligatures pour obtenir la forme de plis souhaitée, que ces derniers sont jointifs et que le taux de compaction permet d'atteindre les 60% en volume de renforts présents dans le moule à l'issue du préformage.

La présence des ligatures est indispensable pour garantir le maintien en position des plis dans l'empilement pendant le préformage des plis suivants mais aussi au cours des étapes suivantes dans le procédé RTM notamment la fermeture de moule et l'injection de résine.

2.2.2 Critère de succès de la fonction

La maîtrise de leur emplacement est tout aussi fondamentale car la distance entre ligatures L_{lig} détermine la quantité de matière qui sera présente dans le pli. Ces quantités de matières sont indispensables à maîtriser à l'échelle du pli pour garantir l'homogénéité de la préforme mais aussi pour s'assurer que la quantité globale minimum de renfort est introduite pour atteindre le seuil des 60% de taux volumique global de fibres dans le composite.

Pour optimiser la conception du dispositif automatisé qui devra assurer une mise en place précise des ligatures en cours de préformage, il faut paramétrer l'effort de serrage des bagues C de la Figure 144 à appliquer sur l'ensemble « tresse + ligature » mais aussi l'effort axial à appliquer pour faire glisser l'ensemble le long du mandrin pour former le pli en repliant sur elle-même la quantité de tresse contenue dans la distance L_{lig} lorsqu'elle est plaquée sur la partie cylindrique du mandrin.

Pour déterminer les conditions d'adhérence et de glissement, nous nous basons sur l'effort de serrage exercé par la ligature sur l'ensemble « tresse + mandrin ». Cet effort sous forme d'une densité linéique notée $f_{serrage}$.

Cet effort de serrage exercé par la ligature a été déterminé expérimentalement.

Détermination de l'effort de serrage : Protocole de l'expérience

La tresse est enfilée sur le mandrin suspendu, une couche de démoulant a été préalablement appliquée sur ce dernier pour reproduire les conditions de fabrication de protection thermique par RTM où le préformage par ligature de tresse est suivi de l'étape d'injection de résine.

Une ligature est déposée sur la tresse exerçant donc un effort de serrage uniformément réparti sur la tresse comprimée par la ligature.

Un système d'accroche est mis en place sur la partie inférieure de la tresse se trouvant dans le vide. Des masses y sont progressivement appliquées jusqu'à déclencher le glissement de la tresse ligaturée par rapport au mandrin fixe.

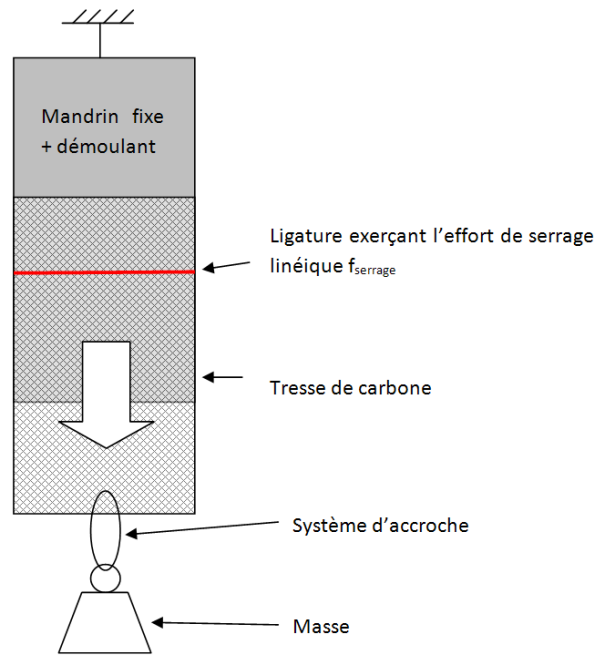


Figure 147 : Dispositif de mesure de l'effort de serrage des ligatures

Résultats obtenus

L'expérience est répétée quatre fois et la moyenne des résultats nous permet d'estimer f_{serrage} la densité linéique de l'effort de serrage exercée par l'élastique sur la tresse à :

$$f_{\text{serrage}} = 108 \text{ N/m} \quad (4.1)$$

En effet, on doit avoir adhérence entre les bagues et la tresse au niveau de la ligature mais il faut aussi être en limite d'adhérence entre la tresse, sur sa partie intérieure, et le mandrin pour que l'ensemble « tresse + ligature » puisse être déplacé vers le bas pour replier la tresse sur elle-même pour former le pli.

Dans le séquençage du préformage automatisé, les plis sont formés aux étapes B et C. Au cours de l'étape B « Serrer l'ensemble « tresse + ligature » », l'automate vient serrer l'ensemble « tresse + ligature ». L'effort de serrage qui doit être appliqué par les deux bagues (Figure 144 - C) est choisi du même ordre de grandeur que l'effort de serrage F_{serrage} de l'élastique sur la tresse au moment de la pose de la ligature.

Il reste toutefois à quantifier le mouvement de glissement intervenant à l'étape C du séquençage « Faire glisser l'ensemble « tresse + ligature » » en déterminant l'effort axial à appliquer pour former le pli.

A cette étape, pour garantir un glissement optimal, il faut qu'il y ait adhérence entre les bagues (Figure 144 - C) et la tresse (au niveau de la ligature) tout en étant en limite de glissement entre l'ensemble « tresse + ligature » et le mandrin pour permettre le glissement et donc la formation du pli conique.

En utilisant la loi de Coulomb, nous pouvons traduire la condition d'adhérence par la relation (4.14) suivante. Elle fait le lien entre l'effort tangentiel $f_{adhérence}$ à l'effort de serrage appliqué par l'élastique sur la tresse $f_{serrage}$ avec :

$$\|\overrightarrow{f_{adhérence}}\| \leq \mu_{0 \text{ carbone/caoutchouc}} \|\overrightarrow{f_{serrage}}\| \quad (4.2)$$

avec $\mu_{0 \text{ carbone/caoutchouc}}$ le coefficient de frottement entre la tresse de carbone et la bague de serrage tapissée de caoutchouc.

En intégrant sur la ligature sur $d\theta$ entre 0 et 2π , nous obtenons l'effort de serrage global $F_{serrage}$:

$$F_{serrage} = \int_0^{2\pi} f_{serrage} (R_m + e_{tresse}) d\theta = 2\pi(R_m + e_{tresse})f_{serrage} \quad (4.3)$$

avec R_m le rayon du mandrin, e_{tresse} l'épaisseur de la tresse et $\mu_{0 \text{ carbone/caoutchouc}}$ le coefficient de frottement entre la tresse de carbone et la bague de serrage tapissée de caoutchouc.

L'effort tangentiel d'adhérence global $F_{adhérence}$ s'écrit :

$$\|\overrightarrow{F_{adhérence}}\| = 2\pi(R_m + e_{tresse})\mu_{0 \text{ carbone/caoutchouc}}f_{serrage} \quad (4.4)$$

avec $f_{serrage}$ la densité linéique de l'effort de serrage de la ligature, R_m le rayon du mandrin, e_{tresse} l'épaisseur de la tresse et $\mu_{0 \text{ carbone/caoutchouc}}$ le coefficient de frottement entre la tresse de carbone et la bague de serrage tapissée de caoutchouc.

Nous avons donc déterminé ici la condition d'adhérence grâce à la relation (4.16) entre les bagues de serrage et l'ensemble « tresse + ligature ». Il reste à traiter la condition de glissement entre la tresse et le mandrin. Cette condition de limite de glissement est décrite grâce à la loi de Coulomb par la relation suivante :

$$\|\overrightarrow{F_{glissement}}\| = \mu_{\text{carbone/acier}} \|\overrightarrow{F_{serrage2}}\| \quad (4.5)$$

avec $\mu_{\text{carbone/acier}}$ le coefficient de frottement entre la tresse de carbone et le mandrin d'acier.

De la même manière que pour les calculs de la condition d'adhérence, on peut écrire l'effort de serrage global $F_{serrage2}$ à partir de la densité linéique de serrage de la ligature $f_{serrage}$:

$$F_{serrage2} = 2\pi R_m f_{serrage} \quad (4.6)$$

donc la force de glissement $F_{\text{glissement}}$ devient :

$$\|\overrightarrow{F_{\text{glissement}}}\| = 2\pi R_m \mu_{\text{carbone/acier}} f_{\text{serrage}} \quad (4.7)$$

avec f_{serrage} la densité linéique de l'effort de serrage de la ligature, R_m le rayon du mandrin et $\mu_{\text{carbone/acier}}$ le coefficient de frottement entre la tresse de carbone et le mandrin en acier.

Nous avons déterminé, avec la relation (4.7), la condition de glissement pour permettre la formation du pli. Pour former le pli, c'est-à-dire faire glisser l'ensemble « tresse + ligature » tout en respectant la contrainte du cahier des charges sur la distance entre ligatures L_{lig} constante (adhérence au niveau de la ligature), l'effort F_{repli} a été quantifié et doit satisfaire les conditions suivantes :

$$2\pi R_m \mu_{\text{carbone/acier}} f_{\text{serrage}} < F_{\text{repli}} < 2\pi(R_m + e_{\text{tresse}}) \mu_{\text{O carbone/caoutchouc}} f_{\text{serrage}} \quad (4.8)$$

avec f_{serrage} la densité linéique de l'effort de serrage de la ligature, R_m le rayon du mandrin, e_{tresse} l'épaisseur de la tresse $\mu_{\text{O carbone/caoutchouc}}$ le coefficient de frottement entre la tresse de carbone et la bague de serrage tapissée de caoutchouc et $\mu_{\text{carbone/acier}}$ le coefficient de frottement entre la tresse de carbone et le mandrin en acier.

Le coefficient de frottement entre deux matériaux est une caractéristique fondamentale dans le préformage des renforts dans le cadre de l'élaboration de composites. Il est le plus souvent obtenu expérimentalement [95]. Pour le type de contact qui nous intéresse, entre le mandrin d'acier et la tresse constituée de mèches de carbone, le coefficient de frottement est pris à :

$$\mu_{\text{carbone/acier}} = 0,2 \quad (4.9)$$

Avec cette valeur de coefficient de frottement et si l'on considère :

$$R_m = 18,5 \text{ mm} \quad (4.10)$$

$$f_{\text{serrage}} = 108 \text{ N.m}^{-1} \quad (4.11)$$

Alors

$$F_{\text{glissement}} = 25,1 \text{ N} \quad (4.12)$$

Afin de respecter les conditions de préformage conforme décrites par la relation (4.8), la force axiale à appliquer sur le dispositif « bague de serrage + poussoir conique » pour former le pli de manière automatisée est donc fixée à :

$$F_{\text{repli}} = 25,5 \text{ N} \quad (4.13)$$

2.2.3 Défauts potentiels

Une mise en place défectueuse des ligatures entraîne le non respect d'un des paramètres « procédé » du préformage, la distance entre ligatures. Ce paramètre régit la quantité de matière dans chacun des plis et l'homogénéité de la quantité de fibre dans la préforme globale.

2.2.4 Solutions envisagées

Le type de ligatures utilisées ainsi que leur mode de mise en place a été optimisé pendant cette étude. Les ligatures ont dans un premier temps été effectuées à l'aide de fil polyester. L'intérêt

majeur de ce dernier est son approvisionnement simple, son faible cout et la faible épaisseur de la ligature ainsi formée.

Cependant, la mise en œuvre de ce type de ligature est difficile. En effet, il faut dans ce cas faire un nœud pour le fixer et la mise en place d'une ligature suffisamment serrée pour garantir une distance L_{lig} constante au cours du temps tout en garantissant sa position n'est pas possible. Une première étape d'optimisation a été envisagée, la ligature était constituée de quatre tours de fils polyester maintenus en position sans nœud mais en cassant le fil par traction. La mise en position des tours de fil est plus précise. La ligature ne bouge pas au moment d'être serrée car le fil est toujours sous tension contrairement au nouage. Le serrage de la ligature maintenant la tresse est optimisé puisqu'il ne dépend du serrage du nœud, non quantifiable et difficilement répétable, mais est associé à la force de traction nécessaire pour faire rompre le fil. Toutefois, le positionnement n'est pas rectifiable en cours de procédé et le serrage est parfois imparfait.

