



Thèse

**Conception et optimisation des structures tissées interlock pour optimisation de la mise en forme 3D de renforts fibreux de matériaux composites.**

Design and optimisation of 3D warp interlock structures for 3D forming optimisation of composite material fibrous reinforcements.

présentée par :

**Clément DUFOUR**

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Lille 1

Discipline : Mécanique des Matériaux

Soutenue le 13/07/2016 devant la commission d'examen

Président du jury : Daniel COUTELLIER

Jury :

|                        |   |            |
|------------------------|---|------------|
| Jean Yves DREAN        | Professeur des Universités, UHA Mulhouse      | Rapporteur |
| Emmanuelle VIDAL SALLE | Professeur des Universités, INSA Lyon         | Rapporteur |
| Daniel COUTELLIER      | Professeur des Universités, UVHC Valenciennes | Examineur  |
| Pierre OUAGNE          | Professeur des Universités, ENI Tarbes        | Examineur  |
| Damien SOULAT          | Professeur des Universités, ENSAIT Roubaix    | Directeur  |
| François BOUSSU        | Maitre de conférences, HDR, ENSAIT Roubaix    | Encadrant  |
| Peng WANG              | Maitre de conférences, ENSAIT Roubaix         | Invité     |



# **Conception et optimisation des structures tissées interlock pour optimisation de la mise en forme 3D de renforts fibreux de matériaux composites**

**Mots clés :** Composites thermoplastiques, Composites thermodurcissables, Tissus de verre, Fibres de carbone, Matières plastiques – Thermoformage, Textiles et tissus à usages techniques, Tissage 3D interlock, Emboutissage, Mise en forme

## **Résumé :**

Les travaux présentés dans ce manuscrit sont issus de la collaboration entre les partenaires du projet MAPICC3D intitulé : « One-shot Manufacturing on large scale of 3D up graded panels and stiffeners for lightweight thermoplastic textile composite structures ». MAPICC3D est un projet de recherches financé par le programme Européen de recherches et d'innovation « FP7 ». L'objectif du programme de recherches MAPICC3D est de développer des matériaux et procédés permettant de produire des pièces composites thermoplastiques en réduisant les coûts de fabrication jusqu'à 25% par rapport à l'état de l'art et en augmentant les cadences de fabrication jusqu'à 30%.

Dans le cadre du projet MAPICC3D, les travaux présentés dans ce manuscrit ont pour objectif de mieux comprendre le comportement des tissus 3D interlocks chaînes lors des étapes de mise en forme et de consolidation de pièces en matériaux composites renforcés de structures tissées 3D interlock chaîne. La compréhension des phénomènes rencontrés lors de ces étapes permet ensuite d'optimiser les structures au niveau local et global dans le but de répondre aux différentes problématiques de mise en forme rencontrées, permettant ainsi des améliorations de la qualité des pièces composites finales développées pour les applications AUTO-MAPICC, TRUCK-MAPICC, RAIL-MAPICC et AERO-MAPICC, et donc de leur tenue mécanique.

## **Laboratoire d'accueil :**

Laboratoire de Génie et Matériaux Textiles (GEMTEX)  
Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT)  
2 allée Louise et Victor Champier  
BP 30329  
59056 Roubaix Cedex 1

# **Design and optimisation of 3D warp interlock structures for 3D forming optimisation of composite material fibrous reinforcements.**

## **Abstract:**

The work presented in this manuscript results from collaboration between the partners of project MAPICC3D entitled: « One-shot Manufacturing on large scale of 3D up graded panels and stiffeners for lightweight thermoplastic textile composite structures ». MAPICC3D is a research project financed by the European research and innovation program “FP7”. The objective of the project MAPICC3D is to develop materials and processes making it possible to produce thermoplastic composite parts by reducing the manufacturing costs up to 25% compared to the state of the art and by increasing the production rates up to 30%. In the framework of the project MAPICC3D, the work presented in this manuscript aim to better understand the behaviour of 3D warp interlock fabrics to forming and consolidation processes of fibre-reinforced composite material parts made of 3D warp interlock structures. The comprehension of the phenomena met at these steps then makes it possible to optimize the structures at the local and global level with an aim of answering the various problems of forming met, thus allowing improvements of the quality of the final composite parts developed for AUTO-MAPICC, TRUCK-MAPICC, RAIL-MAPICC and AERO-MAPICC applications, and thus of their mechanical behaviour.

