

## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                     | Page |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCTION .....                                                                  | 1    |
| CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....                                            | 3    |
| 1.1 Mise en situation .....                                                         | 3    |
| 1.1.1 Sélection d'un design .....                                                   | 3    |
| 1.1.2 Sélection de technologies de production .....                                 | 4    |
| 1.2 Préformage et renforcement des renforts fibreux secs .....                      | 5    |
| 1.2.1 Tissage .....                                                                 | 5    |
| 1.2.2 Tricotage .....                                                               | 6    |
| 1.2.3 Tressage .....                                                                | 8    |
| 1.2.4 Couture .....                                                                 | 9    |
| 1.2.4.1 Procédés de couture classiques .....                                        | 9    |
| 1.2.4.2 Procédés de couture aveugle .....                                           | 10   |
| 1.2.5 Touffetage .....                                                              | 12   |
| 1.2.6 Inventaire des autres procédés .....                                          | 14   |
| 1.3 Effets des paramètres de couture et de touffetage sur les préformes .....       | 15   |
| 1.3.1 Densité de couture .....                                                      | 16   |
| 1.3.2 Patron de couture .....                                                       | 17   |
| 1.3.3 Profondeur d'insertion .....                                                  | 18   |
| 1.3.4 Angle d'insertion .....                                                       | 20   |
| 1.4 Matériaux .....                                                                 | 21   |
| 1.4.1 Renfort fibreux .....                                                         | 21   |
| 1.4.2 Fil de renfort .....                                                          | 24   |
| 1.5 Imprégnation de résine .....                                                    | 26   |
| 1.6 Défauts communs rencontrés lors de l'utilisation de renforts fibreux secs ..... | 28   |
| 1.6.1 Défauts communs engendrés par la manipulation du renfort fibreux .....        | 29   |
| 1.6.2 Défauts communs engendrés par l'insertion de fils de renfort .....            | 30   |
| 1.7 Caractérisation mécanique des préformes .....                                   | 34   |
| 1.7.1 Assemblage de préforme sandwich .....                                         | 34   |
| 1.7.2 Renforcement de raidisseur en T .....                                         | 34   |
| 1.7.3 Mode d'arrachement des touffes .....                                          | 36   |
| 1.7.4 Résistance à l'arrachement de raidisseur en T .....                           | 37   |
| 1.7.5 Conclusion sur la mise en œuvre du touffetage .....                           | 39   |
| 1.8 Projets antérieurs de panneaux assemblés et renforcés par couture .....         | 39   |
| CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE .....                                | 45   |
| 2.1 Le CRIAQ et le projet COMP-501 .....                                            | 45   |
| 2.1.1 Présentation du CRIAQ .....                                                   | 45   |
| 2.1.2 Objectif du projet COMP-501 .....                                             | 45   |
| 2.1.3 Sélection de la géométrie à développer .....                                  | 47   |
| 2.1.4 Problématique et objectifs du mémoire .....                                   | 48   |

|                                                                                                     |                                                              |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----|
| 2.2                                                                                                 | Sélection des procédés .....                                 | 49 |
| 2.2.1                                                                                               | Couture OSS® « 2Needle » .....                               | 49 |
| 2.2.2                                                                                               | Touffetage .....                                             | 51 |
| 2.3                                                                                                 | Sélection des matériaux et paramètres .....                  | 52 |
| 2.3.1                                                                                               | Renfort fibreux .....                                        | 52 |
| 2.3.2                                                                                               | Fil de couture et de touffetage .....                        | 53 |
| 2.3.3                                                                                               | Nouille .....                                                | 54 |
| 2.3.4                                                                                               | Matrice .....                                                | 55 |
| 2.3.5                                                                                               | Séquences d'empilement des renforts .....                    | 55 |
| 2.4                                                                                                 | Préparation des renforts .....                               | 57 |
| 2.4.1                                                                                               | Découpe .....                                                | 57 |
| 2.4.2                                                                                               | Empilage .....                                               | 58 |
| 2.4.3                                                                                               | Assemblage du stratifié par couture .....                    | 58 |
| 2.4.4                                                                                               | Préformage des stratifiés .....                              | 59 |
| 2.4.5                                                                                               | Renforcement .....                                           | 61 |
| 2.5                                                                                                 | Ajout de la matrice par VARI .....                           | 62 |
| 2.5.1                                                                                               | Principe .....                                               | 62 |
| 2.5.2                                                                                               | Équipement et montage .....                                  | 62 |
| 2.5.3                                                                                               | Imprégnation de la préforme .....                            | 64 |
| 2.5.4                                                                                               | Bénéfices et risques .....                                   | 64 |
| 2.6                                                                                                 | Tests mécaniques .....                                       | 65 |
| 2.6.1                                                                                               | Préparation des spécimens pour essais .....                  | 65 |
| 2.6.2                                                                                               | Test d'arrachement symétrique et asymétrique .....           | 66 |
| 2.6.3                                                                                               | Échantillonnage et procédure .....                           | 67 |
| <br>CHAPITRE 3 PRODUCTION DE PRÉFORMES ASSEMBLÉES PAR COUTURE<br>ET RENFORCÉES PAR TOUFFETAGE ..... |                                                              |    |
| 3.1                                                                                                 | Maitrise des outils .....                                    | 69 |
| 3.1.1                                                                                               | Robot .....                                                  | 69 |
| 3.1.2                                                                                               | Nomenclature du renfort et paramètres de couture .....       | 70 |
| 3.1.3                                                                                               | Programmation .....                                          | 74 |
| 3.2                                                                                                 | Conception d'outillage spécifique .....                      | 75 |
| 3.2.1                                                                                               | Gabarit d'empilement de tissus .....                         | 75 |
| 3.2.2                                                                                               | Gabarit de préformage .....                                  | 79 |
| 3.2.3                                                                                               | Pied presseur de touffetage « multi-angle » .....            | 79 |
| 3.2.4                                                                                               | Feuille de calcul de consommation de fil de couture .....    | 81 |
| 3.3                                                                                                 | Production .....                                             | 83 |
| 3.3.1                                                                                               | Couture OSS® « 2Needle » .....                               | 83 |
| 3.3.2                                                                                               | Touffetage .....                                             | 85 |
| 3.4                                                                                                 | Caractérisation et inspection .....                          | 86 |
| 3.4.1                                                                                               | Influence de la qualité de l'empilement sur la couture ..... | 86 |
| 3.4.2                                                                                               | Inspection visuelle des préformes sèches .....               | 88 |
| 3.4.3                                                                                               | Inspection des spécimens par microscope .....                | 89 |

|            |                                                                                                              |     |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CHAPITRE 4 | ÉVALUATION DE L'EFFET DU TOUFFETAGE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES D'UN RAIDISSEUR EN « T » .....             | 91  |
| 4.1        | Introduction au renforcement par touffetage .....                                                            | 91  |
| 4.1.1      | Choix de la configuration de couture.....                                                                    | 92  |
| 4.1.1.1    | Tests .....                                                                                                  | 92  |
| 4.1.1.2    | Résultats des tests d'arrachement .....                                                                      | 93  |
| 4.1.1.3    | Conclusion des travaux sur la couture .....                                                                  | 96  |
| 4.1.2      | Tests de touffetage dans la région de la nouille.....                                                        | 97  |
| 4.1.2.1    | Premier test .....                                                                                           | 97  |
| 4.1.2.2    | Résultats.....                                                                                               | 99  |
| 4.1.2.3    | Seconde série de test .....                                                                                  | 101 |
| 4.1.2.4    | Résultats .....                                                                                              | 102 |
| 4.1.2.5    | Conclusion .....                                                                                             | 103 |
| 4.1.3      | Choix des configurations à tester .....                                                                      | 105 |
| 4.2        | Propriété à l'arrachement symétrique .....                                                                   | 107 |
| 4.2.1      | Résultats et analyse .....                                                                                   | 107 |
| 4.2.2      | Analyse des modes de rupture .....                                                                           | 109 |
| 4.3        | Propriété à l'arrachement asymétrique .....                                                                  | 112 |
| 4.3.1      | Résultats et analyse .....                                                                                   | 112 |
| 4.3.2      | Analyse des modes de rupture .....                                                                           | 113 |
| 4.4        | Conclusions et recommandations .....                                                                         | 116 |
| 4.4.1      | Recommandations.....                                                                                         | 116 |
| 4.4.2      | Conclusions.....                                                                                             | 117 |
| CHAPITRE 5 | ÉTUDE COMPARATIVE DES COUTS ENGENDRÉS PAR LE PRÉFORMAGE PAR COUTURE PAR RAPPORT AU PRÉFORMAGE À LA MAIN..... | 119 |
| 5.1        | Préformage d'un démonstrateur.....                                                                           | 119 |
| 5.1.1      | Étapes de préformage.....                                                                                    | 120 |
| 5.1.2      | Gabarit de préformage .....                                                                                  | 120 |
| 5.2        | Étude des coûts .....                                                                                        | 122 |
| 5.2.1      | Coût d'équipement.....                                                                                       | 122 |
| 5.2.2      | Coût des matériaux .....                                                                                     | 125 |
| 5.2.2.1    | Coût des matières premières .....                                                                            | 125 |
| 5.2.2.2    | Coût des matériaux de support.....                                                                           | 126 |
| 5.2.3      | Coût de main-d'œuvre .....                                                                                   | 127 |
| 5.2.3.1    | Coût de main-d'œuvre direct .....                                                                            | 127 |
| 5.2.3.2    | Coût de main-d'œuvre indirect.....                                                                           | 128 |
| 5.2.4      | Coût en énergie .....                                                                                        | 129 |
| 5.2.5      | Coût d'ingénierie initial .....                                                                              | 130 |
| 5.3        | Cas d'un raidisseur simple.....                                                                              | 131 |
| 5.3.1      | Estimation du temps de préformage .....                                                                      | 131 |
| 5.3.2      | Calcul des coûts .....                                                                                       | 134 |
| 5.3.2.1    | Coût d'équipement.....                                                                                       | 134 |
| 5.3.2.2    | Coût des matériaux .....                                                                                     | 134 |

|                                                                     |         |                                                          |     |
|---------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------|-----|
|                                                                     | 5.3.2.3 | Coût de main-d'œuvre .....                               | 135 |
|                                                                     | 5.3.2.4 | Coût d'ingénierie initial .....                          | 136 |
|                                                                     | 5.3.3   | Conclusion .....                                         | 137 |
| 5.4                                                                 |         | Cas d'un démonstrateur .....                             | 138 |
|                                                                     | 5.4.1   | Estimation du temps de préformage .....                  | 139 |
|                                                                     | 5.4.2   | Calcul des coûts .....                                   | 141 |
|                                                                     | 5.4.2.1 | Coût d'équipement.....                                   | 141 |
|                                                                     | 5.4.2.2 | Coût des matériaux .....                                 | 141 |
|                                                                     | 5.4.2.3 | Coût de main-d'œuvre .....                               | 142 |
|                                                                     | 5.4.2.4 | Coût d'ingénierie initial .....                          | 143 |
|                                                                     | 5.4.3   | Conclusion .....                                         | 145 |
| 5.5                                                                 |         | Extrapolation des coûts de préformage.....               | 146 |
|                                                                     | 5.5.1   | Intérêts supplémentaires au préformage par couture ..... | 146 |
|                                                                     | 5.5.2   | Recommandations et Corrections .....                     | 146 |
|                                                                     | 5.5.3   | Extrapolation.....                                       | 148 |
| CONCLUSION.....                                                     |         |                                                          | 149 |
| RECOMMANDATIONS .....                                               |         |                                                          | 151 |
| ANNEXE I FICHE TECHNIQUE SYSTÈME ARALDITE®LY 8601/ARADUR® 8602..... |         |                                                          | 153 |
| ANNEXE II FICHE TECHNIQUE DEVICE FRAZIER, STANDARD MODEL.....       |         |                                                          | 157 |
| ANNEXE III MISE EN PLAN DU PIED PRESSEUR « MULTI-ANGLE ».....       |         |                                                          | 159 |
| LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....                           |         |                                                          | 161 |



## LISTE DES TABLEAUX

|             | Page                                                                                                             |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tableau 1.1 | Comparaison des caractéristiques des techniques de couture aveugle .....14                                       |
| Tableau 2.1 | Caractéristique de la tête RS 530 «2Needle».....49                                                               |
| Tableau 2.2 | Caractéristique de la tête de tufting RS 522.....51                                                              |
| Tableau 2.3 | Propriétés des renforts fibreux .....53                                                                          |
| Tableau 2.4 | Caractéristiques des empilements .....55                                                                         |
| Tableau 2.5 | Référence et résultats du test d'épaisseur des renforts fibreux.....56                                           |
| Tableau 3.1 | Liste des fonctions principales et fonctions de contraintes du gabarit<br>d'empilement de plis de tissus .....76 |
| Tableau 4.1 | Configurations de couture et leurs paramètres.....92                                                             |
| Tableau 4.2 | Résultats des tests d'arrachement symétriques et asymétriques.....94                                             |
| Tableau 4.3 | Paramètres des patrons de touffetage des tests #1 .....98                                                        |
| Tableau 4.4 | Paramètres des configurations de touffetage des tests #2 .....102                                                |
| Tableau 4.5 | Comparaison des configurations de test .....104                                                                  |
| Tableau 4.6 | Résultats des tests d'arrachement symétrique .....107                                                            |
| Tableau 4.7 | Résultats des tests d'arrachement asymétrique .....112                                                           |
| Tableau 5.1 | Liste des équipements nécessaires à la couture et leur coût .....122                                             |
| Tableau 5.2 | Taux d'amortissement et facteurs influant .....124                                                               |
| Tableau 5.3 | Coût d'équipement et facteurs influant .....124                                                                  |
| Tableau 5.4 | Coût de matières premières et facteurs influant.....126                                                          |
| Tableau 5.5 | Coût de main d'œuvre direct et facteurs influant .....128                                                        |
| Tableau 5.6 | Coût de main d'œuvre indirect et facteurs influant .....129                                                      |
| Tableau 5.7 | Liste des composantes du coût initial d'ingénierie.....130                                                       |

## XVIII

|              |                                                                                                               |     |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 5.8  | Liste des étapes de préformage d'un raidisseur simple avec et sans couture.....                               | 132 |
| Tableau 5.9  | Temps et nombre de techniciens nécessaires à la réalisation d'un raidisseur simple avec et sans couture ..... | 133 |
| Tableau 5.10 | Cas d'un raidisseur simple : Coût de l'équipement .....                                                       | 134 |
| Tableau 5.11 | Cas d'un raidisseur simple : Coût des matériaux .....                                                         | 134 |
| Tableau 5.12 | Cas d'un raidisseur simple : Coût de main d'œuvre pour le préformage par couture .....                        | 135 |
| Tableau 5.13 | Cas d'un raidisseur simple : Coût de main d'œuvre pour le préformage à la main .....                          | 135 |
| Tableau 5.14 | Cas d'un raidisseur simple : Coût d'ingénierie initial par préformage par couture .....                       | 136 |
| Tableau 5.15 | Cas d'un raidisseur simple : Coût d'ingénierie initial par préformage à la main .....                         | 137 |
| Tableau 5.16 | Liste des étapes de préformage d'un démonstrateur avec et sans couture.....                                   | 139 |
| Tableau 5.17 | Temps et nombre de techniciens nécessaires à la réalisation d'un démonstrateur avec et sans couture.....      | 140 |
| Tableau 5.18 | Cas d'un démonstrateur : Coût de l'équipement.....                                                            | 141 |
| Tableau 5.19 | Cas d'un démonstrateur : Coût des matériaux.....                                                              | 142 |
| Tableau 5.20 | Cas d'un démonstrateur : Coût de main d'œuvre pour le préformage par couture .....                            | 143 |
| Tableau 5.21 | Cas d'un démonstrateur : Coût de main d'œuvre pour le préformage à la main.....                               | 143 |
| Tableau 5.22 | Cas d'un démonstrateur : Coût d'ingénierie initial par préformage par couture .....                           | 144 |
| Tableau 5.23 | Cas d'un démonstrateur : Coût d'ingénierie initial par préformage à la main.....                              | 144 |

## LISTE DES FIGURES

|             |                                                                                            | Page |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figure 1.1  | Composantes d'un panneau avec raidisseur en « T » .....                                    | 3    |
| Figure 1.2  | Délamination d'un raidisseur en « T » .....                                                | 4    |
| Figure 1.3  | Familles d'armures de tissage .....                                                        | 6    |
| Figure 1.4  | Métier à tisser 3D avec exemples de structures tissées.....                                | 6    |
| Figure 1.5  | Configuration de tricot.....                                                               | 7    |
| Figure 1.6  | Non-crimp fabric (NCF) .....                                                               | 8    |
| Figure 1.7  | Exemples de préformes 3D tressées .....                                                    | 9    |
| Figure 1.8  | Exemples de points de couture classiques .....                                             | 10   |
| Figure 1.9  | « Blindstitch » développé par KSL.....                                                     | 11   |
| Figure 1.10 | « 2Needle » OSS® développé par KSL.....                                                    | 11   |
| Figure 1.11 | « One-sided sewing » développé par ITA.....                                                | 12   |
| Figure 1.12 | Schématisation du touffetage .....                                                         | 13   |
| Figure 1.13 | Z-Pinning .....                                                                            | 15   |
| Figure 1.14 | Force de tension et de compression à la rupture en fonction de la densité de couture ..... | 16   |
| Figure 1.15 | Principaux patrons de couture.....                                                         | 17   |
| Figure 1.16 | Patron de touffetage .....                                                                 | 17   |
| Figure 1.17 | Préforme cousue OSS® et touffetée .....                                                    | 19   |
| Figure 1.18 | Glissement de la boucle de touffetage hors de la nouille.....                              | 20   |
| Figure 1.19 | a) pied presseur d'origine b) pied presseur modifié c) nouveau pied presseur .....         | 21   |
| Figure 1.20 | Classification des renforts textile.....                                                   | 22   |

|             |                                                                                                                                      |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.21 | Fil retors constitué de 2 brins.....                                                                                                 | 25 |
| Figure 1.22 | Schéma de l'insertion de touffes dans le composite.....                                                                              | 27 |
| Figure 1.23 | Zone sèche dû à la forte densité de touffetage.....                                                                                  | 28 |
| Figure 1.24 | Effilochage d'un renfort lors d'un touffetage .....                                                                                  | 29 |
| Figure 1.25 | Déformations engendrées par le fil de couture a) Compression des fibres dans le plan b) Écartement des fibres dans la préforme ..... | 30 |
| Figure 1.26 | a) Désalignement des fibres par l'insertion d'une touffe b) Casse de fibres par la pénétration de l'aiguille.....                    | 31 |
| Figure 1.27 | a) Canaux de résine pour patron carré b) Poches de résines pour patron triangulaire .....                                            | 32 |
| Figure 1.28 | Déformation du fil de renfort par compression.....                                                                                   | 33 |
| Figure 1.29 | a) Poches d'air autour d'une touffe b) Touffe partiellement mouillée.....                                                            | 33 |
| Figure 1.30 | Schéma de renforcement de préforme .....                                                                                             | 35 |
| Figure 1.31 | Désorientation des touffes.....                                                                                                      | 36 |
| Figure 1.32 | Test d'arrachement mode I : casse et arrachement de touffes .....                                                                    | 37 |
| Figure 1.33 | Test d'arrachement : (A) à (D) témoin non renforcé et (1) à (4) échantillon touffeté .....                                           | 38 |
| Figure 1.34 | Formation d'un panneau par Kullerd .....                                                                                             | 40 |
| Figure 1.35 | Machine à coudre de la NASA pour matériaux composites .....                                                                          | 41 |
| Figure 1.36 | Panneaux d'aile en matériaux composites cousus.....                                                                                  | 41 |
| Figure 1.37 | Projet COMDOR .....                                                                                                                  | 42 |
| Figure 1.38 | Concept du projet PRSEUS .....                                                                                                       | 43 |
| Figure 2.1  | Géométrie d'un panneau démonstrateur CRIAQ COMP-501 .....                                                                            | 47 |
| Figure 2.2  | Dimensions d'un raidisseur en T.....                                                                                                 | 48 |
| Figure 2.3  | Schéma du pied et des aiguilles de la tête de couture RS 530 «2Needle».                                                              | 50 |
| Figure 2.4  | Schéma de couture dans la préforme .....                                                                                             | 50 |

|             |                                                                             |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2.5  | Sergé 2-2 a) schéma de tissage b) photo de tissu sergé 2-2 TC-06-T.....     | 52 |
| Figure 2.6  | Dimensions d'une nouille.....                                               | 54 |
| Figure 2.7  | Tête de découpe ultrasonique RC590 .....                                    | 57 |
| Figure 2.8  | Assemblage de l'empilement du voile .....                                   | 59 |
| Figure 2.9  | Ouverture du voile et ajout de la nouille et de la peau.....                | 60 |
| Figure 2.10 | Assemblage des semelles sur la peau.....                                    | 60 |
| Figure 2.11 | Raidisseur en « T » durant le placement de la nouille .....                 | 61 |
| Figure 2.12 | Montage d'imprégnation de résine VARI .....                                 | 62 |
| Figure 2.13 | Test d'arrachage a) symétrique b) asymétrique.....                          | 66 |
| Figure 3.1  | Robot KUKA KR 100 HA .....                                                  | 70 |
| Figure 3.2  | Nomenclature de la couture OSS® «2Needle».....                              | 71 |
| Figure 3.3  | Vue de dessus et de dessous de la couture OSS® «2Needle» .....              | 72 |
| Figure 3.4  | Couture dans l'épaisseur, calcul de la largeur de l'échelle .....           | 72 |
| Figure 3.5  | Espace virtuel du robot .....                                               | 75 |
| Figure 3.6  | Diagramme pieuvre du gabarit d'empilement de plis de tissus.....            | 77 |
| Figure 3.7  | Schéma du gabarit d'empilement de tissus .....                              | 78 |
| Figure 3.8  | Gabarit d'empilement de couture .....                                       | 78 |
| Figure 3.9  | Gabarit de préformage .....                                                 | 79 |
| Figure 3.10 | Schéma du pied presseur de base.....                                        | 80 |
| Figure 3.11 | Schéma du pied presseur « multi-angle » .....                               | 81 |
| Figure 3.12 | a) Pied presseur « multi-angle » b) Touffetage à 45° .....                  | 81 |
| Figure 3.13 | Paramètres de couture .....                                                 | 82 |
| Figure 3.14 | Défauts de couture : a) points manqués b) fibres sorti de la préforme ..... | 83 |
| Figure 3.15 | Couture avec et sans papier.....                                            | 84 |

|             |                                                                                           |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 3.16 | Raidisseur en « T » du projet CRIAQ COMP-501 préformé par couture OSS® .....              | 85  |
| Figure 3.17 | Défauts de production : zone sèche, nouilles déplacées et désorientation des fibres ..... | 86  |
| Figure 3.18 | Taux de points de couture manqués en fonction de la qualité de l'empilement.....          | 87  |
| Figure 4.1  | Configuration de couture .....                                                            | 93  |
| Figure 4.2  | Résultats des tests d'arrachement symétrique .....                                        | 94  |
| Figure 4.3  | Résultats des tests d'arrachement asymétrique .....                                       | 95  |
| Figure 4.4  | Modes de rupture visibles pour les tests d'arrachement.....                               | 96  |
| Figure 4.5  | Configuration finale de couture .....                                                     | 97  |
| Figure 4.6  | Configuration de touffetage du raidisseur test #1, vue de dessous .....                   | 98  |
| Figure 4.7  | Déformation de la géométrie de la nouille.....                                            | 99  |
| Figure 4.8  | Déplacement de la nouille dans le voile .....                                             | 100 |
| Figure 4.9  | Porosités concentrées au niveau du renfort touffeté .....                                 | 100 |
| Figure 4.10 | Longueur du renfort dans le laminé #1.2 .....                                             | 101 |
| Figure 4.11 | Schéma de configuration des tests #2.1 et #2.2 .....                                      | 102 |
| Figure 4.12 | Décalage de la nouille de la zone de base.....                                            | 103 |
| Figure 4.13 | Schéma de configuration du test #3.1 .....                                                | 105 |
| Figure 4.14 | Schéma de configuration du test #3.2 .....                                                | 106 |
| Figure 4.15 | Schéma de configuration du test #3.3 .....                                                | 106 |
| Figure 4.16 | Résultats des tests d'arrachement symétrique .....                                        | 108 |
| Figure 4.17 | Modes de rupture pour les tests d'arrachement symétrique .....                            | 109 |
| Figure 4.18 | Déformation d'un raidisseur lors d'un test d'arrachement symétrique....                   | 110 |
| Figure 4.19 | Courbe des tests d'arrachement symétrique .....                                           | 111 |
| Figure 4.20 | Décalage de la nouille pour le spécimen #3.3_10.....                                      | 112 |

|             |                                                                                                       |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 4.21 | Résultats des tests d'arrachement asymétrique .....                                                   | 113 |
| Figure 4.22 | Mode de rupture pour les tests d'arrachement asymétrique .....                                        | 114 |
| Figure 4.23 | Déformation de la préforme durant un test d'arrachement asymétrique ..                                | 115 |
| Figure 4.24 | Courbe des tests d'arrachement asymétrique .....                                                      | 116 |
| Figure 5.1  | Schéma gabarit de préformage avec démonstrateur .....                                                 | 121 |
| Figure 5.2  | Panneau démonstrateur dans le gabarit de préformage.....                                              | 121 |
| Figure 5.3  | Courbes d'estimation des coûts de préformage d'un raidisseur simple<br>par couture et à la main ..... | 138 |
| Figure 5.4  | Courbes d'estimation des coûts de préformage d'un démonstrateur<br>par couture et à la main .....     | 145 |





## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

|              |                                                                                                                                        |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1D / 2D / 3D | unidirectionnel / bidirectionnel / tridirectionnel                                                                                     |
| DPA          | Déduction pour l'amortissement                                                                                                         |
| ITA          | Institut für Textiltechnik, Institut des Textiles Techniques de l'Université<br>technologique de Rhénanie-Westphalie à Aix-la-Chapelle |
| NCF          | <i>non-crimp fabric</i> , tissu sans embuvage                                                                                          |
| OOA          | Out-of-autoclave, procédé hors autoclave                                                                                               |
| PME          | Petite et Moyenne Entreprise                                                                                                           |
| UD           | unidirectionnel                                                                                                                        |
| VARI         | <i>Vacuum Assisted Resin Infusion</i> , imprégnation de résine sous vide                                                               |



## **LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE**

|     |                                                                   |
|-----|-------------------------------------------------------------------|
| e   | Épaisseur, mm                                                     |
| L   | Longueur de fil de couture nécessaire à une couture, mm           |
| Nm  | Numéro métrique, unité de titrage textile, longueur massique, m/g |
| p   | Pas, mm                                                           |
| Tex | Unité de titrage textile, masse linéique, g/km                    |



## INTRODUCTION

Le marché actuel présente un grand intérêt pour les structures légères à des fins économiques, environnementales et commerciales. Cette affirmation est d'autant plus vraie dans les structures aéronautiques tant le poids d'un aéronef influence ses performances. La solution est initialement venue des alliages métalliques. Cependant les solutions composites à renforts fibreux sont de plus en plus présentes. Bien que de nombreux défis entravent encore l'utilisation à grande échelle des matériaux composites pour des structures majeures, les fabricants accordent une attention toute particulière à leurs caractéristiques remarquables. Le développement et la conception de telles structures ainsi que la mise en forme des matériaux composites à coût intéressant sont nécessaires à la compétitivité de ces nouveaux matériaux. L'un des principaux facteurs limitant de la mise en forme consiste au recours à des étapes manuelles qui limitent la reproductivité des pièces. De plus, les procédés de mise en œuvre restent en majorité fortement coûteux. Les propriétés mécaniques interlaminaires et leur faible tolérance à l'endommagement ralentissent également leur utilisation pour des pièces structurales et à formes complexes. De nombreux procédés voient le jour afin de répondre aux faiblesses des matériaux composites et de les mettre en œuvre. Les procédés « Out-of-autoclave » (OOA) sont notamment en forte expansion (Red, 2014).

Le projet CRIAQ COMP-501 (Préformes textiles 3D pour fabrication de pièces composites complexes) a vu le jour dans l'objectif de démontrer le potentiel du préformage de pièces composites 3D par des techniques de couture. Cet objectif doit être atteint par la fabrication d'un panneau raidi à l'aide de raidisseurs tel que couramment vus dans l'industrie aéronautique ainsi que par la caractérisation du procédé de fabrication. Le procédé de préformage retenu est la couture « One-Sided Stitching® » (OSS®). Cette technologie novatrice permet d'assembler des renforts fibreux secs selon des géométries complexes et ne requière l'accès qu'à un côté de la préforme. Cet avantage est notamment précieux dans le but de réaliser des structures de grandes dimensions avec précision. De plus, ce procédé est totalement automatisable éliminant ainsi les étapes manuelles qui limitent pour le moment l'utilisation des matériaux composites. Ce procédé répond à une problématique de mise en

œuvre mais également de renforcement des propriétés interlaminaires des matériaux produits. Cependant les procédés de renforcement interlaminaires peuvent s'avérer néfastes aux propriétés intralaminaires. Le projet vise à s'assurer que la fabrication des préformes par couture OSS® est performante et à évaluer les effets sur les performances des matériaux composites.

Après une revue de la littérature et la présentation de la démarche expérimentale, le mémoire traite de trois points du projet CRIAQ COMP-501 :

- 1- La production et les outils nécessaires à la bonne réalisation de préformes par couture afin de rendre le procédé adapté, efficace, performant et répétable.
- 2- L'évaluation des performances mécaniques du renforcement par touffetage (technique spéciale de couture OSS®) de raidisseur en « T » soumis à l'arrachement du voile.
- 3- L'étude comparative des coûts de production du préformage par couture comparés à ceux qui sont engendrés par la production de préformes non cousues.

Pour finir, une conclusion sur les travaux est suivie de recommandations sur l'utilisation du préformage de préformes 3D complexes par couture OSS®.

## CHAPITRE 1

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

#### 1.1 Mise en situation

De nombreuses structures se composent de raidisseurs liés à une peau. Cet assemblage, appelé *panneau raidi* ou simplement *panneau*, est communément utilisé en industrie aéronautique. Les raidisseurs peuvent être de formes diverses : I, T,  $\Omega$  et leurs agencements dépendent fortement du cas d'étude.

##### 1.1.1 Sélection d'un design

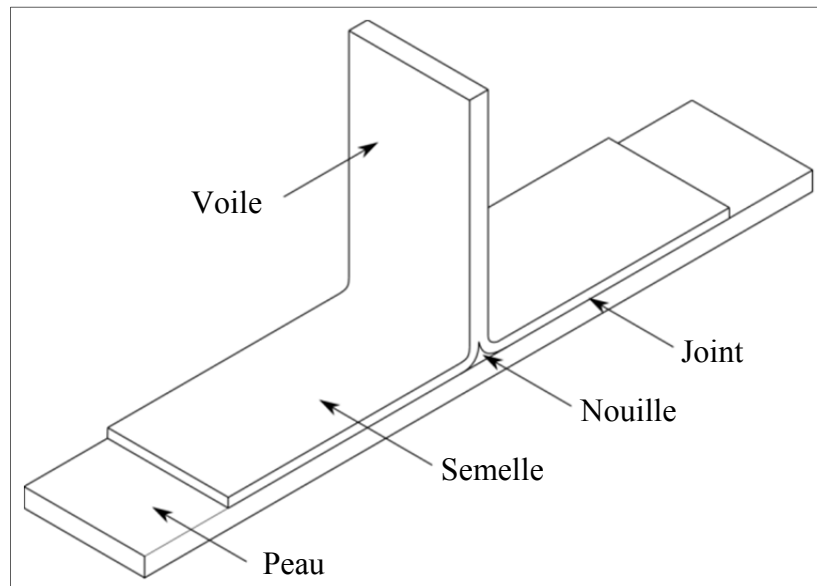


Figure 1.1 Composantes d'un panneau avec raidisseur en « T »

Dans les ailes d'avion ainsi que dans le fuselage ou les stabilisateurs verticaux, on retrouve de nombreux panneaux dont les composantes sont présentées à la Figure 1.1. Le grand nombre de panneaux dans les aéronefs explique l'intérêt pour les fabricants de développer

des techniques pouvant alléger les structures, simplifier la production, ou encore en réduire les coûts.

La sélection de ce design correspond aux objectifs du projet CRIAQ COMP-501 introduit à la section 2.1.

### 1.1.2 Sélection de technologies de production

Les panneaux tels que décrits précédemment sont connus comme présentant une faiblesse au niveau du joint entre le raidisseur et la peau tel que le mentionne Mahfuz *et al.* (2004). En général, les composantes sont fabriquées séparément puis assemblées par collage. Avec des matériaux préimprégnés, il est possible de réaliser la cuisson des éléments indépendamment puis de les lier dans l'autoclave : cette technique est appelée le « co-curing ». Les travaux de Hogg (2010) démontrent la présence d'une concentration de contraintes au niveau de la zone de transition entre le voile et la semelle. La Figure 1.2 montre l'analyse par éléments finis d'une section de raidisseur en T subissant une charge dans le sens d'un arrachement du voile.

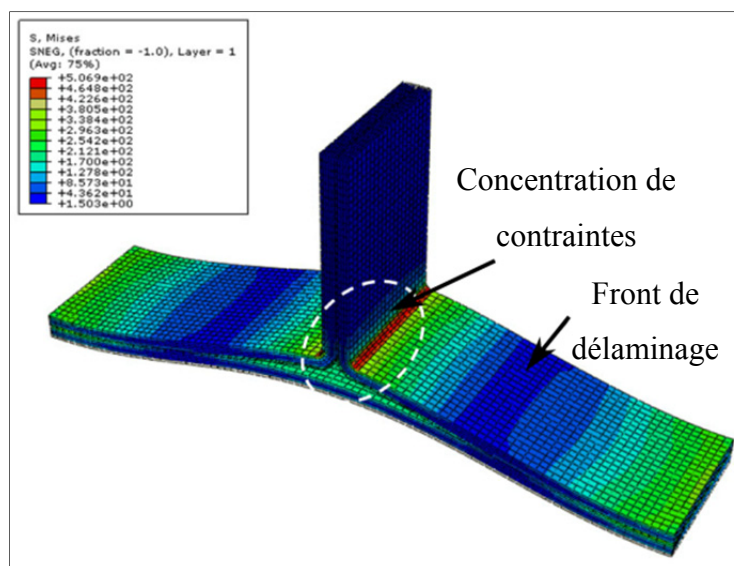


Figure 1.2 Déformation d'un raidisseur en « T »  
Adapté de (Hogg, 2010, p. 43)



Diverses solutions de renforcement de cette zone de concentration de contraintes ont vu le jour. L'ajout de rivets reste une solution envisageable pour les matériaux composites bien qu'elle nécessite des étapes de perçage et d'installation. De plus, le perçage a tendance à délaminer la préforme et le rivet crée une concentration de contraintes.

De nombreux travaux mettent en avant des solutions textiles afin de préformer et/ou renforcer les panneaux. Dransfield *et al.* (1994) et Mouritz *et al.* (1999 et 2000) proposent des revues des solutions textiles de préformage et d'amélioration de la résistance au délaminage, notamment par couture. Han *et al.* (2003) propose un travail de renforcement par couture de panneaux raidis.

## **1.2 Préformage et renforcement des renforts fibreux secs**

Il existe de nombreuses méthodes plus ou moins conventionnelles et applicables au cas d'étude. Toutes ces méthodes n'interviennent pas au même moment dans le processus. Les trois premières méthodes : tissage, tricotage et tressage sont des techniques directes d'assemblage, c'est-à-dire que la préforme est directement formée à la forme finale. La couture et le touffetage sont des techniques indirectes, ces techniques préforment des étoffes généralement plates.

### **1.2.1 Tissage**

Le tissage est l'insertion de fils de trame perpendiculairement à des fils de chaîne. Les tissus obtenus sont classés en trois familles illustrées à la Figure 1.3.

Depuis le début des années 90, le tissage développe également de plus en plus de solutions 3D diversifiées : tissus épais, tissus multicouches, formes prédéfinies en T, en I, en C, etc. Mouritz *et al.* (1999) et Tong *et al.* (2002) réalisent notamment une revue des possibilités 3D des tissages. La Figure 1.4 présente un métier à tisser 3D avec trois tissés issus de ce métier par Khokar (2014).

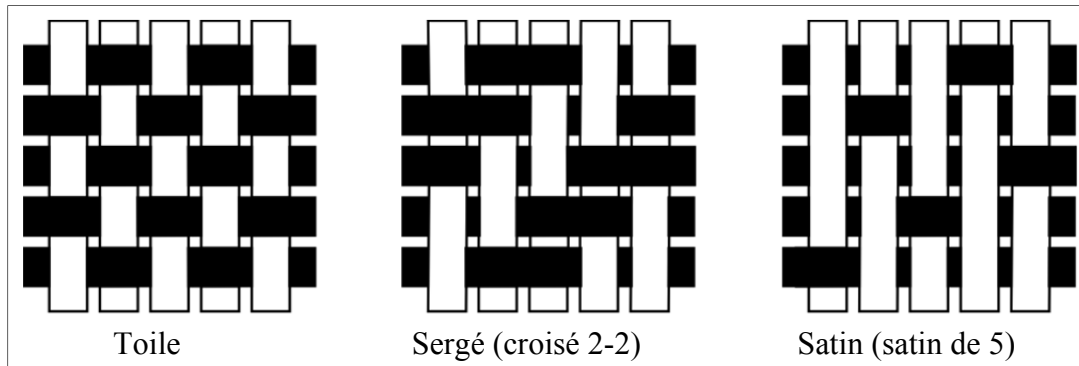


Figure 1.3 Familles d'armures de tissage

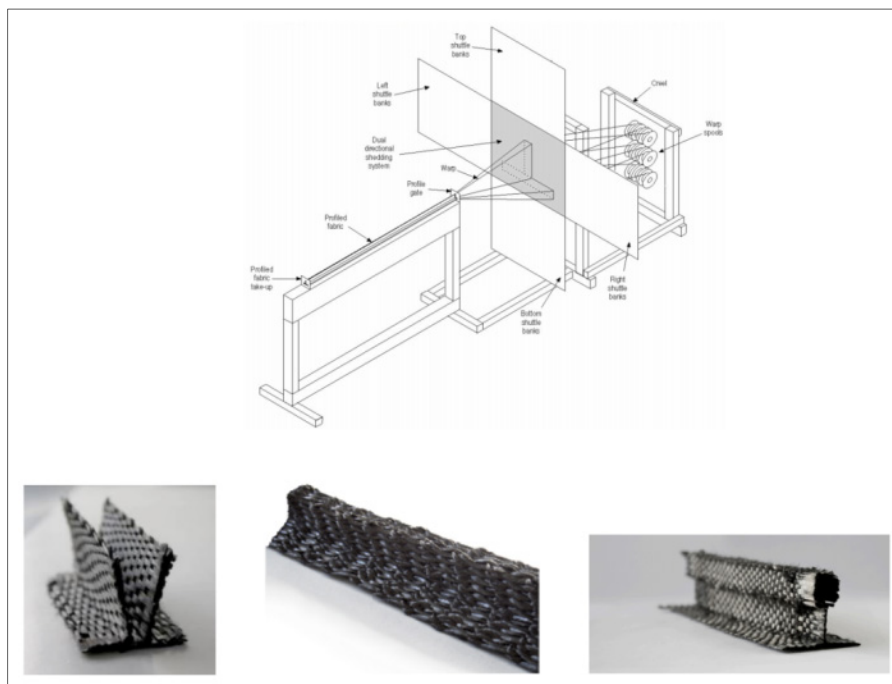


Figure 1.4 Métier à tisser 3D avec exemples de structures tissées  
Tirée de Khokar (2014, p. 7)

## 1.2.2 Tricotage

Le tricotage correspond à la création d'une étoffe par entrelacement de boucles formées par un ou plusieurs fils. Il existe deux familles de tricots : le tricot trame et le tricot chaîne. Le tricot trame aussi appelé tricot à mailles cueillies est constitué d'un fil formant des rangées de

boucles qui s'insèrent dans la rangée précédente. Cependant en multipliant le nombre de fontures (organe du métier à tricoter tenant les aiguilles), il est possible de tricoter plusieurs rangées à la fois. Il est également possible de réaliser un tricot trame plus épais en insérant plusieurs rangées de boucles dans la même rangée. La seconde famille de tricots correspond à celle du tricot chaîne ou tricot à maille jetées dont l'insertion est réalisée par plusieurs fils dans le sens de tricot. Le fil se lie à la boucle voisine et remonte en colonne. Il est également possible d'insérer plusieurs fils pour faire un tricot à couches multiples. Tong *et al.* (2002) a réalisé une revue complète des possibilités du tricotage dont un échantillonnage est visible en Figure 1.5. Les tricots sont généralement plus souples que les tissus mais sont également moins résistants aux sollicitations mécaniques.

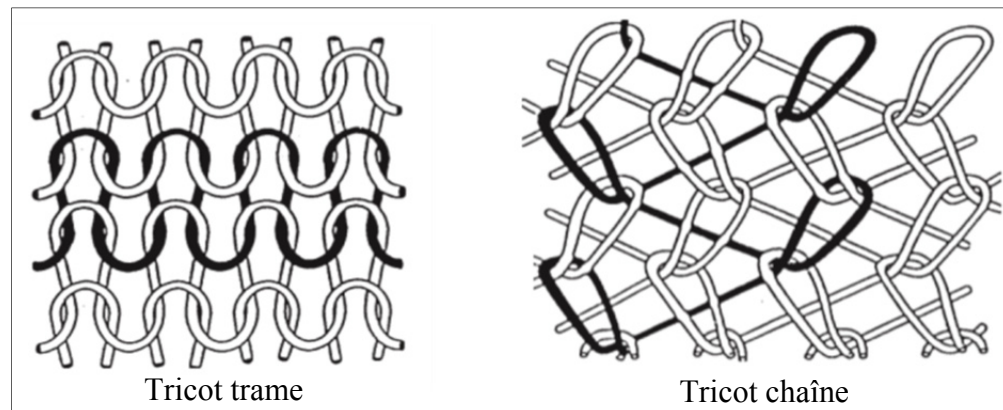


Figure 1.5 Configuration de tricot  
Adaptée de Tong *et al.* (2002, p. 32 et p. 35)

Un dérivé de la technique du tricot chaîne, proche de la couture, permet de lier les *non-crimp fabrics* (NCF). Un NCF est un tissu sans embuvage. L'embuvage est la réduction des fils de chaîne dû à leur entrelacement avec les fils de trame. Pour éviter l'embuvage, un NCF se compose de multiples couches de fils unidirectionnels (UD) disposés les uns à côté des autres ainsi qu'éventuellement d'un mat de fibres. Ensuite ces couches sont liées les unes aux autres par des aiguilles formant un tricot chaîne le long de la structure. La Figure 1.6 présente un NCF selon le brevet de Healey *et al.* (2004).

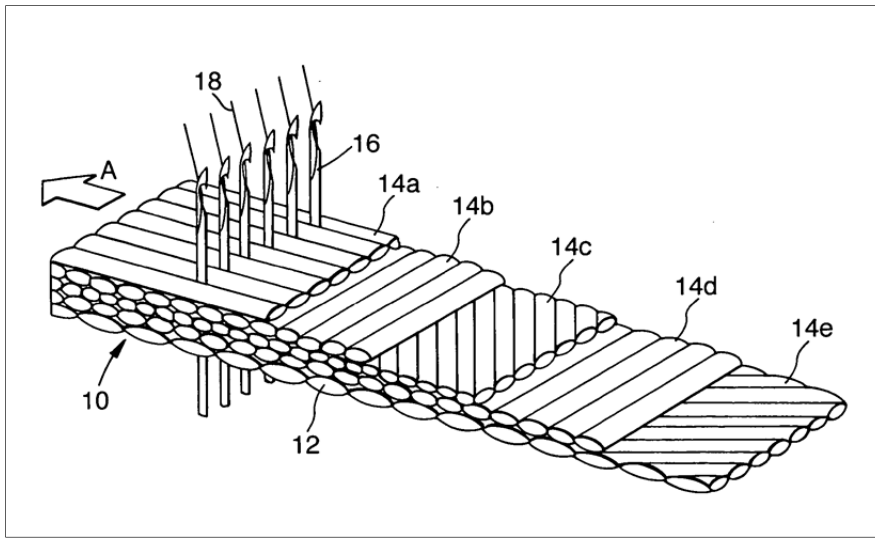


Figure 1.6 Non-crimp fabric (NCF)  
Tirée de Healey *et al.* (2004)

### 1.2.3 Tressage

Le tressage est un entrelacement de trois ou plusieurs fils selon une séquence prédéfinie. Cette technique s'avère particulièrement intéressante pour la production de préformes tubulaires ou pleines. Une tresse est généralement fortement malléable, résistante au cisaillement et tolérante aux chocs. La production peut se faire en 2D, plate ou en 3D selon diverses formes dont certains exemples sont visibles sur la Figure 1.7

La figure présente des structures plates et 3D. On observe également des variations de section qui sont notamment possibles par l'utilisation d'un mandrin. L'utilisation d'un mandrin permet également de changer l'angle des fibres ou la courbure de la tresse. Il est possible de réaliser plusieurs couches sur un même mandrin afin d'obtenir une certaine épaisseur. Cependant malgré les possibilités intéressantes, le tressage reste un procédé relativement lent et ne permettant pas de réaliser des préformes de grandes tailles.

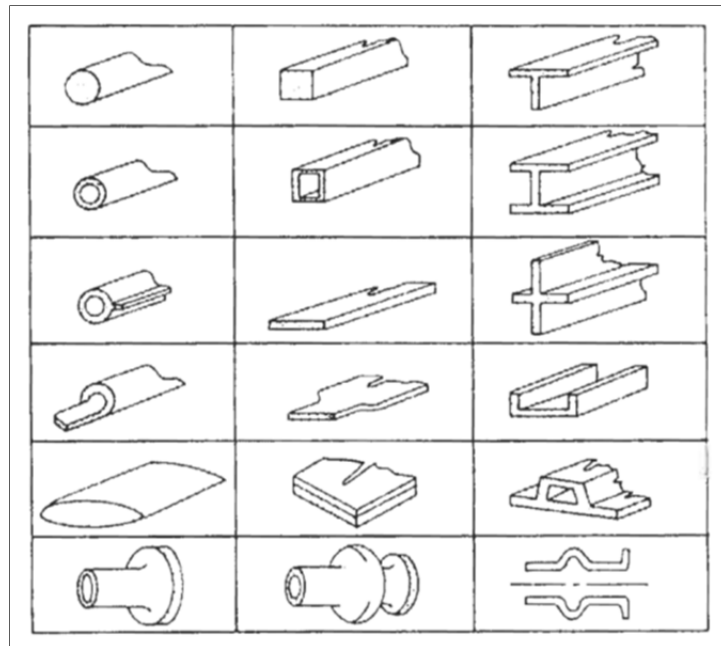


Figure 1.7 Exemples de préformes 3D tressées  
Tirée de Tong *et al.* (2002, p. 30)

#### 1.2.4 Couture

En couture, on distingue principalement deux types de procédés : les classiques et les procédés qui ne nécessitent l'accès qu'à un côté de la préforme. Ces seconds sont appelés OSS® pour « One-Sided Stitching » ou couture aveugle.

##### 1.2.4.1 Procédés de couture classiques

La couture peut remplir deux fonctions pouvant être complémentaires. La première fonction est la fixation de divers éléments fibreux ou non-fibreux ensemble, tandis que la seconde est le renforcement de la structure. De nombreux points de couture permettent de compléter l'une et/ou l'autre de ces fonctions. La Figure 1.8 présente trois points de couture parmi les plus usuels. Dransfield *et al.* (1994) s'est notamment servi de ces trois points afin de caractériser la possible amélioration de matériaux cousus à la résistance à la délamination tout comme Kullerd *et al.* (1992).

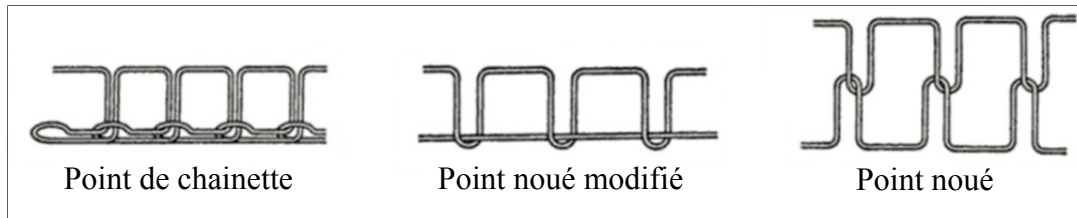


Figure 1.8 Exemples de points de couture classiques  
Adaptée de Tong *et al.* (2002, p. 166)

D'autres procédés plus spécifiques existent afin de coudre deux matériaux bord-à-bord, d'assembler selon un point « zigzag » ou encore de réaliser des assemblages sans contrainte d'encombrement ou invisibles. Comme introduit précédemment, les NCF peuvent également faire partie des préformes cousues. L'appellation de couture tricot est dans ce cas utilisée. Enfin la broderie est une sous-section de la couture classique. Cette technique consiste à déposer localement un fil de manière à réaliser un schéma prédéfini, qu'il soit à but esthétique ou de fixation d'éléments. Le dépôt de fil est assisté par ordinateur dans ce cas. Cependant toutes ces méthodes nécessitent l'accès aux deux côtés de la préforme. Or les préformes dans l'industrie des matériaux composites peuvent être imposantes par leur taille. Afin de répondre à cette problématique, il est nécessaire d'utiliser des procédés moins encombrants.