Il est indispensable de maîtriser cette étape pour que le serrage des ligatures soit homogène pour tous les plis de la préforme et que la mise et le maintien en position soient maîtrisés.

D'autres solutions ont été envisagées [96], notamment des colliers de serrage ou des serre-câbles. Toutefois ces solutions ont rapidement été écartées, du fait de l'encombrement des ligatures ainsi formées dans le cœur de la préforme mais aussi de fait des cinématiques trop complexes du point de vue de l'automatisation.

Afin de garantir une homogénéité de serrage pour tous les plis, une mise et un maintien en position optimisés, les ligatures de fil polyester ont donc été remplacées par l'utilisation d'élastiques (Figure 148) de diamètre intérieur 13 mm et d'épaisseur 1 mm dans leur état au repos.



Figure 148 : Ligatures élastiques

Les ligatures ainsi obtenues sont conformes au cahier des charges : le serrage est identique quel que soit le pli, la mise en position est facilitée et peut être modifiée manuellement en cours de procédé. Le maintien en position est assuré par l'élasticité du dispositif.

L'utilisation des élastiques en tant que ligature et l'aide du gabarit permettent donc de garantir une mise et un maintien en position des ligatures identiques pour tous les plis. La quantité de matière introduite est identique et maîtrisée dans tous les plis.

2.2.5 Validation

La validation ici comporte deux aspects, dans un premier temps, nous devons valider la mise en place des ligatures puis il faut valider l'utilisation des élastiques en tant que ligatures.

Les tests de validation sont effectués lors de préformage manuel. Afin d'obtenir une préforme homogène dans la hauteur dont les plis sont, par hypothèse, tous identiques, la quantité de matière introduite dans chacun d'eux doit être identique. L'utilisation d'un gabarit de longueur adaptée (Figure 149) permet le contrôle et la maîtrise du paramètre « procédé » L_{lig} . Son utilisation garantit une position précise des ligatures au millimètre près (soit 1,5% d'erreur potentiels sur la distance L_{lig}).



Figure 149 : Gabarit de distance entre ligatures

Ce gabarit est utilisé en cours de préformage, de manière systématique, à chaque pli. Sur la Figure 149 (droite), on peut noter qu'il sert aussi de « réservoir » à ligatures élastiques qui sont donc prêtes à être positionnées, en les faisant glisser vers le haut, une à une : elles viennent se plaquer sur le mandrin, sur le bord supérieur du gabarit, garantissant ainsi, d'un seul geste, une mise en place rapide et précise de la ligature.

Dans le cadre de l'automatisation de cette séquence du préformage, la maîtrise de la mise en position des ligatures sera assurée par le pilotage en déplacement du dispositif de serrage.

Les élastiques ont aussi été caractérisés pour valider leur utilisation. Dans cette partie, nous cherchons à quantifier le rayon théorique de l'élastique adapté à l'effort de serrage mesuré expérimentalement dans le paragraphe précédent.

Dans un premier temps, nous avons caractérisé la rigidité effective des élastiques utilisés pour effectuer les ligatures.

a. Caractérisation de la raideur des ligatures élastiques : Protocole de l'expérience

La caractérisation expérimentale de la raideur de la ligature s'effectue en mesurant l'allongement de l'élastique auquel une masse est suspendue (Figure 150).

Les essais sont répétés pour deux élastiques. Pour chacun des essais, plusieurs masses sont appliquées successivement à leur extrémité. A chaque fois, l'allongement de l'élastique est relevé.

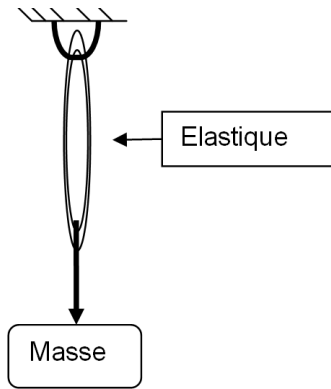


Figure 150 : Dispositif de caractérisation de la raideur des élastiques

Résultats obtenus

Les résultats issus des caractérisations expérimentales sont présentés sur la Figure 151 suivante :

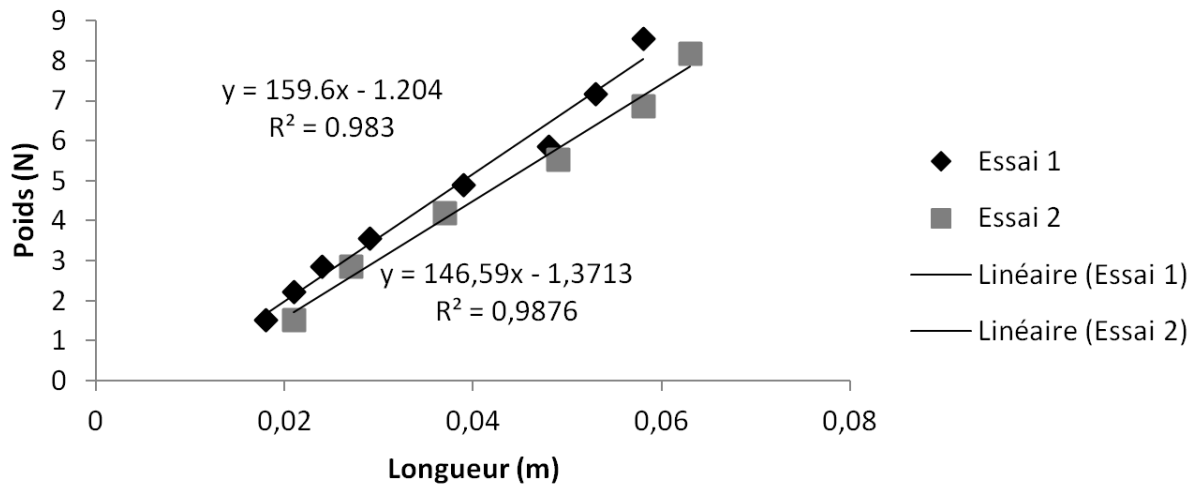


Figure 151 : Caractérisation de la raideur des élastiques

La valeur retenue pour la raideur de l'élastique est issue de la moyenne des relevés expérimentaux. Pour la suite des calculs et paramétrages, on aura donc :

$$k_{\text{élastique}} = 153 \text{ N.m}^{-1} \quad (4.14)$$

Les élastiques utilisés pour ligaturer la tresse ont donc été caractérisés expérimentalement : l'effort de serrage appliqué sur la tresse a été déterminé expérimentalement de même que la raideur $k_{\text{élastique}}$. Cette valeur de l'effort de serrage est utilisée par la suite pour quantifier la force à appliquer sur le poussoir conique pour former le pli par glissement de l'ensemble « tresse + ligature » sur le mandrin.

Afin de valider ces caractérisations expérimentales, nous allons déterminer théoriquement le rayon R_e d'un élastique de raideur $k_{\text{élastique}}$ exerçant un effort de serrage de densité linéique f_{serrage} .

Le diamètre théorique ainsi obtenu sera comparé au diamètre moyen des élastiques utilisés pour effectuer les ligatures pendant le procédé manuel de préformage par ligature de tresse.

b. Quantification du diamètre théorique des élastiques

La détermination théorique des élastiques à utiliser pour effectuer un serrage linéique f_{serrage} de 108 N.m^{-1} est le moyen de valider cette valeur de serrage qui est utilisée par la suite pour quantifier l'effort à transmettre par l'automate pour former le pli en faisant glisser l'ensemble « tresse + ligature » avec le dispositif « bagues de serrage + poussoir conique ».

L'étude théorique est effectuée sur un demi-mandrin représenté sur la Figure 152 suivante :

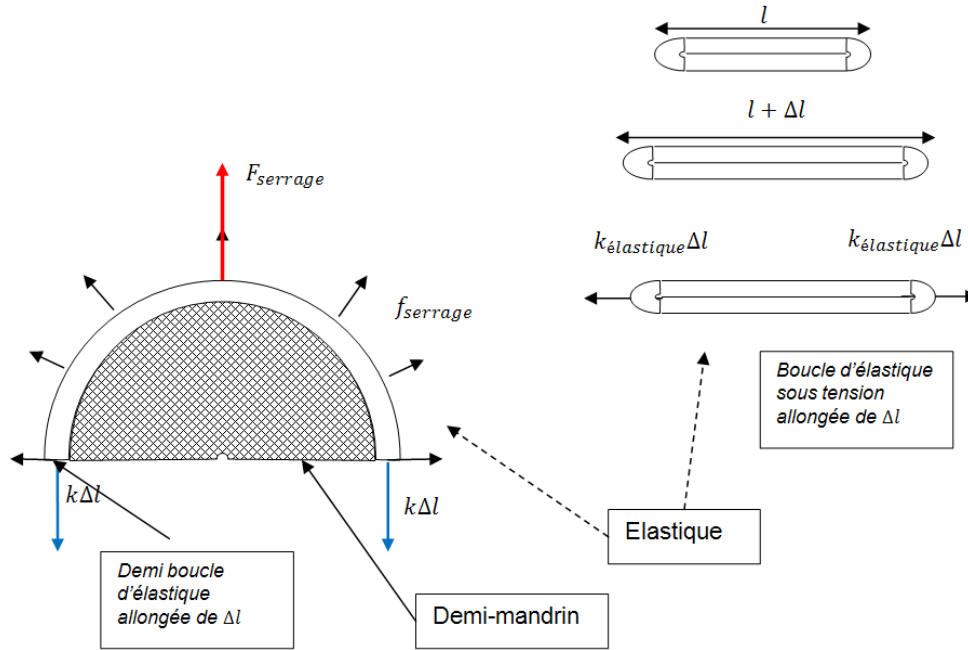


Figure 152 : Caractérisation du diamètre théorique de l'élastique

D'après la Figure 152 précédente, l'effort global de serrage F_{serrage} peut être obtenu à partir de la densité linéique de serrage, f_{serrage} déterminé expérimentalement, par la relation suivante :

$$F_{\text{serrage}} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} f_p R_m d\theta = f_{\text{serrage}} R_m \pi \quad (4.15)$$

où $d\theta$ est la portion d'angle du demi-mandrin à intégrer, R_m le rayon du mandrin.

En appliquant le principe fondamental de la statique sur l'élastique, nous obtenons la relation suivante :

$$F_{\text{serrage}} = 2k\Delta l = k_{\text{élastique}}\Delta l \quad (4.16)$$

En combinant les relations (4.15) et (4.16), l'effort de serrage F_{serrage} s'écrit :

$$F_{\text{serrage}} = k_{\text{élastique}}\Delta l = f_{\text{serrage}} R_m \pi \quad (4.17)$$

Nous pouvons donc en déduire que l'allongement de l'élastique lors de sa mise en place autour de la tresse et du mandrin pour effectuer l'effort de serrage s'écrit :

$$\Delta l = \frac{f_{\text{serrage}} R_m \pi}{k_{\text{élastique}}} \quad (4.18)$$

Au moment de sa mise en place pour effectuer la ligature de la tresse plaquée sur le mandrin, la circonférence de l'élastique est donnée par :

$$circ = 2\pi(R_m + e_{\text{tresse}}) \quad (4.19)$$

Lorsque l'élastique est allongé, sa circonférence est assimilable à :

$$circ = 2(l + \Delta l) \quad (4.20)$$

La combinaison des relations (4.19) et (4.20) nous donne :

$$l = \pi(R_m + e_{\text{tresse}}) - \Delta l \quad (4.21)$$

Cette analyse théorique a pour but d'estimer le rayon théorique R_e d'un élastique de raideur connue qui exercerait l'effort de serrage mesuré expérimentalement sur la tresse.