# Remerciements

Mes premiers remerciements vont à l'Union Européenne, qui a permis le financement du projet MAPICC3D par l'intermédiaire du programme de recherches FP7. En effet, sans ces financements, je n'aurais pas pu effectuer les travaux présentés dans ce manuscrit et évoluer de la sorte dans le domaine de la recherche avec un lien aussi important avec des industriels.

Je remercie Jean Yves DREAN, Professeur des Universités à l'Université Haute Alsace de Mulhouse et Emmanuelle VIDAL SALLE, Professeur des Universités à l'INSA Lyon d'avoir accepté de rapporter cette thèse ainsi qu'à Daniel COUTELLIER, Professeur des Universités à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis et Pierre OUAGNE, Professeur des Universités à l'ENI Tarbes d'avoir accepté d'être examinateur.

Je tiens à remercier François BOUSSU, Maître de Conférences à l'ENSAIT, pour m'avoir accompagné et avoir été source de conseils, ainsi que pour sa sympathie tout au long de la thèse et pour m'avoir permis d'accéder à ce sujet de thèse, ainsi qu'à Peng WANG, Maître de conférences à l'ENSAIT pour sa bienveillance et ses conseils, en particulier à propos de l'emboutissage de structures tissées qui se sont avérés très utiles.

Je souhaite ensuite remercier Damien SOULAT, Professeur des Universités à l'ENSAIT pour la qualité de son encadrement ainsi que pour la confiance qui m'a été accordée lors du déroulement de mes travaux.

J'adresse également mes remerciements à l'ensemble du personnel de l'ENSAIT, et tout particulièrement à Tomasz KROMOSKA, Nicolas DUMONT, Marcel GEVAERT, Ali NAAB, Techniciens, et à Frédérick VEYET, Ingénieur, pour leur aide tout au long de la thèse.

Outre le personnel de L'ENSAIT, je tiens à remercier Lucas LAUWIC, Yoann NEBILI, Grégory MARTIN, Sébastien PICARD, Arthur VOISIN, et Pierre-Francis MIONNET, qui ont participé en tant que stagiaires sur le projet MAPICC 3D, pour leur aide précieuse sans laquelle mes études n'auraient pas été aussi fournies.

Je tiens également à remercier l'ensemble des partenaires du projet MAPICC3D, pour la richesse des échanges que nous avons eus, ainsi que toutes les personnes avec qui j'ai pu échanger et acquérir des connaissances.

Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement tous mes proches, parents, ainsi que mes amis, qui m'ont écouté, soutenu et poussé à m'investir dans les travaux de thèse tout au long de mon parcours.

# Introduction générale

À l'heure où la limitation du réchauffement climatique devient une préoccupation importante au niveau global dans un monde où les ressources fossiles sont de plus en plus compliquées à exploiter, la réduction de la facture énergétique des transports permet d'apporter une réponse à ces problématiques. De plus, la population mondiale augmentant et étant de plus en plus mobile, réduire la consommation énergétique des transports devient primordial.

Il existe différents points de réduction de la consommation énergétique des transports. Le premier point consiste à améliorer l'efficacité énergétique des moteurs, de manière à convertir avec le moins de pertes possibles l'énergie fournie par les carburants. L'autre point consiste à réduire la masse des véhicules, de manière à optimiser la consommation de carburant par personne transportée ou encore pour une masse donnée de marchandise transportée.