#### 1.2.4.2 Procédés de couture aveugle

Les procédés de couture aveugle sont des techniques qui ne nécessitent l'accès qu'à une face de la préforme. Trois principes se distinguent : le premier utilise une aiguille courbe, le second se sert de deux aiguilles tandis que le touffetage insère un fil de renfort dans la préforme sans créer de nœuds.

Le procédé « Blindstitch » développé par KSL utilise une unique aiguille courbe qui pénètre la préforme et en ressort par la même face. Un crochet retient la dernière boucle afin d'y insérer la nouvelle boucle et former une chaînette. La Figure 1.9 montre la schématisation de la tête ainsi que du fil de renfort dans la préforme.

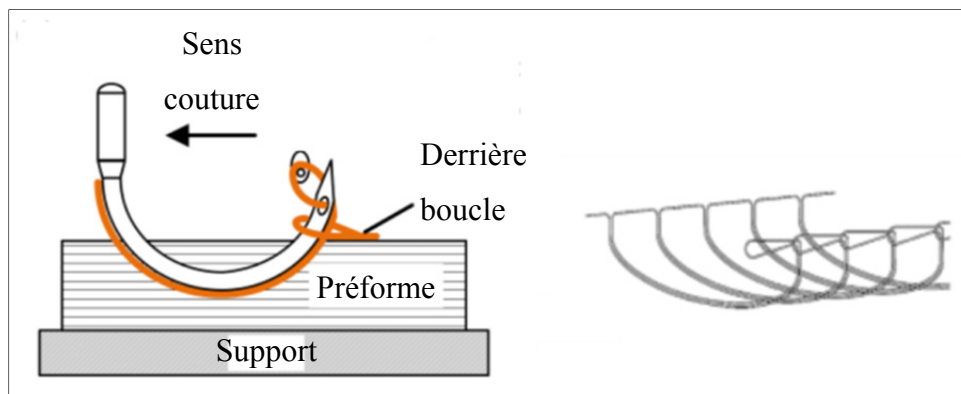


Figure 1.9 « Blindstitch » développé par KSL  
Adaptée de Treiber (2011, p. 10)

Le second principe se sert de deux aiguilles plus ou moins inclinées afin qu'elles puissent se croiser. Deux technologies concurrentes s'affrontent, KSL a développé la sienne avec deux aiguilles, une inclinée et la seconde verticale, s'échangeant un unique fil. Cette technologie visible à la Figure 1.10 est plus amplement décrite à la section 2.2.1. L'ITA propose deux aiguilles inclinées ayant chacune leur propre fil, ces derniers s'insèrent à tour de rôle dans la boucle formée par le précédent sous la préforme. Cette technologie crée une chaînette sous la préforme comme le montre la Figure 1.11.

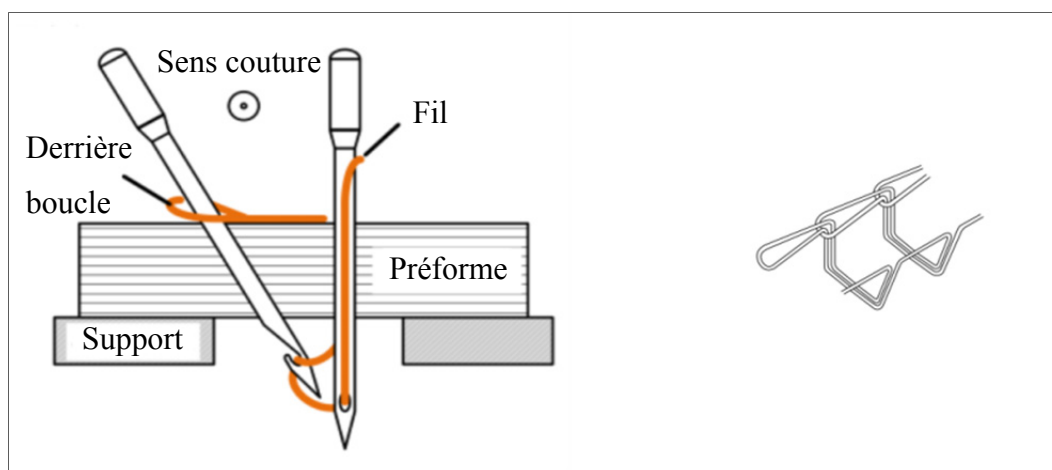


Figure 1.10 « 2Needle » OSS® développé par KSL  
Adaptée de Treiber (2011, p. 9)

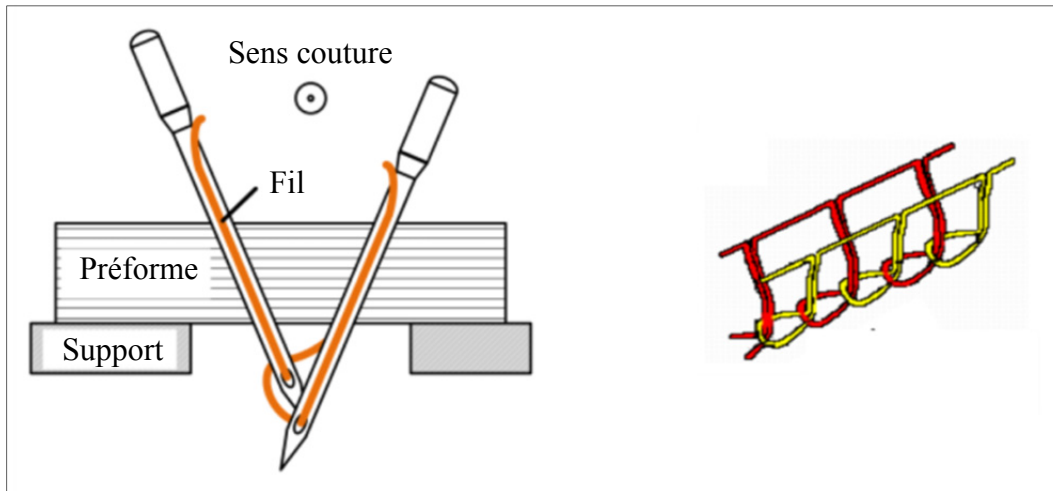


Figure 1.11 « One-sided sewing » développé par ITA  
Adaptée de Treiber (2011, p. 9)

### 1.2.5 Touffetage

À l'origine, le touffetage, *tufting* en anglais, était une technique textile permettant de confectionner des tapis et vêtements chauds. Ensuite, la technologie a été adaptée et développée afin de devenir une technologie d'assemblage et de renforcement transversal pour des matériaux composites à matrice polymère et renfort fibreux. Le touffetage est aussi appelé piquage.

Le touffetage est l'insertion totale ou partielle d'un fil dans le sens orthogonal à la surface de la préforme que l'on souhaite renforcer. Une aiguille unique pénètre la préforme selon un angle prédéfini afin d'insérer le fil. Une boucle se forme alors dans le support, sous la préforme, comme schématisée à la Figure 1.12. Le fil se maintient dans la préforme uniquement par les forces de friction : il n'y a ni nœud ni attache entre les boucles. L'insert d'une boucle est aussi appelé *touffe*.



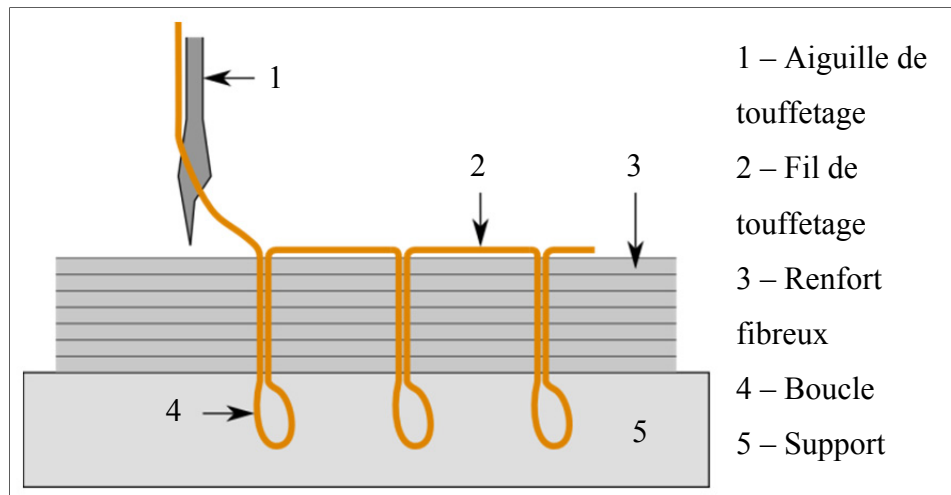


Figure 1.12 Schématisation du touffetage

Le touffetage est une technologie de couture dans la mesure où elle consiste en l'assemblage de deux ou plusieurs morceaux d'étoffe à l'aide de points exécutés avec du fil et une aiguille. De plus, la technologie ne nécessite l'accès qu'à un seul côté de la préforme. Elle fait ainsi partie des technologies d'assemblage et de renfort OSS®.

Le touffetage est une solution intéressante de renforcement localisé d'une préforme notamment concernant les propriétés hors-plan. L'insertion de touffes est particulièrement intéressante pour combattre le délaminage des matériaux composites en dissipant l'énergie causée par un impact.

Comme toutes les technologies de couture, le touffetage est utilisable uniquement sur fibres sèches. Le touffetage est souvent comparé à la technologie de Z-Pinning utilisée avec des fibres préimprégnées de résine. Bien que le touffetage ajoute une étape de préformage lors du processus, il semble viable de réaliser cette opération dans un but de renforcement local des propriétés. En effet, la mise en application est relativement simple et rapide. Treiber (2011) recense de nombreux travaux sur le touffetage et présente un excellent travail sur les performances du touffetage à application composite. Le touffetage y est décrit comme un moyen efficace pour renforcer la résistance des joints entre raidisseur et peau.

Le Tableau 1.1 reprend les caractéristiques des quatre procédés précédemment introduits. Les informations sont extraites de Treiber (2011), la vidéo ITA (2013) et du site de KSL.

Tableau 1.1 Comparaison des caractéristiques des techniques de couture aveugle

| <b>Caractéristique</b>                               | <b>Blind*<sup>1</sup></b> | <b>2Needle*<sup>2</sup></b> | <b>ITA*<sup>3</sup></b> | <b>Tufting*<sup>4</sup></b> |
|------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Vitesse maximale de couture (pts/min)                | 500                       | 500                         | 1400                    | 500                         |
| Pas de couture (mm)                                  | 5 à 12                    | 4 à 8                       | 3 à 7                   | 3 à 18* <sup>5</sup>        |
| Épaisseur min - max de préforme (mm)                 | 2 à 7                     | 2 à 15                      | 5 à 8                   | 2 à 35                      |
| Angle de pénétration des aiguilles (°)* <sup>6</sup> | 90                        | 45 et 90                    | 55 et 125               | 45 à 135                    |

\*<sup>1</sup> « Blindstitch » développée par KSL,

\*<sup>2</sup> « 2Needle » OSS® développée par KSL,

\*<sup>3</sup> « One-sided sewing » développée par ITA,

\*<sup>4</sup> « Tufting Head » développée par KSL,

\*<sup>5</sup> dans la pratique, il est possible de faire une longueur infini, mais on perd l'intérêt,

\*<sup>6</sup> par rapport au plan de la préforme.

### 1.2.6 Inventaire des autres procédés

- Le Z-pinning

Le Z-pinning est une technique d'insertion de renforts, appelés des Z-pins, dans la direction orthogonale à la surface de la préforme. Les renforts peuvent être en métal ou en fibres précurties. La principale méthode d'insertion utilise un marteau ultrasonique à hautes fréquences de vibration comme schématisée à la Figure 1.13. C'est l'équivalent du touffetage pour les produits préimprégnés.

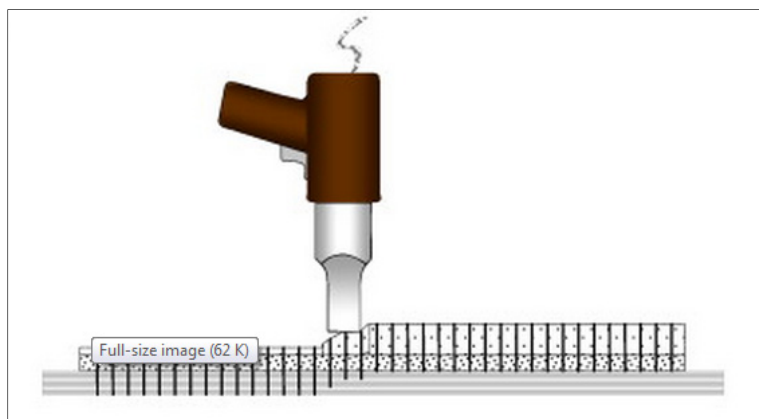


Figure 1.13 Z-Pinning  
Tirée de Mouritz (2007, p. 2386)

- Les renforts de matrice

De nombreux additifs peuvent s'ajouter à la composition de la résine, qu'il s'agisse de fibres courtes, nanotubes de carbone ou de particules ou poudres à fonctionnalités diverses. Toutefois, l'ajout de renforts change le comportement des matrices entraînant des variations dans le procédé de mise en œuvre. Des ajustements sont nécessaires afin de s'assurer la compatibilité des nouveaux mélanges.

### 1.3 Effets des paramètres de couture et de touffetage sur les préformes

Qu'elle soit partielle ou totale, l'insertion de fil par touffetage ou par couture n'est pas anodine. De précédents travaux montrent que la couture OSS® peut significativement améliorer la résistance au délaminage et améliorer la résistance des joints. Cependant l'insertion localisée forme une perturbation qui peut s'avérer néfaste si certains paramètres ne sont pas optimisés. Il s'agit de la densité, du patron de couture et de la profondeur et de l'angle d'insertion.

### 1.3.1 Densité de couture

La région de la zone d'insertion de renfort en Z est une zone propice à l'initiation des fissures. Dransfield *et al.* (1994) présentent de nombreuses études dont les résultats de renforcement des préformes par couture sont dispersés, variant de 10% de pertes jusqu'à 40% d'améliorations de certaines propriétés intralaminaires et interlaminaires. Il affirme qu'il semble y avoir un minimum et un maximum de renfort nécessaire afin de renforcer la résistance à la propagation de fissure.

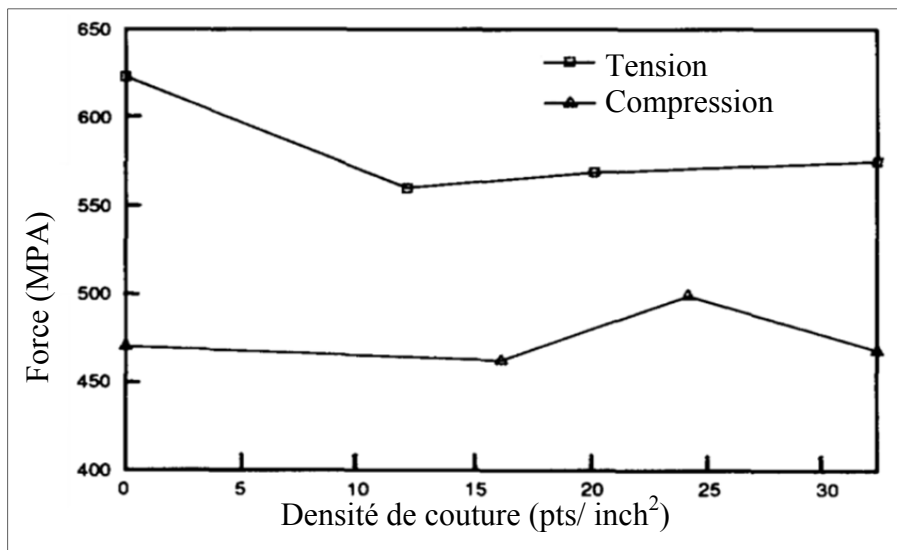


Figure 1.14 Force de tension et de compression à la rupture  
en fonction de la densité de couture  
Adaptée de Dransfield *et al.* (1994, p. 309)

La Figure 1.14 montre l'influence de la densité de couture sur deux propriétés d'une préforme plate. Afin de ne pas réduire les performances des matériaux composites, Mouritz *et al.* (2000) recommandent une densité de 0.4 à 25 points par cm<sup>2</sup>, ce qui correspond à un taux de fibres en Z de 0.5 à 5%. D'autres comme Yudhanto *et al.* (2013 et 2014) et Tan *et al.* (2010) réalisent leurs expériences avec une densité de 0.3 à 11 points par cm<sup>2</sup>. Encore une fois, les résultats sont satisfaisants dans cet intervalle de densité. Cependant, Farley *et al.* (1992) et Dransfield *et al.* (1994) conviennent que le renforcement des propriétés interlaminaires se fait en général au dépend des intralaminaires.

### 1.3.2 Patron de couture

Le patron de couture est également un facteur important. En effet, l'insertion de fibre selon un patron peut causer des chemins préférentiels pour la propagation de fissure au sein de la préforme. La Figure 1.15 présente les quatre principaux patrons de couture.

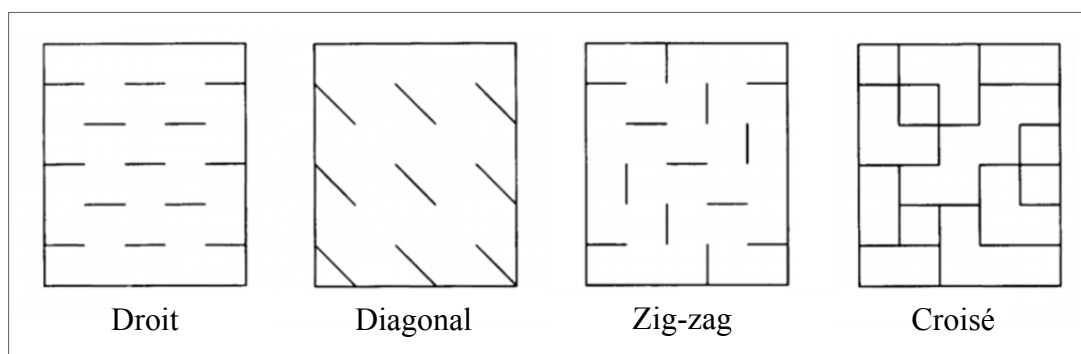


Figure 1.15 Principaux patrons de couture  
Adaptée de Dransfield *et al.* (1994, p. 313)

Pour le touffetage, les patrons sont au nombre de deux : triangulaire et rectangulaire et sont représentés à la Figure 1.16. Ces deux patrons sont modulables avec les longueurs  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$ . Si  $a$  et  $b$  sont égales alors le patron est triangulaire équilatéral, de même si  $c$  et  $d$  sont égales, le patron est carré.

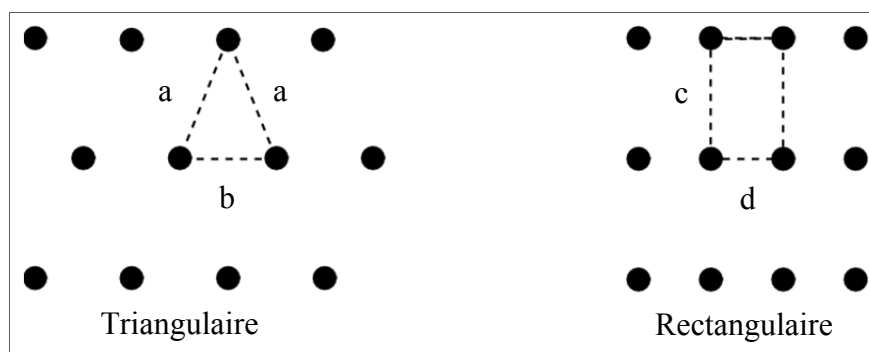


Figure 1.16 Patron de touffetage

L'expérience a démontré que le patron carré peut créer des canaux de résine lors de l'imprégnation si les points sont trop rapprochés surtout dans des NCF dans le sens de la fibre d'après Chang *et al.* (2006). De telles lignes de touffetage favoriseront également la propagation des fissures le long de l'une d'elles. Ce défaut est plus largement traité à la section 1.6.

### 1.3.3 Profondeur d'insertion

Cette section concerne uniquement le touffetage.

Les machines de touffetage permettent d'insérer jusqu'à une épaisseur de 35 à 40 mm mais, les études se font plutôt sur des préformes de 5 et 10 mm d'épaisseur. Dell'Anno (2007) a tout de même réalisé une préforme de 38 mm d'épaisseur.

Pour le touffetage total, l'aiguille pénètre la totalité de la préforme et idéalement le support. Celui-ci peut être une mousse de polystyrène extrudé, une mousse silicone comme Dell'Anno (2007), un film de nylon comme Dell'Anno (2007), un tapis de silicone, ou encore une addition de plusieurs supports. La boucle se trouve alors hors de la préforme une fois que cette dernière est retirée du support. Malheureusement, les boucles en surface risquent de créer une déformation locale lors de l'imprégnation d'après Mouritz *et al.* (2000). Des méthodes pour couper les boucles existent déjà dans l'industrie du tapis et s'avèrent viables pour le cas du touffetage selon Dell'Anno (2007).

En revanche, pour le touffetage partiel, l'aiguille ne ressort pas sous la préforme, la boucle reste dans la préforme évitant ainsi l'étape fastidieuse de découpe des boucles décrite ci-dessus. Cette pratique semble alors plus intéressante. Il faut cependant s'assurer que l'ensemble des plis soient maintenus ensemble.

Wittig (2002) présente cependant une intéressante combinaison de pré-assemblage de quelques plis par couture OSS® puis un touffetage des plis supérieurs dans la partie

pré-cousue au préalable. Le montage est visible à la Figure 1.17. Cette méthode qui permet de réaliser le touffetage directement dans le moule d'imprégnation et évite le déplacement de la préforme.

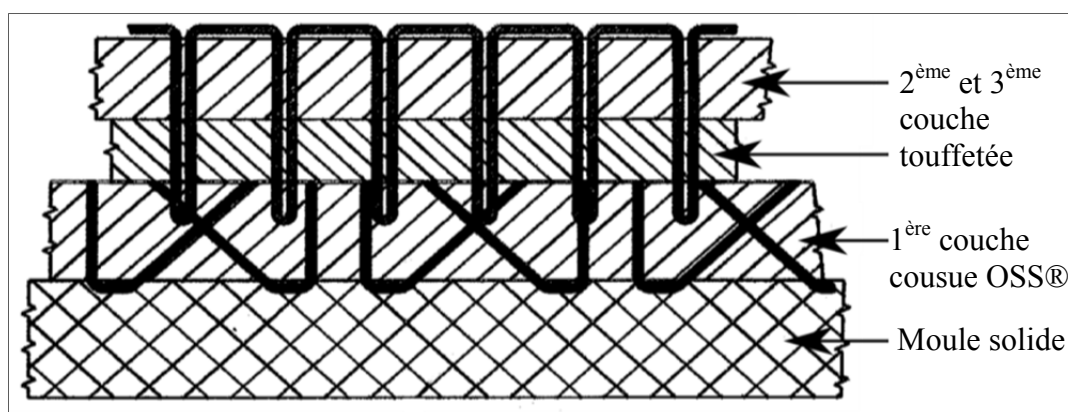


Figure 1.17 Préforme cousue OSS® et touffetée  
Adaptée de Wittig (2002, p. 1050)

Le touffetage partiel pose tout de même un problème de taille : il est difficile de s'assurer du positionnement des touffes par une méthode non destructive avant imprégnation. Dell'Anno (2007) affirme qu'il est difficile d'assurer un contrôle sur le touffetage partiel, ce qui complique assurément la certification de telles pièces composites. Pourtant il est essentiel que le renfort se positionne tel que prévu afin de renforcer les éléments de la préforme. La Figure 1.18 présente une photographie d'une nouille touffetée, cependant on observe la boucle hors de la nouille. Initialement, l'insertion devait être réalisée à 14 mm de profondeur dans la préforme non compactée. Or la touffe est insérée d'uniquement 4.37 mm dans le matériau composite. Le touffetage est donc un échec : la préforme n'est pas renforcée et un défaut est introduit par le passage de l'aiguille dans la nouille.

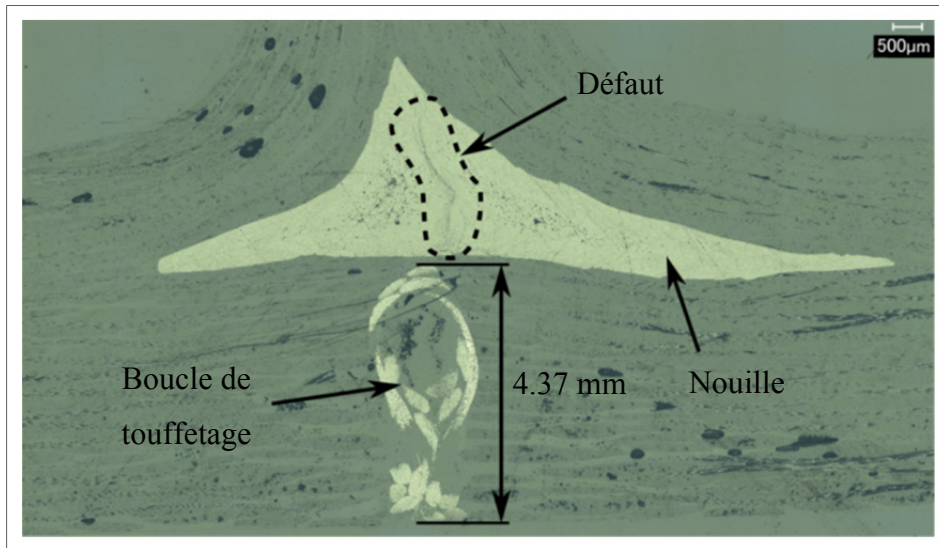


Figure 1.18 Glissement de la boucle de touffetage hors de la nouille

### 1.3.4 Angle d'insertion

Cette section concerne uniquement le touffetage.

Après détermination de la position du touffetage, il faut définir l'angle d'insertion des touffes. Selon la géométrie de la préforme et son application, l'insertion selon un angle différent de  $90^\circ$  par rapport au plan du tissu peut s'avérer utile. Or l'outillage de base du fournisseur KSL n'est pas adapté. En effet, le pied presseur de base de touffetage possède une géométrie rendant impossible la pression localisée autour du point de pénétration de l'aiguille pour un angle autre que  $90^\circ$ , il ne remplit donc pas son rôle. La Figure 1.19.a présente le pied de base. Afin de répondre aux exigences de l'industrie, Treiber (2011) présente une géométrie fortement épurée afin de ne presser que très localement autour de la zone de pénétration de l'aiguille. Le fabricant de machine KSL Keilmann présente aussi un nouveau pied adapté pour le touffetage à angle. Ces géométries sont respectivement présentées en b) et c) de la Figure 1.19. De tels pieds permettent également l'insertion des touffes dans des zones difficiles d'accès de par leur faible encombrement.



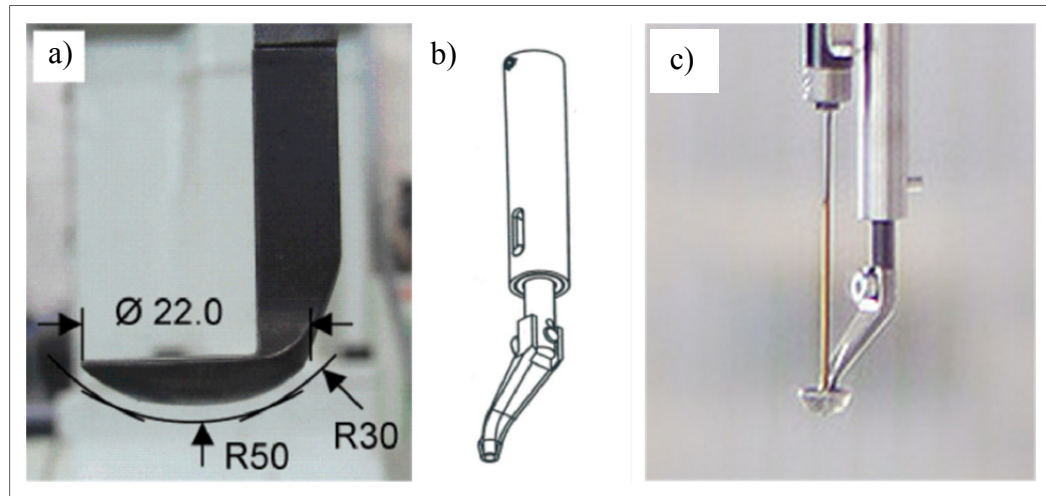


Figure 1.19 a) pied presseur d'origine b) pied presseur modifié  
 c) nouveau pied presseur  
 a) et b) Tirée de Treiber (2011, p. 33)  
 c) Tirée de KSL : tufting head

## 1.4 Matériaux

### 1.4.1 Renfort fibreux

Il existe de nombreuses structures textiles comme classifiées à la Figure 1.20. De l'unidirectionnel (UD) aux tissages 3D en passant par les tissus 2D plus classiques, un grand nombre de renforts sont utilisés dans les matériaux composites à renfort fibreux. Les UD sont particulièrement utilisés en matériaux préimprégnés notamment avec les techniques de placement filamentaire. Liés les uns aux autres, les UD forment un NCF. Les tissus 2D classiques présentent des fibres uniquement dans deux directions perpendiculaires selon des armures présentées à la Figure 1.3. La découpe et l'empilement de tels tissus permettent d'obtenir des préformes plus ou moins épaisses. Pour finir, les tissus 3D sont en pleine expansion, ils permettent la création de structures épaisses ayant des propriétés intéressantes hors du plan. Il est également possible de créer directement des formes complexes 3D comme présentées à la Figure 1.4.

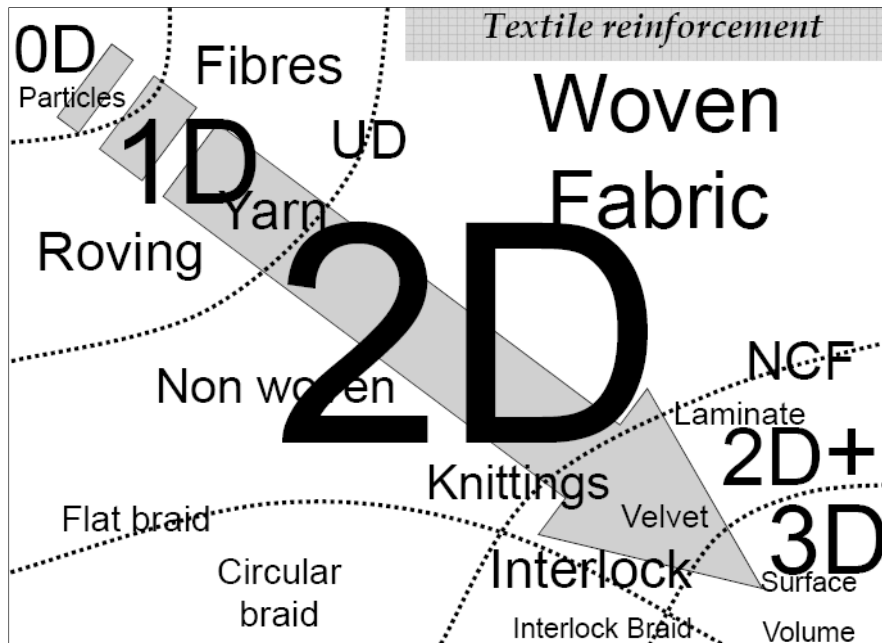


Figure 1.20 Classification des renforts textile  
Tirée de Legrand (2012, p. 4)

Comme introduit précédemment, la couture est réalisée sur des fibres sèches et non sur des fibres préimprégnées de résine. L'aiguille ne pourrait en effet pas pénétrer la fibre préimprégnée durablement sans s'engluer dans la résine et détériorer la matière. Mais le problème est à prendre dans le sens contraire, l'industrie présente un intérêt toujours grandissant pour les matériaux composites à fibres sèches. Ceci s'explique par la facilité de conditionnement, des procédés de cuisson à outillage simplifié mais surtout un coût globale de production nettement moins onéreux (Kassapoglou (2010) et Gurit). Cependant, les fibres sèches sont bien plus délicates à manipuler. Le drapé d'un tissu est la manière dont le tissu se place et suit la forme du moule. Contrairement aux préimprégnés, les tissus de fibres sèches ne se maintiennent pas d'eux-mêmes. Ils ont tendance à mal se draper. Il est nécessaire de les préformer selon la géométrie finale souhaitée. La couture ainsi que le touffetage ont été développés pour remplir la fonction d'assemblage et de renforcement des propriétés notamment hors du plan.

Les matériaux les plus usuels sont le verre (95% en 2014 selon Witten *et al.* (2014) ) puis viennent le carbone, certains aramides comme le Kevlar® et autres fibres synthétiques. Une fois de plus, c'est la fonction de la préforme qui déterminera la matière adéquate, par exemple en aéronautique, c'est le carbone qui est le plus largement utilisé. Selon l'environnement et les contraintes liées à l'utilisation, les matériaux seront plus ou moins intéressants aux vues de leurs propriétés assez diverses. Le prix est généralement un facteur non négligeable, d'autant que ces matériaux ont divers grades offrant des propriétés largement étendues.

Le verre présente un bon rapport performance/prix mais une résistance à la fatigue et un module d'élasticité plus faible que les autres fibres. Il est utilisé pour des coques de bateau, l'industrie éolienne, le renforcement d'objets, etc. Le Kevlar a une bonne résistance en traction ainsi qu'aux chocs et à la fatigue en traction tout en ayant une masse volumique faible. En revanche, la résistance en compression est faible et il est sensible aux rayons ultraviolets et à l'humidité. Le Kevlar est également difficile à travailler et cher, il sert néanmoins à la réalisation de pièces aéronautiques, articles de sport haut de gamme et renforcement de coques. Enfin bien que cher, peu résistant aux chocs et que les fibres sont cassantes, le carbone possède d'excellentes propriétés mécaniques aussi bonnes en traction qu'en compression. Il possède une très bonne résistance aux températures élevées, aux attaques chimiques et est un bon conducteur thermique et électrique. Il est utilisé dans de très nombreux domaines. En aéronautique ce sont ses excellentes performances mécaniques en traction, sa parfaite tenue en compression et ses propriétés de résistance à la fatigue nettement supérieures aux autres types de fibres qui font du carbone le matériau le plus utilisé.

### 1.4.2 Fil de renfort

Selon Dransfield *et al.* (1994), les fils de carbone, de verre et de Kevlar sont tous trois adéquats pour la couture de par leurs propriétés. L'augmentation du diamètre améliore la résistance du fil au détriment de sa flexibilité. Aussi plus le fil est gros, plus le risque d'endommager la préforme est grand. Tan *et al.* (2013) étudient entre autres l'influence de l'épaisseur du fil de couture et ses conclusions appuient les affirmations de Dransfield *et al.* (1994). Enfin, le fil doit être souple afin de supporter la courbure d'une boucle et le fini de surface doit favoriser l'adhésion avec la matrice tout en résistant à l'abrasion qu'il endure durant le procédé de renforcement.

Selon Dell'Anno (2007), un fil idéal présente les propriétés suivantes :

- Le fil est constitué de 2 ou 3 brins
- Chacun des brins est un multifilament ayant une torsion supérieure à 260 tr/m
- Le fil constitué des multiples brins est retordu en fil *retors* (définition ci-dessous) avec une torsion supérieure à 300 tr/m
- Le diamètre du fil est inférieur à 0.5 mm

Un fil *retors* désigne un fil constitué de deux ou de plusieurs fils simples retordus ensemble en une seule opération de retordage. La Figure 1.21 illustre un fil *retors*, le numéro 1, tordu dans le sens « S » composé de deux fils simples, les numéros 2 et 3, tordus dans le sens « Z ».

C'est la torsion qui apporte la flexibilité nécessaire pour supporter la courbure de la boucle. Certains fabricants comme Schappe Technical Thread proposent des fils de couture composés de filés de fibres. Un filé de fibres est un fil constitué de fibres courtes, et non pas des filaments continus, qui sont assemblées en filature par torsion pour créer un fil.

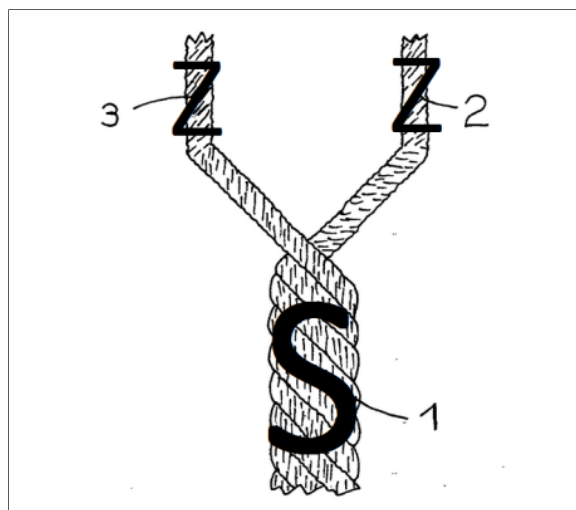


Figure 1.21 Fil retors constitué de 2 brins  
Tirée du Brevet EP 1254978 B1

ON constate que malgré ces recommandations, certaines études utilisent des fils plus fins. C'est le cas de De Verdiere *et al.* (2009) qui travaillent avec un fil de carbone brin unique HTA 1K, soit 1000 filaments du fabricant de fil Toho Tenax. Herkt *et al.* (2006), utilise un fil touffetage de 80 Tex, soit un fil composé d'un brin épais ou de deux petits brins.

Comme Dransfield *et al.* (1994) l'annonce, les matériaux les plus fréquemment utilisés sont en carbone, en verre ou encore en kevlar. Cependant certains fils polymères et fils solubles sont également étudiés.

Concernant la réserve de fil de couture, il est recommandé d'utiliser un cône plutôt qu'un cylindre car le cône aide à dévider le fil avec moins de friction.

Dans le cas particulier du touffetage, il est important de s'assurer que le fil est fourni sans tension lors du processus pour que les forces de friction soient les seules forces en jeu et maintiennent parfaitement le fil. Les fabricants de tête de couture, tel KSL, incluent un système délivreur de fil à tension constante et contrôlée.

## 1.5 Imprégnation de résine

Une étude européenne du marché des matériaux composites, par Witten *et al.* (2014), montre que les procédés les plus courants par revenus sont la pultrusion et l'enroulement filamentaire (40%) puis viennent les matériaux préimprégnés (37%). Les techniques d'imprégnation de résine, notamment par RTM ne représentent que 12% des revenus de l'industrie manufacturière. Cependant avec l'essor de matériaux composites en aéronautique et le besoin de réaliser des pièces structurales de grandes tailles, l'utilisation de préimprégnés avec autoclave devient complexe et extrêmement coûteuse. L'achat d'un autoclave et son utilisation sont tellement onéreux que des solutions de préimprégnés sans autoclaves (Out-of-autoclave, OOA) sont étudiées (Gardiner (2011)). Witik *et al.* (2012) assure qu'il est possible de réduire de 15% le coût d'une pièce en passant d'une solution par autoclave à une imprégnation de résine sous vide avec utilisation d'un four. Un procédé OOA permet également de réduire de 50% les émissions de CO<sub>2</sub>.

Les matériaux composites à fibres sèches nécessitent des techniques d'infusion sous le nom de *Liquid Composite Moulding* ou LCM. Il existe de nombreuses variantes de procédés d'imprégnation ou d'infusion de résine. On peut citer la RTM (*Resin Transfer Moulding*), VARI (*Vacuum Assisted Resin Infusion*), RFI (*Resin Film Infusion*) ou encore RTM Light et bien d'autres. Les plus courantes sont la RTM et la VARI. Dans le premier procédé, la résine est injectée dans un moule rigide contenant le renfort fibreux. Toutefois, il faut s'assurer que la couture n'apporte pas de surépaisseur qui compliquerait l'imprégnation. En effet, le moule étant rigide, la cavité a un volume constant. Une surépaisseur entraîne une compaction accrue des fibres et ainsi un taux de fibres supérieur aux prédictions. Ceci affecte l'imprégnation, il sera plus compliqué de mouiller la préforme de façon homogène, pouvant entraîner la formation de zones sèches ainsi que des zones riches en résine comme le montre la Figure 1.22. Dans la littérature, le RTM est le procédé utilisé par Cartié *et al.* (2006), De Verdiere *et al.* (2009) ou encore Treiber (2011).

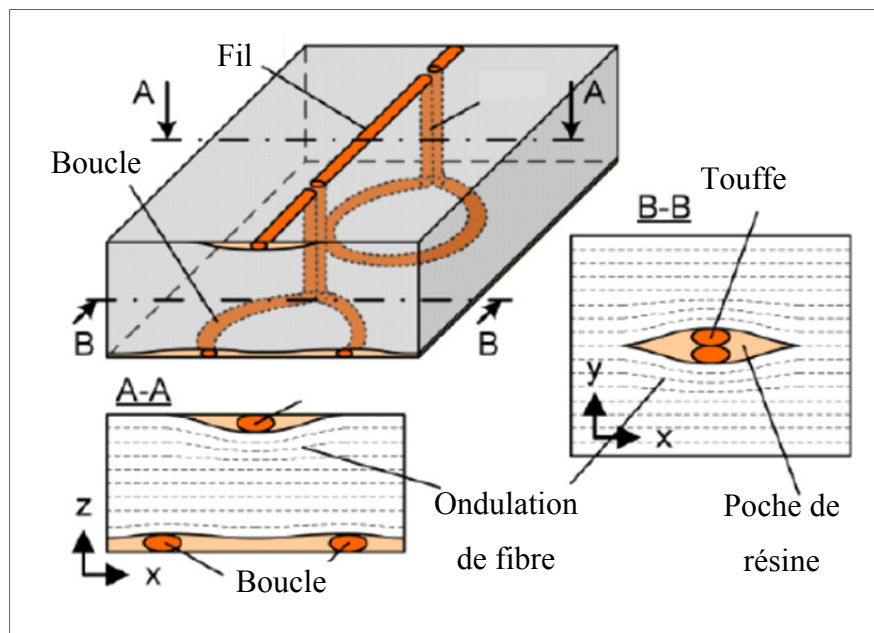


Figure 1.22 Schéma de l'insertion de touffes dans le composite  
Adaptée de Treiber (2011, p. 55)

Pour le procédé VARI, la préforme sèche est placée sur un moule et est recouverte par un sac étanche. Le montage est placé sous vide afin de compresser la préforme. C'est le système sous vide qui va permettre à la résine de s'introduire et de mouiller l'ensemble de la préforme. Cette méthode utilisée par Henao *et al.* (2010) permet d'imprégner plus facilement des préformes localement irrégulières. Par exemple, la présence de boucles en surface est moins problématique car c'est le sac qui comprime la préforme et non un moule dur. Ceci implique toutefois qu'une des faces du matériau, celle du sac, n'aura pas un fini parfaitement lisse.

Quelle que soit la méthode utilisée, Dell'Anno (2007) annonce que la couture, le touffetage et de façon plus générale une structure 3D affecte l'écoulement de résine et donc l'imprégnation. En présence de couture et de touffetage l'imprégnation est d'autant plus complexe en raison de la présence de renfort. Celui-ci apporte des perturbations qui peuvent générer des zones sèches ou de la porosité. Dell'Anno (2007) note toutefois que le touffetage à faible densité peut aider l'écoulement de résine. En revanche, comme le montre la Figure

1.23, une forte densité de touffetage est néfaste pour l'imprégnation ainsi que pour les propriétés dans le plan du matériau.

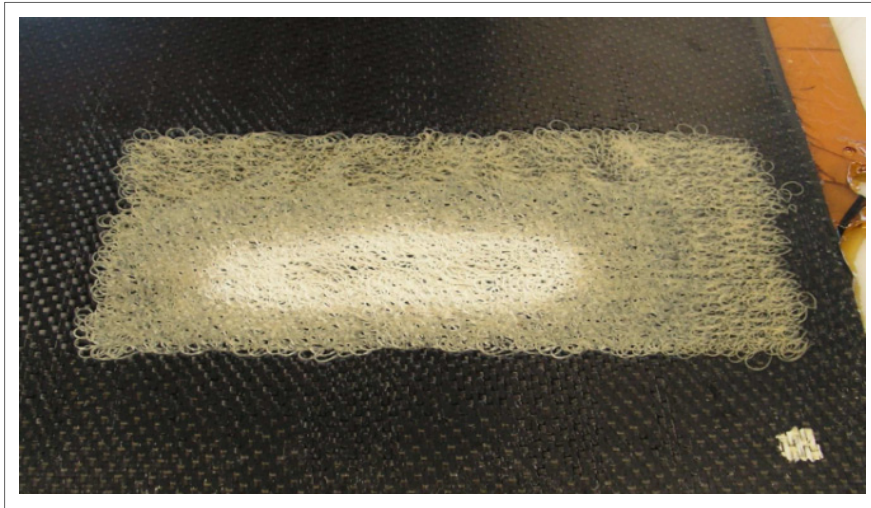


Figure 1.23 Zone sèche dû à la forte densité de touffetage  
Tirée de Dell'Anno (2007, p. 69)

Le touffetage partiel ne semble cependant pas affecter de façon significative l'imprégnation. Dell'Anno (2007) explique ce fait par l'absence de boucle en surface. Farley *et al.* (1992) proposent de raser les boucles en surface et affirme que la solution est viable. Il existe dans l'industrie des méthodes qui permettent de mettre en œuvre ce procédé.

## **1.6 Défauts communs rencontrés lors de l'utilisation de renforts fibreux secs**

Les défauts rencontrés lors de l'utilisation des renforts fibreux secs sont discutés selon deux aspects de la production : la manipulation des fibres et l'insertion d'un fil de renfort par couture ou touffetage.



### 1.6.1 Défauts communs engendrés par la manipulation du renfort fibreux

La manipulation des préformes peut être une source importante de défauts. L'automatisation de ses étapes est d'ailleurs en pleine expansion. Voici quelques défauts qui peuvent être introduits durant la manipulation des renforts fibreux :

- Désalignement, cisaillement des fibres, étudié par Potter *et al.* (2008),
- Effilochage des renforts remarqué par Dell'Anno (2007) et visible à la Figure 1.24,
- Erreur de séquençage,
- Ajout de contaminants,
- Glissement de plis au sein de l'empilement, etc.

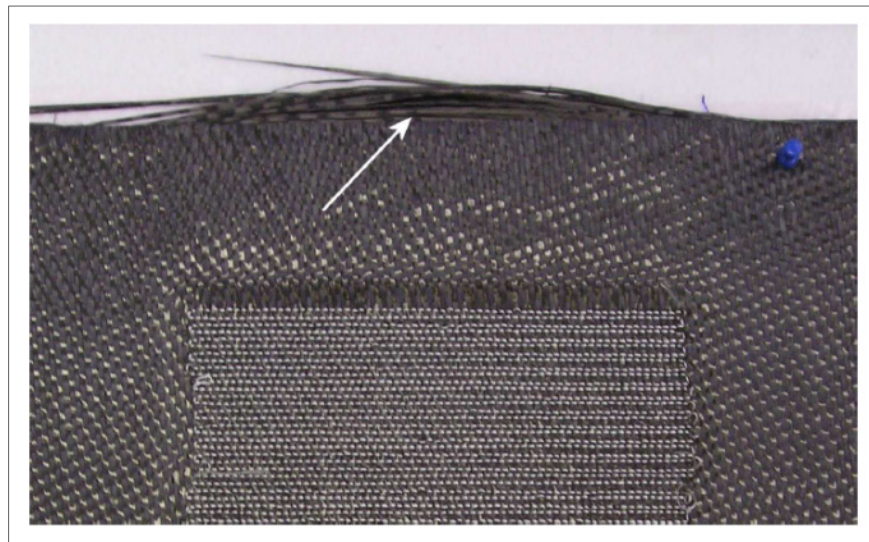


Figure 1.24 Effilochage d'un renfort lors d'un touffetage  
Tirée de Dell'Anno (2007, p. 29)

Dans certaines études, l'utilisation de bandes adhésives sur les bords des tissus permet de faciliter les manipulations telles que le drapage, les déplacements, maintien durant renforcement, etc. Cependant, ces bandes adhésives laissent des résidus qui contaminent la préforme et affaiblissent l'adhésion avec la matrice.

### 1.6.2 Défauts communs engendrés par l'insertion de fils de renfort

Dès lors que le procédé nécessite la pénétration d'une aiguille dans la préforme, il est forcément une source de contraintes et engendre des défauts. De plus, l'ajout d'un fil de renfort nécessite un volume libre précédemment inexistant. Il est impossible d'annuler ces perturbations. L'objectif est donc de les rendre les plus insignifiantes possible.