D'après la Figure 152, le rayon théorique R_e de l'élastique s'écrit :

$$l = \pi R_e = \pi(R_m + e_{\text{tresse}}) - \Delta l \quad (4.22)$$

Soit encore

$$R_e = (R_m + e_{\text{tresse}}) - \frac{f_{\text{serrage}} R_m}{k_{\text{élastique}}} \quad (4.23)$$

D'après les données de l'étude et les caractérisations explicitées précédemment, le rayon théorique de l'élastique vaut :

$$R_e = 6,7 \text{ mm} \quad (4.19)$$

Avec une raideur $k_{\text{élastique}}$ connue, déterminée expérimentalement, et pour appliquer l'effort de serrage F_{serrage} caractérisé dans les parties précédentes, l'élastique doit avoir un rayon de 6,7 millimètres.

Résultats obtenus

Le rayon théorique de l'élastique idéal pour former les ligatures est désormais connu et fixé à 6,7 millimètres. Dans la première partie de ce Chapitre 4, nous avons donné les caractéristiques géométriques des élastiques utilisés pour la mise en œuvre manuelle du préformage par ligature de tresse (Figure 148). Les élastiques présentés ont un diamètre moyen de 13 millimètres. Ces valeurs sont donc tout à fait conformes avec le rayon théorique R_e de 6,7 mm calculé précédemment.

Cette cohérence entre les deux valeurs nous permet de valider l'ordre de grandeur de l'effort de serrage obtenu expérimentalement. Cet effort est exercé par l'élastique sur la tresse au moment de la mise en place de la ligature.

Cette valeur de l'effort de serrage va donc être utilisée pour quantifier l'effort axial que le dispositif automatisé « bagues de serrage + poussoir conique » doit exercer sur l'ensemble « ligature + tresse » pour former le pli.

L'automate de préformage doit donc permettre de piloter en déplacement le dispositif de mise en place des ligatures pour garantir le respect du paramètre « procédé » L_{lig} . Le serrage à appliquer a été quantifié.

Il reste à traiter les solutions envisageables du point de vue de l'automatisation pour la mise en place de ces ligatures. Il existe notamment des dispositifs de distribution d'élastiques. Dans ce dispositif, les élastiques sont pré-montés sur une pièce de type tuyau. Les élastiques sont déposés sur une matrice flexible reliée à un câble. La dépose se fait par traction en pas à pas du câble. Des tests seront nécessaires pour valider ce type de dispositif de dépose de ligatures si la société ROXEL souhaite développer en son sein le préformage automatisé par ligature de tresse.

2.3 Former le pli

2.3.1 Objectifs

Cette étape de drapage du pli sur la forme conique est l'étape clé de ce procédé innovant de mise en forme de tresse. En effet, c'est à cette étape que l'orientation du pli, critère prépondérant du cahier des charges, est obtenue grâce à la base conique du mandrin.

Cette étape régit donc le paramètre d'orientation des plis dans la préforme. Toutefois, l'expérience a démontré que l'étape de drapage du pli sur la forme conique est aussi à l'origine de la géométrie globale de la préforme, notamment son diamètre extérieur.

2.3.2 Critère de succès de la fonction

Le diamètre extérieur est l'un des critères clés de la conformité de la préforme : en effet, une préforme dont le diamètre extérieur est trop important ne peut être introduite dans le moule dans son intégralité et n'est donc pas injectable.

2.3.3 Défauts potentiels

La Figure 153 suivante présente une préforme non conforme en cours de fermeture de moule (ici un contre-moule d'étude en plexiglas) : son diamètre extérieur est trop important, les plis sont tassés vers le bas sans être introduits dans le contre-moule. A ce stade, la fin de la fermeture de moule est impossible et la préforme est inutilisable. Les plis ont été détruits par la tentative de fermeture en force, leur orientation, idéalement à 15°, n'est plus respectée.

Il est donc indispensable de maîtriser le diamètre extérieur de la préforme au cours de la formation successive des 120 plis qui la constituent.

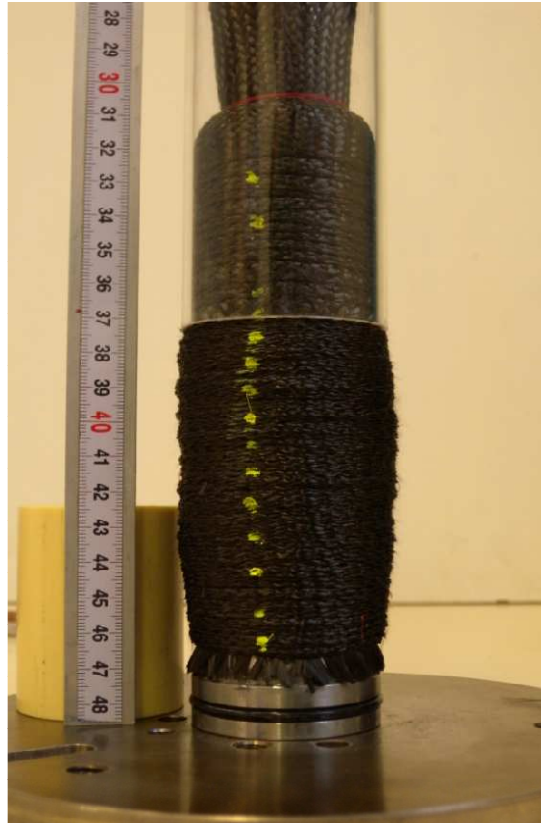


Figure 153 : Préforme non conforme - Fermeture de moule impossible

2.3.4 Solutions envisagées

Afin d'obtenir une préforme dont le diamètre extérieur est conforme, les plis sont formés dans des bagues transparentes de diamètre intérieur identique à celui du contre-moule : la quantité de matière est donc contenue dans un espace représentant l'entrefer du moule d'injection et le diamètre des plis ainsi formés est idéalement égal au diamètre du contre-moule, soit 54 mm.



Figure 154 : Utilisation des bagues pour la maîtrise du diamètre extérieur

Les bagues sont ajoutées autour du mandrin au fur et à mesure de l'empilement des plis, cependant, les bagues obligent à une compaction conique (au moment de la formation du pli, du repli de la tresse sur elle-même) assez précise. Même en veillant à positionner les bagues au dernier moment (quand il ne reste plus de place disponible dans la bague déjà en place pour accueillir de nouveaux plis, on rencontre des soucis d'accessibilité dans le fond de la bague (qui mesure 30 mm de hauteur)

et on doit veiller à former le pli régulièrement sur tout son pourtour pour éviter les défauts d'hétérogénéités et de replis et boucles (Figure 155). Il n'est pas envisageable de diminuer la hauteur des bagues (pour rendre plus accessible le « fond » de celle-ci) car chaque jonction entre ces dernières implique une petite hétérogénéité dans l'empilement des plis et il est donc indispensable d'en limiter le nombre sur la hauteur des préformes.

Sur les photographies suivantes, on peut constater les difficultés à plaquer le pli sur la surface conique des plis précédents ainsi que le risque de détérioration lié l'utilisation d'outils pour pallier à ces difficultés en insérant le bord externe du pli dans la bague.



Figure 155 : Utilisation des bagues



Figure 156 : Poussoir conique

Nous avons alors conçu un poussoir conique (Figure 156) qui permet de former le pli régulièrement et incite à prendre la forme conique, il améliore aussi la compaction puisque l'effort appliqué est reparti sur toute la surface du pli de manière homogène et ce jusqu'au fond de la bague, zone jusqu'alors inaccessible « à la main ». Alors qu'il facilite le passage du pli en cours de formation dans la bague externe, le poussoir conique a aussi pour effet d'optimiser la forme du pli et permet ainsi, lorsqu'il est couplé à l'utilisation des bagues externes, le drapage de plis conformes du point de vue du diamètre extérieur et donc l'orientation maîtrisée.

Son ajustement serré au niveau du diamètre du mandrin doit suffire à faire glisser l'ensemble de la tresse ligaturée et sa ligature élastique pour positionner le départ du pli sur la ligature pour respecter la quantité de matière repliée sur elle-même pour former le pli. En effet, l'élastique supérieur reste coincé sous le poussoir et il est donc possible de faire glisser plus régulièrement (sur tout l'anneau de serrage de la ligature) l'ensemble « tresse + ligature élastique » en appliquant un effort manuellement sur le poussoir comme il est illustré sur la Figure 157 suivante :

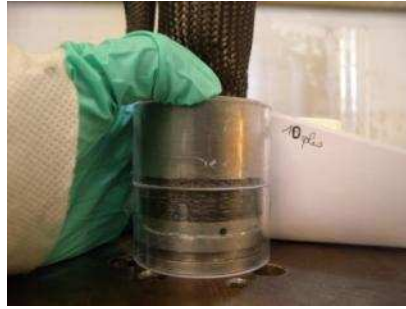


Figure 157 : Utilisation du poussoir conique

Cependant nous avons constaté que cet outillage a des limites et que son utilisation ne rend pas encore optimal (en termes de qualité de préforme obtenue et de praticité à l'utilisation) le procédé de mise en forme par ligature. Comme nous l'avons indiqué précédemment, le poussoir est ajusté serré au niveau de son diamètre intérieur sur le mandrin. Il l'est tout autant dans les bagues pour ce qui est de son diamètre extérieur, de ce fait, il est assez compliqué de le sortir de la bague, lorsque l'on a effectué une compaction relativement importante jusqu'au fond de celle-ci (lorsque l'on vient de la mettre en place et qu'elle ne contient qu'un ou deux plis) : sa faible hauteur rend difficile sa remontée car la zone de prise est petite et oblige à rendre mobiles le poussoir et la bague (qui est sensée rester autour des plis déjà formés pour en maintenir l'état contraint au diamètre extérieur attendu).

La ligature passe parfois sous le poussoir, elle est déplacée, la distance entre ligature est donc modifiée et il est impossible de remonter le poussoir une fois le pli formé sans le déformer.



Elastique passé sous le poussoir pendant la descente de l'ensemble pour former le pli

Figure 158 : Défauts potentiels

Il a fallu imaginer une solution qui permettait d'utiliser la fonction de poussoir conique avec une autre méthode que les ajustements serrés qui, comme nous venons de le démontrer, possèdent des limites. Nous avons donc conçu une bague de serrage, qui associée à un poussoir conique moins ajusté sur le diamètre extérieur, permet que le serrage, même s'il est toujours manuel, soit uniformément repartie et ne compromette pas la précision de la mise en place de la ligature pendant la formation du pli sur tout le pourtour de la ligature.

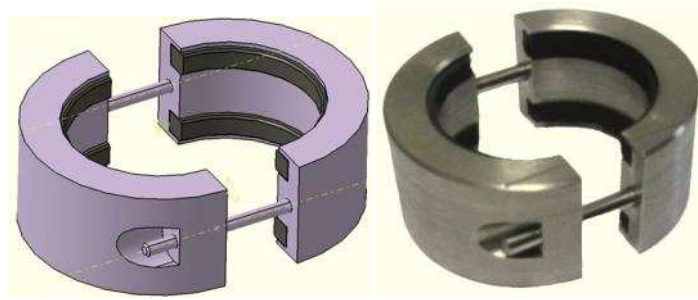


Figure 159 : Bague de serrage

Le réglage manuel implique beaucoup de essai pour ouvrir la bague, la mettre en place, assurer le serrage (et son maintien), glisser l'ensemble, desserrer la bague tout en maintenant les autres chapitres (notamment le poussoir conique qui est situé juste sous la bague au moment de la compaction/formation du pli).

Une évolution possible pour ce dispositif est de lier sur un même outillage les fonctions « bague de serrage » et « poussoir conique ».