Changer les matériaux constituant les véhicules pour des matériaux plus légers est une méthode efficace pour réduire la masse des véhicules. Ainsi, l'allègement de pièces non structurelles vers des matériaux tels que les plastiques permet une réduction de masse significative. L'allègement de pièces structurelles, d'architectures plus complexes du fait des tenues mécaniques plus importantes à respecter, permet de réduire également la masse totale de la structure de façon significative.

Pour répondre aux problématiques de tenue mécanique de pièces structurelles tout en réduisant leur masse, les matériaux composites offrent une solution technologique grâce à des tenues mécaniques par unité de masse qui peuvent être plus intéressantes que pour les métaux courants. Ainsi, l'utilisation des matériaux composites se démocratise de plus en plus dans le domaine des transports, avec par exemple, dans le domaine aéronautique, les matériaux composites représentent 50% de la masse de l'Airbus A350.

Le programme de recherche MAPICC3D intitulé : « One-shot Manufacturing on large scale of 3D up graded panels and stiffeners for lightweight thermoplastic textile composite structures », a été ainsi défini pour répondre aux enjeux précédemment exposés. Ce programme a été accepté et financé par le programme Européen de recherche et d'innovation « FP7 ». L'objectif du programme de recherche MAPICC3D est de développer des matériaux et procédés permettant de produire des pièces composites thermoplastiques en réduisant les coûts de fabrication jusqu'à 25% par rapport à l'état de l'art et en augmentant les cadences de fabrication jusqu'à 30%.

Différents développements ont été effectués lors du projet MAPICC3D sur plusieurs thématiques :

- Les fils commelés composés de fibres de renfort et d'une matrice thermoplastique.
- Les procédés de fabrication « one-shot » de renforts textiles, éliminant toutes les étapes intermédiaires de confection entre la fabrication et la consolidation.
- Les outils de modélisation permettant la prédiction du comportement final des matériaux composites ainsi qu'une optimisation du design de la pièce composite pour respecter le cahier des charges tout en optimisant la réduction de masse.
- Le scale-up des procédés/technologies développés afin de permettre un développement industriel respectant les contraintes de coûts et de cadences.

- Les essais mécaniques sur les pièces composites développées afin de valider le remplacement de pièces métalliques par des pièces composites thermoplastiques dans des applications industrielles.

Le projet MAPICC3D est articulé en huit parties appelées Workpackage (WP) dans lesquelles les différentes thématiques de développement ont été réparties afin d'organiser le travail de chaque partenaire du projet au travers de tâches à effectuer. Les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit s'intègrent dans plusieurs Workpackages : le WP3 associé au développement de préformes 3D, le WP6 lié à la production de démonstrateurs et à l'intégration de capteurs, ainsi que le WP7 pour le scale-up.

Au sein du projet MAPICC3D, différentes applications ont été développées :

- Une application Automobile intitulée « AUTO-MAPICC », avec le développement d'un carter d'huile pour l'entreprise MECAPLAST
- Une application Transport Routier nommée « TRUCK-MAPIC » avec le développement d'un support de siège pour l'entreprise VOLVO TRUCK
- Une application Ferroviaire intitulée « RAIL-MAPICC » avec le développement d'un croisement de tubes pour l'entreprise ALSTOM
- Une application Aéronautique nommée « AERO-MAPICC » avec le développement d'une pièce de forme géométrique en F pour l'entreprise COEXPAIR

Les utilisateurs finaux, présentés en Figure 1, ont défini les cahiers des charges et ont participé à l'ensemble des tâches.



Figure 1 : Utilisateurs finaux du projet MAPICC3D

En plus de ces utilisateurs finaux, le projet MAPICC3D, coordonné par l'ENSAIT, compte de nombreux partenaires européens, académiques et industriels chargés de différentes tâches au sein du projet. Ceux-ci sont présentés en Figure 2.