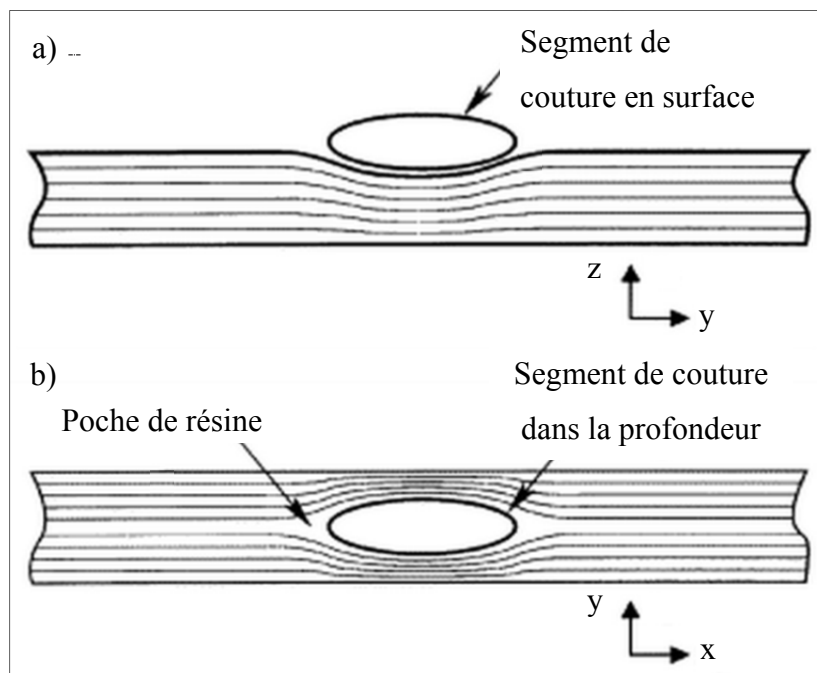


Figure 1.25 Déformations engendrées par le fil de couture

- a) Compression des fibres dans le plan
  - b) Écartement des fibres dans la préforme
- Adaptée de Mouritz *et al.* (2000, p. 3)

Mouritz *et al.* (2000) présentent notamment les déformations du renfort dues à l'ajout d'un fil de renfort. La Figure 1.25 présente la compression des fibres du plan ainsi que l'écartement des fibres avec création d'une poche de résine. Treiber (2011) observe le même type de défaut visible sur la Figure 1.26.a. Localement il y a une perte de géométrie également observée par Dell'Anno (2007). De plus l'aiguille de touffetage détériore des fibres de la préforme. Les effets sont similaires lors de la couture. Ces deux phénomènes sont de parfaits points de faiblesse pour des amorces de rupture.

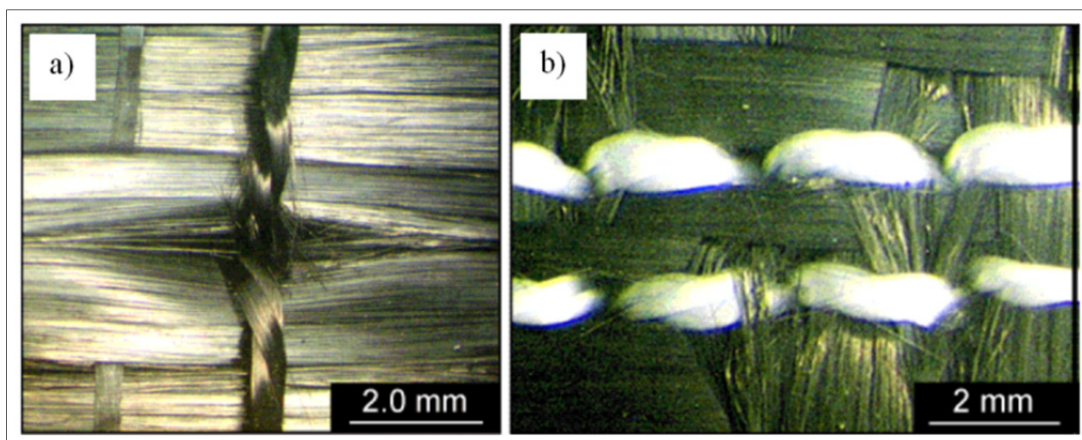


Figure 1.26 a) Désalignement des fibres par l'insertion d'une touffe  
 b) Casse de fibres par la pénétration de l'aiguille  
 Tirée de Treiber (2011, p. 38)

Une fois la préforme imprégnée de résine, de nouveaux défauts sont visibles, notamment les poches de résine. On observe de petits volumes créés par le désalignement des fils de la préforme. Ces zones vides de fibres sont remplies de résine. Dans le cas extrême, ces poches de résines se touchent pour former des canaux de résine. De tels canaux de résine sont observés à la Figure 1.27 pour un patron de touffetage carré tandis qu'un patron triangulaire aide à la formation de poches de résine. Dell'Anno (2007) déclare que les préformes cassent le long d'une ligne de touffetage. Comme avec la couture, les fissures s'amorcent aux zones faibles : bris de fibres, poches de résine, etc.

On note que le patron carré (introduit page 17) crée des zones riches en résine plus imposantes que le patron triangulaire mais crée moins de désalignement des fibres. Toutefois, le patron carré compacte davantage les fibres de par le plus grand volume de la zone riche en résine.

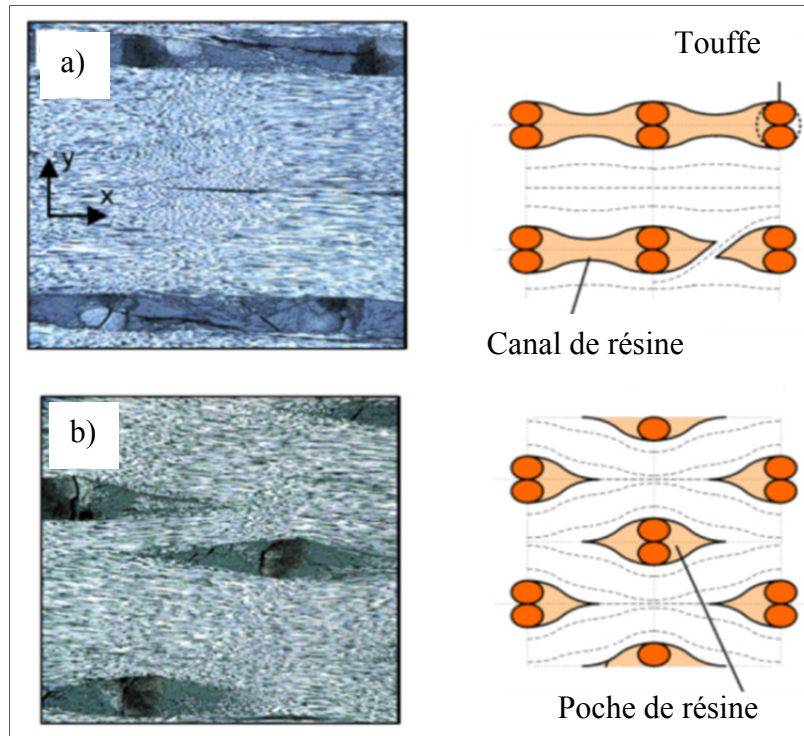


Figure 1.27 a) Canaux de résine pour patron carré  
 b) Poches de résines pour patron triangulaire  
 Adaptée de Treiber (2011, p. 58)

Un autre aspect non négligeable est le fait que la préforme renforcée est placée dans un moule puis comprimée par un contre-moule ou par le sac durant l'imprégnation. Ceci a tendance à écraser le fil de renfort. Dell'Anno (2007) explique que ce phénomène schématisé à la Figure 1.28.a) entraîne une difficulté à imprégner la préforme. Ainsi il a été confronté à des poches d'air coincées autour de touffes et des touffes partiellement mouillées. La Figure 1.29 montre des photos de ces deux phénomènes observés à l'aide d'un microscope.

La couture, comme le touffetage, a tendance à perturber l'imprégnation par divers phénomènes. Malgré tout, les possibles pertes de propriétés sont en partie atténuées car le touffetage améliore les performances du laminé.

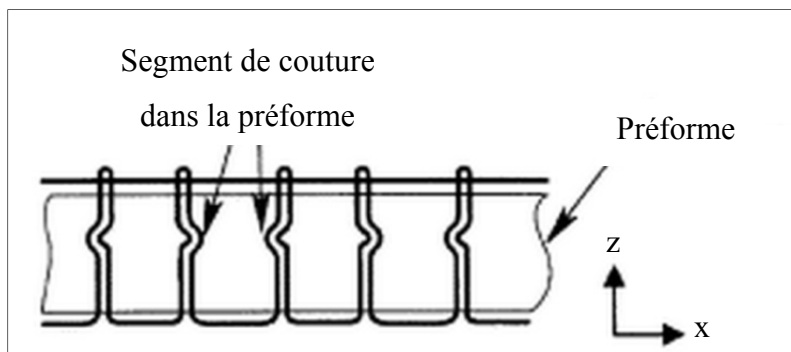


Figure 1.28 Déformation du fil de renfort par compression  
Adaptée de Mouritz *et al.* (2000, p. 3)

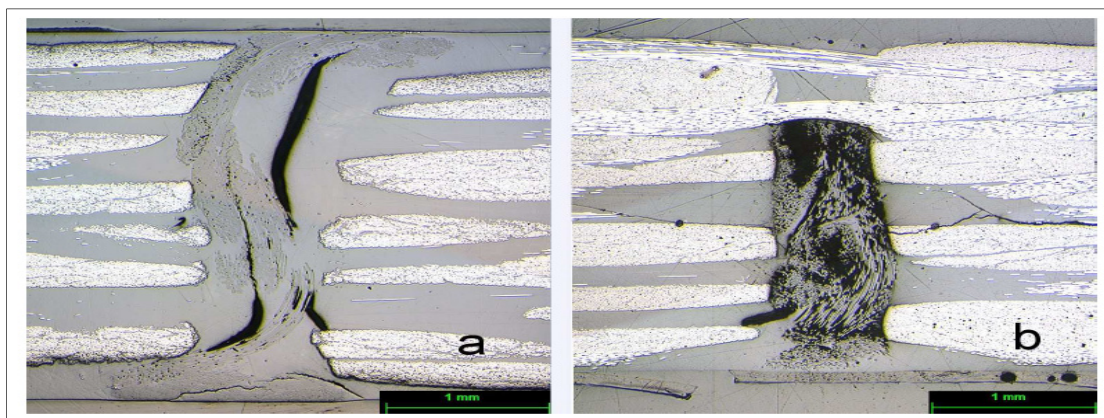


Figure 1.29 a) Poches d'air autour d'une touffe b) Touffe partiellement mouillée  
Tirée de Dell'Anno (2007, p. 68)

Sickinger *et al.* (2001) en complément des études de Sutherland (2000) et Farley *et al.* (1992) confirme que c'est la formation des nœuds dans la couture qui cause le plus de perte de propriétés. Ces deux dernières études ont prouvé qu'ôter le fil de couture dans une préforme ayant été renforcée permet de retrouver la quasi-totalité des propriétés. Il y a deux principales raisons aux dégradations des propriétés : la casse de fibre par la pénétration de l'aiguille et l'ondulation des fibres qui engendre une distribution non homogène des contraintes. De plus, même si les casses des fibres ne peuvent être négligées, Sickinger *et al.* (2001) affirme que c'est l'ondulation qui cause le plus de dégradation de propriétés. Néanmoins, l'auteur admet que le touffetage peut servir de renfort local et que la technologie est prête à être utilisée à l'échelle industrielle du fait de sa grande modulabilité.



## **1.7 Caractérisation mécanique des préformes**

Le sujet abordé est cette fois tellement vaste et développé dans la littérature que cette section s'intéresse uniquement à la caractérisation du touffetage dans les préformes. Cette section sert d'introduction au second objectif de ce mémoire introduit à la section 2.1.4 et développé dans le quatrième chapitre.

Le touffetage peut remplir deux fonctions. Il peut être en effet utilisé comme technique d'assemblage afin de maintenir les multiples plis de la préforme entre eux. Ou, il peut servir de technique de renforcement de la structure afin d'augmenter les propriétés de la préforme. Bien évidemment, ces deux fonctions du touffetage peuvent être appliquées à une même préforme.

### **1.7.1 Assemblage de préforme sandwich**

Henao *et al.* (2010) présentent des résultats particulièrement intéressants pour le touffetage comme technique d'assemblage de préformes sandwich. Il effectue cette étude à la suite des travaux de Stanley *et al.* (2001) ou encore Zheng *et al.* (2008) qui présentent de fortes détériorations dues à la couture. Pour les précédentes études, ce sont les boucles et nœuds de la couture qui sont mis en cause. L'auteur souhaite utiliser le touffetage comme substitut à la couture pour éviter les détériorations. Si la résistance à la compression ne présente que de faibles améliorations, selon la densité de touffetage, il est possible d'atteindre plus de 100% d'augmentation de la charge à la rupture. En termes de flambage, la charge maximale augmente de 50% tandis que la déformation du matériau sandwich diminue de 8 fois avec les renforts touffetés en carbone.

### **1.7.2 Renforcement de raidisseur en T**

Dell'Anno (2007) utilise un liant chimique à un taux de 2.5% afin d'assembler sa préforme puis le touffetage pour lier les deux « L » du voile avec la semelle. Le touffetage permet

aussi de renforcer la zone de la nouille avec une insertion de touffes à un angle de  $30^\circ$  comme l'indique le schéma de la Figure 1.30.

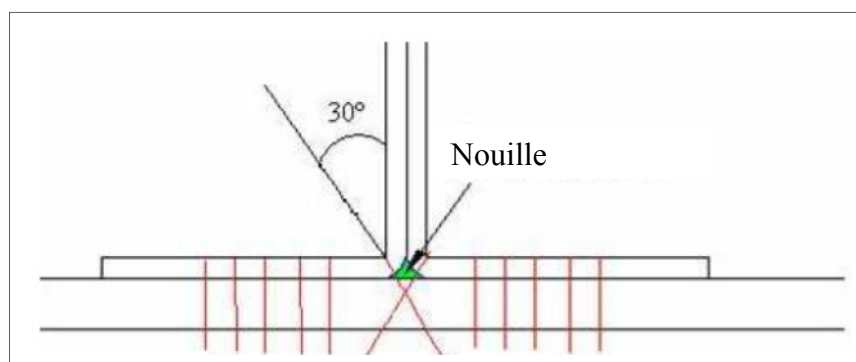


Figure 1.30 Schéma de renforcement de préforme  
Adaptée de Dell'Anno (2007, p. 36)

Premièrement, il est intéressant de noter que malgré le liant chimique déposé avant le touffetage, l'auteur ne perçoit pas de trouble de la pénétration des aiguilles. Le liant sert d'assemblage et le touffetage de renfort selon un patron carré avec un pas de 4 ou 8 mm. Le placement des « L » sur la semelle avec le touffetage est à surveiller. L'auteur rencontre des difficultés à placer les éléments sans déformation. La Figure 1.31, montre que les touffes entre semelle et peau se sont inclinées durant le procédé d'imprégnation.

Dell'Anno (2007) évoque le fait qu'il est complexe de gérer l'alignement des boucles dans des panneaux plats et qu'il est encore plus ardu de le faire avec des préformes complexes. L'auteur appuie l'intérêt d'un fil retors qui se compresse facilement afin d'accepter les contraintes du moule en RTM. Malgré ce défaut d'orientation des touffes, les résultats de répétabilité furent très bons et l'absorption d'énergie du raidisseur en T en test d'arrachement s'est avéré augmenter de 225% pour un patron carré à pas de 4 mm. De plus, il affirme que les boucles insérées à angle dans la nouille augmentent de 295% la résistance à l'arrachement pour un fil de verre et un pas de 4 mm.

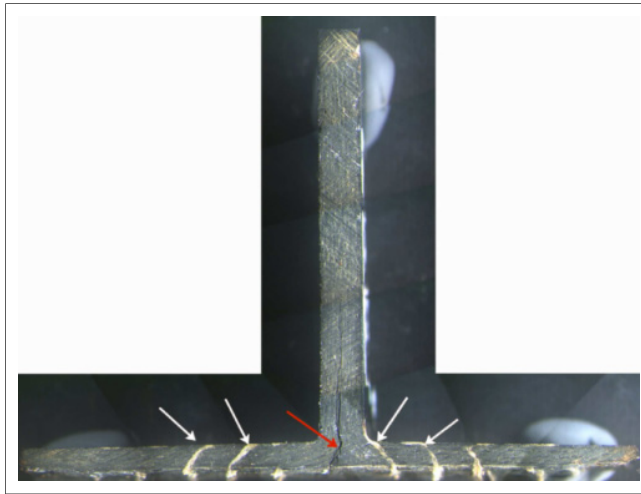


Figure 1.31 Désorientation des touffes  
Tirée de Dell'Anno (2007, p. 37)

Au niveau des dégradations engendrées par le renforcement des préformes, Dell'Anno (2007) affirme que le touffetage s'avère moins critique que la couture. Là où la couture fait perdre respectivement 45% et 30% en résistance à la traction et en rigidité, les pertes dues au touffetage sont de l'ordre de 10%. Il note également que l'on obtient des résultats similaires aux travaux de Patridge *et al.* (2005) et Grassi *et al.* (2002) sur le Z-pinning. Le touffetage semble bien s'intégrer aux préformes complexes, d'autant plus au vu des nettes améliorations en résistance à la délamination : jusqu'à 200%.

### 1.7.3 Mode d'arrachement des touffes

Dell'Anno (2007) a également étudié les modes de rupture des touffes. En mode II, la rupture des touffes intervient par cisaillement. Cependant, en mode I, il n'y a pas de schéma classique. La rupture en mode I sur un échantillon d'une touffe intervient dans le plan de délaminage. En revanche, pour un échantillon présentant plusieurs touffes, la rupture peut subvenir aussi bien dans le plan de délaminage qu'en dehors de ce plan. Enfin lorsque la touffe ne se rompt pas, il y a une déformation élastique puis un arrachement. Ces trois modes de rupture/arrachement sont visibles sur la Figure 1.32. Toujours en mode I, le touffetage permet d'obtenir des résultats jusqu'à 7 fois supérieurs en résistance à la propagation de



fissure selon la configuration de touffetage. Treiber (2011) obtient quant à lui une augmentation 6 fois supérieure pour cette même résistance à la propagation dans une plaque de NCF touffetée à 0.5%.

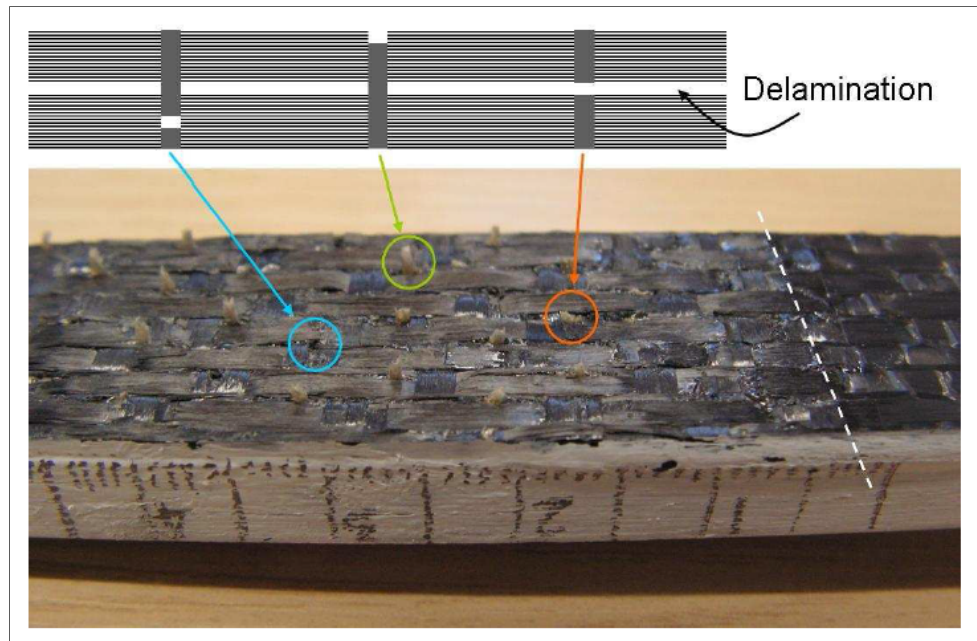


Figure 1.32 Test d'arrachement mode I : casse et arrachement de touffes  
Tirée de Dell'Anno (2007, p. 119)

L'auteur affirme également que l'arrachement ne peut se produire que pour des touffes droites. Si les touffes sont à angle, alors il se produit un cisaillement dans le plan de délamination et il est donc impossible de définir le mécanisme de rupture à ce stade des recherches.

#### 1.7.4 Résistance à l'arrachement de raidisseur en T

Cartié *et al.* (2006) réalisent des essais d'arrachement sur des raidisseurs en T renforcés par du touffetage sous l'ensemble de la semelle suivant un patron carré et un pas de 3.5 mm. On observe que le témoin non renforcé, (A) à (D) sur la Figure 1.33, atteint sa charge maximale lors des premières fissures (B) puis la fissure se prolonge (C) avant l'arrachement final (D). Le raidisseur renforcé, (1) à (4), supporte une charge maximale plus que doublée (3) et un

arrachement total (4) pour un déplacement doublé. Malgré l'apparition de fissures, la charge est répartie dans les touffes et la charge supportée continue d'augmenter permettant une nette augmentation de la résistance à l'arrachement. Cependant en aéronautique, c'est la première rupture qui est prise en compte est dans ce cas, les valeurs sont identiques, (1) et (A).

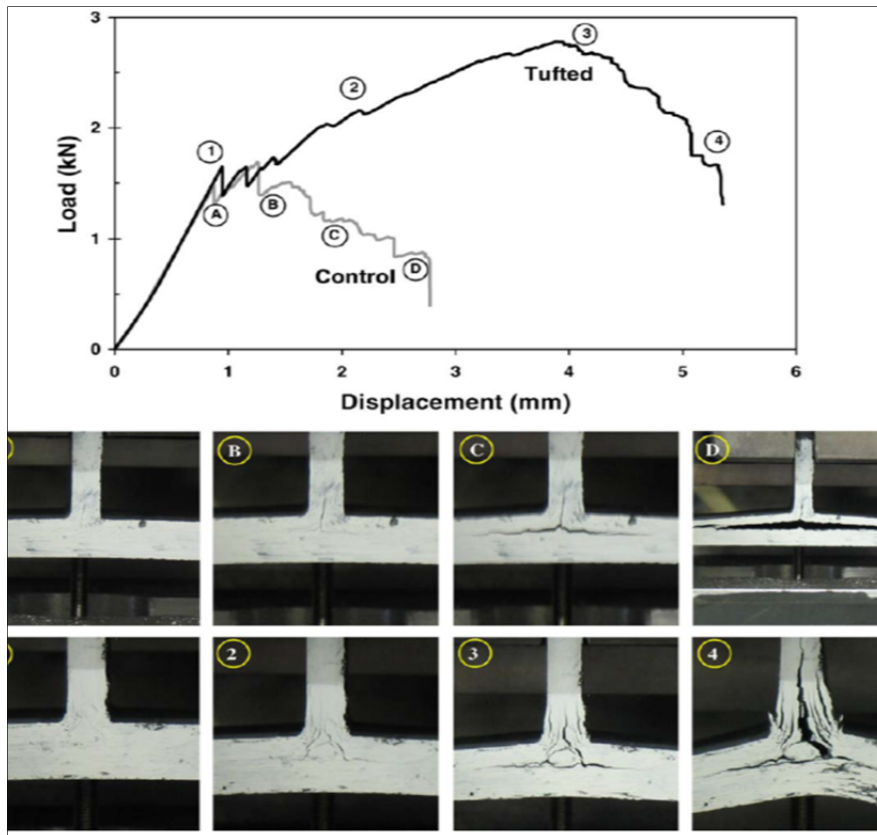


Figure 1.33 Test d'arrachement : (A) à (D) témoin non renforcé  
et (1) à (4) échantillon touffeté  
Tirée de Cartié (2006, p. 2536)

L'échantillon renforcé se brise totalement contrairement à l'échantillon de contrôle qui s'arrache le long de la fissure initiale et s'ouvre. Cette étude démontre l'intérêt du touffetage pour renforcer la zone de la nouille qui est la zone faible du raidisseur en arrachement.

L'auteur présente également des tests de fatigue à l'arrachement où l'échantillon casse après 780 000 cycles soit 12.5 fois plus qu'un échantillon non renforcé.

### 1.7.5 Conclusion sur la mise en œuvre du touffetage

Le touffetage est relativement facile à mettre en place en laboratoire et s'avère être une technique suffisamment aboutie pour être utilisée dans l'industrie. Les points d'amélioration importants sont l'ancrage des boucles dans la préforme et les casses de fibres par l'action de touffetage. En effet il suffit que quelques filaments soient brisés pour créer une zone faible amorçant la rupture du matériau selon Gao *et al.* (1993) et Johnson *et al.* (1995). De plus, le touffetage semble peu efficace pour servir seul de technique d'assemblage. Peut-être que la couture ou un liant chimique serait préférable pour procéder au préformage. Par la suite, le touffetage pourrait servir à renforcer les zones naturellement faibles de la préforme. Éventuellement, le touffetage pourrait se faire directement dans le moule et ainsi éviter le déplacement des préformes comme Wittig (2002) le fait à la Figure 1.17.

Le touffetage semble pouvoir s'adapter aux géométries et objectifs de l'industrie. Chaque projet doit faire l'objet d'une étude de cas afin de d'obtenir les valeurs optimales pour les suivants :

- Nature de la préforme et du support de préforme,
- Utilisation d'un liant chimique et autres constituants,
- Nature et diamètre du fil de renfort et d'aiguille,
- Patron d'insertion.

## 1.8 Projets antérieurs de panneaux assemblés et renforcés par couture

L'essor des panneaux assemblés par couture pour l'industrie aéronautique date des années 90 avec de nombreux travaux de la NASA. En 1992, Kullerd *et al.* (1992) proposent un panneau avec trois raidisseurs assemblés par couture et testé mécaniquement par Deaton *et al.* (1992). La Figure 1.34 présente la formation du panneau par Kullerd *et al.* (1992).

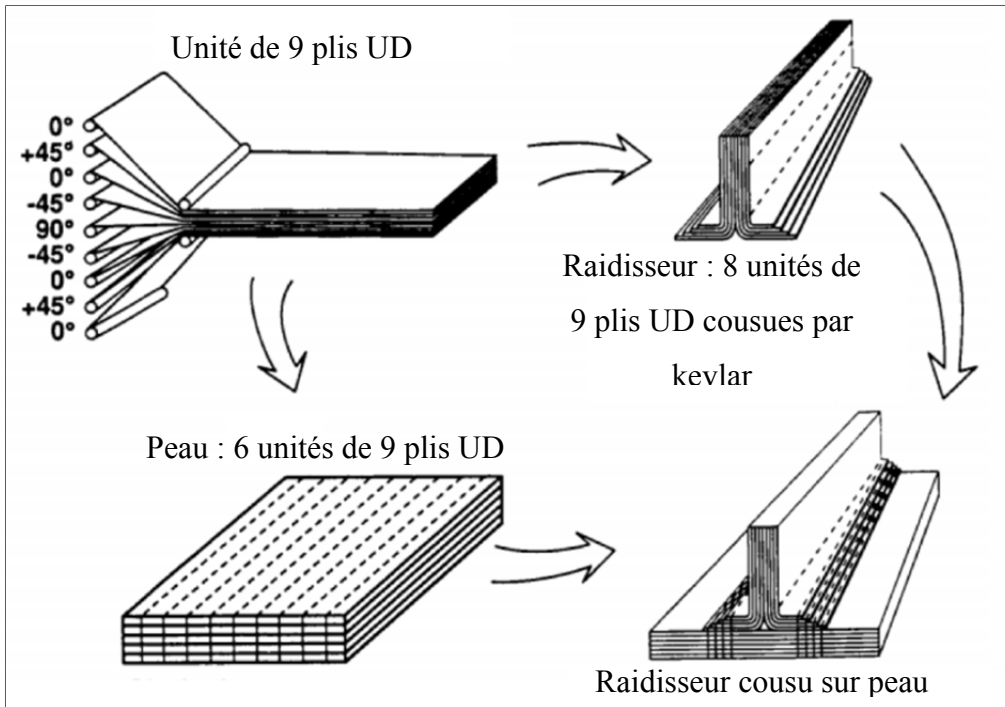


Figure 1.34 Formation d'un panneau par Kullerd  
Adaptée de Deaton (1992)

Mouritz *et al.* (1999) donnent une liste de limitations à la production de large panneaux cousus dont notamment l'absence de machine de couture pour des préformes larges et épaisses. Mais il explique également la nécessité d'accéder aux deux côtés, les problèmes engendrés par la couture et l'impossibilité de faire des pièces courbes et complexes. Puis Brown (1997) annonce que la NASA possède une machine à coudre de 28 m de long capable de coudre des préforme de 15 m par 3 m et admettant une épaisseur pouvant aller jusqu'à 40 mm. Celle-ci est visible sur à la Figure 1.35.

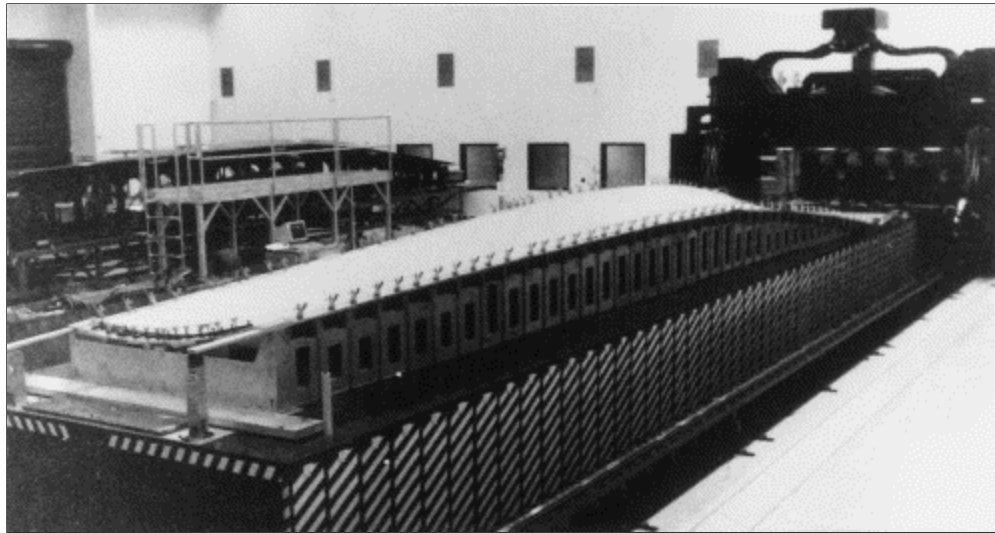


Figure 1.35 Machine à coudre de la NASA pour matériaux composites  
Tirée de Brown (1997)

Cet équipement résout les problèmes précédemment cités et Brown (1997) annonce la possibilité de réaliser des ailes d'avion 25% plus légères et 20% moins chères que les ailes conventionnelles en aluminium. De nombreux projets de la NASA avec des acteurs majeurs de l'industrie aéronautique ont ainsi vus le jour. Des ailes comme Smith *et al.* (1994) à la Figure 1.36 ainsi que des parties de fuselage. Mouritz *et al.* (1999) citent une dizaine de ces réalisations présentées lors de Conférence de la NASA.

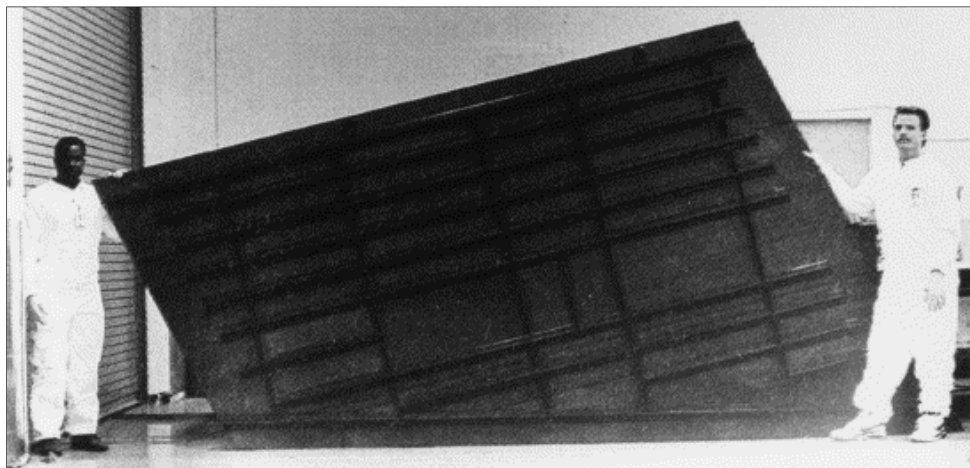


Figure 1.36 Panneaux d'aile en matériaux composites cousus  
Tirée de Smith *et al.* (1994, p. 57)

Plus récemment, Latécoère (2011) a reçu le prix de l'innovation aéronautique au JEC Europe de 2011 pour le projet COMDOR, une structure innovante de préforme assemblée par couture utilisant un procédé RTM. Latécoère et ses partenaires ont assemblé une porte d'aéronef avec la couture « 2Needle » OSS® développée par KSL à partir de fibres sèches. Le projet de porte à la Figure 1.37 promet un gain de 10 à 15% en termes de temps de production, de poids de la structure et de coût de fabrication.

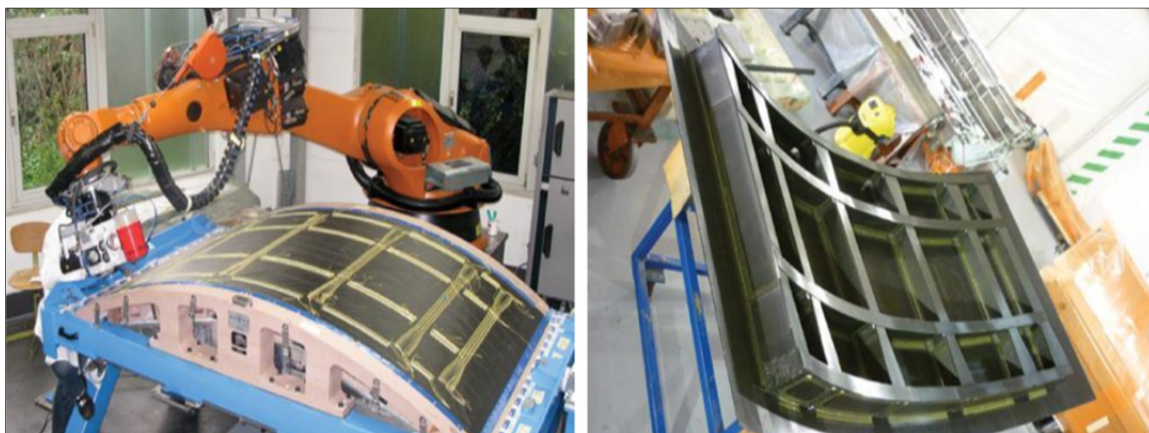


Figure 1.37 Projet COMDOR  
Tirée de Latécoère (2011)

Le Projet PRSEUS (2015) pour « Pultruded Rod Stitched Efficient Unitized Structure » propose une structure cousue comportant des éléments de châssis et des raidisseurs contenant des tubes pultrudés. Ce projet fait suite aux travaux ayant débuté durant les années 90 par la NASA et ses partenaires. PRSEUS (2015) est utilisé dans le but de réaliser une aile volante de nouvelle génération par The Boeing Company et la NASA au sein de l'ERA (Enviromentally Responsible Aviation). Les préformes conçues selon le concept de la Figure 1.38 servent à assembler le caisson central de l'aile volante. Velicki (2011) présente le développement du projet.

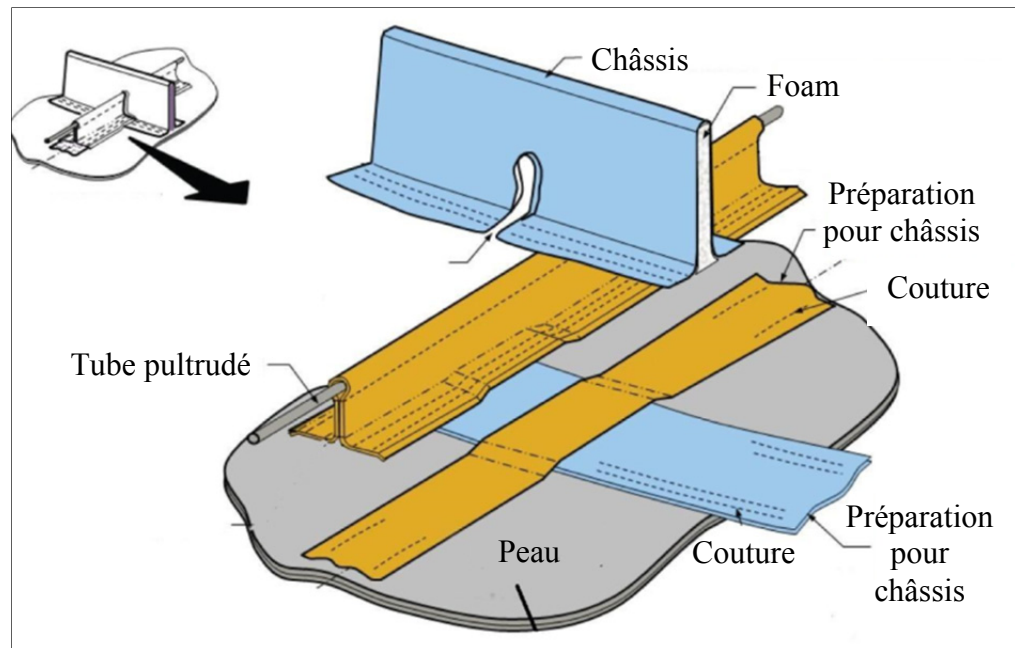


Figure 1.38 Concept du projet PRSEUS





## **CHAPITRE 2**

### **OBJECTIFS ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE**

Ce chapitre introduit la problématique et les objectifs du mémoire et du projet CRIAQ COMP-501. La démarche expérimentale est ensuite présentée. Les choix de matériaux, de technologies et de méthodologies sont discutés en fonction des procédés sélectionnés et de la géométrie souhaitée du démonstrateur.

#### **2.1 Le CRIAQ et le projet COMP-501**

##### **2.1.1 Présentation du CRIAQ**

Le Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec (CRIAQ) est un organisme à but non lucratif créé en 2002. La vocation du CRIAQ est d'améliorer les connaissances, créer des savoir-faire ainsi que des techniques et technologies pour le secteur aérospatial québécois. Grâce aux financements du gouvernement québécois, des projets de recherche regroupant des entreprises de toutes tailles, des universités et des centres de recherche sont mis en œuvre. Les cinq piliers stratégiques du CRIAQ sont la recherche collaborative, l'innovation, la formation de personnel hautement qualifié, la promotion et les collaborations nationales et internationales.

##### **2.1.2 Objectif du projet COMP-501**

Le projet COMP-501 fait partie des recherches du CRIAQ dans le domaine des matériaux composites pour applications aéronautiques. Il regroupe deux donneurs d'ordre que sont Bombardier Aéronautique et Bell Helicopter, trois universités ainsi qu'un centre de recherche, le Groupe CTT et trois PME : Delastek, Hutchinson et Texonic. Ce projet est à la base des travaux présentés dans ce mémoire. La description suivante est l'exacte présentation du projet sur le site [criaq.aero](http://criaq.aero).

## Préformes textiles 3D pour fabrication de pièces composites complexes

Les procédés de fabrication de pièces composites par infusion liquide (RTM, VARTM, RFI...) présentent un fort potentiel d'accélération des cadences et de réduction des coûts comparativement aux procédés traditionnels en autoclave. Cependant, la réalisation de préformes textiles épousant les formes de pièces composites 3D par drapage de multiples couches de tissus de renfort minces est un processus lent et exigeant en termes de main-d'œuvre, qui induit une forte variabilité en termes de fabrication et de performance finale. En pratique, les coûts et la variabilité associés au préformage de renforts minces annulent les avantages des procédés de fabrication hors autoclave. Quelques manufacturiers de textiles innovants offrent depuis peu différents types de renforts 3D. Ces renforts sont disponibles à des fractions volumiques de fibres similaires à ceux des pièces composites finales, éliminant la nécessité de compacter (debulk) pendant la fabrication.

Le projet Préformes 3D vise la production de préformes textiles 3D à "near net shape" pour la fabrication rapide par infusion liquide de pièces composites de forme complexe. Il utilise des renforts 3D obtenus commercialement et via de nouvelles technologies développées en parallèle par les partenaires. Différentes techniques d'assemblage des textiles 3D seront évaluées pour leur rapidité et leur efficacité. Une caractérisation des performances liées aux exigences de la mise en forme (drapabilité, piquabilité, maintien de l'intégrité physique, imprégnabilité, etc.) ainsi que des propriétés mécaniques des composites (traction, cisaillement inter laminaire, impact) sera effectuée aux différentes étapes du projet afin de sélectionner les meilleurs textiles 3D et techniques d'assemblages. Ceux-ci seront utilisés dans la production de plusieurs géométries de démonstrateurs. Ces démonstrateurs correspondront à des géométries 3D complexes à échelle ajustable ("scalable").

Cette technologie vise à simplifier la fabrication de meilleures préformes et pièces, et à améliorer la reproductibilité du préformage et de la fabrication. L'équipe comprend des experts en tissage 3D, infusion de résine, fabrication de structures à renforts textiles, préformage, formage des tissus, conception de pièces, et mécanique des textiles et des composites. Le projet se base aussi sur un partenariat solide avec des leaders industriels des secteurs des textiles, des composites et de l'aérospatiale pour favoriser l'introduction de la technologie en industrie.

En résumé, l'objectif du projet est de proposer des techniques qui peuvent simplifier la production de préformes 3D composites. Celles-ci sont composées de renforts fibreux secs et d'une matrice époxy. Ce sont des techniques de couture qui sont testées pour remplir l'objectif. Plusieurs aspects sont analysés : la simplification de la production, le gain de temps, le coût, la reproductibilité mais aussi les performances mécaniques. La section 2.1.4 définit clairement mon implication dans la globalité du projet COMP-501

### 2.1.3 Sélection de la géométrie à développer

La conception de structures d'aéronef a régulièrement recourt à l'assemblage de peaux raidies à l'aide de raidisseurs. Quelle que soit la géométrie des raidisseurs (en I, en T ou en  $\Omega$ ) ou leur agencement, on parlera de panneau. La Figure 2.1 présente le panneau étudié dans sa configuration finale avec deux raidisseurs en T. La géométrie définie par les partenaires industriels est une simplification de panneaux généralement à simple ou double courbure pouvant être nombreux sur des aéronefs. Le concept est plus dans l'allègement de la structure et la facilité de procédure de production que dans la complexité de la géométrie. Si les techniques de production, les performances mécaniques et la fiabilité du procédé sont avérées, des géométries de complexités supérieures pourront être envisagées dans des travaux ultérieurs.

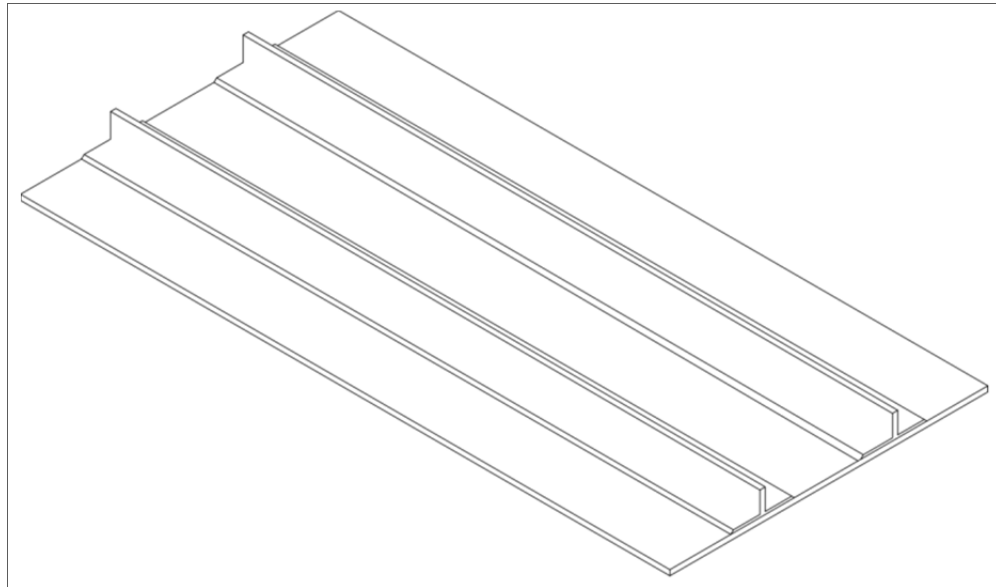


Figure 2.1 Géométrie d'un panneau démonstrateur CRIAQ COMP-501

Dans le cadre du projet COMP-501, les dimensions du démonstrateur sont 1220 mm par 610 mm (soit 4 pieds par 2 pieds). Les raidisseurs sont distants de 254 mm (soit 10 pouces) et centrés sur le milieu du panneau dans le sens de la longueur. Le voile mesure 50.8 mm (2 pouces) et les pieds 63.5 mm (2.5 pouces), comme le précise la Figure 2.2.

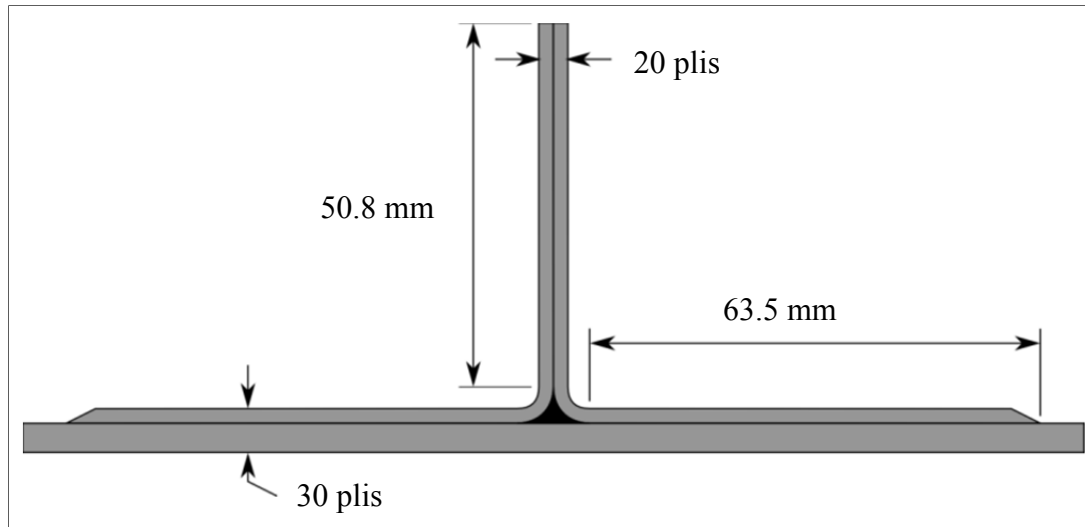


Figure 2.2 Dimensions d'un raidisseur en T

#### 2.1.4 Problématique et objectifs du mémoire

Au vue des informations tirées de la littérature et des premiers résultats du projet CRIAQ COMP-501, le préformage de renforts fibreux secs semble prometteur. Il faut toutefois s'assurer que la technique de préformage par couture soit viable pour l'industrie. La problématique de recherche est de savoir si l'assemblage de préformes 3D composites par des techniques de coutures est une solution d'avenir pour le secteur aéronautique.

L'objectif est de valider la viabilité du préformage par couture. Trois points sont traités dans mes travaux :

- Le premier est de pérenniser la production, il faut s'assurer que la production de préformes par couture soit adaptée, efficace, performante et répétable.
- Le second point est de déterminer si le renforcement par touffetage de telles préformes est intéressant du point de vue des performances mécaniques.
- L'ultime partie est une analyse de coût de production des préformes par couture par rapport à la production de préformes non cousues.

## 2.2 Sélection des procédés

Les procédés sont sélectionnés en fonction des équipements disponibles du laboratoire de recherche en préformes 3D du Groupe CTT.

### 2.2.1 Couture OSS® « 2Needle »

La technologie de couture OSS® « 2Needle » a été créée dans le but de faciliter l'assemblage de plusieurs renforts fibreux dans des zones difficiles d'accès. La tête de couture est un outil de grande précision ne nécessitant l'accès qu'à un seul côté de la préforme, comme schématisé à la Figure 2.3. La tête de couture utilisée dans le projet est une RS 530 produite par KSL Keilmann Sondermaschinenbau GmbH (Lorsch, Allemagne). Le Tableau 2.1 présente les paramètres de l'équipement de couture.

Tableau 2.1 Caractéristique de la tête RS 530 «2Needle»

|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| Pas de couture                            | 4 à 8 mm  |
| Epaisseur du matériel                     | 2 à 15 mm |
| Taille de l'aiguille d'alimentation       | Nm 180    |
| Taille de l'aiguille « attrape fil »      | Nm 200    |
| Inclinaison de l'aiguille d'alimentation  | 45°       |
| Inclinaison de l'aiguille « attrape fil » | 90°       |

La schématisation des aiguilles, Figure 2.3, montre que l'aiguille d'alimentation pénètre la fibre selon un angle de 45° pour alimenter l'aiguille « attrape fil ». Cette dernière attrape le fil de couture par la boucle formée par la remontée de l'aiguille d'alimentation et remonte le fil de couture à la surface de la préforme. Un crochet sort ensuite le fil de couture de l'encoche dans l'aiguille « attrape fil » pour le placer autour de cette même aiguille. La répétition du mouvement des aiguilles permet de créer une couture selon le schéma de la Figure 2.4.