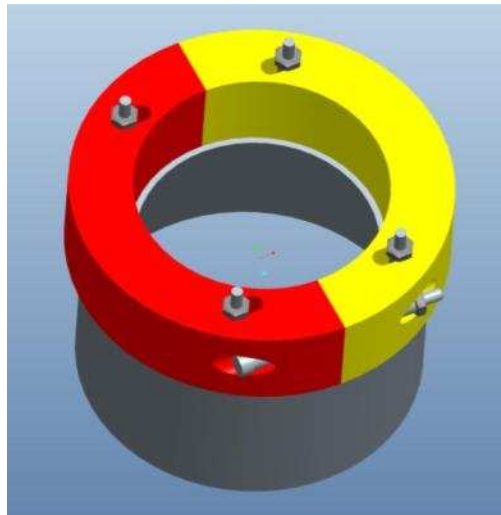


Figure 160 : Bague de serrage à poussoir conique intégré

2.3.5 Validation

Un prototype de ce dispositif a été fabriqué et testé. Les essais de préformage avec cet outillage couplé à l'utilisation des bagues externes ont permis le préformage de plis dont le diamètre extérieur et l'orientation par rapport à l'axe du mandrin sont maîtrisés.

Il subsiste toutefois une limite à l'optimisation du procédé de préformage manuel par l'utilisation de ce dispositif. En effet, pour des raisons d'encombrement, il est impossible d'utiliser simultanément le dispositif « bagues de serrage + poussoir conique » qui, couplé aux bagues externes, garantit le diamètre extérieur et l'orientation des plis, et le gabarit pour la mise en place des ligatures qui quant à lui permet une maîtrise de la quantité de matière introduite dans le pli en garantissant la consigne $L_{lig} = 60 \pm 1 \text{ mm}$.

En effet, si le dispositif « bagues de serrage + poussoir conique » est installé autour du mandrin pour garantir un drapage du pli optimisé, le gabarit pour la maîtrise de la distance entre ligatures doit être

externalisé (Figure 161) et son utilisation ne permet donc plus qu'un respect de la consigne à 2 millimètres près.



Figure 161 : Bague et gabarit en cours de préformage

Ces résultats, bien que permettant l'obtention de préformes conformes dans l'ensemble, sont insuffisants. En effet, l'utilisation du dispositif « bagues de serrage + poussoir conique » permet la formation de plis dont le diamètre extérieur et l'orientation sont conformes mais induit une difficulté liée à une manipulation supplémentaire et diminue la qualité de l'étape de mise en place des ligatures.

La contrainte sur le diamètre par des bagues extérieures est donc validée par des tests sur le préformage manuel. Dans le cadre de l'automatisation du préformage, cette contrainte sera effectuée par le contre-moule, permettant ainsi l'optimisation du procédé global car le préformage et la fermeture de moule seront simultanés et automatisés.

La maîtrise du diamètre extérieur en cours de préformage est indispensable pour obtenir une préforme à la géométrie conforme. Un défaut sur le diamètre extérieur rend la préforme non injectable car son introduction dans le contre-moule pour passer à l'étape d'injection est impossible.

L'étape de fermeture de moule, peu abordée dans les études de ce manuscrit, nécessite rigueur et précision afin de ne pas modifier la position des plis dans la préforme. Elle requiert la présence d'un opérateur expérimenté. En effet, il n'existe pas de protocole particulier mais les divers essais mis en œuvre ont démontré le poids de l'expérience de l'opérateur dans les résultats observés. Il faut s'affranchir de cette variabilité des résultats en fonction de l'opérateur.

Une étude pour optimiser le procédé de préformage automatisé a donc été menée. Cette optimisation aussi pour objectif la maîtrise du diamètre extérieur et l'obtention de résultats fiables et répétables pour la fermeture du moule en limitant au maximum les actions de l'opérateur.

Fermeture de moule en cours de préformage

L'objectif est d'effectuer le préformage tout en introduisant la préforme dans le contre-moule au fur et à mesure. Ainsi, une fois le préformage automatisé terminé, la préforme conforme au cahier des charges industriel, est déjà positionnée dans le contre-moule servant à l'injecter.

La configuration la plus adaptée, du point de vue de l'encombrement avec le dispositif « bagues de serrage + poussoir conique », est d'effectuer la progression contre-moule autour des plis formés par le bas (Figure 162). La Figure 162 présente le dispositif en fin de préformage, lorsque tous les

plis ont été formés et que le contre-moule est successivement translaté vers le haut pour recouvrir l'ensemble.

Le principe de fonctionnement est adapté au séquençage présenté dans l'étude de conception préliminaire de l'automatisation. Le nouveau séquençage se présente alors sous la forme :

- A - Positionner le dispositif pour mettre en place la ligature
- B - Serrer l'ensemble « tresse + ligature »
- C - Faire glisser l'ensemble « tresse + ligature »
- C' - Faire remonter le contre-moule
- D - Desserrer l'ensemble « tresse + ligature »
- E - Remonter le dispositif pour positionner une nouvelle ligature

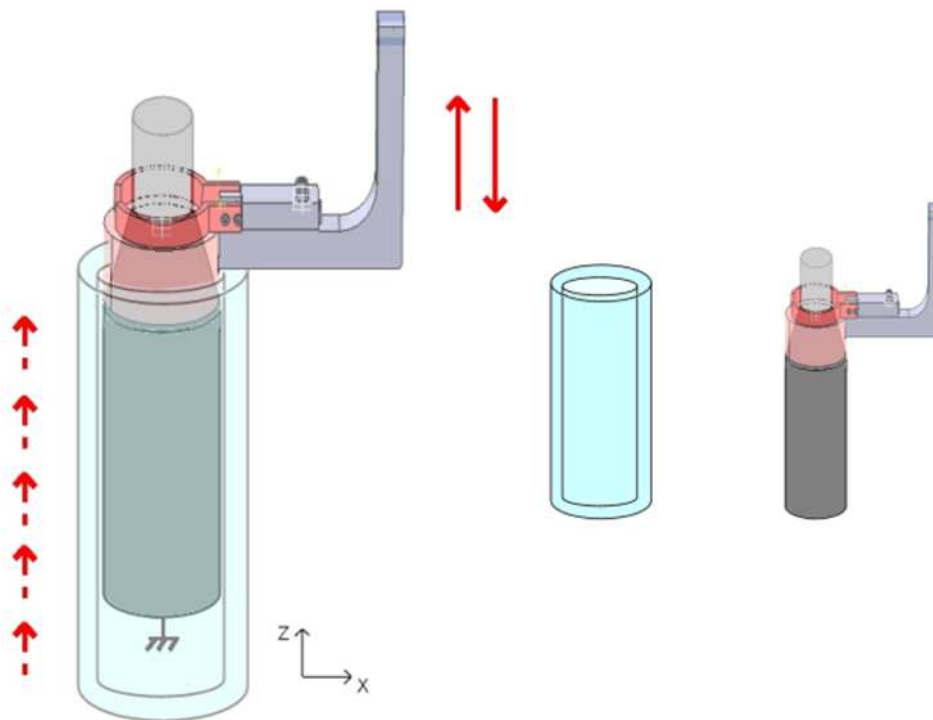


Figure 162 : Fermeture de moule en cours de préformage

L'étape C' a été ajoutée au séquençage initial pour inclure au préformage automatisé la mise en place du contre-moule autour de la préforme. Cette étape intervient après l'étape de compaction des plis empilés : le contre-moule est translaté vers le haut pour venir recouvrir le pli venant d'être formé. La force de compaction appliquée sur le pli est ensuite relâchée, la pince de serrage s'ouvre et le dispositif « bagues de serrage + poussoir conique » remonte pour venir se positionner au niveau de la ligature positionnée à une distance L_{lig} plus haut pour former le pli suivant.

2.4 Etude du mouvement du contre-moule

L'objectif est de venir positionner le contre-moule autour de la préforme au fur et à mesure de l'empilement des plis. La mise en position du contre-moule ne doit toutefois pas endommager les plis déjà formés. Cependant le sens de progression du contre-moule par rapport au sens d'inclinaison des plis empilés n'est pas idéal et peut engendrer des mouvements de plis.

Afin de limiter les frottements entre le contre-moule et les plis empilés au moment de son avancée, le contre-moule doit être mis en place avec un mouvement hélicoïdal. Le choix de ce type de mouvement d'autant plus justifié par la présence d'un joint torique à la base du mandrin (Figure 163).

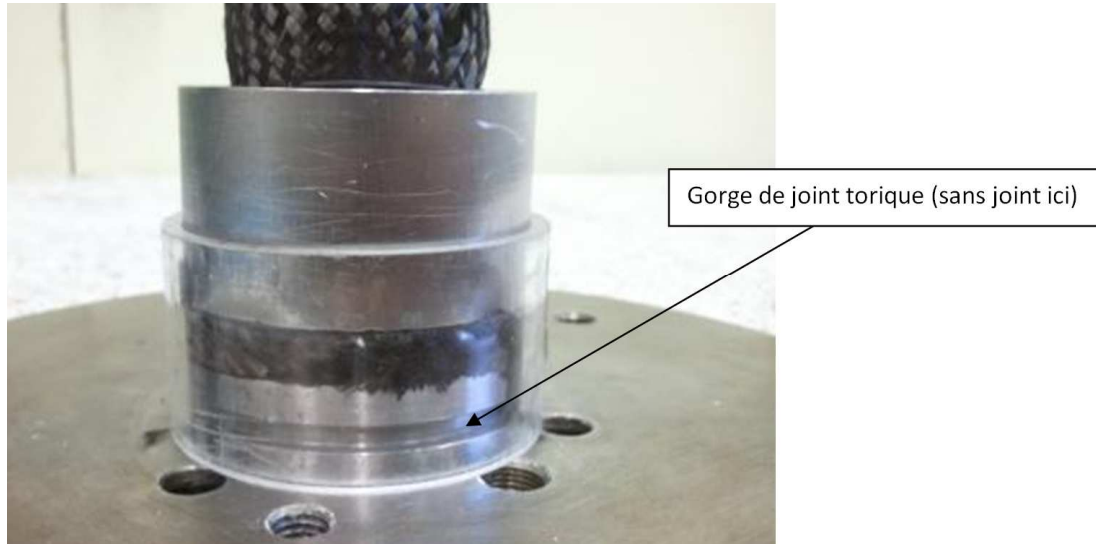


Figure 163 : Joint torique

Ce joint torique est indispensable pour rendre l'assemblage « mandrin + contre-moule » étanche pour l'étape d'injection. Il doit donc être mis en place avant la phase de préformage et fermeture de moule automatisé. Ce contact joint torique/contre-moule présente plus de résistance due au frottement que les plis éventuellement présents au moment du mouvement du contre moule. Cette résistance due au frottement du joint torique sur le contre moule doit être étudiée et quantifiée pour permettre le paramétrage de la phase de mise en position du contre moule sur les plis empilés. Il faut donc déterminer le couple résistant dû à la présence du joint torique.

2.4.1 Paramétrage du mouvement du contre moule

Afin de paramétrer la phase d'avancée du contre moule sur la préforme en cours de procédé, on doit estimer le couple résistant dû au joint torique faisant l'étanchéité entre la base du mandrin et le contre moule. Ce couple résistant à la rotation du contre moule a été déterminé expérimentalement à l'aide d'une clé dynamométrique.

Pour déterminer le couple résistant lors du mouvement hélicoïdal du tube de contre moule autour de l'ensemble « mandrin + joint torique », le tube de contre moule est fixé dans un étau. Une clé dynamométrique est assemblée au mandrin. Cet assemblage est réalisé par vissage dans le logement initialement prévu pour accueillir le raccord de tuyau d'injection par lequel arrive la résine.

Le mandrin est mis en mouvement pour simuler le mouvement hélicoïdal qui a lieu au cours de la fermeture de moule en cours de préformage. Le couple résistant au mouvement appliqué est directement obtenu par lecture sur la clé dynamométrique.