Figure 2 : Autres partenaires du Programme MAPPIC3D

Les travaux de thèse développés dans ce manuscrit sont tous en lien avec les technologies et les techniques de tissage, de mise en forme et de consolidation de pièces composites. Pour chaque application, des préformes tissées 3D interlock chaîne ont été conçues afin de répondre aux cahiers des charges définis par les utilisateurs finaux, et ont été élaborées sur des machines à tisser armurées, puis mises en forme par emboutissage ou par pliage, et enfin consolidées. Les études présentées dans ce manuscrit ont pour objectif de mieux comprendre le comportement des structures tissées 3D interlock chaîne lors de ces différentes étapes. Ces travaux de thèse se sont déroulés au sein du laboratoire GEMTEX (EA n°2461 – ENSAIT de Roubaix) sous la direction de Damien SOULAT et co-encadrés par François BOUSSU et Peng WANG. Ce manuscrit est divisé en trois chapitres.

Le premier chapitre, intitulé « Choix des matériaux et procédés pour les applications du projet MAPICC 3D », établit un état de l'art des matériaux et structures fibreuses, qui ont permis de répondre aux besoins de chaque partenaire du projet MAPICC3D en fonction des exigences liées au domaine d'application. À travers des choix de matière première, des procédés de fabrication du renfort, et des procédés de mise en forme et de consolidation, une orientation vers les solutions adoptées dans le projet MAPICC3D a été effectuée.

Le deuxième chapitre, intitulé « Solutions composites par application du projet MAPICC3D », détaille le cahier des charges des pièces développées pour les applications automobile, transport routier, ferroviaire et aéronautique. Les choix technologiques sont expliqués par application pour ensuite décrire complètement les solutions composites appliquées à chaque domaine. Des études menées sur ces applications sont présentées avec les résultats associés. Ces études concernent la mise en forme par emboutissage de structures tissées 3D interlocks chaînes pour l'application AUTO-MAPICC, mais également la problématique de jonction composite-métal et d'arrachage pour l'application TRUCK-MAPICC. Concernant l'application RAIL-MAPICC la dépendance entre la géométrie de la pièce et l'architecture de la préforme, mais également entre la géométrie de la préforme et le procédé de mise en forme seront discutées. Enfin pour la solution AERO-MAPICC le pliage des structures tissées 3D interlocks chaînes sera abordé.

Le dernier chapitre, intitulé « Adaptation des procédés de fabrication utilisés dans le cadre du projet MAPICC3D », est focalisé sur les machines à tisser utilisées lors de ces travaux de recherche. Avec, dans un premier temps, la conception de la machine à tisser CARBOMAT, dédiée au tissage de structures 3D interlocks chaines à partir de fils de carbone et sur laquelle ont été produit l'ensemble des tissus et préformes de l'application AERO-MAPICC. Dans un second temps, les modifications apportées à la machine à tisser TTF utilisée pour les autres applications seront exposées. Ce chapitre présente les choix techniques en fonction des cahiers des charges des différentes applications, mais également des natures de fibres utilisées.