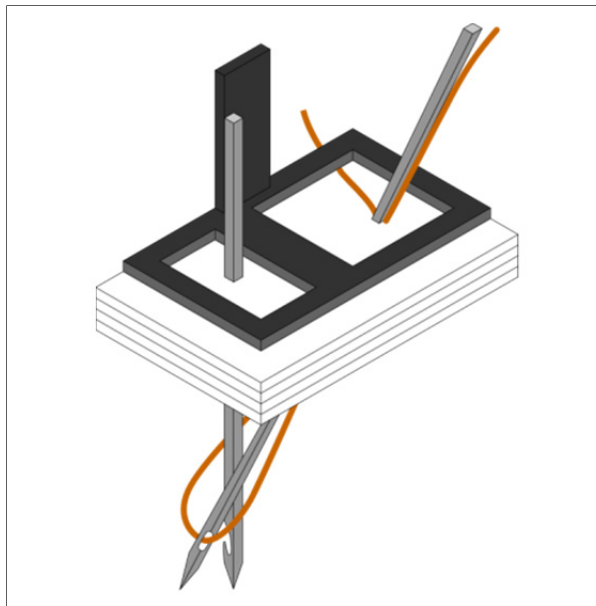


Figure 2.3 Schéma du pied et des aiguilles de la tête de couture RS 530 «2Needle»

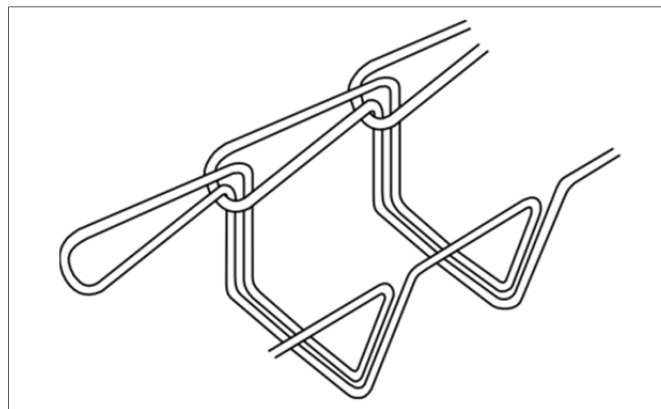


Figure 2.4 Schéma de couture dans la préforme

La conception de raidisseur en T peut être décomposée en deux L symétriques liés ensemble au niveau du voile, partie verticale du L. Puis les parties horizontales des L, les semelles, sont assemblées à la peau du démonstrateur. Le fil, faisant le lien entre chaque élément, que ce soit les deux L ou la peau, est cousu selon la technologie de couture OSS® « 2Needle ». Cette dernière servira tout au long du projet pour assembler tous les empilements de renfort

les uns aux autres. Éventuellement, la couture permettra de renforcer certaines zones des composites.

### 2.2.2 Touffetage

Les raidisseurs de type T sont particulièrement bien connus de l'industrie aéronautique pour leur efficacité mais aussi pour leur faiblesse au niveau de la nouille. Renforcer les structures 3D complexes composites est une des problématiques que le projet cherche à résoudre. Le touffetage est la technologie envisagée tant elle semble parfaitement s'adapter aux types de structures et de géométries sélectionnés. KSL Keilmann Sondermaschinenbau GmbH a conçu une tête de touffetage parfaitement adaptée, c'est donc la RS 522 qui est utilisée. Les paramètres de l'équipement de touffetage sont présentés dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Caractéristique de la tête de tufting RS 522

|                                      |                                                                                  |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Pas de couture                       | 3 à 18 mm                                                                        |
| Épaisseur du matériel                | 2 à 35 mm                                                                        |
| Taille de l'aiguille                 | Nm 250                                                                           |
| Inclinaison de l'aiguille            | 90°                                                                              |
| Inclinaison de la tête de touffetage | 45° à 135° (réduction de l'épaisseur du matériel pour un angle différent de 90°) |

La tête de touffetage suit le principe défini au chapitre 1.2.5. L'aiguille pénètre la préforme afin de déposer le fil de touffetage qui est retenu uniquement par les forces de friction entre le fil et les matériaux de la préforme. De ce fait, le touffetage ne peut être considéré comme une technique d'assemblage à proprement parler. En effet, les forces de frictions sont trop faibles pour manipuler les préformes sans défaire le touffetage et donc maintenir la géométrie 3D. Par contre, le touffetage semble s'avérer une bonne technologie de renforcement des propriétés interlaminaires, par l'insert de fibres en Z. Le touffetage est utilisé pour traiter le second objectif.

## 2.3 Sélection des matériaux et paramètres

Le projet CRIAQ COMP-501 débute en mai 2013 soit huit mois avant le début des travaux de ce mémoire. Il est essentiel de garder à l'esprit que le projet est supporté par des industriels, ainsi des choix ont été imposés en terme de conception, matériaux, procédés ou de tests mécaniques. En effet, afin de développer une technologie innovante et viable pour la production de préformes 3D complexes pour le secteur aéronautique, il est déterminant de réaliser l'étude au plus proche des besoins industriels.

### 2.3.1 Renfort fibreux

Le renfort fibreux est un tissu de type sergé 2-2 composé de multifilaments de carbone 3K, c'est-à-dire 3000 filaments de carbone par multifilament. Ce type de structure visible en Figure 2.5, à l'avantage d'être balancé, c'est-à-dire qu'il y a autant de matière en chaîne (axe x) qu'en trame (axe y).

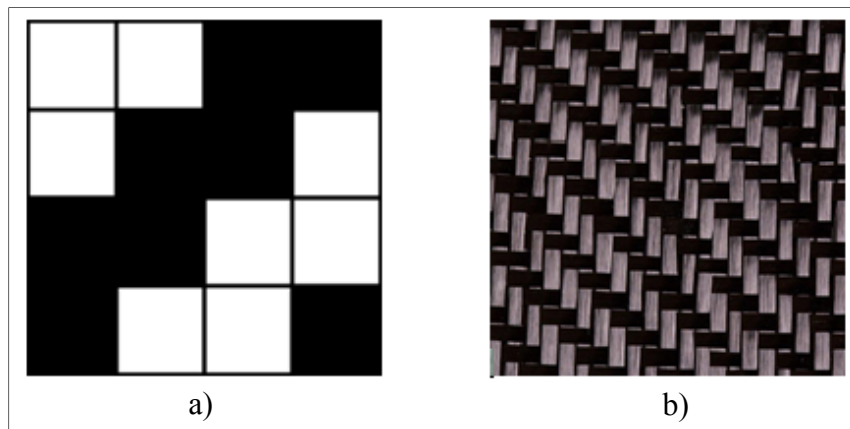


Figure 2.5 Sergé 2-2 a) schéma de tissage  
b) photo de tissu sergé 2-2 TC-06-T

Un tissu de verre est également utilisé, principalement pour les tests préliminaires comme pour vérifier une géométrie ou le bon fonctionnement d'un procédé ou d'une procédure. Par exemple une procédure de manipulation d'empilement ou de couture ou l'imprégnation de résine. Le tissu de carbone, bien plus coûteux, sert pour les tests mécaniques ainsi que la



fabrication des démonstrateurs. Le tissu de carbone dénommé TC-60-T est stocké sous forme de rouleau de 1270 mm de large tandis que le verre TG-10-T est conditionné en rouleau de 1524 mm de large. Les propriétés des tissus sont classées dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 Propriétés des renforts fibreux

| Propriété                            | TC-06-T   | TG-09-T   |
|--------------------------------------|-----------|-----------|
| Tissage                              | Sergé 2-2 | Sergé 2-2 |
| Masse surfacique (g/m <sup>2</sup> ) | 197       | 315       |
| Fibre                                | Carbon-3K | Verre-E   |
| Titrage (Tex)                        | 200       | 275       |
| Densité fil (fil/cm)                 | 5.0       | 5.5       |
| Épaisseur (mm)                       | 0.325     | 0.360     |

Ces différents tissus utilisés sont produits par l'entreprise Texonic (Saint-Jean-sur-Richelieu, Québec). Texonic est l'un des partenaires et fournisseur en renfort fibreux dans le cadre du projet.

### 2.3.2 Fil de couture et de touffetage

Le fil de couture est spécialement conçu par la compagnie Schappe Techniques pour réaliser des travaux de couture de très haute technicité. C'est un fil retors constitué de 2 multifilaments de 67 Tex 1K, on parle alors d'un fil retors 2x67 Tex. La torsion du retors est 245Z. Ce nombre est légèrement plus faible que les recommandations de la littérature, cependant, il est produit spécifiquement pour des applications de couture. Quant au fil de touffetage, il est similaire au fil de couture mais constitué de 4 multifilaments de 67 Tex 1K, soit un fil retors 4x67 Tex. Ces fils présentent toutes les caractéristiques présentées dans le chapitre 1.4.2 assurant le bon fonctionnement pour l'utilisation en couture OSS® ou en touffetage.

### 2.3.3 Nouille

Les travaux sur la nouille au sein du projet COMP-501 sont menés par Mr L.WEST (membre étudiant du projet) de l'Université d'Ottawa. Des tests sont réalisés sur diverses variétés de nouilles : multifilaments tordus, multifilaments non tordus et tresses. Les différents tests varient entre l'étude de l'écoulement de la résine au sein de la nouille, l'adaptation à la forme trapézoïdale de la cavité ou encore les tests d'arrachement des raidisseurs en T. Les analyses des tests ont permis de conclure que la meilleure solution pour le projet CRIAQ COMP-501 est une tresse AERO BIB 2005 produite par EuroCarbon (Sittard, Pays-Bas). Ce modèle a un diamètre de 5 mm pour une section de  $18,3 \text{ mm}^2$  à un taux volumique de fibre de 50%. La Figure 2.6 présente la géométrie ainsi que les dimensions de la nouille. Avec un rayon interne de 6,44 mm, l'aire de la section est de  $17,8 \text{ mm}^2$ . La tresse sélectionnée présente donc un bon ratio compte tenu du fait que le taux volumique de fibre visé est de 60%. La tresse est composée de fibres de carbone de grade aéronautique remplissant parfaitement le cahier des charges du projet.

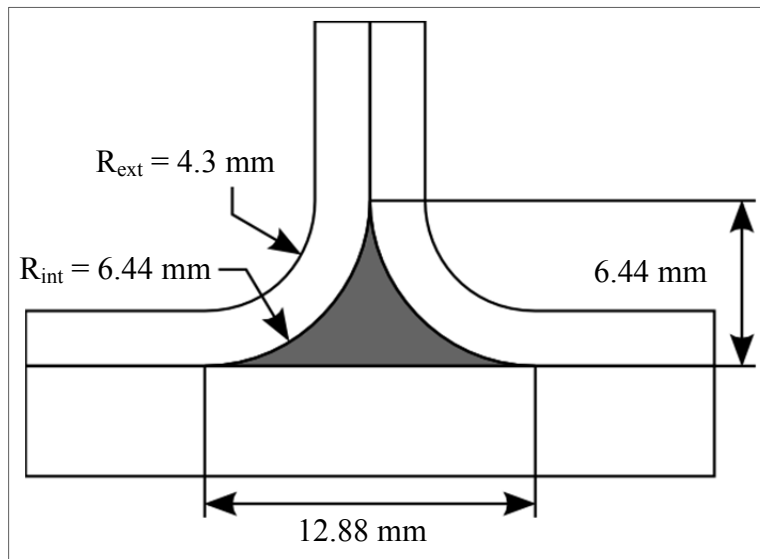


Figure 2.6 Dimensions d'une nouille

### 2.3.4 Matrice

La matrice est un système bi-composant de résine époxy de la marque Huntsman, Araldite® LY 8601 / Aradur® 8602. Ce système est couramment utilisé pour des imprégnations de base. Le procédé d'envisagé pour l'infusion est le VARI et le système de résine est compatible avec la géométrie et les conditions sélectionnées. La résine Araldite® LY 8601 et le durcisseur Aradur® 8602 sont mixés selon un ratio de 100 g de résine pour 25 g de durcisseur. Le mélange polymérise ensuite à température ambiante. Trois jours sont nécessaires pour que le mélange polymérise totalement, bien qu'il soit possible de démouler la pièce après 24h. La fiche technique de la résine est disponible en Annexe I ou sur le site de Huntsman

### 2.3.5 Séquences d'empilement des renforts

Divers séquences d'empilement présentant des performances différentes selon les chargements et utilisations ont été testées au début du projet CRIAQ COMP-501. Aussi, les effets de la couture varient en fonction des renforts et les propriétés des stratifiés en sont affectées. Trois séquences d'empilement de fibres ont été étudiées. Les configurations retenues sont un stratifié *souple*, un stratifié *quasi-isotrope* et un stratifié *rigide*. Le Tableau 2.4 recense ces trois séquences d'empilement. Chacun de ses stratifiés est composé de 20 plis, que ce soit pour le voile ou pour la peau.

Tableau 2.4 Caractéristiques des empilements

|             | Souple                             |      | Quasi-isotrope        |      | Rigide                           |      |
|-------------|------------------------------------|------|-----------------------|------|----------------------------------|------|
| Séquence    | $[(\pm 45)_2/(0-90)/(\pm 45)_2]_s$ |      | $[(\pm 45)/(0-90)]_s$ |      | $[(0-90)_2/(\pm 45)/(0-90)_2]_s$ |      |
| Pourcentage | 0-90°                              | ±45° | 0-90°                 | ±45° | 0-90°                            | ±45° |
| de renforts | 20%                                | 80%  | 50%                   | 50%  | 80%                              | 20%  |

Cette étude a été menée sur des stratifiés plats lors des travaux de Leduc (2014). Après les conclusions de ces travaux, il a été convenu par les industriels de poursuivre le projet avec la séquence d'empilement *quasi-isotrope*. Dans la suite de ce mémoire, chaque référence à la séquence d'empilement correspond dès lors à un stratifié *quasi-isotrope* sauf contre-indication.

Une exception sur la séquence d'empilement existe toutefois. L'épaisseur des plis de verre, calculée sur un instrument de mesure « Device FRAZIER, standard Model », diffère de celle des plis de carbone. Le test et l'instrument sont décrits en Annexe II. Le Tableau 2.5 donne les références et les résultats du test.

Tableau 2.5 Référence et résultats du test d'épaisseur des renforts fibreux

|                         |          |                      |      |
|-------------------------|----------|----------------------|------|
| Type d'essai            |          | CAN/CGSB-42N°37-2002 |      |
| Atmosphère conditionnée |          | 21°C, 65% H-R        |      |
| Pression appliquée      |          | 1 KPa                |      |
| Diamètre pied presseur  |          | 75 mm                |      |
| Épaisseur Moyenne       |          | Écart-type           | CV   |
| TG-10-T                 | 0,36 mm  | 0,05                 | 0,5% |
| TC-06-T                 | 0,325 mm | 0,03                 | 0,3% |

Il est essentiel de travailler avec des préformes de même épaisseur afin de respecter le taux de compaction dans le moule d'imprégnation. Pour résoudre ce problème d'épaisseur, il est décidé que les plis externes sont sacrifiés pour les empilements de plis de verre. En effet lorsque l'on fait un ratio, l'épaisseur de 20 plis de carbone correspond à l'épaisseur de 18 plis de verre. Dès lors l'empilement constitué de fibres de verre est le suivant :  $[(0-90)/((\pm 45)/(0-90))]_4$ .

## 2.4 Préparation des renforts

### 2.4.1 Découpe

La découpe constitue la première étape de préparation des renforts, elle consiste à découper selon une orientation précise le tissu de renfort aux dimensions souhaitées. La découpe est effectuée par une tête de découpe ultrasonique de type RC590 de la compagnie KSL Keilmann Sondermaschinenbau GmbH (Lorsch, Allemagne). Cette tête de découpe, en Figure 2.7, a la capacité de découper des fibres de carbone, de verre ainsi que d'autres fibres courantes dans le domaine des matériaux composites à renfort fibreux. Le fabricant recommande l'utilisation sur une épaisseur de matériel comprise entre 0 et 15 mm.



Figure 2.7 Tête de découpe ultrasonique RC590

Lors de ce projet, la découpe se fait selon l'axe 0-90° ou alors  $\pm 45^\circ$ . Le tissu étant balancé, la chaîne ou la trame peuvent faire office de 0°. Si la chaîne sert de 0°, la trame est le 90° et inversement. Concernant les plis à  $\pm 45^\circ$ , la découpe se fait avec le même tissu mais selon un angle de 45°. À nouveau, le fait que le tissu soit balancé, la chaîne sert de 45° et la trame de -45° ou inversement.

Il va sans dire que la découpe est très importante dans le processus de préformage. C'est la première étape de manipulation des tissus. Or, la réussite de la couture est très dépendante de la qualité de l'empilement de tissu, la découpe doit donc fournir des tissus d'excellente qualité. De nombreux défauts sont courants comme le changement d'orientation local des fibres ou une découpe pas assez franche du tissu entraînant des extrémités de plis imparfaites. La tête de découpe sélectionnée permet de s'assurer de ne pas avoir de défauts de découpe et commencer l'empilement dans les meilleures conditions possibles.

#### **2.4.2 Empilage**

L'empilement des plis de tissus, selon une des configurations discutée au chapitre 2.3.5, intervient dès la découpe des tissus achevée. Simple d'apparence, cette étape n'en est pas moins aussi cruciale que la découpe dans le processus de préformage. La qualité de l'empilement détermine directement la réalisation d'une couture de qualité, c'est-à-dire sans défauts. Une étude démontrera l'influence de l'état de l'empilement sur la réussite d'une couture sans défaut au chapitre 3.5.1. Un outil facilitant l'empilage a d'ailleurs été fabriqué afin de faciliter la réussite de cette étape, il est présenté au chapitre 3.2.1.

#### **2.4.3 Assemblage du stratifié par couture**

L'assemblage par couture est réellement l'étape où le lien entre les plis est créé. La couture fixe l'empilement ensemble. Une fois celle-ci réalisée, il n'est plus possible de modifier l'ordre des plis, leur disposition ni leur orientation.

L'utilisation de la technologie de couture OSS® « 2Needle » requiert un empilement de plis d'une épaisseur minimale de 2 mm et maximale de 15 mm. Il est également nécessaire d'avoir une zone plate et des plis maintenus ensemble pour empêcher qu'ils ne glissent durant la couture. Idéalement, l'empilement est déposé à plat sur un gabarit prévu à cet effet. Il est également maintenu de part et d'autre de la zone à coudre par un système d'attaches amovibles. Cette zone doit être assez large pour permettre le passage du pied presseur de la tête de couture.

Une fois la couture réalisée comme décrit à la section 2.2.1, il est possible de manipuler la préforme, transformer l'orientation des fibres de certaines zones non cousues, ouvrir des plis, placer d'autres éléments entre les plis ou encore donner une nouvelle dimension. Ceci est le préformage et nécessitera ensuite une nouvelle étape de couture pour fixer définitivement ces changements de géométrie ou éléments ajoutés.

#### 2.4.4 Préformage des stratifiés

Le préformage est la phase de mise en forme de la structure en fibres sèches. Il est possible de passer d'une structure en deux dimensions à une structure en trois dimensions ou encore fixer la structure cousue à d'autres éléments. Cette étape est généralement couplée à l'assemblage par couture afin de sceller la position des plis par un lien.

La forme du raidisseur en T présentée en Figure 2.2 nécessite trois étapes : 1- l'assemblage du voile, 2- l'ouverture et l'ajout de la nouille et de la peau, 3- l'assemblage des semelles avec la peau. Ces trois étapes sont illustrées respectivement à la Figure 2.8, Figure 2.9 et Figure 2.10.

- Assemblage de l'empilement du voile :



Figure 2.8 Assemblage de l'empilement du voile

- Placement de la partie cousue du voile dans le gabarit de couture. Puis ouverture des semelles, soit la partie non cousue suivi de l'ajout de la nouille et de l'empilement de la peau :

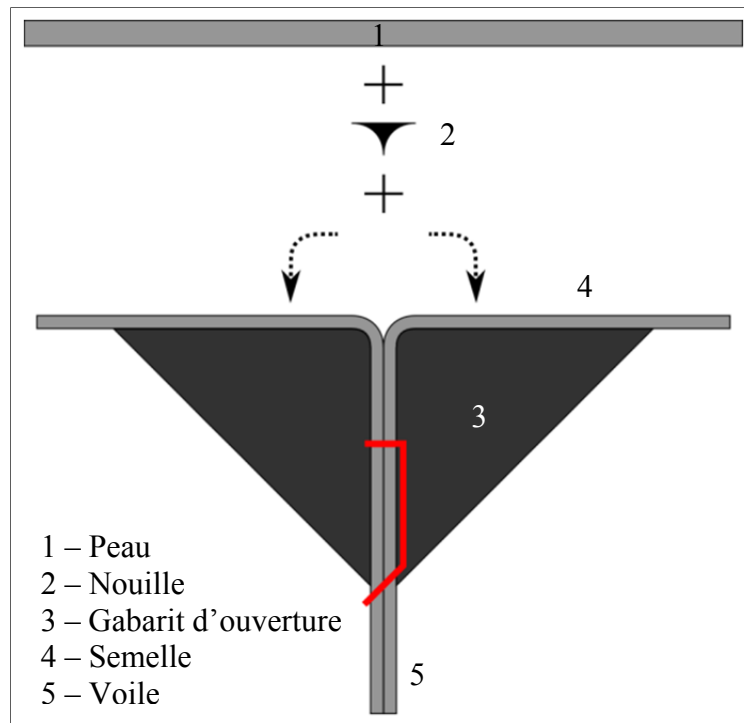


Figure 2.9 Ouverture du voile et ajout de la nouille et de la peau

- Assemblage des semelles du raidisseur sur la peau de chaque côté du voile :

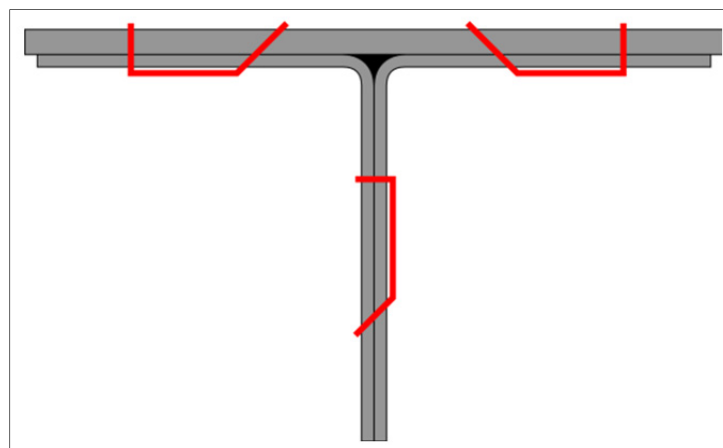


Figure 2.10 Assemblage des semelles sur la peau



La Figure 2.11 montre un raidisseur en « T » dans le gabarit de préformage au moment du placement de la nouille.

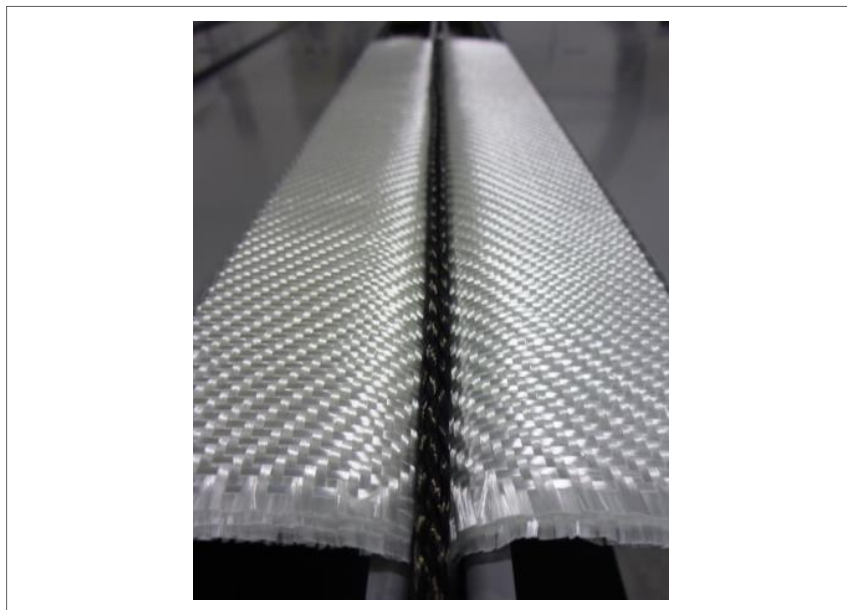


Figure 2.11 Raidisseur en « T » durant le placement de la nouille

#### 2.4.5 Renforcement

Le renforcement est une étape facultative qui vise à consolider les zones faibles ou à fortes sollicitations. Cette étape se fait par touffetage et intervient en fin de processus car le touffetage est un procédé sans nœuds qui par conséquent reste fragile tant que l'ajout de la matrice n'a pas été effectué.

Le positionnement du touffetage est soumis à beaucoup moins de règles que la couture. Il est possible de touffeter dans des espaces beaucoup plus restreints, du moment que la structure soit bien maintenue dans la zone à renforcer. C'est-à-dire que le pied presseur doit pouvoir appuyer sur la préforme sans que celle-ci ne bouge (glissement, vibration, etc.). Il est impensable de touffeter le voile si celui-ci est libre. Diverses configurations de touffetage sont présentées et analysées dans la suite de ce mémoire.

## 2.5 Ajout de la matrice par VARI

Parmi la longue liste des techniques d'ajout de la matrice, le *Vacuum Assisted Resin Infusion* ou VARI est sélectionné pour le projet en raison de ses bons résultats.

### 2.5.1 Principe

La technique VARI utilise le vacuum pour amener la résine dans la préforme. Le renfort fibreux reste sec dans un moule souple ou semi-rigide où le vacuum est appliqué. Une entrée de résine, préalablement fermée, est ouverte une fois le vacuum complet. La résine est alors introduite dans la préforme. Un lot de matériel est nécessaire pour réaliser ce procédé d'ajout de la résine. L'équipement ainsi que le montage sont décrits à la Figure 2.12.

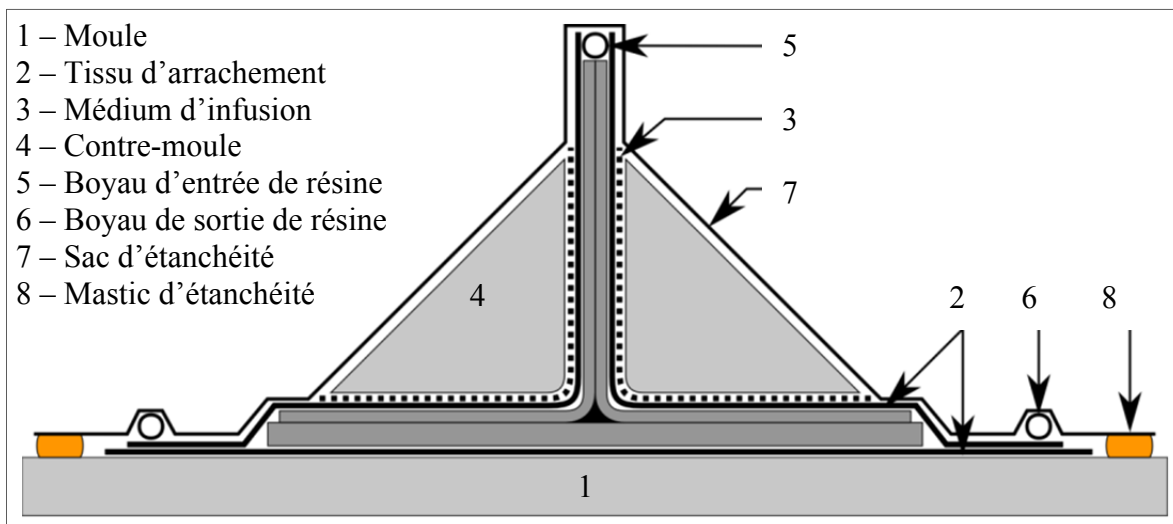


Figure 2.12 Montage d'imprégnation de résine VARI

### 2.5.2 Équipement et montage

L'équipement complet contient :

- Des outils de découpes et de préparation du renfort et des consommables
- Le moule, élément 1 et 4 de la Figure 2.12.

- Les consommables, comprenant les agents nettoyants, scellants et démoulants pour le moule, le tissu d'arrachage, le médium d'infusion, les boyaux d'entrée et de sortie ainsi que le médium d'infusion spirale et le sac et mastic d'étanchéité.
- Un récipient à résine.
- Une pompe à vide.
- Un manomètre, étanche et opérable jusqu'à une pression de -30 inHg.
- Une trappe à résine.
- Des pinces, servant à réguler le flux de résines dans le boyau d'entrée de résine.

Le montage se fait en 4 étapes :

La première étape est la préparation du moule. Le moule est nettoyé puis traité avec un agent scellant et un agent démoulant pour s'assurer le démoulage du composite une fois la polymérisation de la résine complète.

La seconde est le montage du moule, un tissu d'arrachage est placé sur le moule et la préforme est insérée entre les contre-moules. Un tissu d'arrachage et un médium d'infusion sont insérés entre les contre-moules et la préforme, le second permet d'aider l'écoulement de la résine et stabiliser le front de résine. La préforme entre les contre-moules est fixée au moule. Le boyau d'entrée de résine est placé sur le haut du voile de la préforme tandis que les boyaux de sortie sont placés de part et d'autre de la semelle.

La troisième étape est l'installation du sac d'étanchéité. Ce dernier assure l'isolation du système pour la mise sous vacuum. Le sac d'étanchéité recouvre l'ensemble du montage et est maintenu par le mastic d'étanchéité. Les seuls éléments sortant du sac sont les boyaux et ce de façon étanche. Les boyaux de sortie sont branchés à la trappe à résine, elle-même branchée à la pompe à vide. Le boyau d'entrée est fermé par des pinces et sera plongé dans le récipient de résine après préparation de cette dernière.

La quatrième et ultime étape est la mise sous vacuum. Il est essentiel que le montage soit totalement étanche sans quoi l'imprégnation sera un échec. Si des fuites sont repérées, elles sont réparées, par exemple à l'aide de mastic. Si la réparation est impossible, il faut refaire l'étape précédente, l'installation d'un nouveau sac d'étanchéité.

### **2.5.3 Imprégnation de la préforme**

Une fois le montage complété, la résine est préparée selon la fiche technique du fournisseur : dosage, pesage, mélange, dégazage, etc. Le temps de travail d'une résine débute au mélange. Il est important que le montage soit prêt et de s'être assuré que le vacuum soit parfait. La résine prête est placée dans le récipient à résine où le boyau d'entrée l'aspirera. L'imprégnation démarre à l'ouverture du boyau d'entrée, la résine étant ainsi aspirée dans la préforme. L'imprégnation est stoppée lorsque toute la préforme est parfaitement mouillée de résine, le boyau d'entrée peut alors être pincé de nouveau. Si la résine a polymérisé prématurément et que le front de résine est stoppé, l'imprégnation est un échec et la pièce ira aux rebuts.

### **2.5.4 Bénéfices et risques**

Le VARI permet de nombreuses améliorations comparé aux techniques d'imprégnation classiques. On peut noter des améliorations concernant la consommation de résine, celle-ci est très précise, avec peu de gaspillage et une bonne répétabilité. En effet, la résine introduite est idéalement la quantité exacte de résine nécessaire. Ceci permet également d'avoir un taux volumique de fibre répétable. De plus, ce taux volumique est plus élevé que bon nombre de méthodes traditionnelles. Bien que l'installation soit relativement complexe, le temps pour la réaliser est illimité avant l'étape d'infusion. Il est possible de refaire une étape de préparation mal faite. La durée de vie de la résine n'est plus une limite car la résine est préparée au dernier moment, une fois l'installation complétée. Pour finir, cette technique d'imprégnation de résine est propre lorsque la préparation est bien réalisée. La résine reste dans une cavité fermée et n'a pas besoin d'être appliquée à la main ou dans un moule ouvert. On évite également les émanations de volatiles organiques puisque le montage est maintenu sous vide.

L'installation telle que décrite précédemment reste tout de même longue et complexe. De nombreux éléments doivent être insérés dans un ordre bien défini et le vacuum doit être parfait. Si ce n'est pas le cas, il est très facile de réaliser une mauvaise infusion et ainsi de détruire une préforme. Une fois l'imprégnation débutée, il est très difficile de corriger une

erreur. Par exemple une fuite dans le sac d'infusion pourra entraîner des bulles d'air, des zones insaturées de résine voire non mouillées. Afin de déboguer l'installation et le procédé d'imprégnation, de nombreux essais sont réalisés. Il est important de créer et de documenter une procédure afin de la suivre consciencieusement à chaque imprégnation et d'éviter la perte de préforme. Cette procédure de montage et d'imprégnation est longue à réaliser mais évite ensuite les pertes. Cette procédure inclue notamment la vitesse d'absorption de résine. Dans notre cas, la résine dans le boyau d'entrée est restreint entre 0.5 et 1 mm/s.

En conclusion, une fois la technique d'installation et d'imprégnation bien maîtrisée, la fiabilité et la répétabilité du VARI en font un procédé particulièrement intéressant. Dans le cas de petites productions, la technique VARI s'applique bien, d'autant plus qu'elle ne nécessite que de modestes installations et peu de matériels.

## **2.6 Tests mécaniques**

Les essais mécaniques réalisés dans le cadre de ce mémoire visent uniquement la caractérisation du renforcement par touffetage. Les essais préliminaires du projet CRIAQ COMP-501 sur plaques cousues et sur raidisseurs en T assemblés par couture ont été réalisés respectivement par Leduc (2014) et Morin (2015).

### **2.6.1 Préparation des spécimens pour essais**

La préparation de spécimens consiste essentiellement à la découpe des pièces composites précédemment imprégnées de résine. Les bords sont coupés sur environ 25 mm, ce qui permet d'éliminer les zones les plus affectées par les défauts subvenant à l'étape d'imprégnation de résine : bulles d'air, compression ou taux de fibres inégales, etc. Ensuite, la partie centrale est coupée en échantillons de 25.4 mm de largeur pour environ 110 mm de long et 60 de haut. Chaque raidisseur donne entre 13 et 15 spécimens. Chaque spécimen est identifié mais également inspecté visuellement. Si des marques de scies, des problèmes d'infusion, de porosités abondantes ou de délamination sont visibles, alors le spécimen est impropre pour être testé et est éliminé.

### 2.6.2 Test d'arrachement symétrique et asymétrique

Le test mécanique permet de mesurer la résistance à la traction du voile du raidisseur. L'objectif est de créer la préforme la plus résistante à l'arrachement du voile. Malheureusement, il n'y a pas de norme spécifique à la géométrie de renfort en T. Pour répondre à l'objectif, le test s'inspire de la norme ASTM C297M-15 qui mesure la résistance à la traction à plat de constructions sandwich. L'interface entre les 2 « L » composant le voile et le pied du raidisseur et la semelle fait office de zone d'arrachement.

Le test s'effectue sur une machine de traction standard. Un gabarit fixe maintient les pieds et la semelle à l'aide de goupilles tandis qu'un mors mobile placé sur la tête de la machine de traction applique un chargement normal à la semelle. Dans le cas d'un arrachement symétrique, il y a une goupille de chaque côté du voile, placée symétriquement. Pour un arrachement asymétrique, une unique goupille placée d'un côté maintient la préforme comme indiqué sur la Figure 2.13. Les goupilles sont placées à 12.7 mm de distance du centre du voile. Cette mesure est une demande d'un industriel donneur d'ordre du projet. Il est intéressant de noter que les tests d'arrachement vus dans la littérature proposent généralement des appuis bien plus éloignés. D'autres mécanisme de rupture sont étudiés.

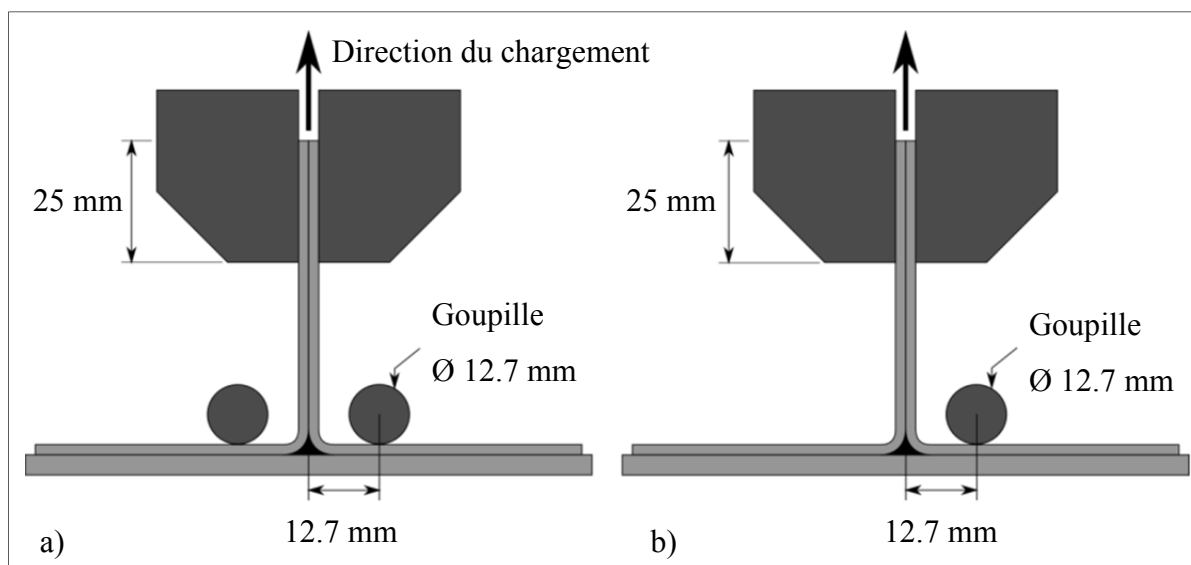


Figure 2.13 Test d'arrachage a) symétrique b) asymétrique

Bien que ce test ne présente pas directement un cas de figure réel, il est couramment utilisé notamment pour les donneurs d'ordre du projet.

Dans le cas d'un arrachement symétrique, on simule un voile comme support à fixation, comme un équipement suspendu. Pour l'arrachement asymétrique, il y a simulation d'efforts de flexion.

### **2.6.3 Échantillonnage et procédure**

Le test est réalisé sur 5 spécimens par configuration, que ce soit symétrique ou asymétrique ou alors une configuration de couture différente. Chaque raidisseur testé a une configuration de renfort différente qui est décrite à la section 4.1. Un raidisseur donne entre 14 et 15 spécimens de 25.4 mm de largeur. Il y a donc 5 spécimens testés symétriquement et 5 asymétriquement. Cette condition de 5 spécimens permet d'obtenir des données significatives. Il reste également 3 à 5 spécimens qui pourraient être utilisés ultérieurement ou en cas de valeur aberrante d'un spécimen testé.

La procédure débute par le placement d'un spécimen dans le gabarit fixe et le voile dans le mors mobile. Ensuite le spécimen est mis sous une charge d'environ 50 N pour bien maintenir le spécimen. Le déplacement de la traverse est remis à zéro pour terminer la préparation. Le test débute ainsi que l'acquisition des données. Pour ce test, l'acquisition est la force en fonction du déplacement de la tête de la machine. L'acquisition enregistre 10 valeurs par seconde, soit une valeur toute les 0.1 s. La vitesse de traction est de 1 mm par minute pour les tests symétriques et de 1.5 mm par minute pour les tests asymétriques. Une fois la première rupture observée, l'acquisition de données continue le temps de s'assurer que le chargement ne dépasse plus la valeur de la première rupture. L'acquisition est ensuite stoppée manuellement. Les données enregistrées peuvent alors être analysées. Le chapitre 4 présente les résultats de tests effectués selon ce principe.





## **CHAPITRE 3**

### **PRODUCTION DE PRÉFORMES ASSEMBLÉES PAR COUTURE ET RENFORCÉES PAR TOUFFETAGE**

Ce chapitre se concentre sur la production de préformes. Y sont décrits les outils dans leurs utilisations quotidiennes avant que la conception d'outils spécifiques ne soit abordée. Plus particulièrement, ce chapitre présente les améliorations qui sont apportées à la technique de production ainsi que la résolution de problèmes liés à la fabrication des préformes. Enfin, une dernière partie aborde la caractérisation et l'inspection des préformes.

#### **3.1 Maitrise des outils**

##### **3.1.1 Robot**

Le robot support des têtes de couture est un KR 100 HA de la marque KUKA. Il s'agit d'un robot industriel à six axes à cinématique articulée, principalement utilisé dans l'industrie de la manutention, du montage, ou encore de l'usinage. Ce modèle présenté à la Figure 3.1 admet une charge nominale admissible de 100 Kg et une reproductibilité de  $\pm 0,05$  mm selon la norme ISO 9283

Sur le poignet du robot est installé un « changeur d'outil » spécialement conçu par le fabricant des outils et développé avec le manufacturier de robot. Ce « changeur d'outil » intervient telle une interface entre le robot et l'outil et permet d'actionner chacune des fonctions, qu'elles soient mécaniques, pneumatiques ou électriques. Chaque outil doit par conséquent posséder l'embase de connexion adaptée au changeur d'outil

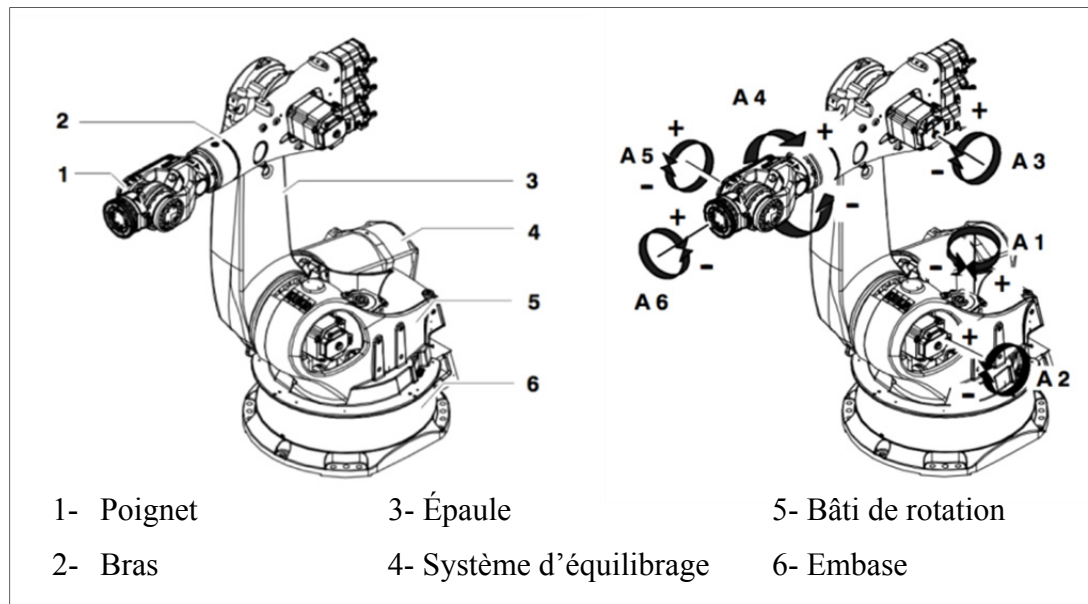


Figure 3.1 Robot KUKA KR 100 HA

Une armoire centralise les modules de commande et de puissance. Le robot est également doté d'une commande peu encombrante permettant de l'actionner. Les manipulations se font soit au moyen de programmes préétablis, soit par manipulations manuelles selon les axes et rotation du robot.

Le robot est installé sur une unité linéaire de type KL 1500, également de la marque KUKA, adaptée au robot. Cette unité permet une translation de 5500 mm selon une direction.

### 3.1.2 Nomenclature du renfort et paramètres de couture

Les paramètres de couture ont été présentés au chapitre 2.2.1. Cependant, d'autres éléments sont nécessaires dans l'objectif de comprendre le procédé et contrôler la production. La Figure 3.2 présente la nomenclature de la couture OSS® «2 Needle». Les boucles et le brin simple sont au-dessus de la préforme, les brins verticaux et ceux à 45° (côté du brin simple) la traversent alors que l'échelle se situe en dessous.

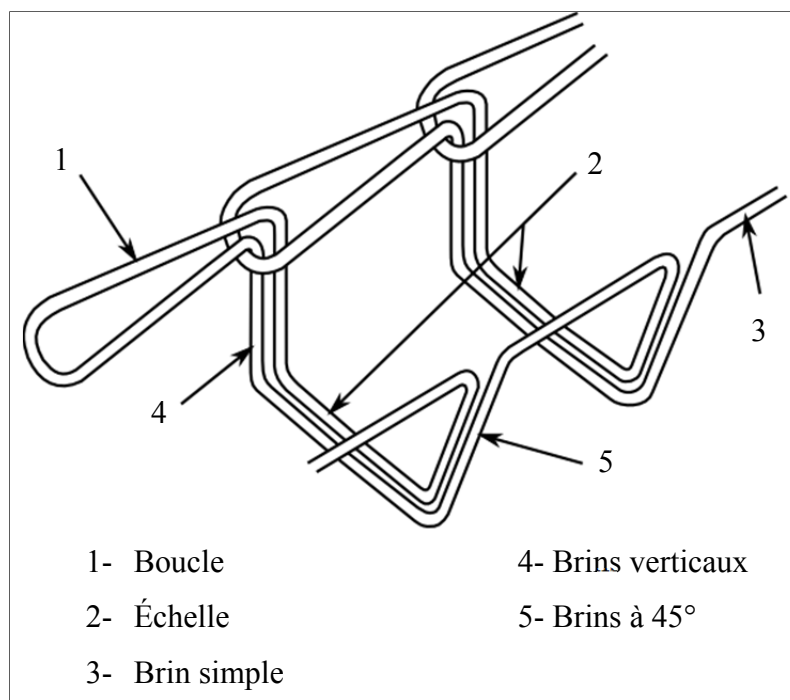


Figure 3.2 Nomenclature de la couture OSS® «2Needle»

L'enchaînement de la série de boucles les unes dans les autres forme la chaînette. Il est également important de mentionner que l'écart entre la chaînette et le brin simple est fixe. La vue de dessus de la Figure 3.3 montre ces deux éléments distants de 25 mm. L'échelle précédemment introduite est visible sur la vue de dessous.

Le fabricant des têtes de couture propose un kit permettant de réduire l'espacement de 25 mm. Cependant, Le Groupe CTT n'a pas fait acquisition de ce kit faute de besoin. Cette dimension est dès lors constante tout au long du mémoire.

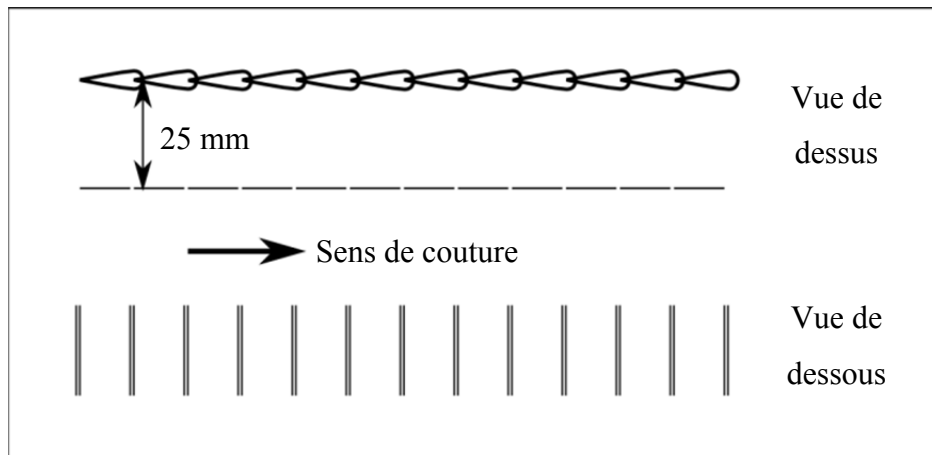


Figure 3.3 Vue de dessus et de dessous de la couture OSS® «2Needle»

Chaque partie de l'échelle est constituée de 2 fils de couture. L'espacement entre ces doublons équivaut à la longueur du pas de couture ou encore à la longueur d'une boucle. La largeur de l'échelle est présentée en Figure 3.4 et est égale à 25 mm auxquels est retranchée une fois l'épaisseur de la préforme. La valeur  $y$  est égale à l'épaisseur  $e$  dans la mesure où elle correspond à l'épaisseur par tangente ( $45^\circ$ ), or tangente ( $45^\circ$ ) vaut 1.

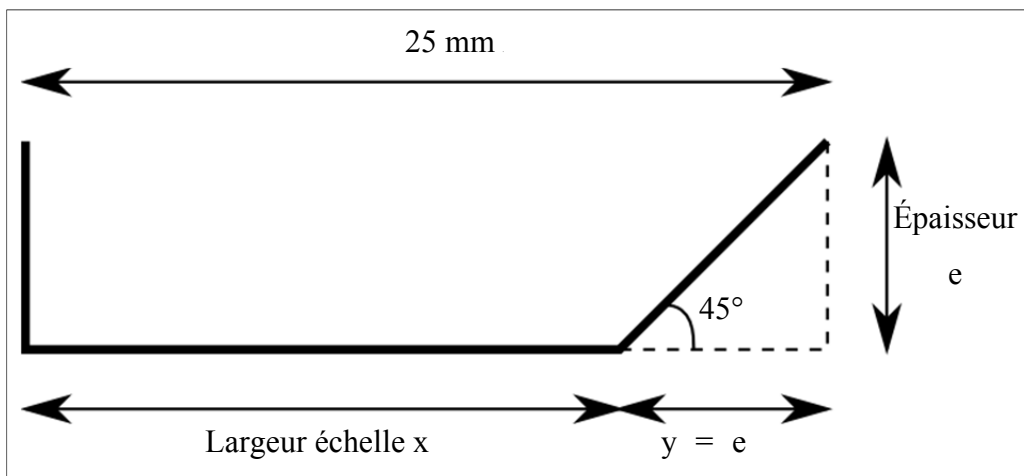


Figure 3.4 Couture dans l'épaisseur, calcul de la largeur de l'échelle

La tête de couture possède également un système de gestion de tension du fil de couture. Ce système consiste en un bras de rappel du fil qui intervient dans le processus de couture. Des tests réalisés afin de connaître l'influence de la tension dans le fil de couture montrent qu'il est compliqué de coudre lorsque cette tension est importante. En effet en présence d'une forte tension, le procédé a tendance à dégrader le fil de couture et générer de fortes contraintes dans les tissus qui composent la préforme. La tension, n'est pas graduée sur la tête de couture. Pour la suite des travaux, chacune des préformes est réalisée avec une tension constante que l'on pourrait considérer comme «modérée». Sous cette tension, le fil est tendu sans générer de contrainte néfaste à la préforme.