Ces essais ont été répétés trois fois. La valeur obtenue pour la mesure du couple résistant est déterminée à 1N.m près.

La caractérisation a permis d'estimer le couple résistant au cours du déplacement du contre moule en cours de préformage a

$$C_{\text{fermeture}} = 5 \text{ N.m} \quad (4.20)$$

Cette caractérisation permet donc de paramétrer la phase de fermeture de moule effectuée en cours de préformage par le système automatisé.

2.5 Compacter le pli

2.5.1 Objectif

Cette phase est la finalité de la phase de formation de pli, elle permet d'obtenir un pli à la forme satisfaisante. Le paramètre entrant en jeu ici est donc l'angle d'orientation du pli dans la préforme par rapport à l'axe du mandrin.

2.5.2 Critère de succès de la fonction

L'utilisation du poussoir conique au cours de la phase de formation du pli permet donc d'assurer son compaction et de garantir que celui-ci prend bien la forme souhaitée, avec la bonne orientation.

A la fin de cette étape de formation du pli, il ne faut pas omettre la compaction des plis entre eux. En effet, cet aspect, détaillé dans le Chapitre 3 de ce manuscrit, est fondamental pour garantir l'obtention d'une préforme dont les plis sont jointifs et orientés à 15° par rapport à l'axe du mandrin. Cet aspect de compaction est aussi influent sur le taux de compaction des fibres dans la préforme et donc sur le taux de fibres global du composite final.

Il faut par conséquent déterminer une force axiale de compaction $F_{\text{compaction}}$ qui intervient après la phase de formation du pli pour garantir un empilement satisfaisant.

La force appliquée manuellement sur le poussoir conique permettant l'obtention de préformes satisfaisantes en termes de taux de compaction a été déterminé expérimentalement. Des caractérisations expérimentales pourraient être menées pour quantifier de manière plus précise cet aspect de l'automatisation. Toutefois dans une première approche, la force de compaction à appliquer par le dispositif sur l'empilement à la fin du drapage conique de chaque pli est fixée à

$$F_{\text{compaction}} = 50 \text{ N} \quad (4.21)$$

2.5.3 Défauts potentiels

Lorsque l'on considère un pli isolé, seule son orientation est à maîtriser, toutefois la préforme est constituée d'un empilement de plis, leur arrangement dans l'empilement est une donnée fondamentale pour garantir qu'une quantité de matière suffisante est introduite dans le moule, pour être sûr que le taux volumique de fibre de 60% dans le composite final est atteint.

2.5.4 Solutions envisagées

Le poussoir conique, utilisé dans la séquence de formage du pli, joue un rôle important dans la compaction du pli. Il permet de plaquer la tresse repliée sur elle-même sur la forme conique souhaitée. Le pli ainsi formé respecte l'orientation de 15° par rapport à l'axe du mandrin tel que le cahier des charges de la fabrication de protections thermiques l'impose.

2.5.5 Validation

Les préformes obtenues à l'issue de la campagne d'élaboration de prototypes ont été mises en œuvre avec un prototype du dispositif « bagues de serrage + poussoir conique ». Les résultats obtenus sont satisfaisants du point de vue de la qualité des préformes obtenues en termes de compaction des plis. Cette solution est donc validée pour la conception du préformage automatisé. L'outillage et le paramétrage de cette étape du préformage sont donc déterminés pour l'automatisation.

2.6 Empiler les plis

2.6.1 Objectif

Au cours de cette phase ultime du préformage, les plis sont empilés pour obtenir une préforme conforme du point de vue du taux volumique global de fibres qui est imposé à $60 \pm 10\%$ par le cahier des charges de la fabrication de tubes de protections thermiques.

2.6.2 Critère de succès de la fonction

La préforme doit contenir 60% de fibres en volume pour être conforme. Avec l'utilisation des bagues externes et du dispositif « bagues de serrage + poussoir conique », le préformage à l'échelle du pli est maîtrisé. Il faut donc à ce stade veiller à maîtriser le paramètre « procédé » de pas d'empilement des plis pour maîtriser le procédé à l'échelle de la préforme.

L'importance de la maîtrise du pas d'empilement des plis a été explicitée dans le Chapitre 3. En effet, il apparaît que la compaction des plis doit être suffisante pour imposer la relation suivante établie au Chapitre 3 :

$$pas \leq 2 e_{tresse} + 2. \frac{D_{lig}}{2} \quad (4.22)$$

Pour se faire, la compaction appliquée manuellement sur le poussoir conique après le drapage de chaque pli a été estimée expérimentalement à 50N.

2.6.3 Défauts potentiels

Un manque de compaction aurait une incidence à la fois sur la forme globale des plis que ne seraient donc plus jointifs mais aussi sur la quantité de matière globale introduite dans le moule qui régit l'un des critères prépondérant de la qualité de la préforme, le taux volumique de fibre présents dans le composite final imposé à $60 \pm 10\%$.

2.6.4 Solutions envisagées

Pour atteindre le niveau de compaction requis, il faut appliquer une pression importante sur le poussoir conique pour empiler les plis. Cette étape est délicate lors du préformage manuel. Elle est toutefois plus accessible dans le cadre de l'automatisation du préformage où l'effort à appliquer sur l'empilement avec le poussoir conique est pilotable par le dispositif de compaction automatisé.

2.6.5 Validation

Les résultats mesurés, en termes de qualité de préforme, sont satisfaisants du point de vue de la forme globale des plis et que la quantité de matière introduite dans le moule pour les préformes issues des tests effectués manuellement. Il faut gérer l'effort de compaction à appliquer sur les plis pour satisfaire la configuration de l'empilement requise. Cet effort a été déterminé, la solution est donc viable sur la partie automatisée du préformage avec le dispositif global tel qu'il a été présenté en Figure 144.

3 Automatisation du préformage : Bilan

L'objectif de ce chapitre est l'étude de préconception de l'automatisation du préformage par ligature de tresse. L'automatisation du préformage, séquencée par les étapes effectuées actuellement manuellement a donc été étudiée. Le procédé de préformage automatisé ainsi prévu permet à priori, à la vue des tests de validation de chacune des étapes à l'aide du préformage manuel, l'obtention de préformes conformes.

Le préformage automatisé comportera certains ajustements notamment dans l'ordre des séquences par rapport au préformage manuel. En effet, le paragraphe 2.4 de ce chapitre traite du mouvement du contre-moule. Le mouvement du contre-moule est étudié pour permettre la fermeture du contre-moule en cours de préformage dans le cadre du préformage automatisé (Figure 164).

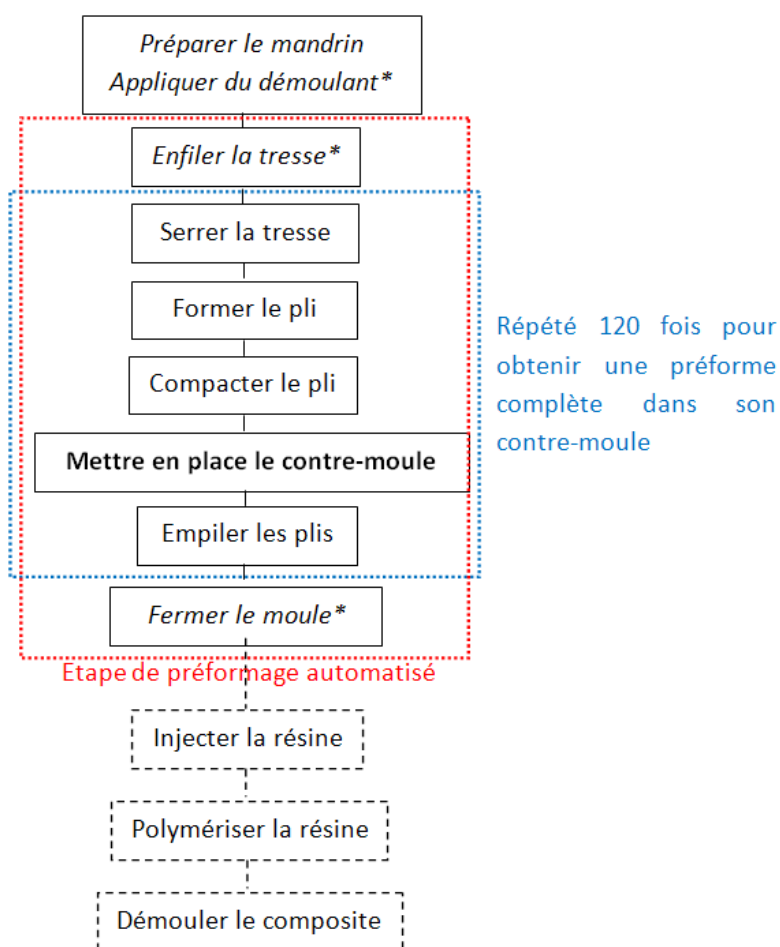


Figure 164 : Séquençage du préformage automatisé

Afin de parvenir à l'écriture de ce cahier des charges de l'automatisation, il a fallu détailler chaque séquence en y associant une fonction à assurer, un critère de succès et des défauts potentiels. Le détail des solutions envisagées est aussi présenté de même que la validation de la solution retenue. Certaines étapes marquées d'un astérisque (Figure 164) sont prévues pour être effectuées manuellement tel que le prévoit le cahier des charges industriel de l'automatisation. Il s'agit des étapes de préparation du mandrin (notamment l'application de démoulant), la première étape du préforme « enfiler la tresse » ainsi que l'étape de fermeture étanche du moule pour procéder à l'étape d'injection de résine.

Afin de satisfaire à la fois les contraintes du cahier des charges liées à l'élaboration de protections thermiques mais aussi les contraintes liées à l'automatisation, des outillages ont été conçus et testés pour certaines de ces étapes.

Nous pouvons notamment lister le gabarit permettant de maîtriser la position des ligatures à l'étape « serrer la tresse » ; cet aspect du préformage garantit l'homogénéité de la préforme sur toute sa hauteur en insérant dans chacun des plis qui la constituent la même quantité de matière. Pour parvenir à maîtriser l'orientation des plis pendant les étapes « former le pli » et « compacter le pli », le système « bagues de serrage + poussoir conique » a été élaboré et testé, il permet une mise en place satisfaisante du pli, en appliquant un effort de serrage sur toute la ligature au moment de la formation du pli et un effort de compaction uniforme sur toute la surface du pli formé pour le compacter sur l'empilement des plis formés auparavant.

La mise en place du contre-moule autour de la préforme en cours de préformage permet un gain de temps puisque cette étape ne sera pas effectuée manuellement par l'opérateur à l'issue du préformage tout en garantissant une maîtrise du diamètre extérieur de la préforme qui est en place directement dans l'espace qui lui est réservé.

Le système automatisé est donc, d'après cette étude de conception préliminaire, composé d'un axe vertical devant gérer les déplacements axiaux pour les étapes de mise en place des ligatures « serrer la tresse » et de repli de la tresse « former le pli ». Cet axe vertical doit être dimensionné pour permettre des déplacements au millimètre près et pour appliquer les efforts axiaux F_{repli} et $F_{\text{compaction}}$ pour les étapes de drapage du pli sur la forme conique « former le pli » et de compaction de l'empilement avec le poussoir conique « compacter le pli ».

La pince actionnant les bagues de serrage doit appliquer une force de serrage dont la densité linéique f_{serrage} a été déterminée expérimentalement.

Le dispositif automatisé ainsi conçu doit donc permettre d'obtenir des préformes conformes au sens où il permet la maîtrise des paramètres « procédé » distance entre ligatures, orientation des plis, pas d'empilement et fraction volumique de fibres à l'échelle de la préforme.

Cette étude sur une future automatisation du procédé de préformage a permis d'optimiser ce procédé en y associant la fermeture de moulage en cours de préformage.

Cette amélioration de l'élaboration est fondamentale pour optimiser les résultats obtenus en terme de fiabilité sur la qualité des préformes et de répétabilité. En outre, ces avancées rendent aussi le procédé industriellement viable car elles limitent les actions d'un opérateur. Le préformage devient alors fiable, répétable et moins coûteux.

Il reste toutefois la limitation concernant la dépose des ligatures en cours de préformage. Les tests de préformage sans ligature ont démontré la nécessité de ces dernières pour obtenir des préformes satisfaisantes.

Les contraintes d'encombrement d'un éventuel dispositif de ligatures mais aussi la limite de taille en épaisseur des ligatures ont été des verrous technologiques qui n'ont pour le moment pas permis une automatisation totale du procédé de préformage.

Des solutions de mise en place de système de ligature existent, il faudrait donc étudier plus en détails l'adaptabilité d'un de ces systèmes du commerce. Les contraintes majeures sont liées à la taille des ligatures qui ne doit pas dépasser 0,5 mm de diamètre et surtout l'encombrement restreint du fait de la présence du système « bagues de serrage + poussoir conique ».

La première étape de validation de ce procédé automatisé serait donc l'élaboration d'un prototype du système automatisé tel qu'il a été conçu. Cette installation permettrait de valider les études de préconception effectuées au cours de ce chapitre 4.

Chapitre 5 : Conclusions / Perspectives

Les études de ce manuscrit de thèse concernent l'élaboration des tubes de protection thermique à l'aide du procédé RTM dans le cadre d'un projet de recherche conjoint avec le projet LCM3M de l'ANR et la société ROXEL. Nos recherches sont concentrées sur la première étape du procédé RTM, le préformage de renfort. L'étude détaillée de la seconde étape du procédé RTM, l'injection de résine, a fait l'objet de la thèse de Romain Agogué [20].

Les objectifs de nos travaux sont doubles. Du point de vue industriel, l'intérêt majeur consiste à démontrer la faisabilité de l'utilisation du procédé RTM pour l'élaboration de tubes de protection thermique. Les attentes de la société ROXEL concernent aussi le mode d'emploi d'un procédé de préformage optimisé et simplifié pour le choix de matériau et le réglage des paramètres de procédé pour garantir l'obtention de préformes conformes à leur cahier des charges.

Afin d'accéder à cette requête et dans le cadre des objectifs liés au projet LCM3M, le procédé de préformage a été conçu et mis en œuvre et les phénomènes apparaissant en cours de préformage, notamment en termes de déformabilité du renfort, ont été étudiés. En effet, la connaissance de l'état de la préforme à l'issue de cette première étape du procédé RTM est essentielle pour optimiser l'étape d'injection et garantir la maîtrise des caractéristiques physiques et techniques du composite final élaboré. L'intérêt est donc de faire le lien entre les paramètres « matériau », les paramètres « procédé » et l'état de la préforme à l'issue du préformage, notamment du point de vue du positionnement des fibres. Le positionnement du renfort va conditionner l'étape d'injection mais aussi les propriétés, mécaniques et de résistance à l'ablation notamment, du composite final obtenu après injection. Dans cette optique, le procédé de préformage innovant a été mis en œuvre et testé expérimentalement. Il a aussi été modélisé en vue de prédire les phénomènes de déformabilité en cours de préformage pour permettre d'établir un choix de matériau adapté aux contraintes du procédé et de garantir la conformité de la préforme mise en œuvre d'après les critères établis.

Ces études conjointes des aspects « expérience » et « modélisation » ont présenté le double intérêt d'optimiser le procédé d'élaboration de manière concrète grâce à l'expérience acquise, tout en permettant une compréhension des phénomènes et des paramètres influents grâce à l'écriture de modèles multi-échelles prédictifs de déformabilités basés sur les observations expérimentales.

Du point de vue de la structure de l'étude, nous avons dans le chapitre 1 présenté le contexte industriel et les contraintes particulières qui ont conduit la société ROXEL à envisager un changement de technologie pour la fabrication de tubes de protection thermique.

Le cahier des charges industriel complexe, notamment du fait de la nécessité pour les composites de protection thermique de présenter une forte résistance à l'ablation est détaillé. Ces contraintes ont conduit à trouver le couple « structure de matériau / procédé ». Le choix d'un matériau de structure tresse et le principe de préformage adapté mis au point sont présentés dans ce chapitre introductif. En effet, l'étude à la fois expérimentale et du point de vue théorique, par l'intermédiaire de modèles prédictifs de déformabilité, de ce procédé de préformage novateur constituent l'objet de ces travaux de thèse.

Les études préliminaires de faisabilité sont présentées au chapitre 1. Nous y détaillons notamment les sollicitations majeures de déformabilité subies par la tresse en cours de préformage ainsi que les paramètres, à la fois intrinsèques au matériau mais aussi liés au procédé, dont nous avons étudié par la suite, l'influence sur les résultats obtenus, en termes de qualité de préforme.

L'étude détaillée des modes de sollicitations majeures, le cisaillement et la compaction, déterminés au chapitre 1, subis par la tresse pendant le procédé de préformage a fait l'objet du chapitre 2. Un état de l'art sur les méthodes de caractérisation en comportement des renforts tissés pour ces sollicitations y est exposé, suivi de la caractérisation du comportement de la tresse soumise au

cisaillement et à la compaction. Le comportement de la tresse soumise à la compaction et au cisaillement y est identifié expérimentalement au cours de ce chapitre 2. La compréhension des phénomènes occurrents en cours de préformage est donc établie au cours des chapitres 1 et 2 avec l'énoncé des contraintes liées au procédé innovant de ligature de tresse et le comportement de la tresse soumise aux sollicitations majeures

Ces données, de contraintes industrielles et de comportement du matériau sont ensuite utilisées dans le cadre de la modélisation des phénomènes liés au préformage.

La modélisation s'effectue en deux temps au cours du Chapitre 3. Tout d'abord, un modèle mésoscopique, à l'échelle de la maille élémentaire sur le pli, décrit l'évolution du cisaillement des mailles en fonction de leur position sur le pli. Ce modèle est indépendant de la forme du pli et a donc été développé pour le cas idéal d'un empilement de plis droits identiques dans la préforme. L'étude de la forme globale des plis a toutefois été menée : cet aspect est indispensable pour modéliser l'effet de la compaction sur l'empilement. Une campagne d'élaboration de prototypes a permis de fournir les informations nécessaires au développement d'un modèle macroscopique à l'échelle du pli dans la préforme.

A l'issue du Chapitre 3, tous les phénomènes de déformation sur la tresse dus au préformage sont donc connus et modélisés. Les paramètres influents sont ciblés pour optimiser le procédé de fabrication et obtenir des préformes conformes et répétables. L'objectif global est l'étude des phénomènes apparaissant en cours de préformage, notamment en termes de déformation subies par le renfort pendant la phase de mise en forme.

Le chapitre 4 a présenté le protocole de préformage sous sa forme concrète. Il présente les grandes étapes du procédé innovant de préformage par ligature de tresse. Il met en lumière les paramètres "procédé" qui régissent le préformage ainsi que les outillages à utiliser pour les maîtriser et obtenir ensuite des préformes conformes aux contraintes d'élaboration des tubes de protections thermiques.

La mise en œuvre industrielle de ce procédé de préformage innovant au sein de la société ROXEL n'est envisageable que dans le cadre d'un procédé automatisé. L'objectif de ce dernier chapitre est donc l'écriture du cahier des charges d'un automate réalisant le préformage tel qu'il a été étudié dans ce manuscrit. L'écriture de ce cahier des charges suit le séquençage des étapes qui ont été déterminées et validées à l'aide d'un procédé manuel. Les premiers résultats sont encourageants : le séquençage, basé sur les étapes de procédé manuel, a permis de mettre au point les étapes clés automatisées ; les phases du séquençage ont été paramétrées et validées à l'aide de tests effectuées manuellement.

Globalement, les objectifs de cette étude sur le préformage des tresses par le procédé de ligatures sont atteints. Les phénomènes apparaissant en cours de préformage ont été identifiés, le comportement du renfort est connu expérimentalement dans les conditions du préformage. Le procédé de préformage a été modélisé et il est désormais possible de prédire, à partir de la géométrie de la pièce industrielle à fabriquer et des données intrinsèques au matériau, l'état de déformation en cisaillement subi par le renfort à l'échelle de la maille en cours de procédé ainsi que l'évolution de la fraction volumique de fibres global dans la préforme final et son évolution le long des plis.

Le principe de préformage quant à lui, est maîtrisé sous sa forme manuelle et ses paramètres influents sont identifiés. Des outillages ont été conçus et validés pour garantir la maîtrise de ces paramètres procédé influents et donc pour garantir l'obtention de préformes conformes de manière

répétable. La pré-étude de conception de l'automatisation du préformage par la méthode de ligature de tresse a permis la rédaction d'un cahier des charges du séquençage du protocole automatisé : les étapes clés ont été identifiées, les outillages conçus et validés pour garantir la maîtrise des paramètres procédés.

Malgré tout, les perspectives de ces travaux sont nombreuses. Elles prennent plusieurs aspects : la modélisation, du point de vue des hypothèses émises mais aussi de la prise en compte de certains phénomènes comme le couplage, et l'automatisation du procédé du point de vue industriel.

Nous allons traiter dans un premier temps les perspectives relatives à la modélisation des phénomènes apparaissant au cours de procédé de préformage par ligature de tresse.

L'une des perspectives évoquées au cours de ce manuscrit est, au cours de la modélisation des mailles sur le pli, la prise en compte de la courbure des mèches dans l'écriture du modèle de maille. En effet, pour le moment, le modèle de maille sur le pli tel qu'il a été présenté dans ce manuscrit l'a été sous forme linéarisée. Ces hypothèses, bien que très répandues pour la modélisation des mailles pour les structures « tresse », restent relativement simplificatrices et restrictives. La prise en compte de la courbure des mèches pour la modélisation des mailles sur le pli serait donc une voie d'optimisation majeure pour obtenir une prédiction théorique plus fidèle aux déformations réelles des mailles de renfort en cours de préformage.

Pour le modèle prédictif de la forme globale des plis, nous avons fait l'hypothèse que la préforme est constituée d'un empilement de plis identiques. Cet aspect est globalement observé expérimentalement, il serait toutefois intéressant de mener une étude plus poussée sur les potentielles variations de forme globale de plis sur la hauteur de la préforme et d'en déduire les paramètres procédé influents. En effet, une étude de la variation de la fraction volumique globale de fibre [20] a montré une certaine disparité dans la hauteur de la pièce. Ces résultats indiquent que la préforme n'est pas rigoureusement constituée d'un empilement de plis identiques. Il faudrait donc étudier plus en détails cette variation de la forme globale des plis en fonction de leur altitude dans la préforme. L'objectif étant de déterminer l'influence de l'altitude du pli étudié qui, couplée aux paramètres « procédé » et « matériau », peut être à l'origine de cette variation de forme de plis.

Dans le cadre de la modélisation de cette étude, les phénomènes de couplage du comportement en cisaillement et en compaction (Chapitre 2) n'ont pas été pris en compte. En effet, l'étude de l'influence du cisaillement sur l'épaisseur des empilements de tresses, présentée à la fin du Chapitre 2, a conduit à négliger cet aspect du comportement des tresses.

Cette étude de couplage a été menée pour une pression de compaction constante. Une perspective intéressante serait l'étude expérimentale et la prise en compte dans l'écriture du modèle de l'influence du cisaillement sur le comportement en compaction des empilements de tresses soumis à un effort de compaction variable [77]. Ces résultats permettraient d'estimer la répartition des mèches de renfort et la fraction volumique locale de fibre plus précisément et d'autant plus conformes aux observations effectuées sur les pièces composite issues de la campagne d'élaboration de prototypes.