Grâce aux paramètres introduits à la section 2.1.1 et ceux présentés dans ce chapitre, la couture est caractérisable. Il est dès lors possible de maîtriser le procédé de production afin de réaliser des coutures de qualité.

Dans le cas du touffetage, moins de paramètres sont à prendre en considération. Par définition, le touffetage correspond à l'insertion d'un fil de renfort sans nœud dans la préforme. De ce fait, hormis la configuration du pas et de la profondeur d'insertion des boucles, il n'est nécessaire de réaliser aucun réglage de la tête en production. La principale préoccupation du renforcement par touffetage reste le support du laminé. Dans l'idéal, la préforme doit être disposée sur un panneau de mousse de polystyrène extrudé. En effet, la dureté de cette mousse permet d'assurer un maintien parfait du fil de touffetage. L'aiguille pénètre facilement la mousse puis cette dernière tend naturellement à reprendre sa forme initiale. Cette propriété est particulièrement intéressante dans la mesure où le fil de renfort est maintenu en place uniquement grâce aux forces de frictions au sein du laminé ou du support de ce dernier. Dans le cas où il n'est pas possible de travailler sur un panneau de mousse, le touffetage ne se fera qu'en zone stable. C'est-à-dire que la zone à touffeter doit s'avérer à la fois fixe et non déformable. La préforme ne peut bouger et l'aiguille ne doit pas déformer la géométrie du laminé. Idéalement la préforme doit se trouver dans un gabarit la supportant afin d'éviter les contraintes liées au procédé de touffetage.

### 3.1.3 Programmation

Le robot support des têtes de couture et de découpe est classiquement utilisé dans des chaînes de montage pour la réalisation de tâches répétitives. Notre utilisation en recherche et développement propose au contraire nombreuses tâches variées. La plupart des utilisations sont uniques. La plus grande difficulté est de programmer le robot afin d'actionner parfaitement l'outil installé selon l'action souhaitée.

De base, la programmation du robot est réalisée par des lignes de code correspondant à des actions et des mouvements élémentaires. La programmation est indépendante de l'outil manipulé pour la plupart des actions et pour l'ensemble des mouvements. Pour sélectionner ou se départir d'un outil, des programmes spécifiques sont disponibles. Les programmes peuvent appeler d'autres programmes notamment pour des changements d'outils ou des actions bien spécifiques comme celles qui consistent en la réinitialisation d'une tête ou l'utilisation de certaines fonctions des outils. Des données en entrée du système permettent de vérifier la présence d'un outil, l'état d'une action, ou la position du robot et de l'outil. Ensuite des blocs de commandes spécifiques à chaque outil permettent de paramétrer le robot et de l'utiliser.

Par la suite, le Groupe CTT a investi dans un logiciel de programmation permettant de simplifier la programmation. L'espace de travail du robot est virtuellement recréé dans le logiciel puis le programmeur indique les actions souhaitées dans cette espace. Il faut identifier les actions que l'on souhaite que la tête effectue ainsi que fournir les paramètres. Le logiciel transcrit ensuite sous forme de lignes de code les actions demandées.

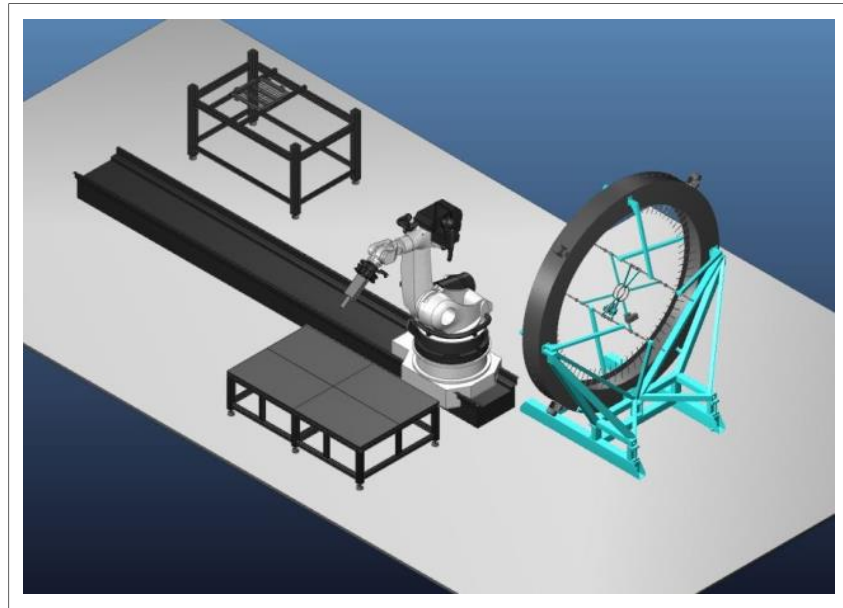


Figure 3.5 Espace virtuel du robot

## 3.2 Conception d'outillage spécifique

La production de préformes de qualité nécessite des outils de pointe et spécifiques aux applications. Cette section présente quelque uns de ses outils.

### 3.2.1 Gabarit d'empilement de tissus

Le processus d'empilement des plis du renfort fibreux s'avère être une étape de production à la fois longue et fastidieuse lorsqu'elle n'est pas automatisée. De plus, bien que répétitive, cette étape s'avère extrêmement déterminante pour la suite du processus de production. En effet, la bonne orientation des multifilaments influe directement sur les performances du matériau composite final. Un mauvais placement des plis lors de l'empilement se fera ressentir dès l'étape de couture où le risque de point de couture manqué sera plus important. Une étude le démontre à la section 3.4.1.

L'automatisation de cette étape est la meilleure des solutions. Le même robot qui assure la découpe du renfort fibreux et l'assemblage pourrait actionner un préhenseur de textile. Ce

dernier attrape les plis directement sur la table de découpe et procède à leur empilement sur la table d'assemblage. Toutefois cette technique est couteuse et nécessite de l'expérience. Le robot doit connaître l'emplacement exact des plis découpés et créer un empilement sans déformation. L'automatisation doit être parfaitement maîtrisée, dans le cas contraire, on retrouve le problème initial d'empilements incorrects. Le Groupe CTT a opté pour l'installation d'un tel système au sein du laboratoire « 3Dpreforms ». En attendant l'installation complète de ce système automatisé, l'empilement est effectué manuellement. Cependant la technique d'empilement à la main nécessite l'utilisation d'outils adaptés remplissant un cahier des charges précis. L'empilement est délicat, il est nécessaire de travailler précisément. Pour cela, l'auteur a imaginé un gabarit qui permet de facilement empiler les tissus ainsi que les transporter sans créer de déformation ou de dégrader les tissus. Le Tableau 3.1 et la Figure 3.6 présentent l'analyse fonctionnelle du gabarit d'empilement des plis de tissus.

Tableau 3.1 Liste des fonctions principales et fonctions de contraintes du gabarit d'empilement de plis de tissus

|     |                                                                 |
|-----|-----------------------------------------------------------------|
| FP1 | Permettre à l'utilisateur d'empiler les plis de tissus          |
| FP2 | Assurer le déplacement de l'empilement vers la table de couture |
| FC1 | Être rigide                                                     |
| FC2 | Être modulable                                                  |
| FC3 | Être léger                                                      |
| FC4 | Être lisse                                                      |



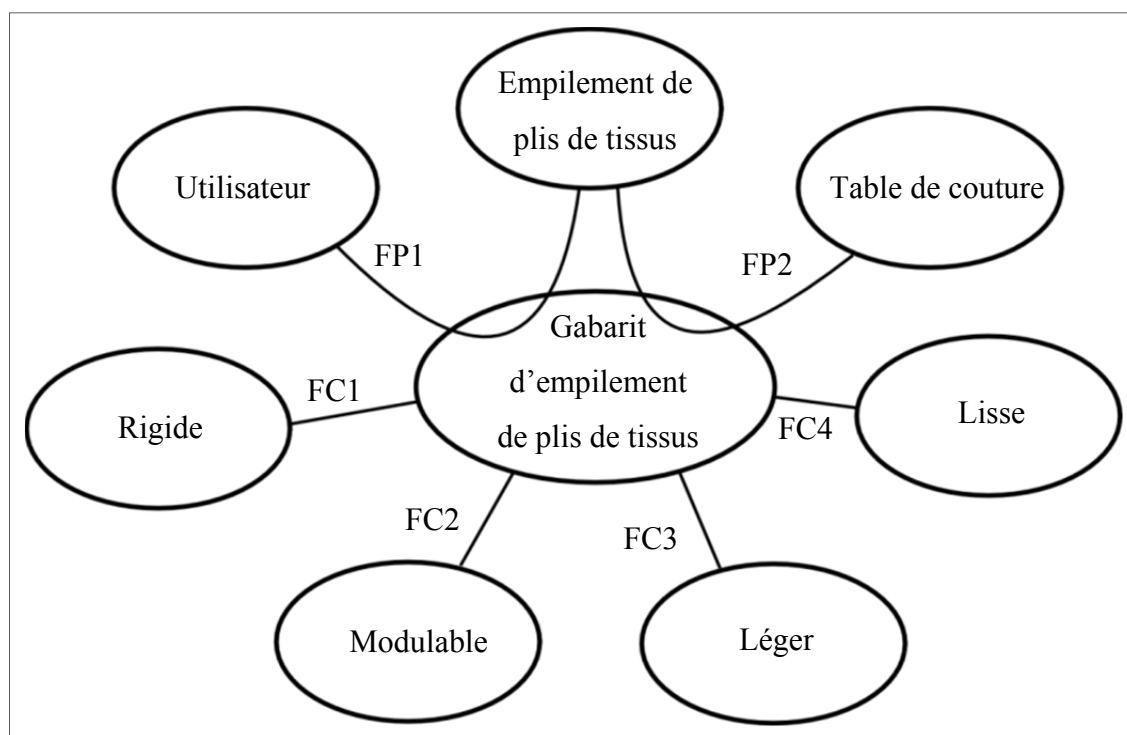


Figure 3.6 Diagramme pieuvre du gabarit d'empilement de plis de tissus

Dans le but de répondre le plus simplement et à moindre coût à l'analyse fonctionnelle du gabarit d'empilement, la fabrication se fait en interne. La solution retenue consiste en l'utilisation de matériaux standards de type bois et mélamine pour la rigidité et la légèreté. De plus la mélamine est suffisamment lisse pour ne pas abimer les plis de tissus. Le gabarit permet de réaliser des empilements d'épaisseur et de dimensions diverses allant jusqu'à 1500 x 1000 mm. La modularité est obtenue grâce à une arête fixe et une seconde mobile. Sur la Figure 3.7 la seconde arête est fixée dans un rail afin de pouvoir modifier sa position. Ces deux arêtes perpendiculaires permettent de placer les plis avec facilité en vue de créer l'empilement. Des graduations permettent de placer l'arête amovible à la longueur souhaitée et de la fixer à l'aide d'un système de pince. Ainsi, une fois le gabarit ajusté, les plis précédemment découpés sur une table de découpe s'insèrent parfaitement entre les deux arêtes et le bord du gabarit.

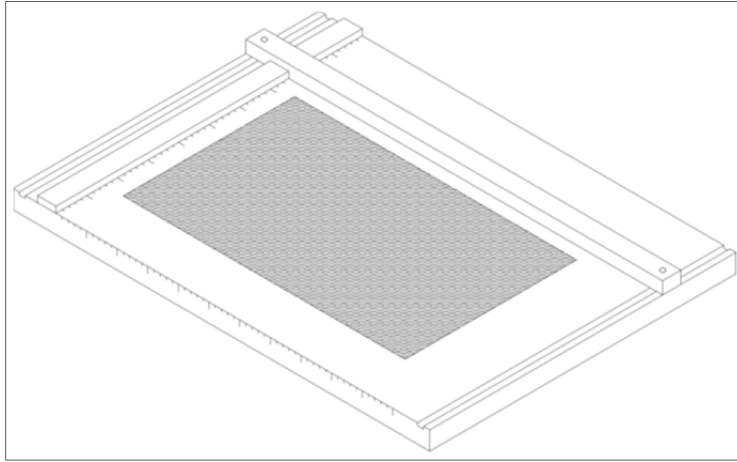


Figure 3.7 Schéma du gabarit d'empilement de tissus

Afin de simplifier le déplacement de l'empilement sur la table de couture, une feuille de papier est placée sur le gabarit. Le papier glisse facilement sur la mélamine sans déformer les plis de tissus puis se retire aussi facilement sur la table de couture. Dans le gabarit, sur le papier, un coin du pli de tissu doit être placé dans l'angle entre les 2 arêtes puis laisser le pli se draper simplement sur le gabarit. Pour certaines orientations de pli, notamment les  $\pm 45^\circ$ , l'utilisateur devra probablement manipuler le pli afin de le faire correspondre parfaitement à la forme déterminée. La Figure 3.8 présente le gabarit de couture réalisé.

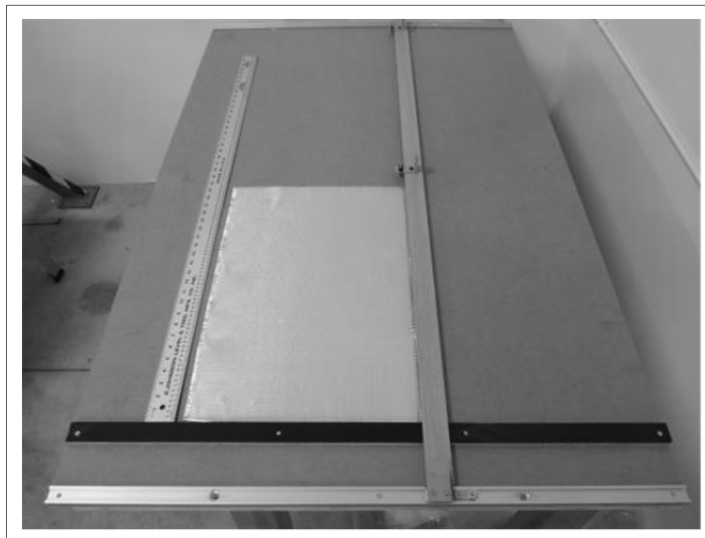


Figure 3.8 Gabarit d'empilement de couture

### 3.2.2 Gabarit de préformage

Le gabarit de préformage consiste en un support qui permet de maintenir la préforme sèche durant l'action de couture. Le passage des aiguilles sous la préforme nécessite une cavité dans le gabarit. Sur la Figure 3.9 est schématisé ce gabarit dont la partie fixe présente une cavité. La présence d'un mors coulissant permet de maintenir le voile dans le cas d'un raidisseur en « T ». Si la préforme à coudre ne possède pas de partie verticale, le mors peut simplement être fermé et se servir du gabarit comme d'une table avec cavité.

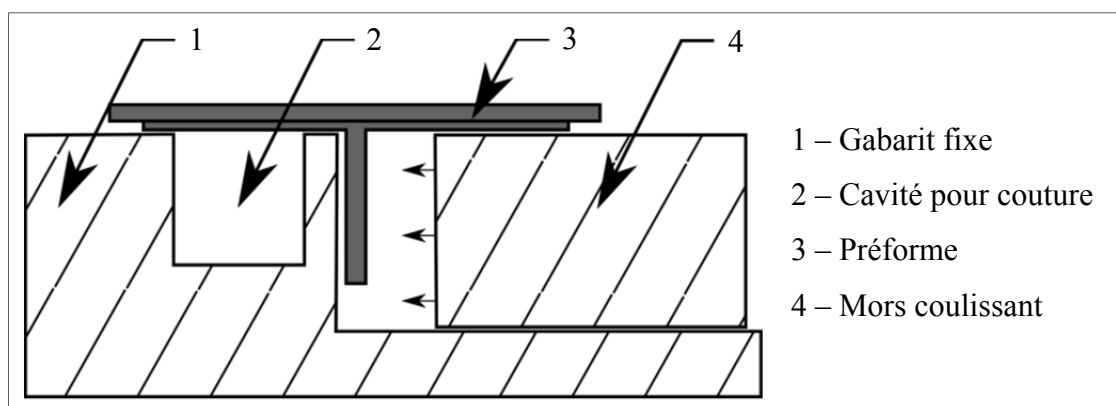


Figure 3.9 Gabarit de préformage

Le gabarit ici présenté s'avère parfaitement adapté pour réaliser le touffetage dans le voile. Le raidisseur est pressé dans le mors et parfaitement maintenu pour le touffetage. Un second gabarit de préformage est conçu spécialement pour le préformage des démonstrateurs. Il est basé sur le même système et est présenté à la Figure 5.1

### 3.2.3 Pied presseur de touffetage « multi-angle »

Le pied presseur a pour unique fonction d'assurer la pression localisée autour du point de pénétration de l'aiguille. Or le pied presseur d'origine présente une géométrie empêchant cette fonction selon un angle de touffetage différent de  $90^\circ$  par rapport au plan d'attaque. La Figure 3.10 correspond à la schématisation de ce pied presseur de base. On remarque qu'à  $90^\circ$  le pied remplit parfaitement sa fonction, en revanche ce n'est plus le cas à  $45^\circ$ .

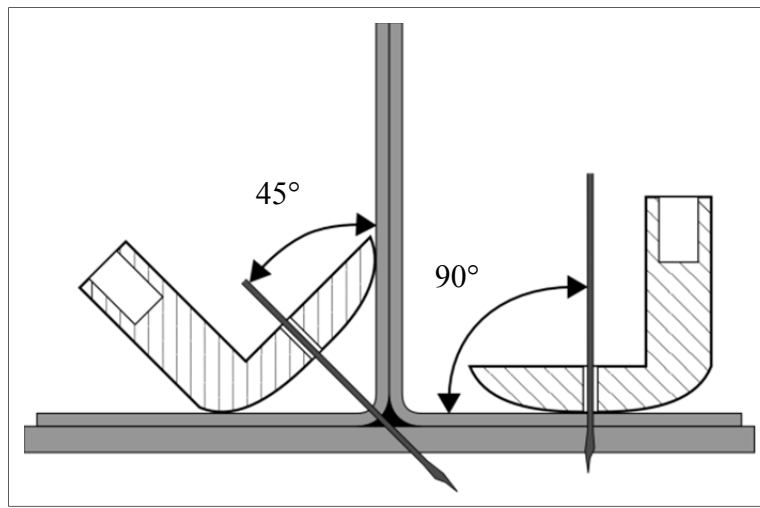


Figure 3.10 Schéma du pied presseur de base

Il est essentiel de pouvoir créer un pied presseur ayant une géométrie adéquate pour répondre à sa fonction selon un angle variant de  $45^\circ$  à  $135^\circ$ . Quel que soit l'angle dans cet intervalle, le pied doit presser la préforme autour du point de pénétration de l'aiguille. La géométrie a été revue et modifiée afin de ne disposer que d'un simple anneau autour du point de pénétration de l'aiguille. La mise en plan du pied presseur « multi-angle » est consultable en Annexe III, Figure-A III-1. Avec ce nouveau pied, le touffetage à angle devient une réalité. Il est dès lors possible de renforcer des zones auxquelles il était précédemment impossible d'accéder, comme dans la zone de transition entre le voile et la semelle du raidisseur. La Figure 3.11 schématise ce nouveau pied presseur intervenant dans cette zone de transition. La Figure 3.12 présente le nouveau pied ainsi que le résultat du touffetage à  $45^\circ$  au niveau de la transition entre le voile et le pied.

Ce pied presseur « multi-angle » est spécialement conçu pour les travaux du chapitre 4.

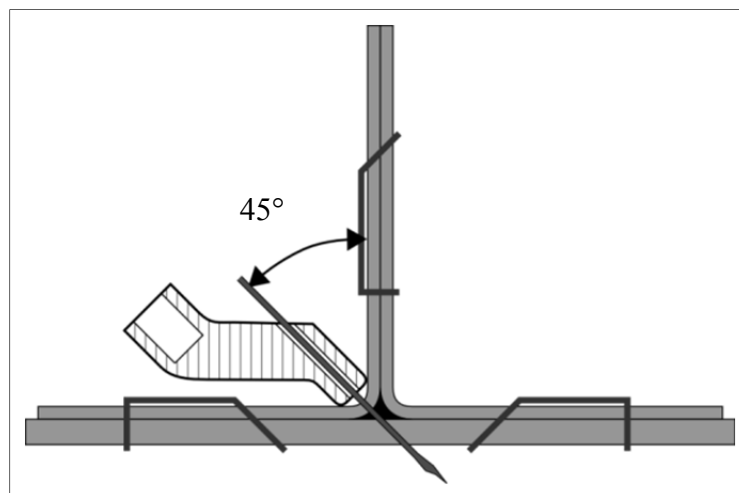


Figure 3.11 Schéma du pied presseur « multi-angle »

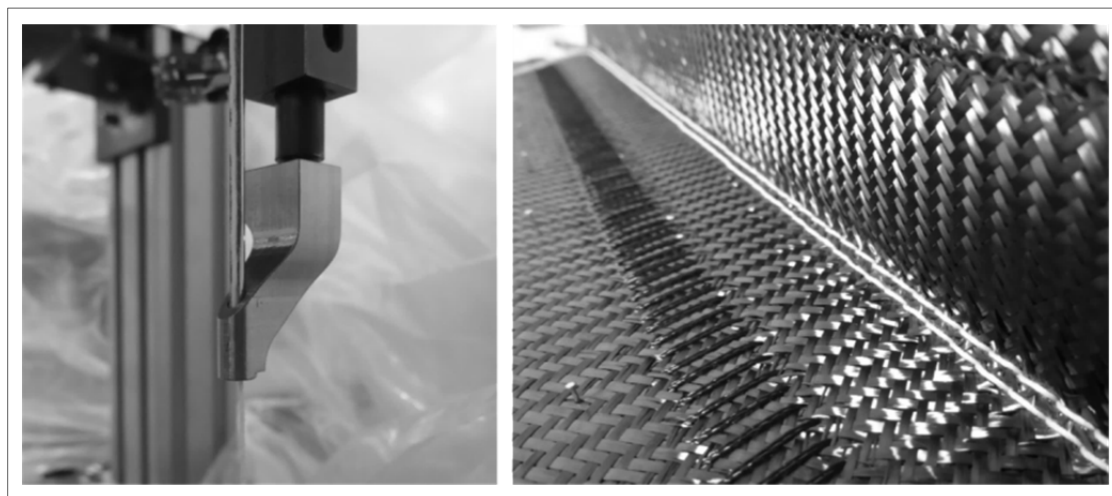


Figure 3.12 a) Pied presseur « multi-angle » b) Touffetage à 45°

### 3.2.4 Feuille de calcul de consommation de fil de couture

La feuille de calcul de consommation de fil de couture est un outil aussi simple qu'utile. Cette feuille vise principalement à estimer le coût en matière pour une préforme. Du point de vue de la production, elle est également efficace pour prévoir la fin d'une bobine de fil et l'approvisionnement en matière. La gestion des stocks peut être simplifiée grâce à un tel outil.

Le calcul de consommation nécessite de connaître quelques paramètres tels que le pas de couture, marqué  $p$  sur la Figure 3.13 et l'épaisseur  $e$  du laminé.

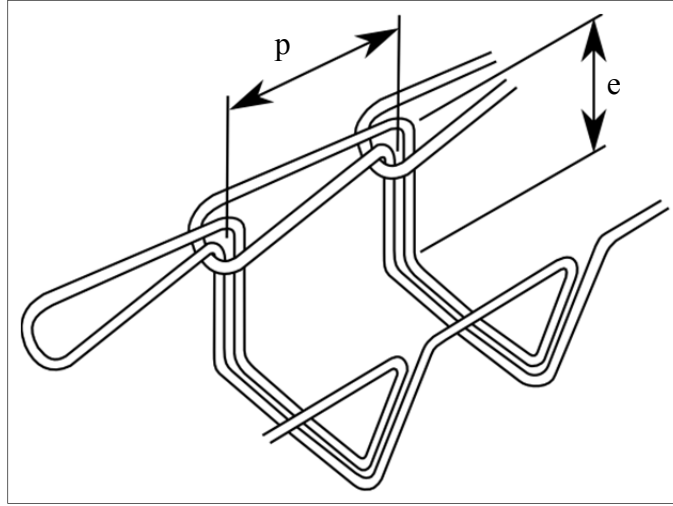


Figure 3.13 Paramètres de couture

Évidemment, la tension présente dans le fil influence également la consommation. Mais pour le calcul de cette dernière, la tension est fixée à une valeur usuelle permettant d'obtenir une couture de bonne qualité. Cette valeur correspond à la valeur discutée à la section 3.1.2.

Le calcul de consommation de fil de couture est défini à partir de l'Équation (3.1) et utilise l'Équation (3.2) afin de définir le nombre de points en fonction de la longueur de couture.

$$L = Nombre_{points} \times [3 \times p + 2 \times e + 2 \times e / \cos 45^\circ + 2 \times (25 - e)] \quad (3.1)$$

Avec

$$Nombre_{points} = \frac{Longueur\ couture}{pas} + 1 \quad (3.2)$$

L'expérience a démontré que la consommation réelle est en moyenne 3% plus faible que la consommation théorique dans un cas de couture classique. Lorsque la couture est réalisée avec une tension maximale, l'écart peut atteindre 25%.

### 3.3 Production

#### 3.3.1 Couture OSS® « 2Needle »

La couture « 2Needle » est un procédé totalement automatisé du fait de l'utilisation d'une tête de couture. Cependant, deux défauts sont régulièrement visibles : il est possible de constater des points de couture manqués ou des fibres sorties du plan. Un point de couture manqué n'est autre qu'une boucle n'ayant pas été prise dans la précédente, ce qui crée un défaut local. Les fibres sorties du plan quant à elles sont des fibres provenant des plis du renfort fibreux qui sont accrochées par l'une des aiguilles et déplacées de leur position initiale. La Figure 3.14 montre une couture sur laquelle apparaissent ces deux défauts.

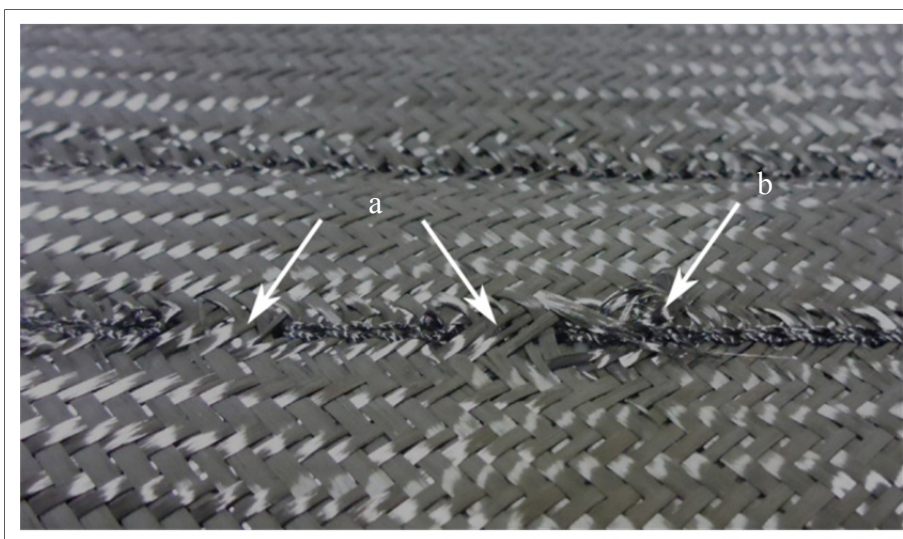


Figure 3.14 Défauts de couture : a) points manqués  
b) fibres sorti de la préforme

Certains détails dans la préparation des tissus et de l'empilement peuvent avoir une importance significative sur la récurrence de ces défauts. L'un des facteurs identifiés est la

qualité de l'empilement qui s'avère être un réel défi, c'est pourquoi la section 3.5.1 s'y consacre. Une seconde façon de prévenir ces défauts a été testée. Elle consiste en l'ajout d'un papier entre la préforme et le pied presseur de la tête de couture. Le papier devra ensuite être éliminé sans abîmer ni la préforme ni la couture.

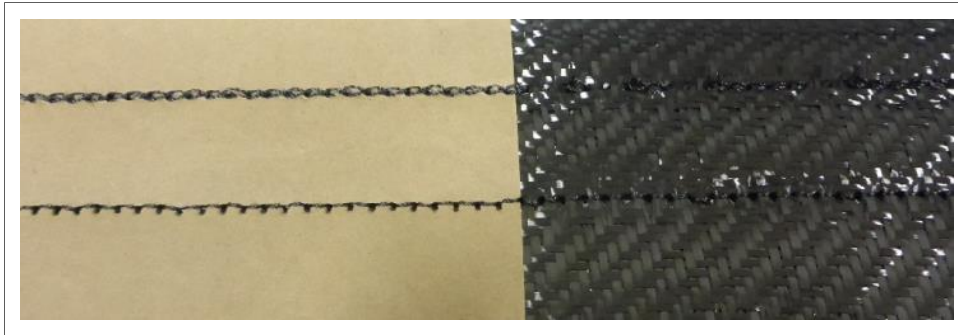


Figure 3.15 Couture avec et sans papier

Le papier utilisé est de type papier Kraft perforé. Il s'avère particulièrement résistant et permet la pénétration des aiguilles de couture. Aucune étude statistique sur les performances de ce procédé n'est réalisée. Seule des constations visuelles ont avéré l'utilité du papier. On observe moins de points sautés ainsi que de fibres sorties du plan. La Figure 3.16 présente un raidisseur en « T » du projet COMP-501 avec le renfort fibreux TG-09-T préformé par couture avec et le fil de couture 2x67 Tex et prêt pour l'imprégnation de résine. On observe qu'il se maintient parfaitement.



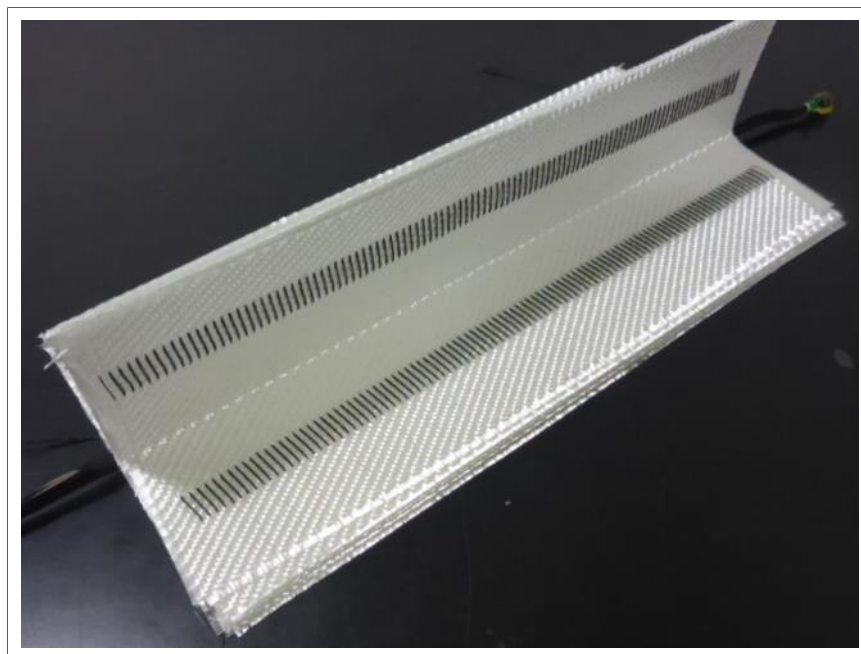


Figure 3.16 Raidisseur en « T » du projet CRIAQ COMP-501  
préformé par couture OSS®

### 3.3.2 Touffetage

La principale difficulté du touffetage consiste en le maintien de la boucle dans la préforme, comme introduit à la section 3.1.2. Tant que possible, la préforme est placée sur un panneau de mousse de polystyrène extrudé. Cependant il n'est pas toujours possible de procéder de la sorte. Si l'on reste sur la géométrie du raidisseur en « T » le gabarit de maintien pourrait être le même que celui servant à l'ouverture de la préforme vue à la Figure 2.9. Il n'est pas évident de déterminer la pression du gabarit sur le voile. En effet, s'il est trop serré, l'aiguille ne peut se frayer un chemin et risque de pousser sur la matière plutôt que de la pénétrer. Au contraire, s'il n'est pas suffisamment serré, les forces de friction risquent de ne pas être assez importantes pour maintenir le fil de renfort dans la préforme. Dans le premier cas, on risque d'obtenir un matériau composite non conforme avec la matière déplacée telle que visible sur la Figure 3.17. Dans le second, le touffetage peut tout simplement être un échec.

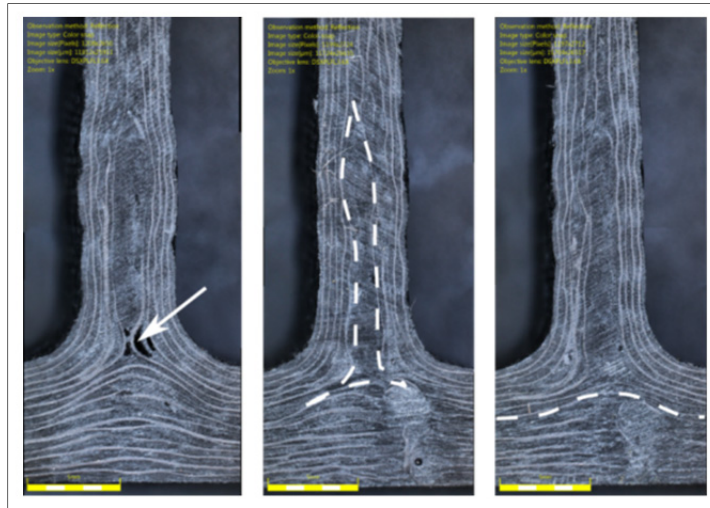


Figure 3.17 Défauts de production : zone sèche, nouilles déplacées et désorientation des fibres

### 3.4 Caractérisation et inspection

#### 3.4.1 Influence de la qualité de l'empilement sur la couture

Il a précédemment été discuté à la section 2.4.2 que la qualité de l'empilement de tissus influence profondément la qualité de la couture. Il est complexe de définir la notion d'empilement de bonne qualité tant celle-ci est subjective. Cependant, il est essentiel d'assurer le meilleur empilement possible. Afin de définir la qualité d'un empilement, une liste non exhaustive de défauts couramment rencontrés est présentée ci-dessous. Elle permet de définir des situations inadmissibles qui peuvent se manifester durant la production et qui influent négativement sur la qualité du laminé puis du composite. Les trois défauts principaux sont les suivants :

- Déviation de l'orientation des fibres d'un pli d'au moins  $10^\circ$  par rapport à l'orientation originale. Visuellement, seuls les plis externes peuvent présenter ce défaut.
- Imperfection ou déformation locale (trou, fibres hors-plan, etc.)
- Présence de corps étrangers (fibres non souhaitées, poussière, impuretés diverses, etc.) dans ou sur l'empilement.

Afin de faciliter la détermination de la qualité, il est défini qu'un empilement est conforme s'il ne présente aucun défaut cité ci-précédemment. À l'inverse tout empilement présentant au moins un de ces défauts est défini comme étant de qualité « imparfaite ».

L'hypothèse est faite que la présence d'un ou plusieurs des défauts entraîne un plus grand nombre de points manqués. Pour l'étude, les empilements sont triés selon deux classes : les « imparfaits » et les « conformes ». Le moyen de comparaison est le taux de points manqués sur chacune des classes d'empilement. Plus d'une dizaine d'essais ont été réalisés par configuration. La Figure 3.18 présente les résultats.

On observe un important écart entre les deux classes d'empilement puisque huit fois plus de points sont manqués en moyenne pour un empilement « imparfait ». Les écarts-types sont important à la vue des valeurs de taux de points manqués, toutefois, ils ne se chevauchent pas. Selon un test de Student, les résultats sont significatifs à plus de 1 %. Il est alors possible de conclure que la qualité de l'empilement est primordiale pour la réussite du procédé.

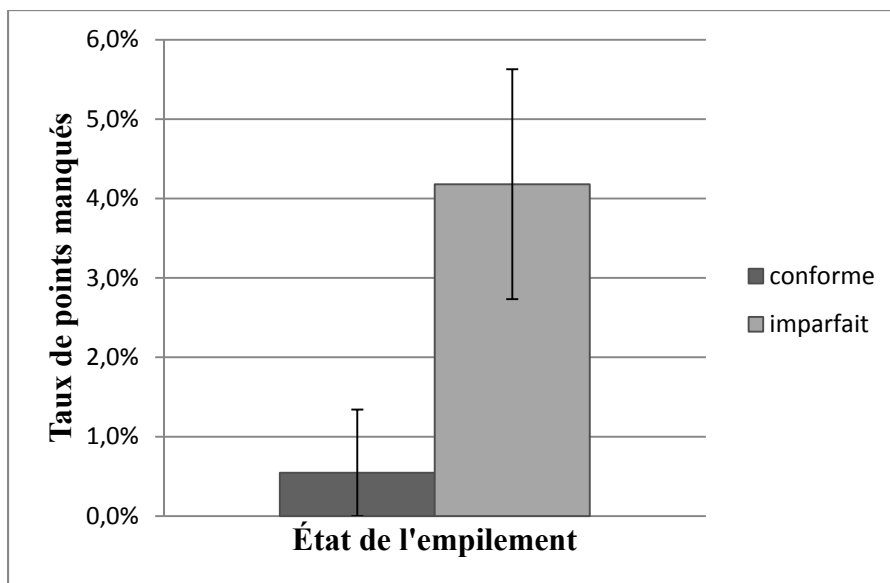


Figure 3.18 Taux de points de couture manqués en fonction de la qualité de l'empilement

Il est intéressant de noter que la qualité de l'empilement n'influence pas l'action de touffetage. C'est la nature du média à touffeter qui influe sur la faisabilité du touffetage : composition du renfort fibreux, mousse pour retenir les boucles, position, etc. Cependant, le fait de touffeter dans une zone qui a déjà été touffetée et dont le fil de renfort a été retiré, a tendance à impacter négativement la qualité du touffetage. Il en est de même pour la couture.

### **3.4.2 Inspection visuelle des préformes sèches**

L'inspection non destructive des matériaux composites reste complexe et onéreuse, d'autant plus lorsqu'il s'agit d'une préforme non imprégnée de résine. Sans équipement d'inspection de pointe au sein du Groupe CTT, l'inspection des préformes sèches se fait visuellement. L'inspection s'avère plutôt une attention permanente qu'un exercice ponctuel. Certes, certains moments s'avèrent davantage propices à une inspection comme après le déplacement d'une préforme ou après la réalisation d'une couture. L'inspection visera principalement à vérifier l'orientation de plis de tissus ou du fil de couture pour s'assurer qu'il n'y a ni déplacement de matière, ni point de couture manqué, etc. Cependant, il ne faut négliger l'inspection à aucun moment. En effet, l'inspection visuelle doit être réalisée durant l'empilement, la préparation de la préforme ainsi que l'installation du papier de couture et des fixations. Il s'agit de repérer les impuretés ou encore les agents pouvant altérer la réalisation de la couture.

Le principal avantage de ce type d'inspection est qu'elle est réalisée en temps réel, chaque intervenant est mis à contribution et la réactivité est importante. Il est possible de reprendre une mauvaise couture, sceller une couture non terminée ou remplacer un élément. Ce type d'inspection présente tout de même une limite puisqu'elle dépend la vision d'un humain et sa concentration qui sont toutes deux assujetties à ses émotions.

La thermographie est une solution explorée au sein du Groupe CTT mais l'investissement n'a pas encore été réalisé.

### **3.4.3 Inspection des spécimens par microscope**

Le microscope utilisé est un Olympus DSX100, équipé d'une lentille DSXPLFL3.6X. Cet équipement permet de prendre des photos de très haute définition grâce à divers filtres et une netteté optimale. La lentille permet un grossissement jusqu'à 386X bien que qu'un tel zoom ne soit jamais utilisé dans cette étude. Le microscope permet l'inspection des spécimens, principalement au niveau de la nouille, en vue de s'assurer que cette dernière est correctement implantée. Malheureusement, à ce stade de la production, le raidisseur est imprégné de résine et découpé, aucun recours n'est possible en cas d'anomalie inacceptable.



## **CHAPITRE 4**

### **ÉVALUATION DE L'EFFET DU TOUFFETAGE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES D'UN RAIDISSEUR EN « T »**

Ce chapitre présente les études qui ont conduit au choix de la configuration de couture et de renforcement par touffetage. Dans un premier temps sont abordées les études préliminaires qui ont été menées sur les paramètres et l'emplacement de la couture. Ensuite, les premiers tests de renforcement par touffetage sont présentés. Enfin, dans un dernier temps, le choix qui est fait concernant la configuration de couture et de touffetage est expliqué. Ce processus amène à l'évaluation des propriétés mécaniques en arrachement de raidisseurs en « T » préformés par couture et renforcés par touffetage.

#### **4.1 Introduction au renforcement par touffetage**

Le projet CRIAQ COMP-501 vise à simplifier la production de préformes 3D complexes et à s'assurer de leur reproductibilité tout en améliorant leurs performances mécaniques. En effet, la couture doit si possible améliorer les performances mécaniques des préformes ou au minimum conserver les propriétés du laminé non renforcé. Les conclusions des travaux de Morin (2015) prouvent que la couture remplit la fonction de préformage. Par contre, elle semble montrer des faiblesses concernant les performances mécaniques des préformes, notamment au niveau des zones de concentration de contraintes comme la nouille. Afin de renforcer cette zone, le touffetage apparaît comme une solution intéressante. Des essais préliminaires de touffetage au niveau de la nouille ont été réalisés dans deux buts :

- satisfaire les travaux sur la nouille du projet COMP-501. Ceux-ci sont effectués par L. West.
- valider la faisabilité du touffetage dans la zone de la nouille.

#### 4.1.1 Choix de la configuration de couture

##### 4.1.1.1 Tests

La configuration de couture pour le projet COMP-501 a été choisie en accord avec les conclusions des travaux de Morin (2015). Les travaux portaient sur l'évaluation des performances mécaniques de raidisseurs en T préformés par couture. Cette évaluation est basée sur les performances à l'arrachement (symétrique et asymétrique) ainsi que la rigidité à la flexion. Les tests d'arrachement sont tels que décrits dans la section 2.6.2. Cinq configurations de couture ont été testées et comparées à une référence non cousue. Le Tableau 4.1 et la Figure 4.1 décrivent ces configurations de couture.

Tableau 4.1 Configurations de couture et leurs paramètres  
Tiré de Morin (2015, p. 42)

| Spécimen | Voile                      |                           | Semelle                    |                           |
|----------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
|          | Distance de la couture (D) | Orientation de la couture | Distance de la couture (D) | Orientation de la couture |
| 00.0     | --                         | --                        | --                         | --                        |
| ST.1     | 5 mm                       | Adjacente                 | 20 mm                      | Adjacente                 |
| ST.2     | 20 mm                      | Adjacente                 | 20 mm                      | Adjacente                 |
| ST.3     | 32 mm                      | Opposée                   | 20 mm                      | Adjacente                 |
| ST.4     | 42 mm                      | Opposée                   | 27 mm                      | Opposée                   |
| ST.5     | 42 mm                      | Opposée                   | 34 mm                      | Opposée                   |



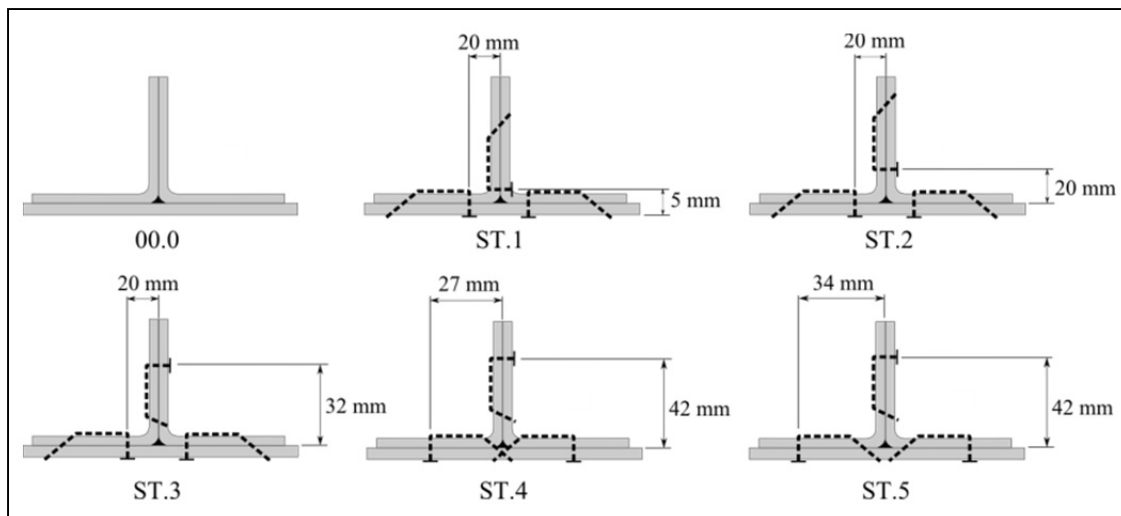


Figure 4.1 Configuration de couture  
Tirée de Morin (2015, p. 43)

La faiblesse naturelle des raidisseurs en T au niveau de la nouille est connue. Il y a une volonté d'évaluer la capacité de la couture à renforcer cette zone. Par exemple la configuration ST.1 présente la couture du voile au plus proche de la nouille ou encore la ST.4 est cousue avec le brin simple directement dans la nouille.

#### 4.1.1.2 Résultats des tests d'arrachement

Le Tableau 4.2 présente les initiations à la rupture ainsi que le chargement maximal des préformes sous arrachement symétrique et asymétrique. Les Figure 4.2 et Figure 4.3 illustrent ces résultats. Le chargement d'initiation de la rupture sert d'évaluation dans le cadre industriel du projet. Le chargement maximal sert principalement d'indicateur du potentiel d'amélioration des performances après endommagement.

Tableau 4.2 Résultats des tests d'arrachement symétriques et asymétriques  
Adapté de Morin (2015, p. 68)

| Motif | Arrachement symétrique        |                         | Arrachement asymétrique       |                         |
|-------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
|       | Initiation de la rupture (kN) | Chargement maximal (kN) | Initiation de la rupture (kN) | Chargement maximal (kN) |
| 00.0  | 10,3                          | 10,3                    | 1,4                           | 1,5                     |
| ST.1  | 4,6                           | 5,5                     | 1,2                           | 1,4                     |
| ST.2  | 8,8                           | 8,8                     | 1,1                           | 1,6                     |
| ST.3  | 6,0                           | 9,7                     | 1,6                           | 1,6                     |
| ST.4  | 4,2                           | 4,9                     | 0,6                           | 0,9                     |
| ST.5  | 8,0                           | 8,0                     | 0,7                           | 1,2                     |

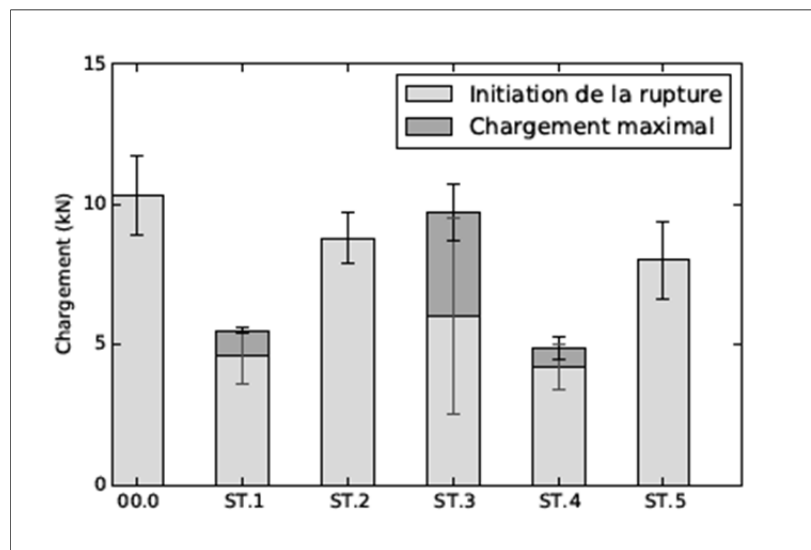


Figure 4.2 Résultats des tests d'arrachement symétrique  
Tirée de Morin (2015, p. 69)

Les résultats montrent que les configurations ST.1, ST.3 et ST.4 possèdent la plus forte dégradation. Ce sont également les configurations qui possèdent de la couture au plus proches de la nouille. Le fil de couture apporte des déformations locales qui facilitent

l'initiation de fissures. Les bénéfices que pourraient apporter la couture sont négligeables par rapport aux pertes qu'engendrent les perturbations qui sont dues à la couture.

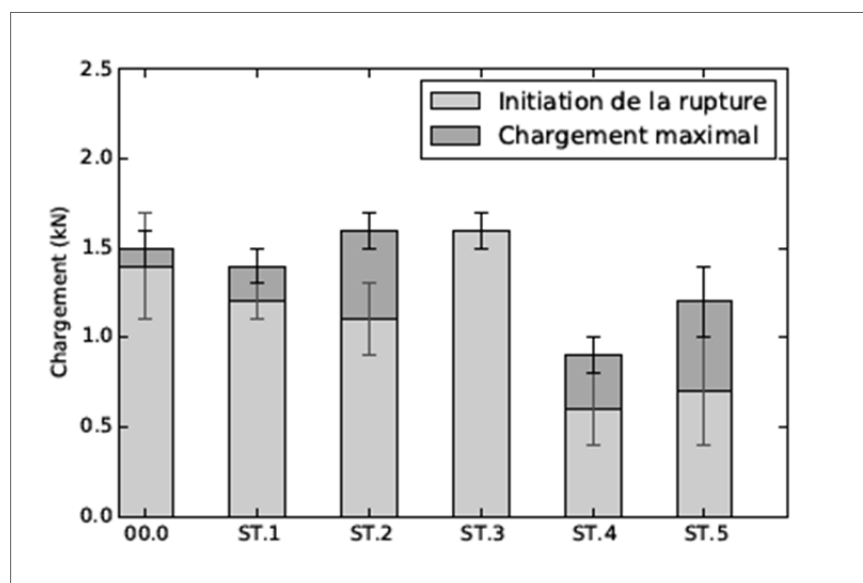


Figure 4.3 Résultats des tests d'arrachement asymétrique  
Tirée de Morin (2015, p. 73)

On remarque ici que le fait de placer la couture trop proche de la nouille réduit considérablement les performances en arrachement avec les configurations ST.4 et ST.5.