Le dernier aspect des perspectives liés à la modélisation concerne la création d'un outil informatique à visée industrielle pour prédire le positionnement global des mèches du renfort dans la préforme à partir des données géométriques du tube à fabriquer et des caractéristiques intrinsèques au matériau. Cet outil serait finalement la concaténation des modèles à la fois à l'échelle de la maille sur le pli et du pli dans la préforme. Il est d'ailleurs possible d'envisager cet outil prédictif global sous deux formes : une *version directe* qui donnerait, à partir des données de la géométrie de l'étude, du

matériau choisi et des paramètres « procédé », les caractéristiques de la préforme future, en termes de positionnement des mèches, de fraction volumique globale et son évolution sur le pli. Ou une *version indirecte* qui, à partir de certaines caractéristiques à atteindre, optimiserait les paramètres « procédé » associés ainsi que les caractéristiques du matériau à choisir de manière optimale pour garantir l'obtention des résultats attendus. Cet outil pourra prendre en compte une potentielle variation de la forme globale du pli en fonction de sa position dans l'empilement constituant la préforme.

Les autres voies d'amélioration de cette étude concernent l'automatisation du préformage. Dans un premier temps, c'est l'étape de dépose automatisée des ligatures qui pourrait faire l'objet de travaux futurs. En effet, nous n'avons pas pu, au cours de nos travaux, aboutir à une solution technique validée pour l'étape « serrer la tresse ». Nous avons constaté qu'il existe des systèmes de dépose qui pourrait permettre d'automatiser cette étape, il faudrait toutefois étudier plus en détails ces potentielles solutions et les tester dans le cadre particulier du préformage par ligature de tresse pour finaliser le cahier des charges préliminaire de l'automatisation du préformage.

Enfin, la perspective fondamentale de cette étude de l'automatisation serait la mise en place d'un prototype de l'automate de préformage tel qu'il a été étudié dans le chapitre 4. Cette installation permettrait la mise en œuvre concrète des solutions validées sur le préformage manuel et serait une étape clé pour un changement de technologie de fabrication des composites de protection thermique au sein de la société Roxel.

La finalité de ce projet est la mise en place, au sein de la société Roxel, d'un nouveau procédé de fabrication pour les tubes de protections thermiques. A cette fin, le test de tir de propulseur équipé d'un tube obtenu grâce au procédé RTM reste la perspective principale pour clore ce projet et valider, à l'échelle industrielle, la faisabilité démontrée en laboratoire d'obtenir, grâce au procédé RTM et notamment le préformage par ligature de tresse, des tubes de protections thermiques conformes.

Bibliographie

- [1] Document interne Roxel – Protac, Juin 2006
- [2] A. Cordier-Telmar, Rapport de stage de fin d'études d'ingénieur, Polytech'Orléans - ROXEL 2007
- [3] Beaudet J., Cormier J., Dragon A., « Thermal protection characterization under hot supersonic flow conditions with normal incidence : influence of reinforcement on the ablative properties », *Compte-Rendus des JNC 17 - Poitiers* 2011
- [4] Cavalier JC., Dauchier M., « Matériaux composites phénoliques ablatifs », *Techniques de l'ingénieur*, AM 5 325
- [5] Pulci G., Tirillo J., Marra F., Fossati F., Bartuli F., Valente T., « Carbon-phenolic ablative materials for re-entry space vehicles : Manufacturing and properties », *Composites Part A, Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, n° 10, pp 1483-1490, 2010
- [6] Beaudet J., Cormier J., Dragon A., Rollin M., Benoit G., « Ablation properties of C fibers reinforced glass ceramic matrix composites based on a geopolymer precursor upon oxyacetylene torch exposure », *Composites Part A*, -en cours de soumission-
- [7] Zanelli D., Rozière JM., Brevet Européen, Roxel – Protac, EP 1 995 043 A1, 2007
- [8] Hoskin BC, Baker AA. "Composite materials for aircraft structures". New York: American Institute of Aeronautics and astronautics; 1986.
- [9] Buhl H. "Advanced aerospace materials. Berlin": Springer; 1992.
- [10] Flower HM. "High performance materials in aerospace". London: Chapman & Hall; 1995.
- [11] Schonberg WP. Protecting spacecraft against orbital debris impact damage using composite materials. *Compos Part A: Applied Science Manufacturing*, 2000;31(8):869–78.
- [12] Windhorst T, Blount G. "Carbon-carbon composites: a summary of recent developments and applications". *Material and Design*, 1997;18(1):11–5.
- [13] Lin Ye, Ye Lu, Zhongqing Su, Guang Meng, "Functionalized composite structures for new generation airframes : a review", *Composites Science and Technology* 65 (2005) 1436–1446
- [14] Site internet de réglementation européenne : http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/chemical_produ_pro/l21282_fr.htm
- [15] M.J. Buntain and S. Bickerton. Modeling forces generated within rigid liquid composite molding tools. Part a : Experimental study. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 38(7) : 1729–1741, 2007
- [16] Christophe Binétruy. *Physique du moulage des composites avancés : aspects théoriques*. Techniques de l'Ingénieur, AM 3 718, 2004
- [17] Daniel Gay. *Matériaux composites*, 5e édition révisée. Lavoisier, 2005
- [18] Delphine Carronnier and Daniel Gay. *Approche intégrée du RTM*. Hermes, 1996.
- [19] J Bréard and A Saouab. Numerical simulation of liquid composite molding processes. *European Journal of Computational Mechanics*, 14(6-7) :841–865, 2005
- [20] R. Agogué, « Analyse expérimentale et numérique de la fabrication de pièces composites par le procédé RTM », Thèse soutenue en Février 2011, Université d'Orléans
- [21] M. Dauchier, J-C. Cavalier, *Matériaux composites phénoliques ablatifs*, *Plastiques et composites Techniques de l'ingénieur*, AM5325
- [22] M.J. Buntain and S. Bickerton. Modeling forces generated within rigid liquid composite molding tools. part a : Experimental study. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 38(7) :1729–1741, 2007.
- [23] C. Binétruy. *Physique du moulage des composites avancés : aspects théoriques*. Techniques de l'Ingénieur, AM 3 718, 2004.

- [24] D. Gay. Matériaux composites, 5e édition révisée. Lavoisier, 2005.
- [25] Delphine Carronnier and Daniel Gay. Approche intégrée du RTM. Hermes, 1996.
- [26] Mouritz et al. « Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile Composites ». Composites: Part A 30 (1999) 1445–1461
- [27] Wu et al. « Measurement of braided preform permeability” Composites Science and Technology 66 (2006) 3064–3069
- [28] Ayranci et al. “2D braided composites: A review for stiffness critical applications”. Composite Structures 85 (2008) 43–58
- [29] Sun et al. « Prediction of the mechanical properties of three-dimensionally braided composites ». Composites Science and Technology 57 (1997) 623-629
- [30] Kuo et al. « Elastic moduli and damage mechanisms in 3D braided composites incorporating pultruded rods »Composites Part A 29 (1998) 681-692
- [31] Ivanov et al. “Failure analysis of triaxial braided composite”. Composites Science and Technology 69 (2009) 1372–1380
- [32] Xu et al. « Finite element analysis of mechanical properties of 3D five-directional braided composites” Materials Science and Engineering A 487 (2008) 499–509
- [33] Potluri et al. “Flexural and torsional behaviour of biaxial and triaxial braided composite structures ». Composite Structures 75 (2006) 377–386
- [34] Fouinneteau et al. “Shear mechanism modelling of heavy tow braided composites using a meso-mechanical damage model”. Composites: Part A 38 (2007) 2294–2306
- [35] Nemoz, « Textures textiles tridimensionnelles », Plastiques et Composites, Techniques de l’Ingénieur, AM5 122
- [36] Caramano, « Textiles à usage technique », Techniques de l’Ingénieur, N2 511
- [37] Chen et al. « On the microstructure of three-dimensional braided preforms ». Composites Science and Technology 59 (1999) 391-404
- [38] Long « Process modelling for liquid moulding of braided preforms ». Composites Part A 32 (2001) 941-953
- [39] Knott T. W., Loos A. C., “Resin film infusion process modelling for large transport aircraft wing structures”, NASA Langley Research Center, 1998
- [40] Potluri et al. « Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3D preforms”. Composites Part A 34 (2003) 481–492
- [41] Kessel et al. “Prediction of the yarn trajectories on complex braided preforms”. Composites : Part A 33 (2002) 1073–1081
- [42] Du G.W., Popper P., Analysis of a circular braiding process for complex shapes, J. text. Inst. , 1994, vol.85, n°3, pp.316-337
- [43] Tang et al. “Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials”. Part I: fabric structure and fibre volume fraction. Composite Structures 49 (2000) 451±459
- [44] Buyng, “The analytical characterization of 2-D braided textile composites”, Composites science and technology, 60 (2000) 705-716
- [45] Stueve et al., “Simulation of braiding technology along the complete process chain”, SAMPE Europe International Conference, Paris 2007
- [46] Némóz G. et al., “3D braided preforms for shaped composite material”, Proceedings of the European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing 2005 (ESA SP-581), 10-12 May 2005, Noordwijk, The Netherlands

- [47] Tolosana N. et al., "Development of a geometrical model for a 3D braiding unit cell based on braiding machine emulation", Finite element modelling of textiles and textile composites, St Petersburg, 26-28 September 2007
- [48] M. Grediac, "The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations", Composites: Part A 35 (2004) 751–761
- [49] A. Ammouche, J. Riss, D. Breyse, J. Marchand, Image analysis for the automated study of microcracks in concrete, Cement and concrete composites 23 (2001) 267-278
- [50] S.B. Sharma, M.P.F. Sutcliffe*, S.H. Chang, Characterisation of material properties for draping of dry woven composite material, Composites: Part A 34 (2003) 1167–1175
- [51] Ifju P.G., Masters J.E, Jackson W.C., "The use of Moiré interferometry as an aid to standard test-method development for textile composite materials", Composites Science and Technology 53 (1995) 155-163
- [52] Ching Quek S., Waas A.M., Shahwan K.W., Agaram V., "Compressive response and failure of braided textile composites : Part 1 – experiments, International Journal of Non-linear Mechanisms 39 (2004) 635-648
- [53] Masters J.E, Ifju P.G., "A phenomenological study of triaxially braided textile composites loaded in tension, Composites Science and Technology 56 (1996) 347-358
- [54] Lomov S., Boisse P., Deluycker E., Morestin F., Vanclooster K., Vandepitte D., et al., "Full field strain measurements in textile deformability studies", Composites A (2008);39:1232-44
- [55] Lomov et al., "Nesting in textile laminates: geometrical modelling of the laminate". Composites Science and Technology 63 (2003) 993–1007
- [56] Song et al. "Prediction of permeability tensor for three dimensional circular braided preform by applying a finite volume method to a unit cell". Composites Science and Technology 64 (2004) 1629–1636
- [57] P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Sallé, F. Dumont, "Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses ", Composites Science and Technology, Volume 71, Issue 5, 22 March 2011, Pages 683-692
- [58] S. Kawabata, Masako Niwa & H. Kawai, The finite deformation theory of plain-weave fabrics, Part III : The shear deformation theory, Journal of the Textile Institute, Vol. 64, Issue 2, 1973
- [59] S.V. Lomov, I. Verpoest, "Model of shear of woven fabric and parametric description of shear resistance of glass woven reinforcements", Composites Science and Technology, Vol. 66, Issues 7-8, June 2006, pages 919-933
- [60] P. Harrison, M.J. Clifford, A.C. Long, C.D. Rudd, "A constituent-based predictive approach to modelling the rheology of viscous textile composites", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.35, Issues 7-8, July 2004, Pages 915-931
- [61] P. Potluri, D.A. Perez Ciurezu, R.B. Ramgulam, "Measurement of meso-scale shear deformations for modelling textile composites", Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, Vol. 37, Issue 2, February 2006, Pages 303-314
- [62] SB. Sharma, MPF. Sutcliffe, "A simplified finite element model for draping of woven material", Composite Part A, Vol. 35, Issue 6, June 2004, Pages 637-643
- [63] G.B. McGuinness, C.M. ÓBrádaigh, "Characterisation of thermoplastic composite melts in rhombus-shear: the picture-frame experiment", Composite Part A : Applied Science and Manufacturing, Vol; 29, Issues 1-2, Pages 115-132

- [64] F. Dumont, G. Hivet, R. Rotinat, J. Launay, P. Boisse, P. Vacher, « Mesures de champs pour des essais de cisaillement sur des renforts tissés », *Mécanique & Industries*, Vol. 4, Issue 6, Nov.-Déc. 2003, pages 627-635
- [65] P. Harrison, M.J. Clifford, A.C. Long, "Shear characterisation of viscous woven textile composites: a comparison between picture frame and bias extension experiments", *Composites Science and Technology*, Volume 64, Issues 10–11, August 2004, Pages 1453–1465
- [66] G. Lebrun, M. N. Bureau, J. Denault, Evaluation of bias-extension and picture-frame test methods for the measurement of intraply shear properties of PP/glass commingled fabrics, *Composite Structures*, Volume 61, Issue 4, September 2003, Pages 341-352
- [67] J. Launay, G. Hivet, A. V. Duong, P. Boisse, Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements, *Composites Science and Technology* 68 (2008) 506–515
- [68] J. Cao, R. Akkerman, P. Boisse, J. Chen, H.S. Cheng, E.F. de Graaf, J.L. Gorczyca, P. Harrison, G. Hivet, J. Launay, W. Lee, L. Liu, S.V. Lomov, A. Long, E. de Luycker, F. Morestin, J. Padvoiskis, X.Q. Peng, J. Sherwood, Tz. Stoilova, X.M. Tao, I. Verpoest, A. Willems, J. Wiggers, T.X. Yu, and B. Zhu, "Characterization of mechanical behavior of woven fabrics : Experimental methods and benchmark results". *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 39(6) :1037–1053, 2008.
- [69] J. Launay, G. Hivet, A. V. Duong, P. Boisse, "Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements », *Composites Science and Technology*, Vol. 68, Issue 2, February 2008, Pages 506-515
- [70] Boisse P., Zouari B., Daniel J-L., "Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite performing", *Composite Part A* 37 (2006) 2201-2212
- [71] Q. Govignon, S. Bickerton, P.A. Kelly, "Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete resin infusion process", *Composites : Part A* 41 (2010), 45-47
- [72] P. Smith, C. D. Rudd, and A. C. Long, "The effect of shear deformation on the processing and mechanical properties of aligned reinforcements", *Composites Science and Technology*, 57(3) :327–344, 1997
- [73] A. Telmar, R. Agogué, D. Soulat, G. Hivet, D. Zanelli, "Prediction of braid deformability during rtm process", *International Journal of Material Forming*, 3 : 676–678, 2010
- [74] S.V. Lomov, I. Verpoest, T. Peeters, D. Roose, M. Zako, "Nesting in textile laminates : geometrical modeling of the laminate", *Composites Science and Technology* 63 (2003) 993-1007
- [75] K. Birkefeld, M. Röder, T. Von Reden, M. Bulat, K. Drechsler, "Characterization of biaxial and triaxial braids: Fiber architecture and mechanical properties", *Applied Composite Materials*, Volume 19, Numbers 3-4 (2012), 259-273
- [76] K. Birkefeld, A. Erber, K. Drechsler, "Virtual design design process for braided drive shafts", *SAMPE Europe Conference*, Paris (2010)
- [77] Q. T. Nguyen, "Analyse expérimentale et numérique de la compaction des renforts fibreux. Application pour la perméabilité », Thèse soutenue en 2011, Université de Lyon
- [78] B. Chen, T.-W. Chou, Compaction of woven-fabric preforms: nesting and multi-layer deformation, *Composites Science and Technology*, Volume 60, Issues 12-13, September 2000, Pages 2223-2231
- [79] F. Robitaille, R. Gauvin, « Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. I : Review of experimental results", *Polymer Composites* 1998, Vol 19, Pages 198-216
- [80] Y. Roak Kim, S.P. McCarthy, J. P. Fanucci, "Compressibility and relaxation of fiber reinforcements during composite processing", *Polymer Composites*, Feb. 1991, Vol. 12, No. 1

- [81] AA. Shomeshekar, S. Bickerton, D. Bhattacharyya, "An experimental investigation of non-elastic deformation of fibrous reinforcements in composite manufacturing", *Composites Part A* 2006, Vol. 37, Pages 858-867
- [82] PA. Kelly, "Transverse compression properties of composite reinforcements, Composite reinforcement for optimum performance", Woodhead Publishing Limited 2011
- [83] S. Bickerton, MJ. Buntain, AA. Shomeshekar, "The viscoelastic compression behavior of liquid composite moulding performs", *Composites Part A* 2003, Vol.34, Pages 431-444
- [84] R.A Saunders, C Lekakou, M.G Bader, "Compression in the processing of polymer composites 1. A mechanical and microstructural study for different glass fabrics and resins", *Composites Science and Technology*, Volume 59, Issue 7, May 1999, Pages 983-993
- [85] P. Potluri, T.V. Sagar, "Compaction modelling of textile preforms for composite structures", *Composite Structures*, Volume 86, Issues 1-3, November 2008, Pages 177-185
- [86] Saunders R.A., Lekakou C., Bader M.G., "Compression in the processing of polymer composites 1. A mechanical and microstructural study for different glass fabrics and resins", *Composites Science and Technology* 59 (1999) 983-993
- [87] S.V. Lomov, I. Verpoesta, T. Peetersb, D. Roosec, M. Zakoc, "Nesting in textile laminates: geometrical modelling of the laminate", *Composites Science and Technology* 63 (2003) 993–1007
- [88] G. Hivet, A.V. Duong, "A contribution to the analysis of the intrinsic shear behavior of fabrics", *Journal of Composite Materials* March 2011 45: 695-716, first published on October 27, 2010
- [89] A. Willems, S.V. Lomov, I. Verpoest, D. Vandepitte, "Optical strain fields in shear and tensile testing of textile reinforcements », *Composites Science and Technology*, Volume 68, Issues 3–4, March 2008, Pages 807-819
- [90] Nguyen Q. T., Vidal-Sallé E., Boisse P., Park C. H., Saouab A, Bréard J., Hivet G., « Mesoscopic scale analyses of textile composite reinforcement compaction », à paraître
- [91] Ouagne P., Soulat D., Hivet G. Allaoui S., Duriatti D. "Analysis of defects during the preforming of a woven flax reinforcement". *Advanced Composite Letters*, 20 (2011) 105-108.
- [92] Chen B., Chou T-W., "Compaction of woven fabrics performs in liquid composite molding processes : single-layer deformation", *Composites Science and Technology* 59 (1999) 1519-1526
- [93] K. Buet-Gautier, « Analyse et simulation du comportement mécanique des renforts composites tissés », Thèse soutenue en décembre 1998, Université d'Orléans
- [94] P. Ouagne, D. Soulat, R. Agogué, C.H. Park, L. Bizet, J. Bréard, D. Zanelli, "Injection of a complex perform by RTM process", *The 10th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM10)*, Monte Verità, Ascona, CH – July 11-15, 2010
- [95] S. Allaoui, G. Hivet and J. L. Billoët, "Experimental analysis of the contact between layers of dry fabrics", From the issue entitled "Proceedings of the 12th ESAFORM Conference on Material Forming, Enschede (Netherlands), 27–29 April 2009
- [96] J. Moothoo, « Rapport de projet de 5^e année, Conception d'un dispositif de dépose de gaine sur un mandrin », Polytech'Orléans, 2009-2010
- [97] A. Cruchet, J. Piedallu, « Conception d'un système de préformage », Polytech'Orléans, 2010-2011
- [98] E. Assadi, « Conception d'un système automatisé de préformage. Dépose de gaine sur mandrin », Polytech'Orléans, 2011-2012

Aurélie TELMAR

Etude de déformabilité de tresses en cours de préformage pour la fabrication de composite par le procédé RTM

Cette thèse traite la fabrication de pièces composites par le procédé « Resin Transert Molding » (RTM), appliquée à des tubes de protections thermiques assemblées dans des propulseurs de systèmes d'armes. Ces travaux ont pour objectif de démontrer la faisabilité d'utilisation de ce procédé pour la fabrication de ces pièces complexes. C'est le préformage, première étape du procédé de fabrication par RTM, qui est étudié dans le cadre de cette thèse. Cette étape est cruciale du point de vue de la faisabilité de l'étape d'injection qui la suit dans le procédé RTM mais aussi pour s'assurer de la qualité de la pièce composite finale obtenue.

L'objectif des travaux de thèse est triple. Il faut tout d'abord développer le protocole de fabrication répétable adapté pour garantir l'obtention de préformes conformes. Ce protocole devra être viable du point de vue industriel. Pour cela, une démarche expérimentale a été mise en place. Un pilote de laboratoire puis un pilote industriel ont permis de comprendre et maîtriser les phénomènes survenant en cours de préformage en faisant varier les paramètres procédé pour la fabrication de nombreux prototypes. Un modèle macroscopique prédictif de la forme globale des plis obtenus à partir des paramètres procédés a été développé à l'aide des observations expérimentales. Un modèle mésoscopique, à l'échelle de la maille élémentaire, a été écrit également. Il permet de prédire, à partir des données constitutives du matériau et d'une géométrie de pièce, la déformation de compaction et de cisaillement, modes de sollicitations prépondérants en cours de préformage, subie par le renfort en cours de la première étape du procédé de fabrication. Ces modèles mésoscopique et macroscopique couplés permettent le développement d'un outil global qui, de manière théorique et prédictive, assure la faisabilité d'une pièce de géométrie connue avec un matériau connu et fournit les paramètres « procédé » optimum pour assurer sa fabrication future.

Les phénomènes de déformation en cisaillement et compaction apparaissant sur la tresse en cours de préformage sont donc identifiés et connus. Le procédé de fabrication est optimisé et l'outil prédictif permet d'envisager et tester en amont un changement de matériau, de géométrie de pièce à fabriquer ou de cahier des charges industriel.

Mots clés : RTM, préformage, tresse, procédé de fabrication, cisaillement, compaction, modèle prédictif

This study deals with the manufacture of composite parts by the process "Resin Transert Molding" (RTM), applied to thermal protection tubes. This work aims to demonstrate the feasibility of using this method for the production of these complex parts. This study deals with the first step of the RTM process, the fiber performing. This is critical from the standpoint of the feasibility of injecting step that follows in the RTM process but also to ensure the quality of the final composite part obtained.

The aim of the thesis is threefold. Must first develop the manufacturing protocol adapted to ensure repeatable obtaining preforms compliant. This protocol should be viable to the industrial point of view. For this purpose, an experimental approach was implemented. A pilot laboratory and an industrial pilot helped to understand and master the phenomena occurring during forming varying the process parameters for the production of many prototypes. A macroscopic model predictive of overall shape folds obtained from the process parameters has been developed with the experimental observations. A mesoscopic model, the scale of the unit cell was also writing. It can predict, based on the specifications of the material and part geometry, the deformation of compaction and shear stresses. These models mesoscopic and macroscopic allow the development of a global tool that, theoretically predictive and ensures the feasibility of a piece of known geometry with a known material parameters and provides the "process" to ensure its optimum manufacturing future.

The phenomena of compaction and shear strain appearing on the braid during preforming are identified and known. The manufacturing process is optimized and the predictive tool allows to explore and test upstream change of material, part geometry in manufacturing or industrial specifications

KEY WORDS : RTM, fiber forming, braid, process manufacturing, compaction, shear, predictive model



Prisme – Equipe MMH –
Polytech'Orléans
8 rue Léonard de Vinci
45072 Orléans France