Il est impossible de définir un mode de rupture préférentiel pour l'arrachement. Trois modes, visibles en Figure 4.4, se répètent en des proportions similaires dans le cas de l'arrachement symétrique. Le gabarit de test d'arrachage ne permet pas de voir le lieu exact d'initiation à la rupture. En revanche, cette dernière se produit toujours au plus proche de la zone où se trouve la nouille puis se propage depuis l'interface entre la nouille et le tissu avant d'évoluer dans le voile et/ou dans la semelle.

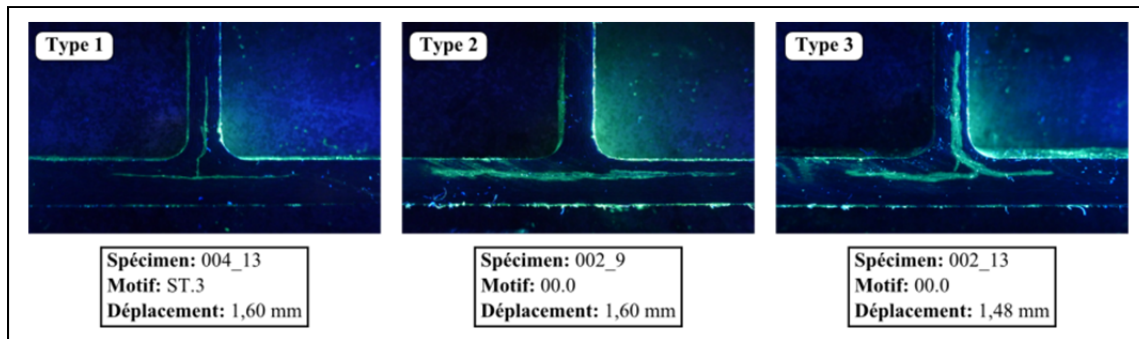


Figure 4.4 Modes de rupture visibles pour les tests d'arrachement  
Tirée de Morin (2015, p. 71)

Les résultats des tests d'arrachement présentés ici ne sont pas comparables aux prochains résultats en termes de performances dans la mesure où un système de résine différent a été utilisé. En effet, les échantillons de Morin (2015) se composent d'une résine « haute température » utilisée par un donneur d'ordre du projet. Cette résine est plus complexe à mettre en œuvre mais elle présente de meilleures propriétés mécaniques. Les tests avec touffetage sont réalisés avec la résine de base présentée au chapitre 2.3.4 pour des raisons de coût et de simplicité de réalisation. Par contre leurs tendances peuvent être étudiées.

#### 4.1.1.3 Conclusion des travaux sur la couture

Les conclusions des travaux de Morin (2015) présentent la couture comme une technique prometteuse pour le préformage. Par contre, la couture ne semble pas le meilleur procédé concernant le renforcement des propriétés mécaniques. En effet, la couture a tendance à apporter des déformations locales facilitant l'initiation et la propagation de fissure. Malgré tout, il est possible de préformer facilement et efficacement avec la couture OSS® « 2needle ». La boucle apparaît comme une forte zone de contrainte. On préférera donc éloigner les boucles de la nouille dans la semelle. La configuration de couture finale pour le démonstrateur est alors définie à la Figure 4.5.

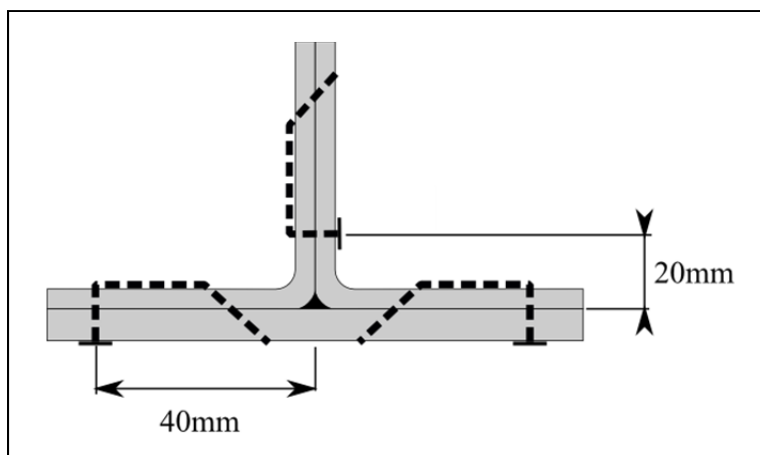


Figure 4.5 Configuration finale de couture  
Tirée de Morin (2015, p. 85)

Concernant le renforcement de la nouille, la couture ne donne pas de résultats satisfaisants. La correction de la faiblesse au niveau de la nouille ne se fera par conséquent pas par couture. La technologie de touffetage est présentée par la suite pour renforcer cette faiblesse. L'insertion du fil de renfort sans tension semble plus adaptée dans cette zone critique.

#### 4.1.2 Tests de touffetage dans la région de la nouille

##### 4.1.2.1 Premier test

Afin de valider la faisabilité du touffetage dans la zone de la nouille, un premier test a été effectué. Le principe retenu est de tester plusieurs configurations de touffetage sur un même échantillon, ainsi seul le paramètre touffetage change. Les quatre configurations retenues sont détaillées dans le Tableau 4.3 et sur la Figure 4.6. La première configuration, #1.1, sert de référence et n'est ainsi pas renforcée. Les trois autres configurations présentent un renforcement par touffetage. Ce renforcement est exclusivement réalisé par pénétration de fil par la peau du raidisseur au niveau de la nouille comme l'indique la Figure 4.6. Ce choix est lié au fait que le pied presseur de base de la tête de touffetage ne permet pas de touffeter à angle. En effet, le pied presseur multi-angle, introduit au chapitre 3.2.3, était en cours de conception au moment de cette première série de tests.

Tableau 4.3 Paramètres des patrons de touffetage des tests #1

| Configuration  | #1.1 | #1.2                              | #1.3     | #1.4                    |
|----------------|------|-----------------------------------|----------|-------------------------|
| Touffetage     | -    | ✓                                 | ✓        | ✓                       |
| Pas, mm        | -    | 4                                 | 4        | 4                       |
| Profondeur, mm | -    | 14                                | 24       | 14                      |
| Patron         | -    | 1 rangée                          | 1 rangée | 2 rangées <sup>*1</sup> |
| Fil de renfort | -    | Fil de carbone, 4 brins, 4x67 Tex |          |                         |

Remarque <sup>\*1</sup> : Il y a une compensation de 2 mm entre les deux rangées. Ces deux rangées sont écartées de 1.5 mm du centre de la nouille, un écart de 3 mm les sépare donc toutes les deux. Ces deux paramètres permettent de dessiner un patron triangulaire comme décrit à la section 1.3.2.

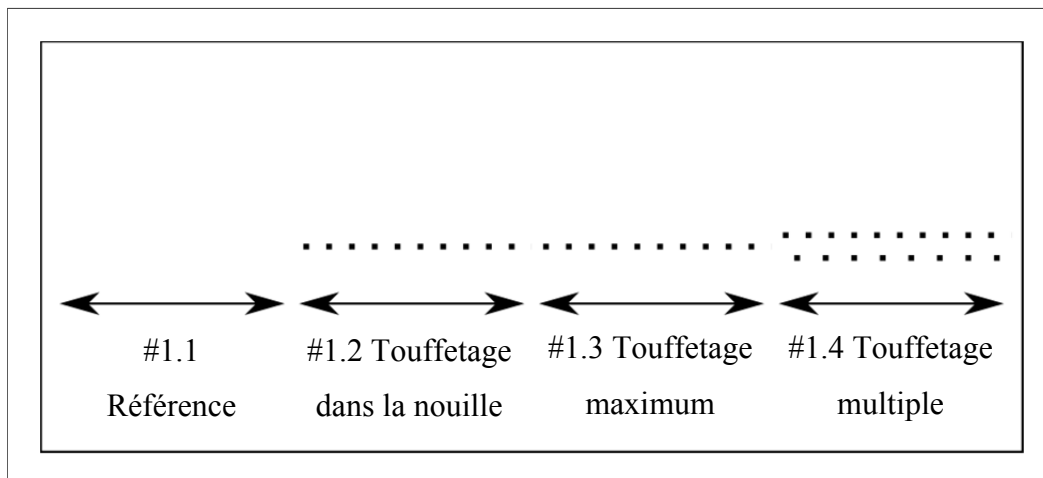


Figure 4.6 Configuration de touffetage du raidisseur test #1, vue de dessous

Le renfort fibreux choisi est la fibre de verre dans la mesure où elle permet d'observer facilement la nouille mais aussi le fil de renfort qui sont tous deux en carbone. En effet le verre devient quasi-transparent après imprégnation tandis que le carbone reste noir. La nouille utilisée à ce moment était constituée de 22 brins de carbone 12K unidirectionnels.

Plus d'informations sur les matériaux sont disponibles à la section 2.3. Le choix de la nouille tressée s'est notamment imposé suite à ces tests de touffetage.

#### 4.1.2.2 Résultats

La production de cette série de raidisseurs fut quelque peu problématique. Le touffetage se maintient dans la préforme par les forces de frictions. Malheureusement, il s'avère que le type de nouille sélectionné ne présente pas les requis nécessaire pour maintenir le fil de renfort en son sein. De plus, ce type de nouille a tendance à se déplacer de sa zone de base. Ce phénomène est d'autant plus visible avec l'action de touffetage. L'aiguille a tendance à pousser sur la matière et la nouille s'en retrouve déformée. La Figure 4.7 illustre parfaitement ce phénomène avec une nouille sortie de son emplacement initial schématisé en pointillés.

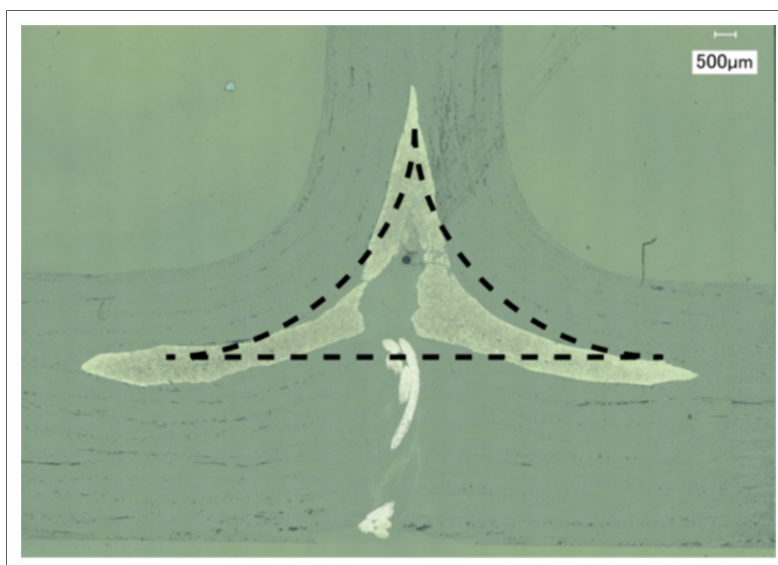


Figure 4.7 Déformation de la géométrie de la nouille

La Figure 4.8 présente un cas critique de déplacement de la nouille par l'aiguille de touffetage. L'intégralité de la nouille se trouve dans le voile.

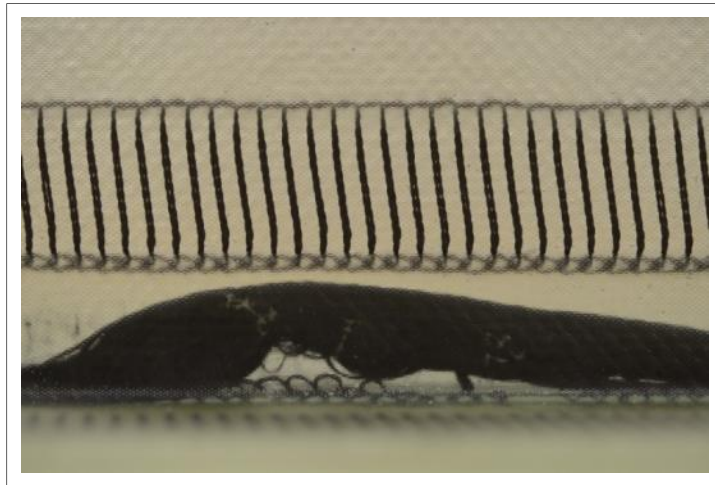


Figure 4.8 Déplacement de la nouille dans le voile

Une seconde difficulté fut l'imprégnation de résine, la zone renforcée présentant une forte concentration de porosités et de fibres sèches. La Figure 4.9 montre ce phénomène. Un travail d'amélioration du procédé d'imprégnation a été réalisé afin de minimiser ce problème.

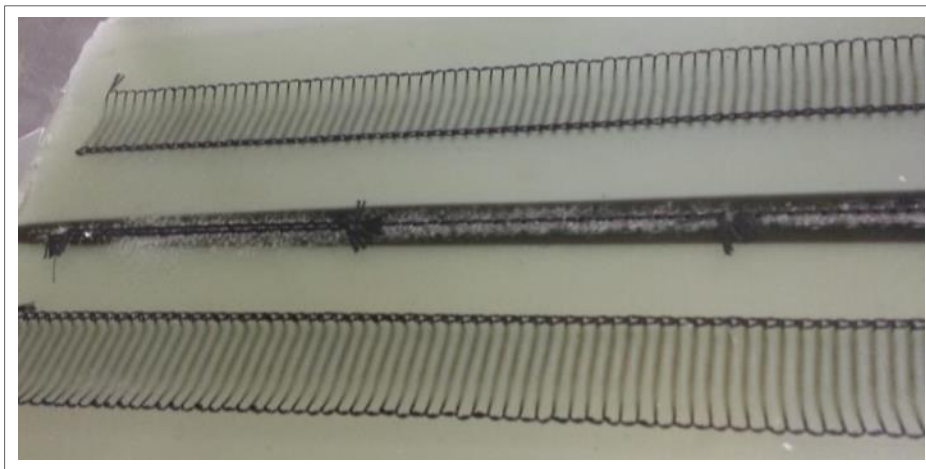


Figure 4.9 Porosités concentrées au niveau du renfort touffeté

L'observation de la nouille et du fil de touffetage après imprégnation démontre que le fil ne reste pas dans la préforme comme il le devrait. Ce phénomène peut être observé sur la Figure 4.10. On y observe la configuration #1.2, avec une touffe pénétrée de 4.37 mm alors qu'une profondeur de 14 mm est attendue. De plus, la nouille est fortement déformée.



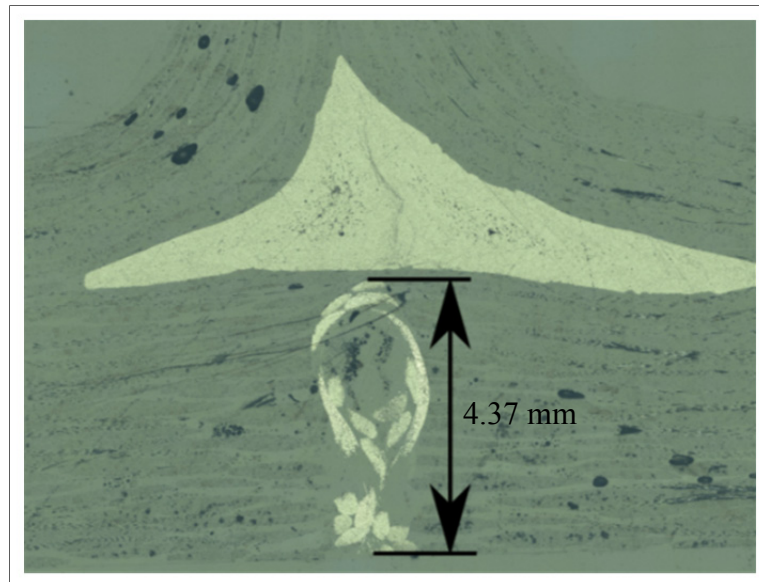


Figure 4.10 Longueur du renfort dans le laminé #1.2

#### 4.1.2.3 Seconde série de test

En conséquence des résultats peu encourageants de la première série de test, la seconde série se concentre sur une nouvelle façon d'introduire le renfort par touffetage. La solution retenue est une insertion à  $45^\circ$  au niveau du rayon de la nouille de part et d'autre du voile. L'innovation consiste en le fait que la préforme puisse maintenant être placée sur un panneau de mousse, introduit à la section 3.1.2, qui retient les boucles. En effet l'aiguille pénètre la préforme de part en part ainsi que la nouille qui emprisonne la boucle. Ce touffetage à angle est possible pour cette nouvelle série de test grâce à l'usinage du pied presseur multi-angle, présenté au chapitre 3.2.3. Les deux configurations ici testées ne diffèrent pas par le touffetage mais par les matériaux utilisés. En effet, la première configuration, #2.1, est composée de tissus de verre TG-09-T et d'un fil de renfort de carbone, ainsi, le renfort de carbone sombre peut être observé dans le verre translucide. La seconde, #2.2, est en revanche constituée de tissus de carbone TC-06-T et d'un fil de renfort de polyester. Le Tableau 4.4 concentre les paramètres des deux configurations.

Tableau 4.4 Paramètres des configurations de touffetage des tests #2

| Configuration    | #2.1                                                        | #2.2                                  |
|------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Tissu de renfort | TG-09-T                                                     | TC-06-T                               |
| Pas, mm          | 6                                                           | 6                                     |
| Angle, °         | 45                                                          | 45                                    |
| Patron           | 2 lignes par côté du rayon, offset de 3mm entre les 2 cotés |                                       |
| Fil de renfort   | Fil de carbone, 4 brins,<br>4x67 Tex                        | Fil de polyester Permacore<br>240 Tex |

La Figure 4.11 présente la configuration d'insertion du touffetage pour la seconde série de test. Les inserts sont placés avec un pas de 6 mm et les 2 rangées sont distantes de 2 mm. Il y a également un décalage de 3 mm entre les inserts de gauches et ceux de droite. Ceci permet d'éviter que les inserts ne se télescopent.

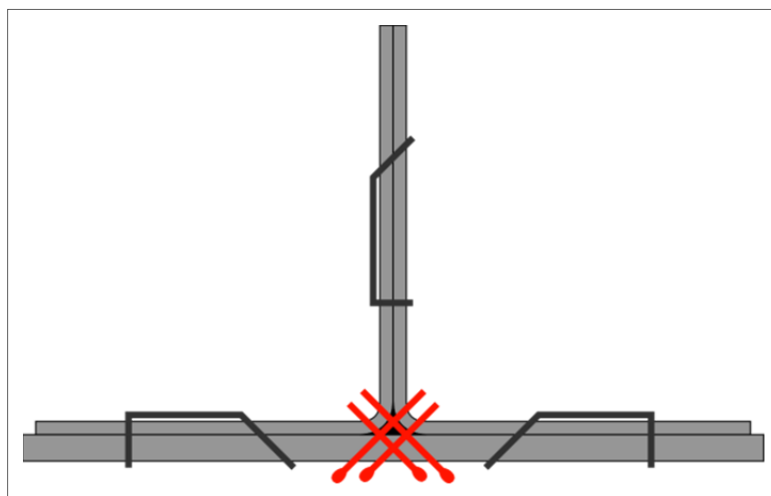


Figure 4.11 Schéma de configuration des tests #2.1 et #2.2

#### 4.1.2.4 Résultats

Comme prévu, le fil de touffetage reste parfaitement en place dans la nouille comme dans la préforme. Persiste toutefois le problème de la nouille unidirectionnelle qui se déplace dans la

préforme sous l'action de l'aiguille de touffetage. La Figure 4.12 montre la nouille totalement étirée d'un côté de la préforme; ce côté se trouvant à l'opposé du côté renforcé en premier. L'aiguille inclinée à  $45^\circ$  a poussé la nouille à sortir de sa zone de base.

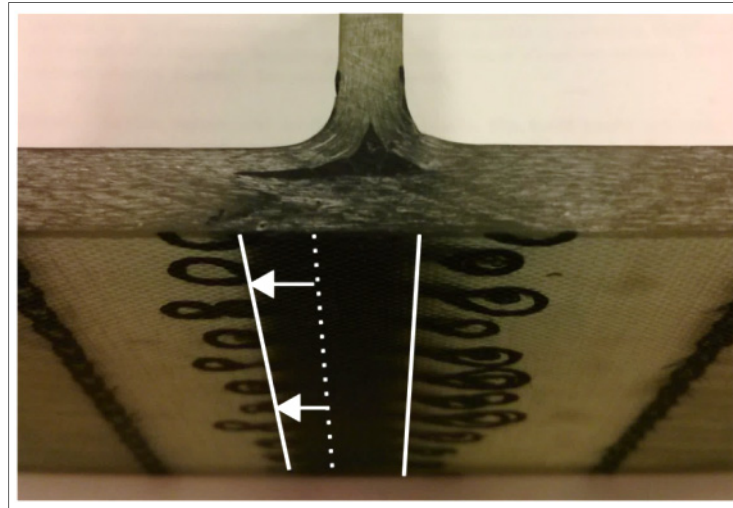


Figure 4.12 Décalage de la nouille de la zone de base

Au niveau de la fabrication, le touffetage s'avère être une réussite. Reste cependant à régler le problème de la nouille qui se déplace dans la préforme.

#### 4.1.2.5 Conclusion

Le problème de géométrie de la nouille peu stable est critique pour les performances mécaniques et la répétabilité de production des pièces. À ce stade de l'étude, l'utilisation d'une nouille tressée s'impose d'elle-même. En effet, une tresse conserve une géométrie stable quelques soient les manipulations et insertions de fil de renfort. L'entrelacement des brins de la tresse lui confère une unité contrairement à la nouille d'UD. Cette dernière se compose de 22 brins libres pouvant facilement s'écarter les uns des autres.

Des tests préliminaires d'arrachement ont été réalisés afin de comparer les configurations étudiées et de conclure quant au fait que la tresse et/ou le touffetage puissent être des solutions intéressantes. Les quatre préformes testées sont faites de tissus TG-09-T selon la

séquence d'empilement « quasi ». Trois configurations sont comparées à un raidisseur référence non cousu, c'est-à-dire préformé à la main avec une nouille UD. Les trois configurations sont :

- « Cousu » : raidisseur préformé par couture, fil 2\*67 Tex, nouille UD,
- « Tressé » : raidisseur préformé à la main, nouille tressée
- « Touffeté » : raidisseur préformé par couture, fil 2\*67 Tex, nouille UD et touffetage selon la configuration #2.2 de la Figure 4.11.

La référence, le « Cousu » et le « Tressé » sont des préformes de Morin (2015) imprégnées avec le système de résine présenté à la section 2.3.4. Le Tableau 4.5 récapitule les gains ou pertes de performance par comparaison avec la configuration de référence.

Tableau 4.5 Comparaison des configurations de test

| Test               | Arrachement symétrique |          |          | Arrachement asymétrique |          |          |
|--------------------|------------------------|----------|----------|-------------------------|----------|----------|
| Configuration      | Cousu                  | Tressé   | Touffeté | Cousu                   | Tressé   | Touffeté |
| Première rupture   | +6,96 %                | -10,18 % | +2,55 %  | +10,34 %                | -30,54 % | -13,27 % |
| Chargement maximal | +18,81 %               | -10,18 % | +12,97 % | +10,31 %                | -28,82 % | -5,68 %  |

Ce tableau montre une légère amélioration des résultats dans le cas d'un raidisseur cousu. La nouille tressée semble réduire les performances, particulièrement en arrachement asymétrique. Enfin le touffetage semble peu affecter la première rupture en symétrique mais plus en asymétrie. Toutefois, le touffetage donne de meilleurs résultats qu'une simple nouille tressée. La troisième et prochaine série de raidisseurs vise à savoir si le touffetage peut réellement s'avérer utile pour le renforcement de la zone de la nouille avec une nouille tressée.

Il est intéressant de noter que les tests d'arrachement de Morin (2015) pour les préformes imprégnées avec un système de résine hautes performances présente des résultats différents. Le Tableau 4.2 ainsi que les Figure 4.2 et Figure 4.3 montrent des pertes de propriétés à l'arrachement quelle que soit la configuration de couture. Les principaux facteurs pouvant

expliquer cette différence sont le système de résine différent et l'utilisation de tissu de verre dans ce cas et de carbone dans l'étude de Morin (2015).

#### 4.1.3 Choix des configurations à tester

Le choix des configurations de renforcement est assez simple une fois l'étude préliminaire réalisée. Les préformes sont réalisées avec le tissu TC-06-T (sergé2-2 en carbone), le fil de couture 2x67 Tex et la nouille tressée AERO BIB 2005 introduits à la section 2.3. Il est choisi de réaliser une référence qui corresponde à la configuration de couture choisie pour le démonstrateur; configuration visible sur la Figure 4.5. La référence possède une nouille tressée, selon le chapitre 2.3.3, mais ne possède pas de renforcement par touffetage. Elle est schématisée en Figure 4.13 et se nomme configuration de test #3.1.

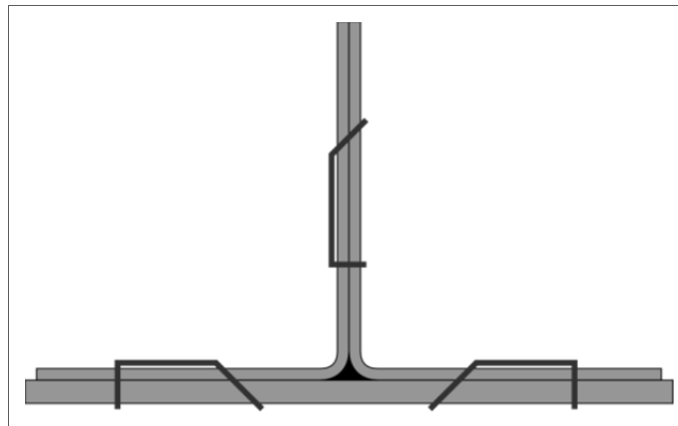


Figure 4.13 Schéma de configuration du test #3.1

Les configurations #3.2 et #3.3 ont ensuite été sélectionnées afin de caractériser le renforcement par touffetage. Elles possèdent toutes deux la même configuration de couture ainsi que la même nouille tressée que la configuration référence. Leur différence vient d'un renforcement par touffetage. La configuration #3.2 visible à la Figure 4.14 semble très prometteuse à la vue de la seconde série de test. Contrairement aux tests précédents, une seule rangée est insérée par côté. Ce choix vise à atténuer le problème de déplacement de nouille observé à la section 4.1.2.4.

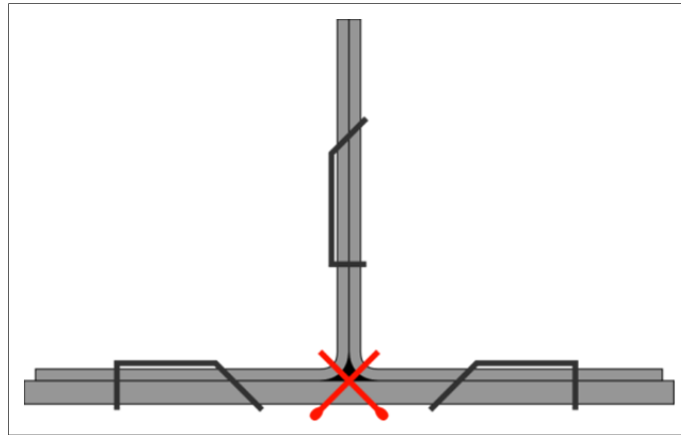


Figure 4.14 Schéma de configuration du test #3.2

Pour la configuration #3.3, il est vrai que la technique de touffetage utilisée pour le renforcement ne semblait pas efficace. Mais grâce à l'utilisation de la nouvelle nouille tressée AERO BIB 2005, il est probable que le fil de touffetage se maintienne parfaitement dans la nouille. Cette configuration est visible en Figure 4.15. Deux rangées sont insérées avec un décalage afin d'éviter de créer une faiblesse rectiligne dans la nouille.

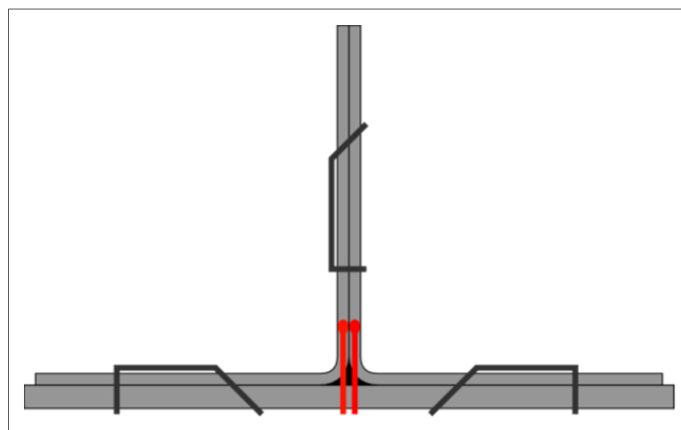


Figure 4.15 Schéma de configuration du test #3.3

Ces sont donc ces trois configurations qui ont été testées selon la méthode du chapitre 2.6. Les résultats sont présentés ci-après et analysés.

## 4.2 Propriété à l'arrachement symétrique

### 4.2.1 Résultats et analyse

Le Tableau 4.6 présente les résultats des tests d'arrachement symétrique selon le protocole de test défini à la section 2.6 pour les trois configurations retenues. Ce tableau recense la valeur moyenne du chargement à la première rupture ainsi qu'à la charge maximale. La moyenne est obtenue à partir des cinq spécimens mesurés. La valeur de gain ou de perte est exprimée en fonction de la référence, qui correspond à la configuration #3.1. Seules les valeurs de la configuration #3.3 sont établies sur quatre spécimens. Les spécimens ont été inspectés avant que les tests ne soient réalisés. Malheureusement le raidisseur associé à la configuration #3.3 présente plusieurs spécimens impropres à l'étude pour cause de nouille mal placée. Malgré tout, les résultats obtenus avec quatre spécimens sont assez représentatifs.

Après révision du mémoire, il apparaît que l'auteur a fait un oubli. Sur les courbes présentées à la Figure 4.19, il y a un changement de pente autour entre 0.15 et 0.2 mm de déplacement. Ce point est probablement le début de la rupture initiale. Le changement de pente montre une perte de rigidité probablement dû à l'initiation de la rupture et plus précisément le délaminage de la semelle. L' « initiation de la rupture » telle que défini au Tableau 4.6 serait en réalité la première rupture franche du spécimen d'où le fait que le chargement maximal est globalement identique.

Tableau 4.6 Résultats des tests d'arrachement symétrique

|       | Initiation de la rupture |            |            | Chargement maximal |            |            |
|-------|--------------------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|
|       | Moyenne                  | Écart-type | Gain/perte | Moyenne            | Écart-type | Gain/perte |
| unité | kN                       | kN         | kN (%)     | kN                 | kN         | kN (%)     |
| #3.1  | 6.3                      | 0.9        | -          | 6.3                | 0.9        | -          |
| #3.2  | 8.3                      | 0.4        | 2.0 (+33)  | 8.3                | 0.4        | 2.0 (+33)  |
| #3.3  | 6.2                      | 0.6        | 0.1 (+0.9) | 6.4                | 0.7        | 0.6 (+9.4) |

Les valeurs présentées dans le tableau sont similaires pour la configuration #3.2, qu'il s'agisse de la première rupture ou la charge maximale atteinte. Par contre, la configuration #3.3 présente une augmentation de la résistance entre l'initiation de la rupture et le chargement maximal. Quant aux gains de performances par rapport à la référence, ils ne sont pas significatifs d'après un test de Student. Par contre, les résultats de la configuration #3.2 dépassent de deux écarts-types la moyenne de la référence. Un test de Student confirme un résultat significatif à moins de 1%.

La Figure 4.16 présente ces mêmes résultats mais sous la forme d'un graphique. Le graphique permet de visualiser facilement le gain important de performances pour la configuration #3.2. Pour la configuration #3.3, il est impossible de conclure au vu des écarts-types obtenus.

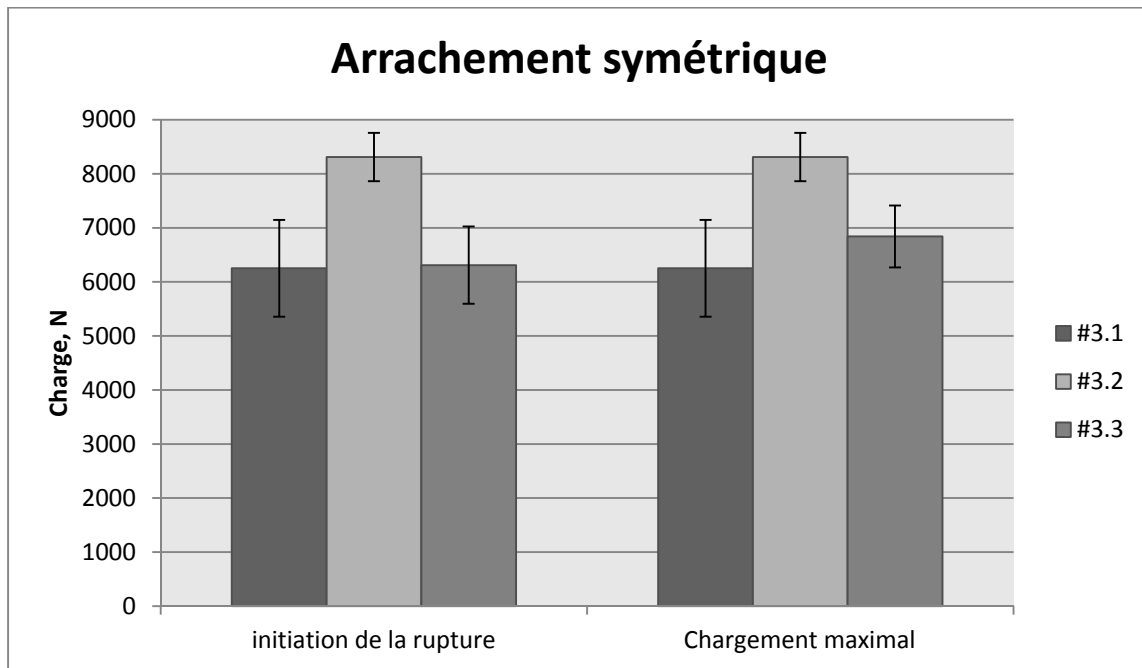


Figure 4.16 Résultats des tests d'arrachement symétrique

La configuration #3.2 semble un moyen efficace de renforcer un raidisseur en « T » dans un cas d'utilisation sensible à un arrachement symétrique.



#### 4.2.2 Analyse des modes de rupture

Suite aux tests d'arrachement, les spécimens sont à nouveau inspectés à l'aide du microscope optique de type Olympus DSX100, équipé d'une lentille DSXPLFL3.6X. Plusieurs modes d'ouverture sont observés. La Figure 4.17 montre une rupture au niveau de l'interface nouille/tissus, un décollement de la semelle et l'ouverture des deux parties qui forment le voile. Ces trois configurations sont également réparties dans les spécimens arrachés.

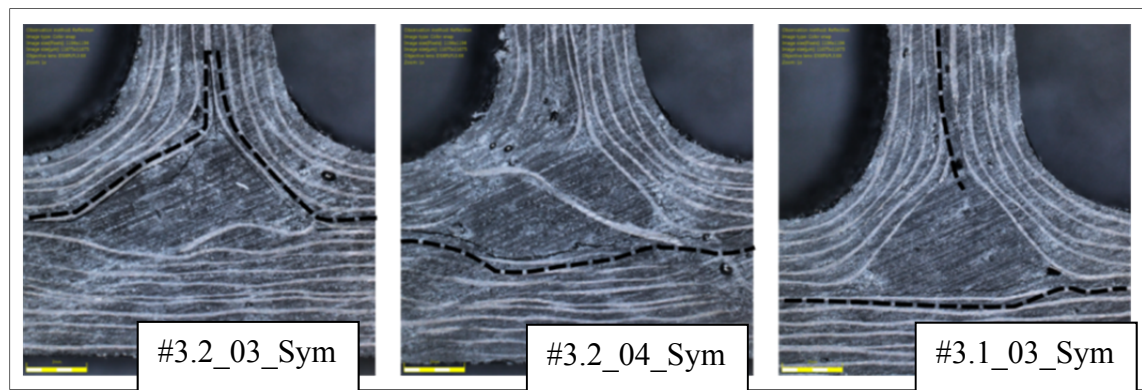


Figure 4.17 Modes de rupture pour les tests d'arrachement symétrique

Chacun de ses trois modes de rupture est symétrique et présente un décollement peau/raidisseur. Les performances satisfaisantes obtenues lors de ce test par la configuration #3.2 s'expliquent probablement par le fil de touffetage à 45°. Ce renfort est directement placé dans la section qui tend à s'ouvrir et est orthogonal au plan d'interface nouille/tissus. Or c'est cette interface qui cède en premier. D'autre part, le renfort est placé symétriquement, formant une « croix » dans la zone faible. Il est alors possible de poser l'hypothèse que le fil de touffetage est idéalement placé pour répartir la charge. Le renfort travaille afin d'empêcher l'ouverture de la préforme schématisée à la Figure 4.18.

Pour la configuration #3.3, l'insertion par-dessous crée une déformation locale facilitant la déformation du raidisseur.

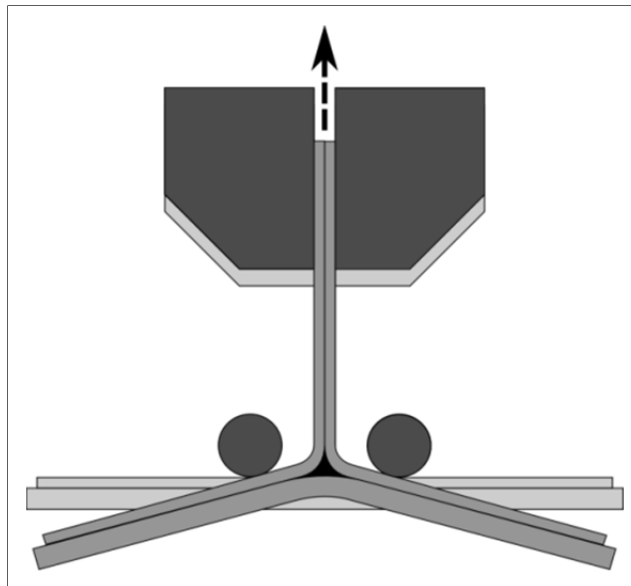


Figure 4.18 Déformation d'un raidisseur lors d'un test d'arrachement symétrique

La Figure 4.19 montre que la configuration #3.2 réagit de la même manière que la référence mais avec un déplacement moindre pour le même chargement. Le stratifié est plus rigide, la nouille subit moins d'effort car il est mieux réparti dans la préforme par le fil de touffetage.

En revanche, pour la configuration #3.3, malgré des performances identiques à la référence, le stratifié est moins rigide, les déplacements sont bien plus importants. Il est alors possible d'envisager deux hypothèses afin d'expliquer ce résultat. Le renfort est placé dans le sens du chargement, il ne tend pas à consolider la préforme contre ce chargement. De plus, l'observation au microscope démontre que le touffetage a légèrement déplacé la nouille vers le voile. Ainsi, le stratifié n'a pas le même taux volumique de fibres en tout point et se déforme plus facilement. La Figure 4.20 montre la nouille tressée légèrement au-dessus de sa zone de base.

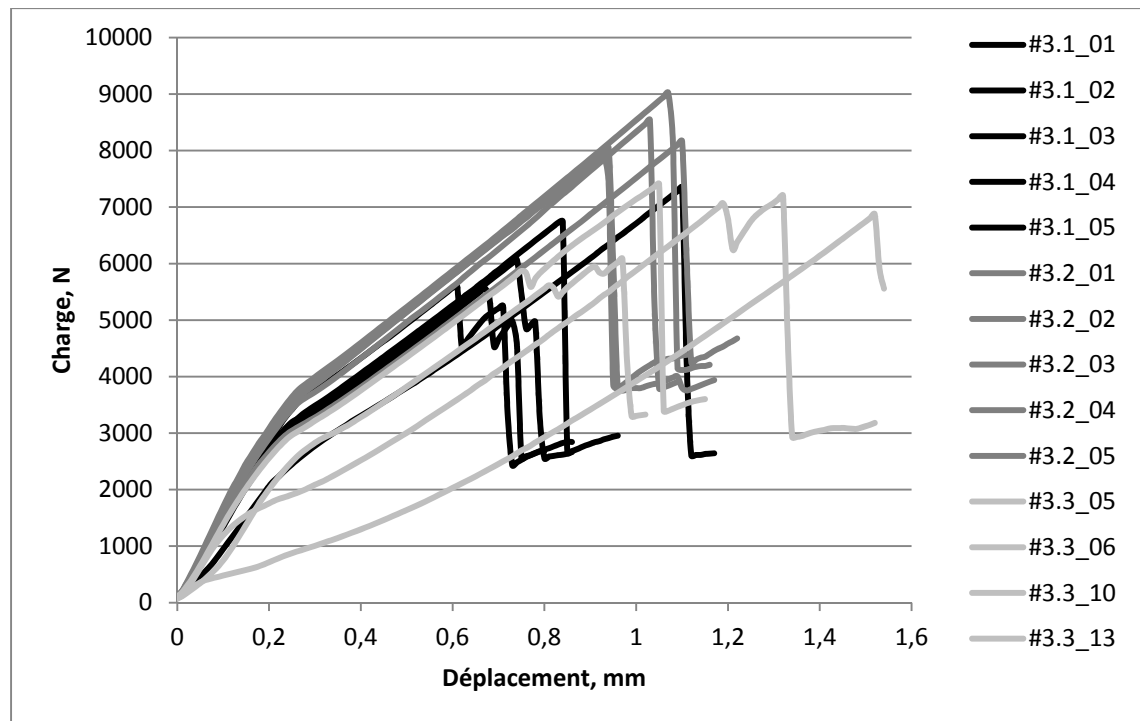


Figure 4.19 Courbe des tests d'arrachement symétrique

Après révision du mémoire, il est observé sur les courbes de la Figure 4.19 un changement de pente indiquant une perte de rigidité des spécimens. Celui-ci intervient avant 0.2 mm de déplacement. Il est probablement que cette perte de rigidité est dû à un délaminage de la peau du raidisseur est ainsi moins de redistribution de la contrainte. Ceci permet d'expliquer que la configuration #3.2 est plus rigide. Les renforts à 45° jouant un rôle dans la redistribution de contrainte plus loin dans la peau. Les renforts de la configuration #3.3 vont au contraire concentrer la contrainte au niveau de la nouille. De plus l'insertion crée des défauts localement ce qui explique les grandes différences de comportement visible sur les courbes.

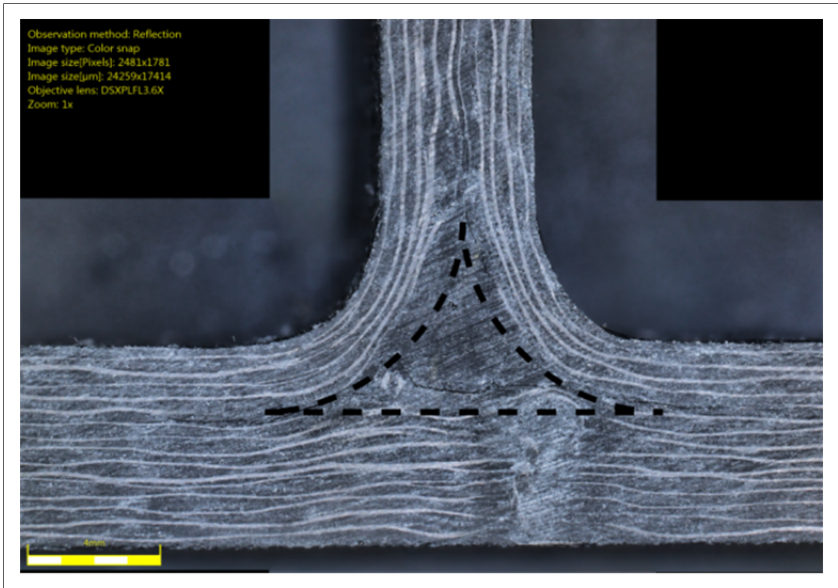


Figure 4.20 Décalage de la nouille pour le spécimen #3.3\_10

4.3 Propriété à l’arrachement asymétrique

4.3.1 Résultats et analyse

Le Tableau 4.7 présente les résultats des tests d’arrachement asymétrique. Les valeurs sont les moyennes obtenues par le test de cinq échantillons de chacune des trois configurations. La Figure 4.21 présente également les résultats sous forme de graphique.

Tableau 4.7 Résultats des tests d'arrachement asymétrique

|       | Initiation de la rupture |            |            | Chargement maximal |            |            |
|-------|--------------------------|------------|------------|--------------------|------------|------------|
|       | Moyenne                  | Écart-type | Gain/perte | Moyenne            | Écart-type | Gain/perte |
| unité | kN                       | kN         | kN (%)     | kN                 | kN         | kN (%)     |
| #3.1  | 1.3                      | 0.03       | -          | 1.3                | 0.03       | -          |
| #3.2  | 1.3                      | 0.04       | 0.04 (+3)  | 1.3                | 0.04       | 0.04 (+3)  |
| #3.3  | 1.5                      | 0.06       | 0.21 (+16) | 1.5                | 0.06       | 0.21 (+16) |

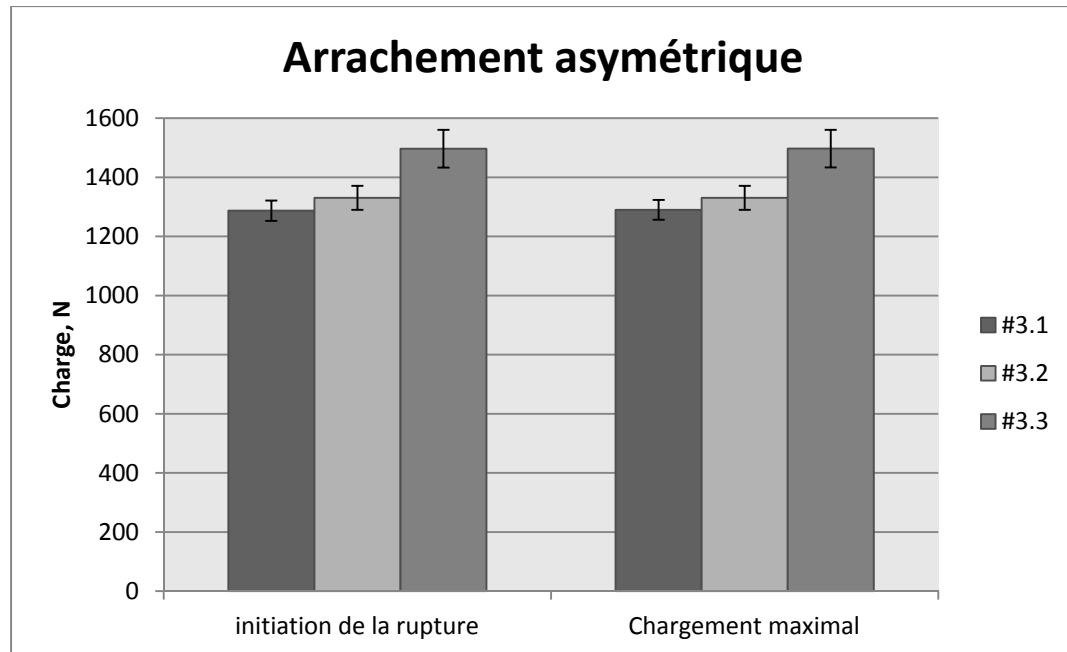


Figure 4.21 Résultats des tests d'arrachement asymétrique

Selon le test de Student, le cas de la configuration #3.2 donne un résultat non significatif. Il s'avère cependant significatif à moins de 1% pour la configuration #3.3.

La configuration #3.3 semble donc un moyen efficace de renforcer un raidisseur en « T » dans un cas d'effort en flexion.

#### 4.3.2 Analyse des modes de rupture

Les spécimens sont également inspectés par le biais d'un microscope Olympus DSX100, équipé d'une lentille DSXPLFL3.6X. Contrairement à l'arrachement symétrique, il n'est pas évident d'observer la fissure pour les spécimens testés asymétriquement. Dans les cas où la fissure est observée, elle est à l'interface nouille/tissus et se propage le long de l'interface pied du raidisseur/peau et interface entre les deux demi-voiles. La fissure est toujours observée du côté de la goupille. La Figure 4.22 montre la fissure sur un spécimen. Dans ce cas, la goupille est placée sur la droite de la préforme. Sur la figure, la fissure est mise en évidence grâce à un contour en pointillés.

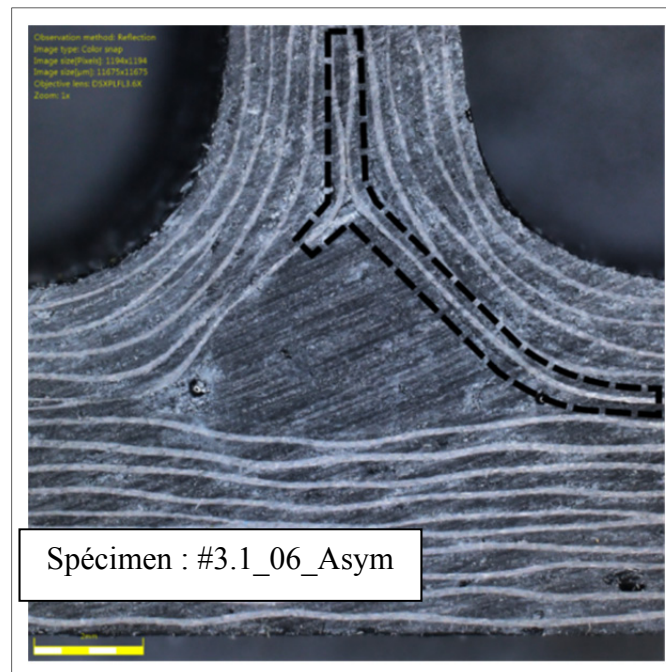


Figure 4.22 Mode de rupture pour les tests d'arrachement asymétrique

Il serait possible d'imaginer que la configuration #3.2 avec un touffetage à  $45^\circ$  soit parfaite pour contrer ce mode de rupture. En effet le fil de renfort est placé orthogonalement à l'interface qui se rompt. Or ce n'est pas le cas, cette configuration présente un gain de performance non significatif. Durant les tests asymétriques, les spécimens en « T » se comportent, comme schématisé en Figure 4.23. Il y a une combinaison d'une rotation de la semelle autour de la zone de la nouille avec une légère flexion du voile.

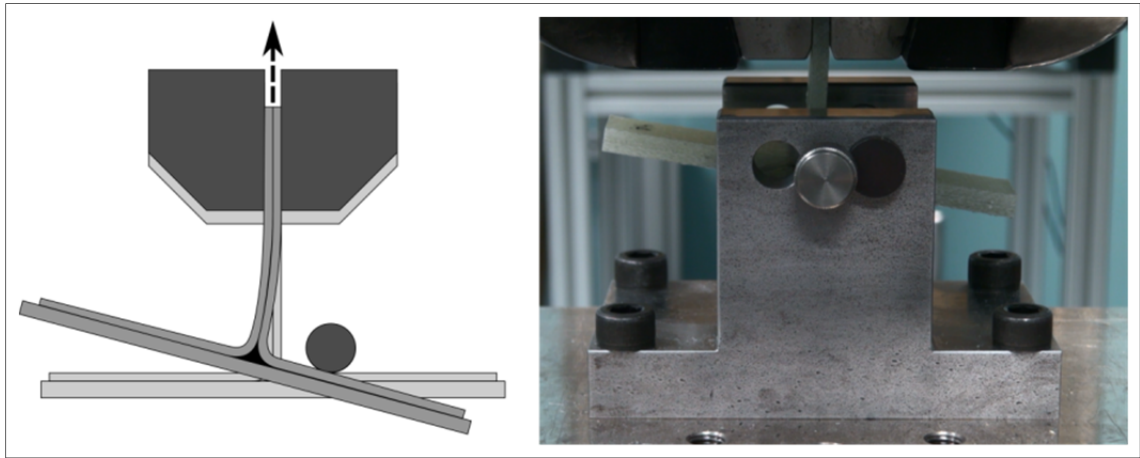


Figure 4.23 Déformation de la préforme durant un test d'arrachement asymétrique

Selon le schéma de déformation, le renfort dans la configuration #3.2 travaille peu en vue de s'opposer à la rotation. Le renfort étant placé au point de pivot de la rotation. Au contraire, la configuration #3.3 place des renforts depuis la semelle jusqu'au voile en passant dans la zone de rotation. Les renforts viennent rigidifier la zone de la nouille jusqu'à la base du voile. C'est donc une action visant à contrer le phénomène de rotation qui engendre la rupture du spécimen. On observe d'ailleurs sur la Figure 4.24 que la configuration #3.3 est plus rigide que les deux autres qui présentent des courbes ayant sensiblement la même pente.

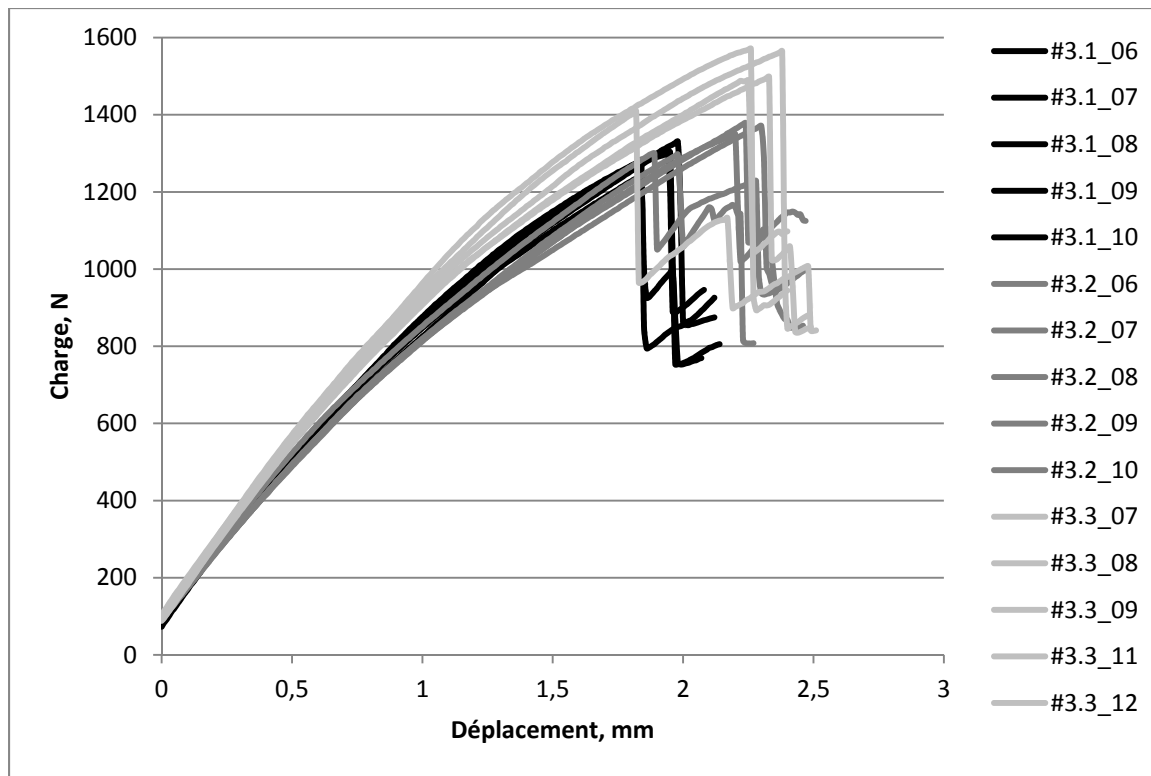


Figure 4.24 Courbe des tests d'arrachement asymétrique

## 4.4 Conclusions et recommandations

### 4.4.1 Recommandations

Les recommandations sont principalement basées sur des observations faites durant les tests et qui auraient pu faciliter l'analyse des résultats.

La première concerne la façon de randomiser les essais. La prise en main de l'équipement et la réalisation des études préliminaires nécessitent un temps non négligeable dans la réalisation des travaux. Ensuite, pour des raisons de coûts et de temps il n'a pas été possible de réaliser davantage de préformes. Pour d'évidentes raisons de validation des résultats, il aurait été préférable d'utiliser des spécimens provenant de plusieurs préformes ayant la même configuration. Ainsi, il aurait été possible d'éliminer certaines variables comme la préparation ou l'infusion qui peuvent influencer les performances. En revanche, un défaut



dans la procédure m'est imputable. La sélection des spécimens a été réalisée de façon systématique. Pour plus d'homogénéité, il aurait été préférable de mélanger les spécimens d'une même configuration et de les tirer au hasard pour les tests.

Un second point d'amélioration consisterait en l'utilisation d'outillages transparents. Par exemple, cela pourrait permettre d'observer la bonne réalisation de l'infusion et d'éviter des zones de porosités. Surtout, un gabarit transparent pour les tests d'arrachement aurait permis de filmer l'initiation de la rupture et la propagation de cette dernière. Observer ces phénomènes permettrait probablement de déterminer l'action exacte du fil de renfort durant chaque phase du test.

Le placement des spécimens dans le mors de la machine de traction gagnerait à être optimisé. Les spécimens sont placés approximativement à la main dans le mors. Ensuite, l'alignement dans le mors des pieds est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse. Il serait avantageux de trouver une méthode de montage plus précise pour s'assurer qu'aucun chargement indésirable ne vienne perturber le test.

#### **4.4.2 Conclusions**

Les analyses des performances de la couture peuvent être résumées en deux points : intérêt particulier de la couture pour le préformage et faiblesse de la technique pour le renforcement des préformes. La technologie de touffetage semble être un parfait complément. En effet, le touffetage, du fait de ses performances, s'avère être avantageux pour le renforcement de zones faibles.

Il ne faut pas oublier que le touffetage est fragile tant que la préforme n'a pas été imprégnée de résine. Si l'étape de touffetage pouvait être effectuée une fois la préforme insérée dans le moule d'imprégnation, le procédé en serait perfectionné. Envisager la conception du moule avec des ouvertures permettant le renforcement des zones souhaitées éviterait une manipulation de la préforme post-touffetage. Cette proposition n'est certes pas envisageable

dans tous les cas, mais il est intéressant de la considérer si la conception de la préforme le permet.

Pour finir, il est évident que chaque cas nécessite une étude de faisabilité préalable. Il est alors possible de vérifier si la technologie est viable et si elle permet d'obtenir les performances souhaitées.

## **CHAPITRE 5**

### **ÉTUDE COMPARATIVE DES COÛTS ENGENDRÉS PAR LE PRÉFORMAGE PAR COUTURE PAR RAPPORT AU PRÉFORMAGE À LA MAIN**

Les conclusions précédentes ne démontrent pas d'amélioration très significatives des performances mécaniques des matériaux composites préformés par couture. Pour être viable, le préformage doit apporter d'autres gains, notamment en termes de rentabilité. Ce chapitre présente les possibles gains en temps et en coût de production selon deux géométries étudiées durant le projet CRIAQ COMP501. Les géométries sont le raidisseur en T et le panneau raidi dans la configuration du démonstrateur du projet COMP-501. Une extrapolation pour d'autres formes et tailles de pièces conclut ce travail.

Il est important de noter que dans cette section, seul le temps et les coûts de préformage engendrés par la couture sont étudiés. Il s'agit donc de s'intéresser à chaque étape suivant l'empilement des plis jusqu'à la mise en place de la préforme dans le moule d'imprégnation inclus. Par exemple, le coût du renfort fibreux n'est pas pris en compte car il est le même dans les deux cas, tout comme les coûts d'imprégnation par VARI.

La première partie du chapitre présente succinctement le travail effectué sur le démonstrateur dans le but de définir les éléments qui diffèrent d'un raidisseur simple.

#### **5.1 Préformage d'un démonstrateur**

Le préformage du démonstrateur est sensiblement le même que celui qui est appliqué à un raidisseur en T simple. Le démonstrateur, montré à la Figure 2.1 est un panneau de 1220 mm par 610 mm (soit 4 x 2 pieds) raidi par 2 raidisseurs en T dans le sens de la longueur.

### **5.1.1 Étapes de préformage**

La section 2.4.4 ainsi que le chapitre 3 présentent le préformage en s'appuyant essentiellement sur la technique qui est utilisée pour un raidisseur en T. Un démonstrateur consiste principalement en deux raidisseurs longs de 1220 mm cousus sur une unique peau. La principale difficulté de cette pièce réside dans le changement de dimensions et les manipulations de matière qui en résulte. Le placement et la manipulation des tissus sont des étapes critiques et nécessitent une extrême vigilance. Pour faciliter la manipulation de la peau, l'empilement est pré-cousu sur le bord dans le sens la longueur. Les deux raidisseurs sont assemblés par le voile comme à la première étape de la section 2.4.4. Ils sont ensuite placés dans un gabarit de couture spécialement conçu pour le préformage du démonstrateur du projet COMP-501. Le gabarit est présenté à la section 5.1.2. Celui-ci est conçu pour maintenir les deux raidisseurs parfaitement alignés et distants de 254 mm (soit 10 pouces). Une fois placés, les raidisseurs sont ouverts et une tresse est placée à chacun des deux emplacements de nouille. La peau pré-cousue peut ensuite être placée. La couture est ensuite similaire à la description de la section 2.4.4. Contrairement aux raidisseurs simples, au vue de leurs dimensions, la manipulation des préformes peut nécessiter l'intervention de deux techniciens. Bien que simples d'apparence, ces étapes sont de la plus haute importance pour la production de la préforme. En effet, la couture robotisée est configurée et ne pose pas de problème de dimensions. Le travail le plus contraignant consiste à placer les tissus de telle sorte à s'assurer que l'orientation des plis est adéquate.

### **5.1.2 Gabarit de préformage**

Le gabarit de préformage est l'élément essentiel au maintien de la préforme durant les étapes de couture. La Figure 5.1 correspond à la schématisation du gabarit de couture qui accueille les deux raidisseurs. Les raidisseurs sont bloqués entre le gabarit et un mors coulissant au niveau du voile. De chaque côté du voile, un espace permet le passage des aiguilles de couture. L'assemblage des semelles avec la peau forme un démonstrateur. La Figure 5.2 est un panneau démonstrateur en verre cousu dans le gabarit de préformage

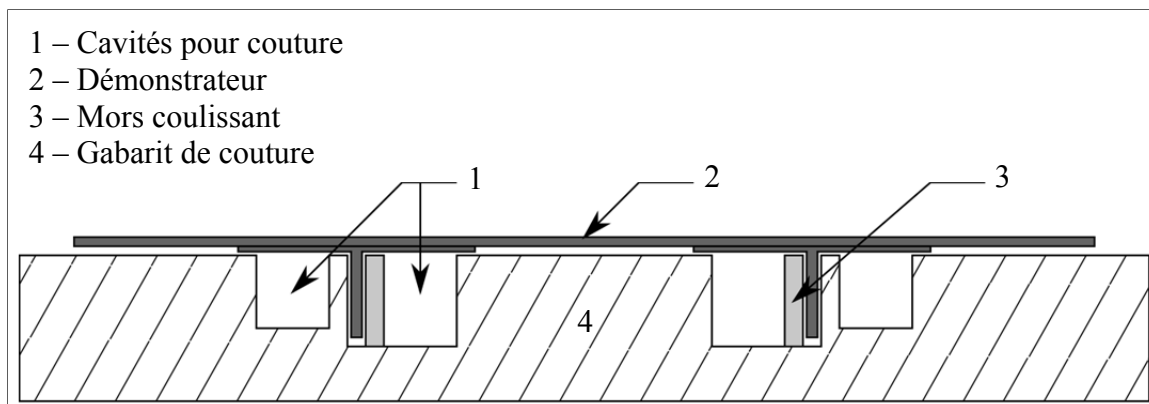


Figure 5.1 Schéma gabarit de préformage avec démonstrateur

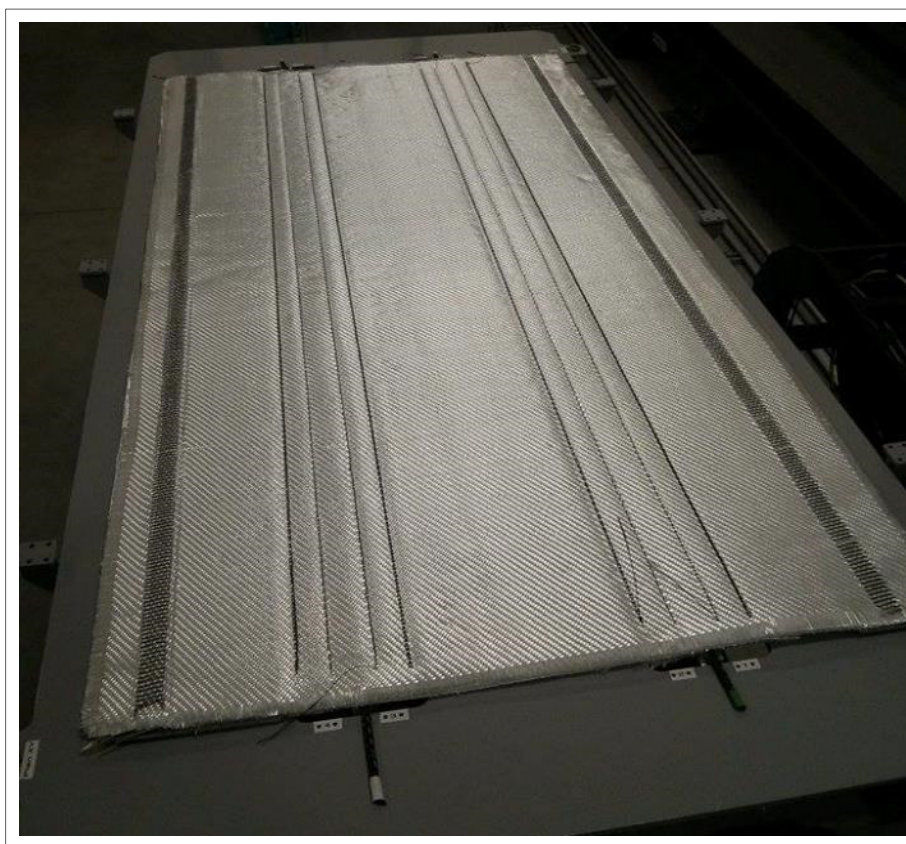


Figure 5.2 Panneau démonstrateur dans le gabarit de préformage

## 5.2 Étude des coûts

La présente étude de coûts s'appuie sur les travaux de thèse de Ma (2011) intitulés « Cost modelling for manufacturing of aerospace composites ». Les équations présentées sont tirées de la thèse et traduites. Pour tous les calculs, de nombreuses valeurs correspondent à des estimations ou des arrondis de coûts. Certains chiffres peuvent apparaître négligeables par rapport à d'autres valeurs ou arrondis mais sont retenus pour être le plus fidèles aux travaux de la thèse sélectionnée. Si des arrondis ou estimations doivent être faits, tant que possible, ils sont réalisés en défaveur du préformage par couture. Cette décision est prise dans le but de déterminer si le préformage par couture peut être viable en industrie. L'extrapolation donne de possibles erreurs mais également des pistes d'amélioration pour une étude plus approfondie.

### 5.2.1 Coût d'équipement

Le coût d'utilisation des équipements dépend fortement du temps d'utilisation et de la durée d'amortissement souhaitée. Dans cette section, l'amortissement est calculé sur 10 ans. Le Tableau 5.1 présente la liste des équipements ainsi que leurs coûts. Cette liste inclut également les coûts de maintenance et de pièces de rechange pour les 10 années précédant la date d'amortissement de l'équipement.

Tableau 5.1 Liste des équipements nécessaires à la couture et leur coût

| Équipement                                                            | Coût, k\$  |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| Robot avec contrôleur                                                 | 300        |
| Tête de couture                                                       | 50         |
| Unité linéaire (rail)                                                 | 25         |
| Logiciel de contrôle et de programmation, formation                   | 50         |
| Outillages spécifique et conception de nouvelles pièces* <sup>1</sup> | 50         |
| Maintenance (10 ans) et pièces de rechange                            | 25         |
| <b>Total</b>                                                          | <b>500</b> |

Remarque \*<sup>1</sup> : Cette section comprend notamment un magasin de support pour décharger la tête de couture, de l'outillage spécifique ou encore le pied de touffetage « multi-angle » présenté à la section 3.2.3.

La valeur d'amortissement de l'investissement en équipement pour une entreprise correspond à l'étalement de son coût sur sa durée d'utilisation. Ici cette valeur de 500 k\$ sur 10 ans est calculée en dollars par minute de travail effective selon l'Équation (5.1).

$$Taux_{amortissement} = \frac{Investissement\ équipement}{amortissement \times Temps_{travail\ annuel}} \quad (5.1)$$

Le temps de travail annuel est basé sur un chiffre de 7.5 h de travail par journée d'activité. Le nombre de jours ouvrables au Canada est d'environ 250 par année. Il est décidé de retrancher 20 jours pour diverses tâches : maintenance des outils, installations de nouveaux équipements dans l'enceinte de travail du robot, réparation des bris d'outils comme les aiguilles, etc. En effet, par sécurité, le robot ne peut travailler lorsque des personnes sont présentes dans son enceinte de travail. Sont alors pris en compte 230 jours à 7.5 h soit 1725 h ou 103 500 min comme indiqué dans le Tableau 5.2. Le fabricant de robot, KUKA Roboter GmbH (Augsburg, Allemagne), garantit une durée de vie de 40 000 h de production avec des intervalles de maintenance de plus de 20 000 h. Un amortissement sur 10 ans pour un travail annuel de 1725 h apparaît ainsi parfaitement plausible. Le calcul ne tient pas compte de la déduction pour l'amortissement (DPA) étant donné que l'étude de coût se fait sur la globalité des dépenses. L'étude compare deux méthodes et n'est pas une étude de rentabilité par année. Dans notre cas, la DPA n'a pas d'influence sur le calcul. On travaille avec l'hypothèse que le robot travaille 103 500 min par année durant 10 ans. À la fin de ces 10 années, le coût de l'équipement devient nul, l'équipement est totalement amorti.

Tableau 5.2 Taux d'amortissement et facteurs influant

|       | <b>Investissement<br/>d'équipement</b> | <b>Durée<br/>d'amortissement</b> | <b>Temps de<br/>travail annuel<br/>d'équipement</b> | <b>Taux<br/>d'amortissement</b> |
|-------|----------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------|
| unité | \$                                     | Année                            | Min                                                 | \$/min                          |
| Total | 500000                                 | 10                               | 103500                                              | 0.5                             |

Le coût de l'équipement est calculé en fonction du taux d'amortissement précédemment calculé mais également du temps d'utilisation du robot. Un taux de rejet de pièce est également inclus, ce dernier est généralement de 5% dans l'industrie aéronautique d'après Ma (2011). Cependant, les divers travaux au sein du projet CRIAQ COMP-501 ont montré que les préformes cousues sont de meilleures qualité et moins propice au rejet que des préformes non cousues. Le taux de rejet sera donc de 1% pour les pièces préformées par couture et de 5% pour celles préformées à la main tout au long de ce chapitre. Dans la thèse référence, le nombre de pièces réalisées par cycle d'action est inséré. Dans notre cas, le préformage réalise une seule pièce par action de couture. L'Équation (5.2) est donc une adaptation de l'équation original. Le Tableau 5.3 recense ces données tandis que l'Équation (5.2) présente le calcul du coût de l'équipement.

$$Coût_{\text{équipement}} = \frac{\text{temps}_{\text{utilisation}} \times Taux_{\text{amortissement}}}{(1 - Taux_{\text{rejet}})} \quad (5.2)$$

Tableau 5.3 Coût d'équipement et facteurs influant

|       | <b>Temps<br/>d'utilisation</b> | <b>Taux<br/>d'amortissement</b> | <b>Taux de rejet</b> | <b>Coût de<br/>l'équipement</b> |
|-------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| unité | min                            | \$/min                          | %                    | \$                              |
| Total | *2                             | 0.5                             | 1                    | -                               |



Remarque \*<sup>2</sup> : Le temps d'utilisation du robot dépend de l'application. Dans les chapitres 5.3.2 et 5.4.2, le temps d'utilisation est calculé selon divers cas et l'Équation (5.2) permet d'accéder au coût de l'équipement.

Le temps d'utilisation du robot est fonction de l'application. Il comprend le temps de travail mais également le temps de chargement et/ou de déchargement de l'outil installé sur le changeur d'outil.

### 5.2.2 Coût des matériaux

Les matériaux utiles au procédé de préformage par couture de préformes 3D peuvent être classés selon deux catégories : les matières premières et les matériaux de support consommables. Le coût des matériaux équivaut à la somme de l'ensemble des composantes de ces deux catégories, comme le montre l'Équation (5.3).

$$Coût_{matériaux} = \sum Coût_{matière\ première} + \sum Coût_{matériaux\ support} \quad (5.3)$$

#### 5.2.2.1 Coût des matières premières

A la différence d'un préformage à la main, les matières premières qui sont utilisées dans le cas d'un préformage par couture se résument au fil de couture. Comme précisé précédemment, le tissu n'est pas pris en compte dans le calcul des coûts car ces derniers sont les mêmes avec ou sans préformage par couture.

$$Coût_{matière\ première} = \frac{Quantité\ de\ matière \times Coût\ unitaire_{matière}}{(1 - Taux_{perte}) \times (1 - Taux_{rejet})} \quad (5.4)$$

Le calcul est réalisable grâce à la quantité de matière nécessaire et le coût unitaire de la matière. L'Équation (5.4) propose également un taux de perte de matière de 15% ainsi que le taux habituel de rejet de pièce de 5% toujours selon Ma (2011). Cependant, le procédé ne

génère pas de perte de matière pour le fil de couture. L'Équation (5.4) présente alors un taux de perte de matière de 0%. En effet, il n'y a pas de perte de matière dans le procédé une fois la tête de couture réglée selon les paramètres désirés. Si des pertes de matières sont à prévoir, elles sont associées aux coûts d'ingénierie initiaux et de réglages du robot abordés à la section 5.2.5. De plus, il est décidé précédemment que le taux de rejet de pièce assumé est de 1% pour le préformage par couture.

Le fil de couture, présenté au chapitre 2.3.2, coûte 800 \$ par kilogramme pour le grade aéronautique. Ce fil est un 2\*67 Tex soit 134 Tex ou 134 g/km. Le prix métrique du fil de couture, présenté dans le Tableau 5.4, est alors de 0.11 \$. Le nombre de mètres nécessaire à la couture dépend du pas de couture, de la longueur de couture et de l'épaisseur de la préforme. Ce calcul est réalisé à l'aide d'un tableur Excel présenté à la section 3.2.4.

Tableau 5.4 Coût de matières premières et facteurs influant

|                   | <b>Titrage</b> | <b>Prix par<br/>kilogramme</b> | <b>Prix<br/>métrique</b> | <b>Métrage<br/>nécessaire</b> | <b>Taux<br/>rejet</b> | <b>Coût de<br/>matériau</b> |
|-------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Unité             | g/km           | \$/kg                          | \$/m                     | m                             | %                     | \$                          |
| Fil de<br>couture | 134            | 800                            | 0.11                     | * <sup>3</sup>                | 1                     | -                           |

Remarque \*<sup>3</sup> : Le métrage nécessaire dépend du pas de couture, de la longueur de couture et de l'épaisseur de la préforme. Un tableur Excel, présenté au chapitre 3.2.4, permet d'obtenir cette information dans les sections 5.3.2 et 5.4.2.

### 5.2.2.2 Coût des matériaux de support

Les matériaux de support correspondent au papier qui est utilisé durant la couture ainsi qu'aux marqueurs de placement de la préforme dans le gabarit de couture. Le coût est un pourcentage du coût de matière première comme le montre l'Équation (5.5). Selon Ma (2011), en production de matériaux composites, le pourcentage moyen est de 3%. Dans

mon cas, ce taux semble quelque peu surévalué mais reste réaliste pour un environnement industriel avec production intensive.

$$Coût_{matériaux\ support} = Coût_{matière\ première} \times Taux \left( \frac{mat.\ support}{mat.\ première} \right) \quad (5.5)$$

Il est important de faire la distinction entre les matériaux de support, qui sont des consommables durant la production, et les outillages et supports spécifiques à la réalisation d'une géométrie. Ces derniers font parties de la section « Outillage, gabarits spécifiques » de la section 5.2.5 sur le cout d'ingénierie initial. C'est-à-dire les dépenses, propres à une géométrie particulière, qui se font avant même la réalisation de la première pièce.

### 5.2.3 Coût de main-d'œuvre

Le coût de main-d'œuvre revient à additionner les deux catégories suivantes : les coûts directs et les indirects comme dans l'Équation (5.6).

$$Coût_{main\ d'\ oeuvre} = Coût_{main\ d'\ oeuvre\ direct} + Coût_{main\ d'\ oeuvre\ indirect} \quad (5.6)$$

#### 5.2.3.1 Coût de main-d'œuvre direct

Le coût de main-d'œuvre direct correspond au coût de travail effectif en production. Il se calcule avec les Équations (5.7) et (5.8). Le taux de rejet est toujours égal à 5% et le temps de travail direct fonction du cas d'étude comme l'indique le Tableau 5.5.

$$Coût_{main\ d'\ oeuvre\ direct} = \frac{Tps_{travail\ direct} \times Taux_{horaire\ main\ d'\ oeuvre}}{(1 - Taux_{rejet}) \times N_{bpièces/tour}} \quad (5.7)$$

Avec

$$Tps_{travail\ direct} = N_{b_{opérateur}} \times Temps_{procédé} \quad (5.8)$$

Le taux horaire de main-d'œuvre direct est défini à 50 \$/h. Cette valeur est déterminée en fonction des chiffres obtenus auprès d'un partenaire, de la thèse de Liu (2009) et le site stat.gouv.qc.ca.

Tableau 5.5 Coût de main d'œuvre direct et facteurs influant

|       | <b>Temps de travail direct</b> | <b>Taux horaire de main-d'œuvre</b> | <b>Taux de rejet</b> | <b>Coût de main-d'œuvre direct</b> |
|-------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Unité | Min                            | \$/h                                | %                    | \$                                 |
| Total | * <sup>4</sup>                 | 50                                  | 1 ou 5* <sup>5</sup> | -                                  |

Remarque \*<sup>4</sup> : Fonction du cas étudié aux sections 5.3.2 et 5.4.2.

Remarque \*<sup>5</sup> : 1% dans le cas d'un préformage par couture et 5% pour le préformage à la main.

### 5.2.3.2 Coût de main-d'œuvre indirect

Le coût de main-d'œuvre indirect peut être calculé avec le temps de travail indirect comme indiqué dans l'Équation (5.9). Ce temps étant difficile à évaluer, l'Équation (5.10) permet de le calculer en fonction du temps de travail direct avec un taux de 40%. Ce taux, donné par Ma (2011) est classique en industrie aéronautique. Ce coût comprend notamment de la maintenance ainsi que des travaux d'ingénierie et de management de production ou encore d'inspection qualité se déroulant tout au long de la phase de production. À ne pas confondre avec le coût d'ingénierie initial qui correspond au travail précédent la mise en production. Le Tableau 5.6 reprend les facteurs qui influencent ce coût de main-d'œuvre indirect.

$$Coût_{maind'oeuvre\ indirect} = \frac{Tps_{travail\ indirect} \times Taux_{horaire\ maind'oeuvre}}{(1 - Taux_{rejet}) \times N_{b_{pièces/tour}}} \quad (5.9)$$

Avec

$$Tps_{travail\ indirect} = Tps_{travail\ direct} \times Taux \left( \frac{Tps_{travail\ indirect}}{Tps_{travail\ direct}} \right) \quad (5.10)$$

Le taux horaire de main-d'œuvre indirect est défini à 60 \$/h. Ce taux est différent du taux de main-d'œuvre direct car il correspond à une moyenne de salaire horaire des divers agents : entretien, contrôle qualité, manager, ingénieur, etc. la valeur est déterminée en fonction de chiffres obtenus auprès d'un partenaire et du site [stat.gouv.qc.ca](http://stat.gouv.qc.ca).

Tableau 5.6 Coût de main d'œuvre indirect et facteurs influant

|       | <b>Temps de travail indirect</b> | <b>Taux horaire de main-d'œuvre</b> | <b>Taux de rejet</b>  | <b>Coût de main-d'œuvre indirect</b> |
|-------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Unité | Min                              | \$/h                                | %                     | \$                                   |
| Total | * <sup>6</sup>                   | 60                                  | 1 ou 5 * <sup>7</sup> | -                                    |

Remarque \*<sup>6</sup>: Fonction du temps de travail direct qui est calculé selon les configurations discutées.

Remarque \*<sup>7</sup>: 1% dans le cas d'un préformage par couture et 5% pour le préformage à la main.

#### 5.2.4 Coût en énergie

Le coût en énergie n'est pas évident à déterminer. Lorsque de nombreux outils consomment de l'énergie, les coûts est la somme des consommations. Dans le cas présent, il n'est pas évident de calculer la consommation du robot de couture. La valeur de coût d'énergie se base dès lors sur les travaux de Ma (2011) qui affirme qu'en production de pièces composites aéronautiques, le coût en énergie représente deux à trois pour cent du montant total.

### 5.2.5 Coût d'ingénierie initial

Le coût d'ingénierie initial est le seul coût non tiré de la thèse « Cost modelling for manufacturing of aerospace composites » de Ma (2011) qui sert de référence à ce chapitre.

Le coût initial n'est pas fonction du nombre de pièces produites : c'est un coût qui n'intervient qu'une seule fois dans le processus. Il est présent avant même la fabrication de la première pièce contrairement aux coûts introduits précédemment. Ce coût correspond au temps consacré à une étude de faisabilité de la pièce, la programmation, la création d'une procédure de préformage et des tests de de préformage selon la méthode voulues. Le Tableau 5.7, est repris dans les deux cas de géométries étudiés dans le projet COMP-501. Les coûts obtenus pour le préformage par couture et à la main correspond à l'ordonnée à l'origine de la courbe de coût du préformage par couture. Ce coût est un facteur important de la viabilité du préformage par couture. En effet, s'il est trop élevé, les gains apportés par la couture ne pourront être assez importants pour rendre la technologie économiquement viable.

Tableau 5.7 Liste des composantes du coût initial d'ingénierie

| <b>Composantes</b>                 | <b>Coût ingénieur</b> | <b>Coût technicien</b> | <b>Coût matériaux</b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|
| Unité                              | \$                    | \$                     | \$                    | \$           |
| Étude faisabilité                  |                       |                        |                       |              |
| Programmation                      |                       |                        |                       |              |
| Outillage, gabarits spécifiques    |                       |                        |                       |              |
| Création procédure                 |                       |                        |                       |              |
| Test #1, couture préforme en verre |                       |                        |                       |              |
| Étude qualité, modification        |                       |                        |                       |              |
| procédure                          |                       |                        |                       |              |
| Test #2, couture préforme carbone  |                       |                        |                       |              |
| Étude qualité, modification        |                       |                        |                       |              |
| procédure                          |                       |                        |                       |              |
| Total                              |                       |                        |                       |              |

La faisabilité correspond à la possibilité de réaliser le préformage selon la technique souhaitée en termes de géométrie, contraintes, limitations, etc. La programmation est la réalisation du programme de couture dans le cas du préformage par couture. Pour le préformage à la main, la programmation est inexistante. La création de la procédure est la manière de préformer comme à la section 2.4.4 pour le préformage par couture. Puis les tests et la qualité sont la validation que la procédure est adéquate et optimisée.

Le remplissage de ce tableau selon le cas nécessite un taux horaire des différents acteurs. Le taux horaire d'un technicien reste 50 \$/h tandis que celui d'un ingénieur est estimé à 100 \$/h. Cette estimation provient d'une moyenne de taux horaire obtenus chez un partenaire industriel et le site [stat.gouv.qc.ca](http://stat.gouv.qc.ca).

### **5.3 Cas d'un raidisseur simple**

Le raidisseur simple est un raidisseur en T selon la géométrie indiquée au chapitre 2.1.3 et visible sur la Figure 2.2.

#### **5.3.1 Estimation du temps de préformage**

Dans le but de comparer le temps nécessaire à la mise en forme d'un raidisseur simple en « T », avec ou sans couture, il est essentiel de déterminer chaque étape des deux procédés. Le Tableau 5.8 recense les étapes et leur confère un numéro.

Tableau 5.8 Liste des étapes de préformage d'un raidisseur simple avec et sans couture

| Numéro<br>étape | Nom étape                                                   | Nécessité<br>avec<br>couture | Nécessité<br>sans<br>couture |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1a              | Placement de l'empilement du voile sur gabarit d'assemblage | ✓                            |                              |
| 1b              | Placement de l'empilement du voile dans le contre-moule     |                              | ✓                            |
| 2               | Paramétrage du programme                                    | ✓                            |                              |
| 3               | Exécution couture voile                                     | ✓                            |                              |
| 4               | Scellage, inspection couture, finition                      | ✓                            |                              |
| 5               | Déplacement, ouverture                                      | ✓                            |                              |
| 6               | Ajout de nouille et semelle                                 | ✓                            | ✓                            |
| 7               | Exécution couture semelle                                   | ✓                            |                              |
| 8               | Scellage, inspection couture, finition                      | ✓                            |                              |
| 9               | Retrait de la préforme du gabarit de préformage             | ✓                            |                              |
| 10a             | Placement de la préforme dans le moule                      | ✓                            |                              |
| 10b             | Fermeture du moule d'imprégnation                           | ✓                            | ✓                            |

Il est intéressant de noter l'important nombre d'étapes supplémentaires lors du préformage par couture. Ces étapes consistent principalement en la manipulation et l'installation de tissus mais également en de la programmation et de l'exécution de couture. Ensuite, le Tableau 5.9 présente le temps et le nombre de techniciens nécessaires pour la réalisation de chacune des étapes précédemment numérotées.



Tableau 5.9 Temps et nombre de techniciens nécessaires  
à la réalisation d'un raidisseur simple avec et sans couture

| Numéro<br>étape | Préformage par couture |                         |                     | Préformage à la main |                         |                     |
|-----------------|------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|---------------------|
|                 | Temps,<br>min          | Nombre de<br>technicien | Temps total,<br>min | Temps,<br>min        | Nombre de<br>technicien | Temps total,<br>min |
| 1a              | 5                      | 1                       | 5                   |                      |                         |                     |
| 1b              |                        |                         |                     | 10                   | 1                       | 10                  |
| 2               | 1                      | 1                       | 1                   |                      |                         |                     |
| 3               | 1                      | 1                       | 1                   |                      |                         |                     |
| 4               | 3                      | 1                       | 3                   |                      |                         |                     |
| 5               | 2                      | 1                       | 2                   |                      |                         |                     |
| 6               | 3                      | 1                       | 3                   | 3                    | 1                       | 3                   |
| 7               | 2                      | 1                       | 2                   |                      |                         |                     |
| 8               | 2                      | 1                       | 2                   |                      |                         |                     |
| 9               | 1                      | 1                       | 1                   |                      |                         |                     |
| 10a             | 5                      | 1                       | 5                   |                      |                         |                     |
| 10b             | 2                      | 1                       | 2                   | 10                   | 1                       | 10                  |
| Total           |                        |                         | 25                  |                      |                         | 23                  |

Les temps introduits ici proviennent du chronométrage des étapes effectués par Morin (2015) et moi-même durant le projet CRIAQ COMP-501.

La seconde étape correspond à la vérification du programme : paramètres de couture, longueur de couture, placement de la couture, etc. Ce n'est pas la programmation qui apparaît dans le Tableau 5.14. Le programme existe déjà, on s'assure juste qu'il est bien paramétré ce qui justifie le temps. Le scellage des étapes quatre et huit correspond à bloquer la dernière boucle afin de s'assurer que la couture ne se défasse pas.

Le total de temps du Tableau 5.9 montre que le préformage par couture ne réduit pas le temps de préformage pour un raidisseur simple comparé au préformage à la main. Cependant le préformage à la main présente des étapes plus propice à une déformation de l'empilement de tissus or ceci n'est pas acceptable. Il y a donc plus de risque de rejet lors qu'un préformage à la main.

### 5.3.2 Calcul des coûts

#### 5.3.2.1 Coût d'équipement

Le temps d'utilisation du robot de couture est de 5 min : 1 min de programmation spécifique, 3 min de couture et 1 min de chargement et déchargement de l'outil de couture.

Tableau 5.10 Cas d'un raidisseur simple : Coût de l'équipement

|       | <b>Temps<br/>d'utilisation</b> | <b>Taux<br/>d'amortissement</b> | <b>Taux de rejet</b> | <b>Coût de<br/>l'équipement</b> |
|-------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| unité | min                            | \$/min                          | %                    | \$                              |
| Total | 5                              | 0.5                             | 1                    | 2.4                             |

Le Tableau 5.10 révèle un coût d'équipement de 2.4 \$.

#### 5.3.2.2 Coût des matériaux

Le métrage de fil de couture nécessaire au préformage d'un raidisseur en T est de 28 m : 8.4 m pour le voile et deux fois 9.3 m pour les pieds. Le coût du fil de couture est ainsi de 3 \$. Le Tableau 5.11 présente également un coût de matériaux de support de 0.1 \$, soit 3% du coût de fil de couture.

Tableau 5.11 Cas d'un raidisseur simple : Coût des matériaux

|                         | <b>Titrage</b> | <b>Prix par<br/>kilogramme</b> | <b>Prix<br/>métrique</b> | <b>Métrage<br/>nécessaire</b> | <b>Taux<br/>rejet</b> | <b>Coût de<br/>matériau</b> |
|-------------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Unité                   | g/km           | \$/kg                          | \$/m                     | m                             | %                     | \$                          |
| Fil de<br>couture       | 134            | 800                            | 0.11                     | 28                            | 1                     | 3.0                         |
| Matériaux<br>de support |                |                                |                          |                               |                       | 0.1                         |
| <b>Total</b>            |                |                                |                          |                               |                       | <b>3.1</b>                  |

### 5.3.2.3 Coût de main-d'œuvre

Le Tableau 5.12 ainsi que le Tableau 5.13 présentent respectivement les coûts de main-d'œuvre d'un préformage par couture et celui d'un préformage à la main. Comme introduit dans le chapitre 5.3.1, le temps de préformage par couture est supérieur à celui d'un préformage à la main, ce qui impacte le coût. Le travail indirect accentue un peu plus l'écart entre les deux procédés. Pour rappel, le temps de travail indirect est égal à 40% du temps de travail direct.

Tableau 5.12 Cas d'un raidisseur simple : Coût de main d'œuvre pour le préformage par couture

|                  | <b>Temps de travail</b> | <b>Taux horaire de main-d'œuvre</b> | <b>Taux de rejet</b> | <b>Coût de main-d'œuvre</b> |
|------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| unité            | Min                     | \$/h                                | %                    | \$                          |
| Travail direct   | 25                      | 50                                  | 1                    | 21                          |
| Travail indirect | 10                      | 60                                  | 1                    | 10                          |
| <b>Total</b>     |                         |                                     |                      | <b>31</b>                   |

Tableau 5.13 Cas d'un raidisseur simple : Coût de main d'œuvre pour le préformage à la main

|                  | <b>Temps de travail</b> | <b>Taux horaire de main-d'œuvre</b> | <b>Taux de rejet</b> | <b>Coût de main-d'œuvre</b> |
|------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| unité            | Min                     | \$/h                                | %                    | \$                          |
| Travail direct   | 23                      | 50                                  | 5                    | 20                          |
| Travail indirect | 9.2                     | 60                                  | 5                    | 10                          |
| <b>Total</b>     |                         |                                     |                      | <b>30</b>                   |

#### 5.3.2.4 Coût d'ingénierie initial

Le coût d'ingénierie initial est estimé à un total de 2900 \$ dans le cas du préformage par couture. Le Tableau 5.14 présente notamment des coûts d'outillage et de création de procédure de préformage supérieurs au cas du préformage à la main au Tableau 5.15. Il y a également le coût de programmation que l'on retrouve dans le premier cas et non dans le second.

Tableau 5.14 Cas d'un raidisseur simple : Coût d'ingénierie initial par préformage par couture

| <b>Composantes</b>                       | <b>Coût ingénieur</b> | <b>Coût technicien</b> | <b>Coût matériaux</b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|
| Unité                                    | \$                    | \$                     | \$                    | \$           |
| Étude faisabilité                        | 200                   | 100                    |                       | 300          |
| Programmation                            | 100                   |                        |                       | 100          |
| Outillage, gabarits spécifiques          |                       |                        | 1000                  | 1000         |
| Création procédure                       | 200                   | 100                    |                       | 300          |
| Test #1, couture préforme en verre       | 200                   | 200                    | 100                   | 500          |
| Étude qualité, modification<br>procédure | 100                   | 50                     |                       | 150          |
| Test #2, couture préforme carbone        | 100                   | 100                    | 200                   | 400          |
| Étude qualité, modification<br>procédure | 100                   | 50                     |                       | 150          |
| <b>Total</b>                             | <b>1000</b>           | <b>600</b>             | <b>1300</b>           | <b>2900</b>  |

Pour le préformage à la main, le coût d'ingénierie initial n'est que de 1600 \$, il y a ainsi un écart de 1 300 \$ entre les deux méthodes de préformage avant même la production de la première préforme. La principale différence provient de l'investissement dans l'outillage. De plus l'étude de faisabilité et la création de procédure nécessite d'avantage de temps afin d'utiliser le préformage par couture judicieusement.

Tableau 5.15 Cas d'un raidisseur simple : Coût d'ingénierie initial par préformage à la main

| Composantes                              | Coût ingénieur | Coût technicien | Coût matériaux | Total       |
|------------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-------------|
| Unité                                    | \$             | \$              | \$             | \$          |
| Étude faisabilité                        | 100            | 50              |                | 150         |
| Programmation                            | x              | x               | x              | x           |
| Outillage, gabarits spécifiques          |                |                 | 100            | 100         |
| Création procédure                       | 100            | 50              |                | 150         |
| Test #1, couture préforme en verre       | 200            | 200             | 100            | 500         |
| Étude qualité, modification<br>procédure | 100            | 50              |                | 150         |
| Test #2, couture préforme carbone        | 100            | 100             | 200            | 400         |
| Étude qualité, modification<br>procédure | 100            | 50              |                | 150         |
| <b>Total</b>                             | <b>700</b>     | <b>500</b>      | <b>400</b>     | <b>1600</b> |

### 5.3.3 Conclusion

Il apparaît que le temps de travail est supérieur dans le cas d'un préformage avec couture. Puis les coûts de couture s'additionnent. De plus, le coût initial d'ingénierie est supérieur. Le préformage par couture ne peut être viable pour la géométrie étudiée. La Figure 5.3 présente les deux courbes de coût de préformage en fonction du nombre de préformes. Comme attendu, la courbe de coût de préformage par couture est supérieure à celle du préformage à la main et le restera quel que soit le nombre de préformes.

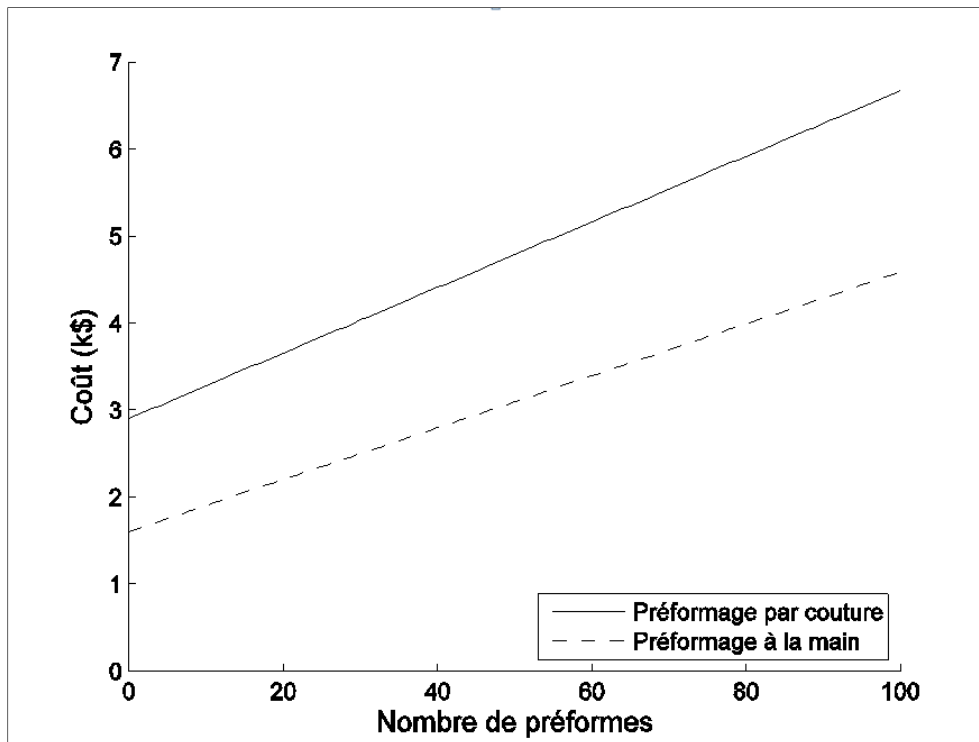


Figure 5.3 Courbes d'estimation des coûts de préformage d'un raidisseur simple par couture et à la main

En conclusion, le préformage par couture n'est pas viable pour l'industrie d'un point de vue économique pour une structure aussi simple que le raidisseur en T aux dimensions du projet. Il faut s'intéresser à d'autres gains comme la qualité des préformes fabriquées pour envisager le préformage par couture pour le type de pièce ici étudié.

#### 5.4 Cas d'un démonstrateur

Cette section se présente sous le même format que celle qui est associée au cas d'un raidisseur simple au chapitre 5.3. Le démonstrateur étudié dans ce chapitre possède la géométrie étudiée au chapitre 2.1.3 et visible sur la Figure 2.1.

### 5.4.1 Estimation du temps de préformage

Le préformage d'un démonstrateur est fondamentalement similaire à celui d'un raidisseur. Les quinze étapes indiquées dans le Tableau 5.16 correspondent à une succession de placements, coutures, inspections et manipulations de matière. Les différences majeures avec un raidisseur simple sont : les dimensions de la préforme associée à la nécessité de faire intervenir deux personnes pour certaines manipulations ainsi que l'explosion du temps de travail visible au Tableau 5.17.

Tableau 5.16 Liste des étapes de préformage d'un démonstrateur avec et sans couture

| Numéro<br>étape | Nom étape                                                              | Nécessité<br>avec<br>couture | Nécessité<br>sans<br>couture |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1a              | Placement de l'empilement pour la peau sur le gabarit d'assemblage     | ✓                            |                              |
| 1b              | Placement de l'empilement pour la peau sur le moule d'imprégnation     |                              | ✓                            |
| 2               | Paramétrage du programme                                               | ✓                            |                              |
| 3               | Exécution couture de la peau                                           | ✓                            |                              |
| 4               | Scellage, inspection couture, finition                                 | ✓                            |                              |
| 5a              | Placement des empilements pour raidisseurs sur le gabarit d'assemblage | ✓                            |                              |
| 5b              | Placement des empilements pour raidisseurs dans les contre-moules      |                              | ✓                            |
| 6               | Paramétrage du programme                                               | ✓                            |                              |
| 7               | Exécution couture voile                                                | ✓                            |                              |
| 8               | Scellage, inspection couture, finition                                 | ✓                            |                              |
| 9               | Déplacement, ouverture des voiles                                      | ✓                            | ✓                            |
| 10              | Ajout de nouille et semelle                                            | ✓                            | ✓                            |
| 11              | Paramétrage du programme                                               | ✓                            |                              |
| 12              | Exécution couture semelle                                              | ✓                            |                              |
| 13              | Scellage, inspection couture, finition                                 | ✓                            |                              |
| 14              | Retrait de la préforme du gabarit de préformage                        | ✓                            |                              |
| 15a             | Placement de la préforme dans le moule                                 | ✓                            |                              |
| 15b             | Fermeture du moule                                                     | ✓                            | ✓                            |

Les quatre premières étapes traitent de la peau puis le préformage des raidisseurs est discuté. L'étape 10 correspond à l'ajout la nouille et de la semelle. Enfin la fermeture du moule signifie que les contre-moules sont placés sur la préforme pour le préformage par couture. Pour le préformage à la main, la fermeture correspond au placement des raidisseurs insérés dans les contre-moules sur la peau posée sur le moule. Ensuite les contre-moules sont boulonnés au moule dans les deux cas.

Tableau 5.17 Temps et nombre de techniciens nécessaires à la réalisation d'un démonstrateur avec et sans couture

| Numéro<br>étape | Préformage par couture |                         |                     | Préformage à la main |                         |                     |
|-----------------|------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|---------------------|
|                 | Temps,<br>min          | Nombre de<br>technicien | Temps total,<br>min | Temps,<br>min        | Nombre de<br>technicien | Temps total,<br>min |
| 1a              | 5                      | 2                       | 10                  |                      |                         |                     |
| 1b              |                        |                         |                     | 5                    | 2                       | 10                  |
| 2               | 1                      | 1                       | 1                   |                      |                         |                     |
| 3               | 2                      | 1                       | 2                   |                      |                         |                     |
| 4               | 3                      | 1                       | 3                   |                      |                         |                     |
| 5a              | 5                      | 2                       | 10                  |                      |                         |                     |
| 5b              |                        |                         |                     | 30                   | 2                       | 60                  |
| 6               | 1                      | 1                       | 1                   |                      |                         |                     |
| 7               | 2                      | 1                       | 2                   |                      |                         |                     |
| 8               | 3                      | 1                       | 3                   |                      |                         |                     |
| 9               | 5                      | 2                       | 10                  | 10                   | 2                       | 20                  |
| 10              | 5                      | 2                       | 10                  | 5                    | 2                       | 10                  |
| 11              | 1                      | 1                       | 1                   |                      |                         |                     |
| 12              | 4                      | 1                       | 4                   |                      |                         |                     |
| 13              | 5                      | 1                       | 5                   |                      |                         |                     |
| 14              | 3                      | 2                       | 6                   |                      |                         |                     |
| 15a             | 5                      | 2                       | 10                  |                      |                         |                     |
| 15b             | 5                      | 1                       | 5                   | 20                   | 2                       | 40                  |
| Total           |                        |                         | 83                  |                      |                         | 140                 |

Le Tableau 5.17 met en évidence un premier avantage à utiliser la couture dans le procédé de préformage : cette technique permet d'économiser beaucoup de temps comparée au



préformage à la main. En effet une étape de manipulation des voiles des raidisseurs (5a, 5b) ne durant que quelques minutes nécessite six fois plus de temps si le préformage par couture n'est pas utilisé. Ce gain de temps de travail se révèle une grande source d'économie, en faveur de la technique de couture. C'est temps sont issus du chronométrage de la production des démonstrateurs durant le projet CRIAQ COMP-501.

## 5.4.2 Calcul des coûts

### 5.4.2.1 Coût d'équipement

Le Tableau 5.18 indique un temps d'utilisation de 12 min du robot monté de la tête de couture. Ce temps est la somme des étapes de paramétrage de programme, d'exécution de couture ainsi qu'une minute additionnelle pour éventuellement charger ou décharger la tête de couture. Ce temps donne un coût d'équipement de 6 \$ pour le préformage par couture d'un démonstrateur.

Tableau 5.18 Cas d'un démonstrateur : Coût de l'équipement

|       | <b>Temps<br/>d'utilisation</b> | <b>Taux<br/>d'amortissement</b> | <b>Taux de rejet</b> | <b>Coût de<br/>l'équipement</b> |
|-------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| Unité | min                            | \$/min                          | %                    | \$                              |
| Total | 12                             | 0.5                             | 1                    | 6.0                             |

### 5.4.2.2 Coût des matériaux

Le métrage de fil de couture nécessaire au préformage d'un raidisseur en T est de 198 m : 23.5 m pour chaque voile, 23.5 m pour chaque côté de la semelle et quatre fois 26 m pour les pieds. Le Tableau 5.19 présente le coût du fil de couture de 22 \$. Et un coût de matériaux de support de 0.7 \$. Pour rappel ce coût correspond à 3% du coût de matière première qui est dans notre cas uniquement le fil de couture. En effet, le tissu du renfort fibreux n'est pas

compris car l'étude se concentre sur la différence entre les deux méthodes de préformage et chacune nécessite la même quantité de tissus.

Tableau 5.19 Cas d'un démonstrateur : Coût des matériaux

|                         | <b>Titrage</b> | <b>Prix par<br/>kilogramme</b> | <b>Prix<br/>métrique</b> | <b>Métrage<br/>nécessaire</b> | <b>Taux<br/>rejet</b> | <b>Coût de<br/>matériau</b> |
|-------------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Unité                   | g/km           | \$/kg                          | \$/m                     | m                             | %                     | \$                          |
| Fil couture             | 134            | 800                            | 0.11                     | 198                           | 1                     | 22                          |
| Matériaux<br>de support |                |                                |                          |                               |                       | 0.7                         |
| <b>Total</b>            |                |                                |                          |                               |                       | <b>22.7</b>                 |

Il n'y a pas de tableau pour le préformage à la main car il ne nécessite pas de matériaux supplémentaires.

#### 5.4.2.3 Coût de main-d'œuvre

Contrairement au cas du raidisseur, le préformage par couture réduit fortement le temps de main-d'œuvre par rapport au préformage à la main. Le Tableau 5.20 montre que le coût total est de 104 \$ pour le préformage par couture contre 182 \$ pour le préformage à la main du Tableau 5.21. Pour rappel, le temps de travail indirect équivaut à 40% du temps de travail direct.

Tableau 5.20 Cas d'un démonstrateur : Coût de main d'œuvre pour le préformage par couture

|                  | <b>Temps de travail</b> | <b>Taux horaire de main-d'œuvre</b> | <b>Taux de rejet</b> | <b>Coût de main-d'œuvre</b> |
|------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Unité            | Min                     | \$/h                                | %                    | \$                          |
| Travail direct   | 83                      | 50                                  | 1                    | 70                          |
| Travail indirect | 33                      | 60                                  | 1                    | 34                          |
| <b>Total</b>     |                         |                                     |                      | <b>104</b>                  |

Tableau 5.21 Cas d'un démonstrateur : Coût de main d'œuvre pour le préformage à la main

|                  | <b>Temps de travail</b> | <b>Taux horaire de main-d'œuvre</b> | <b>Taux de rejet</b> | <b>Coût de main-d'œuvre</b> |
|------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Unité            | Min                     | \$/h                                | %                    | \$                          |
| Travail direct   | 140                     | 50                                  | 5                    | 123                         |
| Travail indirect | 56                      | 60                                  | 5                    | 59                          |
| <b>Total</b>     |                         |                                     |                      | <b>182</b>                  |

#### 5.4.2.4 Coût d'ingénierie initial

La géométrie du démonstrateur étant plus complexe que celle du raidisseur, on observe dans les Tableau 5.22 et Tableau 5.23 l'augmentation de la plupart des coûts. De nouveau, le préformage par couture engendre un coût initial supérieur au préformage à la main. La programmation et l'outillage spécifique sont les principaux facteurs de cette augmentation.

Il est intéressant de noter que les coûts en matériaux composent la majeure partie des coûts. Plus particulièrement les 2500 \$ pour le second test, montant qui représente uniquement le coût en tissu de carbone. Cette somme conséquente met en lumière l'importance de minimiser le taux de rejet de préformes tant le coût en matière première est élevé.

Tableau 5.22 Cas d'un démonstrateur : Coût d'ingénierie initial par préformage par couture

| <b>Composantes</b>                       | <b>Coût ingénieur</b> | <b>Coût technicien</b> | <b>Coût matériaux</b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|
| Unité                                    | \$                    | \$                     | \$                    | \$           |
| Étude faisabilité                        | 400                   | 200                    |                       | 600          |
| Programmation                            | 200                   |                        |                       | 200          |
| Outillage, gabarits spécifiques          |                       |                        | 2500                  | 2500         |
| Création procédure                       | 200                   | 100                    |                       | 300          |
| Test #1, couture préforme en verre       | 400                   | 500                    | 500                   | 1400         |
| Étude qualité, modification<br>procédure | 100                   | 50                     |                       | 150          |
| Test #2, couture préforme carbone        | 200                   | 250                    | 2500                  | 2950         |
| Étude qualité, modification<br>procédure | 100                   | 50                     |                       | 150          |
| <b>Total</b>                             | <b>1600</b>           | <b>1150</b>            | <b>5500</b>           | <b>8250</b>  |

Tableau 5.23 Cas d'un démonstrateur : Coût d'ingénierie initial par préformage à la main

| <b>Composantes</b>                       | <b>Coût ingénieur</b> | <b>Coût technicien</b> | <b>Coût matériaux</b> | <b>Total</b> |
|------------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|
| Unité                                    | \$                    | \$                     | \$                    | \$           |
| Étude faisabilité                        | 200                   | 100                    |                       | 600          |
| Programmation                            | x                     | x                      | x                     | x            |
| Outillage, gabarits spécifiques          |                       |                        | 250                   | 250          |
| Création procédure                       | 100                   | 50                     |                       | 150          |
| Test #1, couture préforme en verre       | 400                   | 500                    | 500                   | 1400         |
| Étude qualité, modification<br>procédure | 100                   | 50                     |                       | 150          |
| Test #2, couture préforme carbone        | 200                   | 250                    | 2500                  | 2950         |
| Étude qualité, modification<br>procédure | 100                   | 50                     |                       | 150          |
| <b>Total</b>                             | <b>1100</b>           | <b>1000</b>            | <b>3250</b>           | <b>5350</b>  |

### 5.4.3 Conclusion

Le cas du démonstrateur s'avère particulièrement intéressant puisque malgré un coût d'ingénierie initial conséquent, le préformage par couture permet un important gain de temps de travail. Ceci se traduit, sur la Figure 5.4, par le fait que les courbes de coût de préformage par couture et de préformage à la main se croisent. Bien que pour un préformage par couture, le coût soit initialement supérieur à celui d'un préformage à la main, la courbe s'inverse après la 55<sup>ème</sup> préforme. La zone de profit est alors atteinte.

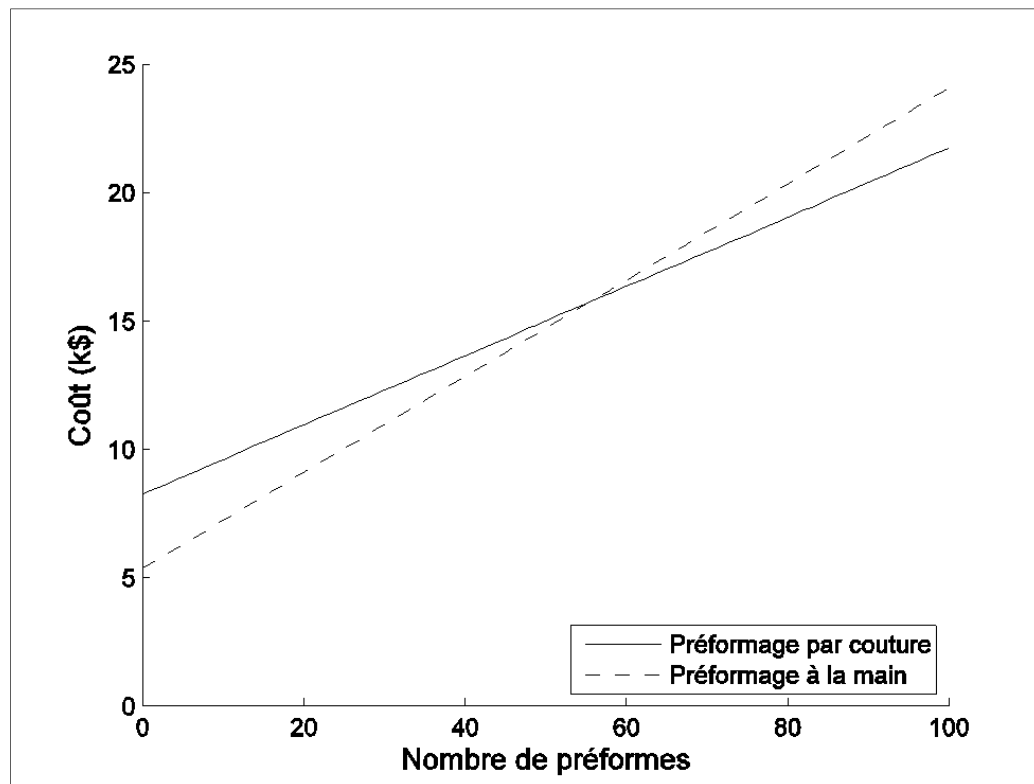


Figure 5.4 Courbes d'estimation des coûts de préformage d'un démonstrateur par couture et à la main

Il est possible de conclure que le préformage par couture est économiquement viable pour l'industrie à partir d'une certaine quantité de démonstrateurs de la géométrie du projet CRIAQ COMP-501. En considérant les hypothèses de cette étude, la quantité de viabilité économique est de 55 préformes. Bien évidemment l'entreprise pourrait choisir d'émettre

des hypothèses différentes de celles qui ont été utilisées pour cette étude. Par exemple s'il était considéré que l'amortissement de l'équipement ne se faisait que sur cinq années, il faudrait attendre le 64<sup>ème</sup> préforme pour atteindre la même viabilité économique.

## **5.5 Extrapolation des coûts de préformage**

### **5.5.1 Intérêts supplémentaires au préformage par couture**

En plus des économies de temps et d'argent qu'apporte le procédé de préformage par couture pour de grandes préformes, l'aspect qualitatif de ce procédé s'avère non négligeable. En effet, le robot utilisé est extrêmement précis et la répétabilité de l'opération est quasi parfaite. Contrairement aux robots, l'humain est dépendant de son talent et de son état d'esprit qui influencent la qualité et le temps de travail. Plus de 3000 \$ sont nécessaires à la production d'un démonstrateur (en matière, consommable et temps de travail) ainsi que de nombreuses heures de travail (découpe, empilement, préformage, infusion, cuisson). Il paraît alors évident qu'il faille minimiser les rejets. De par sa précision et la répétabilité de son travail, le robot promet l'obtention de préformes de meilleure qualité et réduit les sources d'erreur.

Si l'utilisation d'un robot de couture s'avère également intéressante, c'est parce qu'il est extrêmement polyvalent. Il peut aussi bien être utilisé pour la couture que pour la découpe, la manipulation de tissus et de préformes ou encore le renforcement par des techniques spécialisées comme le touffetage. L'investissement dans le robot peut être rentabilisé par la réalisation de nombreuses tâches tout au long du processus de production.

### **5.5.2 Recommandations et Corrections**

Comme précisé en introduction à la section 5.2, des choix ont été faits concernant cette étude de coût afin, tant que possible, de ne pas avantager le préformage par couture. Cependant de nombreux paramètres pourraient être revus à la baisse et des corrections pourraient montrer une viabilité économique d'autant plus importante pour le procédé.

La première correction possible concerne le taux de rejet appliqué. En effet, des taux de 1 et 5% sont appliqués or les expériences qui ont été réalisées et la section précédente ont démontré que le préformage par couture améliorait significativement la qualité des préformes. Il serait intéressant d'étudier les taux de rejet du fait de leur influence sur les coûts. D'autant plus que le coût du renfort fibreux n'est pas pris en compte dans l'étude. En effet, l'étude s'attarde sur la différence de coût de préformage. Sachant que le renfort fibreux est très onéreux, le taux de rejet prend encore plus d'importance.

Dans une étude plus approfondie du coût de préformage, une courbe d'apprentissage aurait assurément sa place dans la fabrication des premières pièces. Il est possible d'affirmer sans prendre de risques que la courbe d'apprentissage serait plus courte dans le cas du préformage par couture et précipiterait également le point de rentabilité. Les raisons pour lesquelles il pourrait être affirmé que l'apprentissage serait réduit sont : un temps de travail plus court à la base, des étapes simplifiées par la couture et les outils spécialisés, comme le gabarit d'assemblage.

Sans phase d'apprentissage, le gain entre le préformage par couture et à la main est d'environ 50 \$ par démonstrateur. Considérant que le coût de renfort fibreux atteigne 2500 \$ et qu'une matrice haute performance s'avère très couteuse, le gain peut paraître minime comparé à la mise en place d'une telle technologie. D'autant plus qu'il faut prévoir de la place supplémentaire pour installer le dispositif, ce qui représente donc un coût non discuté dans l'étude tant il est dépendant de la situation géographique et du métrage souhaité. Une fois de plus l'aspect d'amélioration de la qualité des préformes couplé au gain de temps de procédé peuvent être déterminants pour investir dans la technologie de préformage par couture.

D'autre part, l'une des hypothèses qui ont été émises semble maladroite. En effet, que le robot travaille 10 années à plus de 100 000 min/année implique un million d'heures de travail. Or un démonstrateur ne nécessite que 12 min de temps robot. Il faudrait plus de 80 000 démonstrateurs pour assouvir ce temps de travail, ce n'est pas envisageable dans un contexte aéronautique. Cependant, dans la mesure où le robot s'avère extrêmement

polyvalent, pourquoi se limiter à la simple utilisation pour la couture des préformes? Il est plus qu'envisageable d'en faire un robot multitâche : découpe, manipulation de tissus et renforcement peuvent compléter la couture grâce à l'ajout de nouvelles têtes spécialisées. L'investissement initial augmenterait mais le robot gagnerait en polyvalence, ce qui permettrait de combler les temps mort durant la couture. Il serait même envisageable que le robot travaille 15 ou 24 h/jr et non seulement 7,5 h tel qu'il le fait dans l'étude.

Il pourrait être intéressant, lors d'une étude de coût plus approfondie, de tester diverses tailles de préformes mais également plusieurs niveaux de complexité. Ceci pourrait permettre de valider, avec un niveau de certitude plus élevé, que l'efficacité du préformage par couture est croissante avec une taille ou une complexité de préformes croissantes.

### **5.5.3 Extrapolation**

À partir d'une certaine dimension ou complexité, le préformage présente un potentiel intéressant. Une préforme cousue ne nécessite l'intervention de plusieurs techniciens qu'à certaines étapes de la manipulation contrairement à une préforme non cousue qui la nécessite tout au long du processus. Aussi, le temps nécessaire à la réalisation d'une préforme cousue est réduit par comparaison à une préforme non cousue. Plus la préforme est complexe, plus la réduction de temps est importante. Aussi ce gain de temps, peut se révéler être une source d'économie suffisamment importante pour réduire les coûts de fabrication malgré les investissements et coûts d'ingénierie que nécessite le procédé. Ceci est d'autant plus appréciable sachant que le préformage par couture réduit le taux de rejet de préformes.

En conclusion, la pratique et le calcul mettent en évidence qu'une augmentation de taille et/ou de complexité des préformes nécessite une augmentation du temps de travail et du nombre de techniciens. Cette tendance semble d'autant plus véridique pour de grandes pièces complexes. Le préformage par couture apparaît donc d'autant plus judicieux et pourra s'avérer économiquement viable pour l'industrie. Une étude de cas reste cependant nécessaire pour chaque géométrie envisagée.



## CONCLUSION

Le projet CRIAQ COMP-501 vise le préformage efficace de préformes 3D complexes à renforts fibreux secs pour le secteur industriel aéronautique. La solution envisagée est le préformage de préformes 3D complexes assemblées par couture « One-Sided Stitching® » (OSS®). L'évaluation et la caractérisation du procédé doivent permettre la réalisation d'un panneau démonstrateur raidi. Au sein de ce projet, les objectifs de ce mémoire de maîtrise sont : la pérennisation de la fabrication de préformes, l'évaluation des performances mécaniques du renforcement par touffetage et l'étude de la viabilité économique du préformage par couture OSS®.

Suite aux travaux précédents du projet COMP-501 d'évaluation des paramètres de couture puis de leur positionnement sur le raidisseur en « T », la couture ne s'avère pas une technique de renforcement mais plutôt de préformage. Des essais d'arrachement du voile ont alors été effectués afin d'évaluer le pouvoir de renforcement des préformes par touffetage. Après une revue de la littérature, il s'est imposé que le renfort par touffetage devait être inséré avec précision et précaution dans les zones de concentration de contraintes. L'étude a démontré la difficulté de mise en place du touffetage, les premières tentatives montrant de grosses anomalies de fabrication. La stabilisation du procédé de touffetage répond en partie au premier objectif de ce mémoire. Une fois le touffetage stabilisé dans la zone de la nouille, zone de concentration de contraintes et présentant l'initiation de la rupture sous chargement, des essais d'arrachement du voile ont été effectués. Les performances mécaniques de deux patrons de touffetage ont été évaluées lors d'essais symétriques et asymétriques. Les résultats démontrent une possibilité intéressante de renforcement localisé. Un premier patron de touffetage permet d'obtenir jusqu'à 33% de gain à la résistance à l'arrachement symétrique selon notre configuration de raidisseur en « T ». C'est-à-dire imprégné par VARI avec le système de résine époxy du projet et notre choix de matériaux et de géométrie. Il y a également la configuration « quasi » de l'empilement et le patron de couture préférentiel évalué par les travaux précédents. C'est le second patron de touffetage qui présente la

meilleure résistance à l'arrachement asymétrique avec des gains allant jusqu'à 12%. Le touffetage permet également une plus grande déformation du matériau avant rupture.

L'étude comparative des coûts engendrés par le préformage par couture par rapport à ceux qu'engendre le préformage à la main se base uniquement sur les différences au moment du préformage. La préparation des empilements et l'imprégnation des préformes ne sont pas pris en compte dans l'évaluation de la viabilité économique de la mise en œuvre du préformage par couture. L'étude montre qu'à partir d'une certaine complexité ou d'une certaine dimension de préforme, le préformage apporte des gains de temps et de qualité non négligeables qui permettent un retour sur investissement de l'équipement et des matières premières supplémentaires. Une discussion présente divers points d'étude confirmant l'intérêt que présente la couture OSS® dans le préformage de matériaux composites à renforts fibreux secs. L'automatisation est le principal argument en faveur de cette technologie, en effet, elle doit permettre des gains de temps et de qualité en supprimant le facteur humain. De plus l'automatisation peut s'étendre à la découpe et l'empilement des renforts fibreux ainsi qu'au déplacement de préforme. L'investissement n'en serait que plus rentable.

En conclusion, si la couture ne s'avère pas être la technique idéale de renforcement de préformes selon les géométries étudiées lors de ce projet, elle semble être une technique propre au préformage. Le touffetage apparaît quant à lui plus mature pour le renforcement de préforme. L'automatisation complète de la fabrication de préformes et un intérêt grandissant de l'industrie pour les renforts fibreux secs seront les facteurs clés de l'utilisation de ces techniques à l'échelon supérieur.

## RECOMMANDATIONS

Le mémoire étant multidisciplinaire, les recommandations sont spécifiques à un domaine :

Afin de mieux comprendre l'influence de la couture sur les propriétés interlaminaires et intralaminaires, la liste suivante présente des études à fort potentiel :

- Influence de la pénétration d'une aiguille dans la préforme.
- Influence d'un défaut de couture (point manqué, fibres sorties du plan, etc) sur les performances de la couture.
- Évaluation des performances mécaniques de la couture OSS® et/ou du touffetage soumis à d'autres chargements et/ou un endommagement.
- Évaluation des performances mécaniques de la couture OSS® et/ou du touffetage en fatigue.

Concernant la production, il serait intéressant de travailler sur la maturation des procédés de préformage par couture OSS® et touffetage :

- Automatisation complète de la production d'une préforme du rouleau de matière première à la manipulation d'une préforme cousue pour le placement dans le moule d'imprégnation afin de prouver la viabilité du processus pour le milieu industriel.
- Manipulation et déformation de renforts fibreux secs par un automate.

Pour l'étude comparative des coûts, de nombreuses recommandations et discussions sont proposées à la section 5.5 afin d'améliorer l'étude et d'éventuellement la développer pour des géométries différentes.



## ANNEXE I

### FICHE TECHNIQUE SYSTÈME ARALDITE®LY 8601/ARADUR® 8602

  
Enriching lives through innovation

Advanced Materials

**Araldite®LY 8601 / Aradur® 8602 System**

EPOXY RESIN SYSTEM

---

**DESCRIPTION:**

Araldite®LY 8601 (Resin) / Aradur® 8602 (Hardener) is a two-component, low-viscosity epoxy system developed for use in the production of advanced composites using vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM), resin transfer molding (RTM), Seemans Composite Resin Injection Molding Process (SCRIMP<sup>SM</sup>), or other infusion processes. The low-mixed viscosity and wet-out potential of Araldite®LY 8601 / Aradur® 8602 enhance processability parameters.

Araldite®LY 8601 / Aradur® 8602 has excellent toughness, and the increased reactivity allows for a faster ambient temperature cure and reduced de-mold time.

---

**MIX RATIO:**

By weight: 100 to 25 Resin to Hardener

**Mixing Instructions:** Measure each component accurately ( $\pm$  5%) into clean containers. Thoroughly mix resin and hardener together (minimum 2 minutes) scraping container sidewalls, bottom and mixing stick several times to assure a uniform mix.

---

**TYPICAL HANDLING PROPERTIES:**

Tested @ 77 °F (25 °C) unless otherwise noted.

| Property          | Criteria   | ASTM Test Method | Test Value  |
|-------------------|------------|------------------|-------------|
| Color             | Mixed      |                  | Transparent |
| Viscosity, cP     | Resin      | D-2393           | 580         |
|                   | Hardener   |                  | 25          |
|                   | Mixed      |                  | 175         |
| Gel Time, minutes | 14 fl. oz. | D-2471           | 70          |

**NOTE :** Typical Properties – These physical properties are reported as typical test values obtained by our test laboratory. If assistance is needed establishing product specifications, please consult with our Quality Control Department.

---

**RECOMMENDED CURE SCHEDULE:**

| Temperature   | Demold Time | Full Cure Time |
|---------------|-------------|----------------|
| 77 °F (25 °C) | 24 Hours    | 3 Days         |

Araldite®LY 8601 Aradur® 8602 System

Page 1/4

October 2010

Distributed By

Freeman Manufacturing & Supply Co.

www.freemansupply.com 800-321-8511



Figure-A I-1 Fiche Technique : Araldite®LY 8601/Aradur® 8602



### NEAT SYSTEM

#### TYPICAL CURED PROPERTIES:

Tested @ 77 °F (25 °C) and cured 7 days @ 77°F (25°C) unless otherwise noted.

| Property                                   | ASTM Test Method | Test Values <sup>(1)</sup> |
|--------------------------------------------|------------------|----------------------------|
| Specific Gravity                           | D-792            | 1.12                       |
| Cubic inch per Pound                       | --               | 24.6                       |
| Hardness (Shore D)                         | D-2240           | 82                         |
| Ultimate Flexural Strength, psi            | D-790            | 11,013                     |
| Flexural Modulus, psi                      | D-790            | 322,560                    |
| Ultimate Tensile Strength, psi             | D-638            | 7,871                      |
| Tg by DMA, °F (°C)                         | D-4065           | 164 (73)                   |
| Linear Shrinkage, Mold 0 in/in             | D-2566           | 0.001                      |
| Ultimate Compressive Strength, psi         | D-695            | 15,410                     |
| Compressive Modulus, psi                   | --               | 305,432                    |
| % Elongation                               | D-638            | 6                          |
| Coefficient of Thermal Expansion, in/in/°F | D-3386           | 42 x 10 <sup>-6</sup>      |
| -22 to 86 °F (-30° to 30 °C)               |                  |                            |
| Izod Impact, Notched, ft.lb./in.           | D-256            | 0.4116                     |

**NOTE :** All properties are of neat product form (non-composite)

### INFUSION PROCESS

#### TYPICAL CURED PROPERTIES:

Tested @ 77 °F (25 °C) unless otherwise noted.

| Property                           | ASTM Test Method | Test Values <sup>(1)</sup> | Test Values <sup>(2)</sup> |
|------------------------------------|------------------|----------------------------|----------------------------|
| Hardness (Shore D)                 | D-2240           | 88                         | 92                         |
| Ultimate Flexural Strength, psi    | D-790            | 47,600                     | 102,165                    |
| Flexural Modulus, psi              | D-790            | 2.5 x 10 <sup>6</sup>      | 6.9 x 10 <sup>6</sup>      |
| Ultimate Tensile Strength, psi     | D-638            | 44,545                     | 72,851                     |
| Ultimate Compressive Strength, psi | D-695            | 30,023                     | 45,387                     |
| Compressive Modulus                | D-695            | 3.6 x 10 <sup>6</sup>      | 9.7 x 10 <sup>6</sup>      |
| % Elongation                       | D-638            | 1.6                        | 1.0                        |

#### LAY-UP PROCESS:

|                  | Glass Laminate <sup>(1)</sup>          | Graphite Laminate <sup>(2)</sup>       |
|------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| Panel Type :     | Approximately 2 ft. x 2 ft. flat panel | Approximately 2 ft. x 2 ft. flat panel |
| Cloth Type :     | 8 layer, Volan A 7500, 10oz            | 8 layer, 3K, 70P                       |
| Cloth Rotation : | 0 degrees                              | 0 degrees                              |
| Procedure :      | VARTM, flat panel                      | VARTM, flat panel                      |
| Cure Schedule:   | 7 days @ 77°F                          | 7days @ 77°F                           |

#### CONDITIONING:

Stir well before use. This material will separate.



Figure-A I-2 Fiche Technique : Araldite®LY 8601/Aradur® 8602

**HUNTSMAN**  
Enriching lives through innovation

---

**STORAGE:**

Araldite® LY 8601 (Resin) / Aradur® 8601 (Hardener) should be stored in a dry place, in the sealed original container, at temperatures between +2°C and +40°C (+35.6°F and +104°F). Under these storage conditions, the shelf life is 2 years. The product should not be exposed to direct sunlight.

---

**PRECAUTIONARY STATEMENT:**

Huntsman Advanced Materials Americas LLC maintains up-to-date Material Safety Data Sheets (MSDS) on all of its products. These sheets contain pertinent information that you may need to protect your employees and customers against any known health or safety hazards associated with our products. Users should review the latest MSDS to determine possible health hazards and appropriate precautions to implement prior to using this material.

**First Aid!**

Refer to MSDS as mentioned above.

**KEEP OUT OF REACH OF CHILDREN**  
**FOR PROFESSIONAL AND INDUSTRIAL USE ONLY**

Araldite® LY 8601 Aradur® 8602 SystemPage 3/4

October 2010  
Distributed By  
Freeman Manufacturing & Supply Co.  
www.freemansupply.com 800-321-8511

FREEMAN

Figure-A I-3 Fiche Technique : Araldite®LY 8601/Aradur® 8602



#### IMPORTANT LEGAL NOTICE

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

WHILE ALL THE INFORMATION AND RECOMMENDATIONS IN THIS PUBLICATION ARE, TO THE BEST OF HUNTSMAN ADVANCED MATERIAL'S KNOWLEDGE, INFORMATION AND BELIEF, ACCURATE AT THE DATE OF PUBLICATION, nothing herein is to be construed as a warranty, whether express or implied, including but without limitation, as to merchantability or fitness for a particular purpose. In all cases, it is the responsibility of the user to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any product for its own particular purpose.

The behavior of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behavior of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behavior should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd. Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

Araldite and Aradur are registered trademarks of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2010 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

Main Office :  
Huntsman Corporation  
10003 Woodloch Forest Dr  
The Woodlands, TX 77380  
888-564-9318

[www.huntsman.com/advanced\\_materials](http://www.huntsman.com/advanced_materials)  
[advanced\\_materials@huntsman.com](mailto:advanced_materials@huntsman.com)



Figure-A I-4 Fiche Technique : Araldite®LY 8601/Aradur® 8602



## ANNEXE II

### FICHE TECHNIQUE DEVICE FRAZIER, STANDARD MODEL

#### *The Frazier™ Schiefer Thickness Gauge*

**[formerly The Frazier NBS (U.S. National Bureau of Standards) Thickness Gage]**

The Frazier Precision Instrument Company offers a Carpet Thickness Gauge that was especially developed by the National Institute of Standards & Technology for measuring the thickness of rugs, carpets and other materials. The thickness is a direct indication of quality or amount of wear experienced in use and during a laboratory wear test.



Frazier Schiefer Carpet Thickness Gage (new model with digital indicator is now available)



Frazier Schiefer Thickness Gauge - Standard Model (new model with digital indicator is now available)

#### [Accessories and Information about Digital Indicators used in the Frazier Schiefer Thickness Gauges](#)

The *Frazier Schiefer Thickness Gauge* is available in two models - the *Carpet Thickness Gauge* and a *Standard Thickness Gauge*. These instruments are used for determining the thickness of rugs, carpets, woven and knitted cloths, nonwovens, rubber, felt, sponge, blankets, pile and napped cloths, narrow cloths, webbings, tapes, ribbons, braids, coated cloths, films and glass cloths.

The *Carpet Thickness model* is provided with a slim probe that penetrates the material tested. It is portable and the bottom surface of the material does not have to be exposed or moved in order to take a measurement. This enables measurements to be made on carpets installed over firm surfaces or during a laboratory wear test.

Figure-A II-1 Fiche Technique Device Frazier, Standard Model

The *Standard Model* is without the probe and provision is made for the addition of various dead weights to the instrument to produce specific standard pressures.

Some representative advantages and/or Uses of the *Frazier Carpet Thickness Gauge* are as follows:

1. Developed to measure the thickness of carpets, rugs and similar material such as sponge rubber while they are in position of use.
2. Measures the thickness of material at a constant pressure of 0.75 pounds/square inch.
3. A *Standard Model* is available with a series of weights and sizes of presser feet for measurements at a wide range of standard pressures.
4. Relatively inexpensive and simple and convenient to use.
5. Additional custom loads and presser foot sizes can be made to comply with additional testing standards.

The *Frazier Carpet Thickness Gauge* complies with the requirements and specifications set forth in: ASTM D374, ASTM D885, [ASTM D1117](#), [ASTM D1777](#), [ASTM D461](#), [ASTM D418](#), [ASTM D645](#), [D5199](#); [ASTM D6859](#); DART 120.0; Federal Test Methods Standard #191, Method 5030; and ANSI Standard L14.137-1964.

Existing units with analog dial indicator can be refitted with digital indicator - call for Details

See Also: [Frazier Schiefer Compressometer](#)

[Price Quote](#)

[FST - User Manual](#)

**The Frazier Thickness Gage** - Frazier, Schiefer, compressability, compressibility, thickness, hand, softness, compress, carpet thickness, compressional resilience, ames, 282, 202, dial indicator, digital indicator, comparator, thickness comparator, [D5736](#), [D5823](#), [D6859](#)

Figure-A II-2 Fiche Technique Device Frazier, Standard Model

## ANNEXE III

### MISE EN PLAN DU PIED PRESSEUR « MULTI-ANGLE »

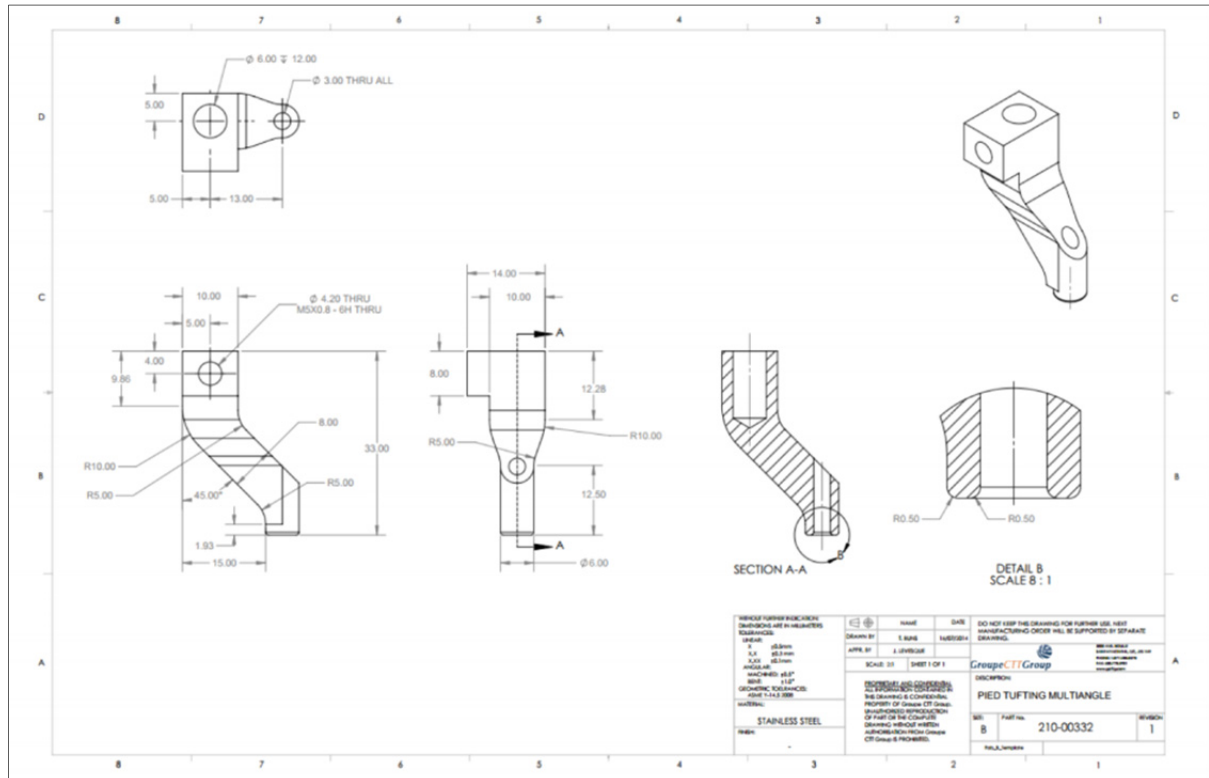


Figure-A III-1 Mise en plan du pied presseur « multi-angle »



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- American Society for Testing and Material. 1952. *Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions*. 3e éd. Norme internationale, ASTM C297M-15. American Society for Testing and Material.
- Brown, A. S. 1997. « Cutting composite costs with needle and thread ». *Aerospace America*, p. 24-25.
- Cartié, Denis D. R. , G. Dell'Anno, E. Poulin et I. K. Padridge. 2006. « 3D reinforcement of stiffener-to-skin T-joints by Z-pinning and tufting ». *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, p. 2532-2540.
- Chang, P., A. P. Mouritz et B. N. Cox. 2006. « Properties and failure mechanisms of pinned composite lap joints in monotonic and cyclic tension ». *Composites Science and Technology*, vol. 66, n° 13, p. 2163 - 2176.
- De Verdiere, Colin, M. Pickett, A. K. Skordos et V. A. A. Witzel. 2009. « Evaluation of the mechanical and damage behaviour of tufted non crimped fabric composites using full field measurements ». *Composites Science and Technology*, vol. 69, p. 131-138.
- Deaton, Jerry W. , Susan M. Kullerd, Ram C. Madan et Victor L. Chen. 1992. *Test and analysis results for composite transport fuselage and wing structures*.
- Dell'Anno, Giuseppe. 2007. « Effect of tufting on the mechanical behaviour of carbon fabric/epoxy composites ». PhD Thesis. Mémoire de doctorat, Cranfield, Cranfield University, 247 p.
- Dransfield, Kimberley, Caroline Baillie et Yiu-Wing Mai. 1994. « Improving the delamination resistance of CFRP by stitching. a review ». *Composites Science and Technology*, vol. 50, n° 3, p. 305 - 317.
- Farley, Gary L., et Larry C. Dickinson. 1992. « Removal of Surface Loop from Stitched Composites Can Improve Compression and Compression-after-Impact Strengths ». *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 11, n° 6, p. 633-642.
- Gao, Z. , et K. L. Reifsnider. 1993. « Micromechanics of Tensile Strength in Composite Systems ». *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, vol. Fourth Volume, ASTM STP 1156, p. 453-470.
- Gardiner, G. 2011. « Out-of-autoclave prepreps: hype or revolution? ». *High Performance Composites*.

- Grassi, M., X. Zhang et M. Meo. 2002. « Prediction of stiffness and stresses in z-fibre reinforced composite laminates ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, n° 12, p. 1653 - 1664.
- Gurit. « Guide to composites ». En ligne. < <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx> >. Consulté le 13 octobre 2015.
- Han, N. L., S. S. Suh, J. M. Yang et H. T. Hahn. 2003. « Resin film infusion of stitched stiffened composite panels ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 34, n° 3, p. 227 - 236.
- Henao, A., M. Carrera, A. Miravete et L. Castejón. 2010. « Mechanical performance of through-thickness tufted sandwich structures ». *Composite Structures*, vol. 92, p. 2052-2059.
- Herk, Manuel, Peter Middendorf, Christian Less, Werner Riedel, Georg Maier et Klaus Drechsler. 2006. « Dynamic strength testing of 3D-reinforced T-joints ». In *25th International Congress of the aeronautical sciences*.
- Hogg, Paul. 2010. « Wind Energy Technology ». En ligne. < [https://community.dur.ac.uk/supergen.wind/docs/presentations/2010-03-25\\_1420\\_SUPERGENWind\\_FA\\_Presentation\\_PaulHogg.pdf](https://community.dur.ac.uk/supergen.wind/docs/presentations/2010-03-25_1420_SUPERGENWind_FA_Presentation_PaulHogg.pdf) >. Consulté le 21 septembre 2015.
- ITA. 2013. « ITA-Preformcenter: ITA-One-sided sewing ». In *Youtube*. En ligne. < <https://youtu.be/MRDe0Xl03eE> >. Consulté le 13 octobre 2015.
- Johnson, W. S., J. E. Masters, S. Subramanian, K. L. Reifsnider et W. W. Stinchcomb. 1995. « Tensile Strength of Unidirectional Composites: The Role of Efficiency and Strength of Fiber-Matrix Interface ». *Journal of Composites Technology & Research*, vol. 17.
- Kassapoglou (300). 2010. *Design and analysis of composite structure : with applications to aerospace structure*, Vol. 1. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons.
- Khokar, Nandan. 2014. « Development of Innovative 2D and 3D Fabric-forming Processes for Manufacturing Reinforcements for Composite Materials ». In *8th Aachen-Dresden International Textile Conference*.
- KSL. « KSL : Aviation ». En ligne. < <http://www.ksl-lorsch.de/en/products/aerospace/aviation/> >. Consulté le 13 octobre 2015.
- Latécoère. 2011. « Integrated, optimized aircraft door ». In *High-Performance Composites*. En ligne. < <http://www.compositesworld.com/articles/integrated-optimized-aircraft-door> >. Consulté le 30 septembre 2015.

- Leduc, Catherine. 2014. « Évaluation des performances mécaniques des stratifiés carbone-époxy à l'aide de la couture « One-Sided » ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École de Technologie Supérieure, 206 p.
- Legrand, Xavier. 2012. *Textiles 3D*. Coll. « Notes du cours Textiles 3D »: École Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles, 236 p.
- Liu, Xudong. 2009. « Cost Analysis for Manufacturing of Composite Aerospace Products with Uncertainties ». Mémoire de maîtrise, Montréal, Concordia University, 87 p.
- Ma, Weitao. 2011. « Cost modelling for manufacturing of aerospace composites ». Mémoire de maîtrise, Cranfield, Cranfield University, 126 p.
- Mahfuz, Hassan, Prasun Majumdar, Mrinal Saha, Frederick Shamery et Shaik Jeelani. 2004. « Integral Manufacturing of Composite Skin-Stringer Assembly and Their Stability Analyses ». *Applied Composite Materials*, vol. 11, n° 3, p. 155-171.
- Morin, Scott. 2015. « Évaluation des performances mécaniques de raidisseurs en « T » carbone-époxy préformés à l'aide de la couture « One-Sided » ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École de technologie Supérieure, 186 p.
- Mouritz, A.P. 2007. « Review of z-pinned composite laminates ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, n° 12, p. 2383 - 2397.
- Mouritz, A.P., M.K. Bannister, P.J. Falzon et K.H. Leong. 1999. « Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, n° 12, p. 1445 - 1461.
- Mouritz, A.P., et B.N. Cox. 2000. « A mechanistic approach to the properties of stitched laminates ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, n° 1, p. 1 - 27.
- Organisation internationale de normalisation. 1998. *Robots manipulateurs industriels - Critères de performance et méthodes d'essai correspondantes*. 2e éd. Norme internationale, ISO 9283. Organisation internationale de normalisation, 64 p.
- Partridge, Ivana K., et Denis D.R. Cartié. 2005. « Delamination resistant laminates by Z-Fiber® pinning: Part I manufacture and fracture performance ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, n° 1, p. 55 - 64.
- Potter, K., B. Khan, M. Wisnom, T. Bell et J. Stevens. 2008. « Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, n° 9, p. 1343 - 1354.

- PRSEUS. 2015. « PRSEUS update: Hybrid wing body passenger cabin takes shape ». In *CompositesWorld*. En ligne. < <http://www.compositesworld.com/articles/prseus-update-hybrid-wing-body-passenger-cabin-takes-shape> >. Consulté le 30 septembre 2015.
- Red, Chris. 2014. « The market for OOA aerocomposites, 2013-2022 ». *High-Performance Composites*.
- Sickinger, C., et A. Herrmann. 2001. « Structural Stitching as a Method to design High-Performance Composites in Future ».
- Smith, B. A., P. Proctor et P. Sparaco. 1994. « Airframers pursue lower aircraft costs ». *Aviation Week and Space Technology*, p. 57?58.
- Stanley, L.E., et D.O. Adams. 2001. *Development and Evaluation of Stitched Sandwich Panels*. stanley2001. Coll. « NASA contractor report ». National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center.
- Sutherland, Herbert J. 2000. « A summary of the fatigue properties of wind turbine materials ». *Wind Energy*, vol. 3, n° 1, p. 1-34.
- Tan, K.T., N. Watanabe et Y. Iwahori. 2010. « Effect of stitch density and stitch thread thickness on low-velocity impact damage of stitched composites ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, n° 12, p. 1857 - 1868.
- Tong, L. , A.P. Mouritz et Bannister M.K. 2002. *3D fibre reinforced polymer composites*. Tong2002. Elsevier Science Ltd.
- Treiber, J. W. G. 2011. « Performance of tufted carbon fibre/epoxy composites ». Mémoire de doctorat, Cranfield, Cranfield University, 300 p.
- Velicki, Alex , et Dawn Jegley. 2011. « PRSEUS Development for the Hybrid Wing Body Aircraft ». In *AIAA Centennial of naval aviation forum*.
- Witik, Robert A., Fabrice Gaille, Remy Teuscher, Heike Ringwald, Veronique Michaud et Jan-Anders E. MÅ¥nson. 2012. « Economic and environmental assessment of alternative production methods for composite aircraft components ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 29â??30, p. 91 - 102.
- Witten, Elmar, Thonmas Kraus et Michael Kühnel. 2014. « Composites Market Report 2014 ». In *Composites-germany*. En ligne. < [http://www.composites-germany.org/images/market-information/20141008\\_market\\_report\\_grpcrp.pdf](http://www.composites-germany.org/images/market-information/20141008_market_report_grpcrp.pdf) >. Consulté le 27 septembre 2015.



- Wittig, J. 2002. « In-mold-reinforcement of preforms by 3-dimensional tufting ». In *47th International SAMPE Symposium*. (May 12-16), p. 1043-1051.
- Yudhanto, Arief, Naoyuki Watanabe, Yutaka Iwahori et Hikar Hoshi. 2014. « Effect of stitch density on fatigue characteristics and damage mechanisms of stitched carbon/epoxy composites ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 60, p. 52 - 65.
- Yudhanto, Arief, Naoyuki Watanabe, Yutaka Iwahori et Hikaru Hoshi. 2013. « Effect of stitch density on tensile properties and damage mechanisms of stitched carbon/epoxy composites ». *Composites Part B: Engineering*, vol. 46, p. 151 - 165.
- Zheng, XiTao, JianFeng Zhang, Fan Yang, YaNan Chai et Ye Li. 2008. « Experimental and Analytical Study on the Mechanical Behavior of Stitched Sandwich Composite Panel with a Foam Core ». *Advanced Materials Research*, vol. 33-37, p. 477-482.