# Sommaire

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Résumé en français .....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>Résumé en anglais.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Remerciements .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Introduction générale .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>Sommaire .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>Table des figures.....</b>  | <b>13</b> |
| <b>Liste des tableaux.....</b>   | <b>20</b> |
| <b>Chapitre 1 : <u>C</u>hoix des matériaux et procédés pour les applications du projet<br/>MAPICC 3D .....</b> | <b>21</b> |
| <b>1. Introduction.....</b>  | <b>22</b> |
| <b>2. Choix des renforts fibreux et des résines pour les solutions composites<br/>MAPICC3D.....</b>            | <b>22</b> |
| <b>3. Choix des structures de fils.....</b>  | <b>23</b> |
| <b>4. Choix du procédé textile pour les renforts fibreux des solutions composites<br/>MAPICC3D.....</b>        | <b>26</b> |
| 4.1 Classification des architectures de renforts.....  | 26        |
| 4.2 Structures tissées 3D de type Interlock chaîne.....  | 29        |
| 4.3 Propriétés et élaboration des tissus 3D Interlock chaînes.....   | 31        |
| <b>5. Choix du procédé de mise en forme et de consolidation des solutions composites<br/>MAPICC3D.....</b>     | <b>36</b> |
| <b>6. Synthèse.....</b>  | <b>39</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Chapitre 2 : Solutions composites par application du projet MAPICC3D ....</b>  | <b>41</b>  |
| <b>1. Solution AUTO-MAPICC pour l'application automobile .....</b>  | <b>43</b>  |
| 1.1 Problématique du partenaire.....  | 43         |
| 1.2 Élaboration de préformes et présentation du banc de mise en forme.....  | 44         |
| 1.3 Élaboration et intégration des fils capteurs dans les préformes 3D.....   | 49         |
| 1.4 Étude de l'influence de différents paramètres des tissus 3D interlocks chaines sur la mise en forme par emboutissage. ....            | 55         |
| A. Emboutissage hémisphérique .....   | 55         |
| B. Emboutissage gousset .....   | 59         |
| C. Emboutissage avec fils capteurs .....  | 61         |
| 1.5 Conclusion de la solution AUTO-MAPICC .....   | 71         |
| <b>2. Solution TRUCK-MAPICC pour l'application du transport routier .....</b>   | <b>71</b>  |
| 2.1 Problématique du partenaire.....  | 71         |
| 2.2 Détail de la solution développée TRUCK-MAPICC .....   | 73         |
| 2.3 Étude de la jonction entre une pièce en matériau composite et une pièce en métal .....  | 75         |
| 2.4 Influence de l'armure de surface du renfort tissé 3D interlock chaine lors d'essais d'arrachage d'un assemblage composite/métal. .... | 83         |
| 2.5 Conclusion de la solution TRUCK-MAPICC .....  | 86         |
| <b>3. Solution RAIL-MAPICC pour l'application ferroviaire.....</b>  | <b>87</b>  |
| 3.1 Problématique du partenaire.....  | 87         |
| 3.2 Solution développée.....  | 88         |
| A. Élaboration des préformes et consolidation .....   | 88         |
| B. Caractérisations mécaniques.....   | 93         |
| 3.3 Étude de la dépendance entre paramètres géométriques à différentes étapes de fabrication de la pièce composite. ....                  | 98         |
| A. Influence de l'architecture d'une préforme sur sa géométrie .....  | 98         |
| B. Dépendance entre les paramètres géométriques de la préforme et le procédé de mise en forme et de consolidation .....                   | 101        |
| 3.4 Conclusion sur la solution RAIL-MAPICC.....   | 104        |
| <b>4. Solution AERO-MAPICC pour l'application Aéronautique.....</b>   | <b>104</b> |
| 4.1 Problématique du partenaire.....  | 104        |
| 4.2 Solution développée.....  | 105        |
| Élaboration des préformes.....  | 105        |
| 4.3 Étude du pliage de structures tissées 3D interlocks chaines carbone.....  | 109        |
| 4.4 Conclusion sur la solution AERO-MAPICC .....  | 115        |
| <b>5. Conclusions du chapitre .....</b>   | <b>115</b> |

## **Chapitre 3 : Adaptation des procédés de fabrication utilisés dans le cadre du projet MAPICC3D..... 117**

### **1. Conception et améliorations de la machine à tisser CARBOMAT ..... 119**

1.1 Problématiques rencontrées lors du tissage des fils de carbone ..... 119

1.2 Conception d'un ourdissoir spécifique aux fils de carbone..... 123

1.3 Conception et réalisation d'un cantre d'ensouples ..... 124

1.4 Avancée de l'ensemble des systèmes de sélection de la machine à tisser ..... 126

1.5 Conception et fabrication des éléments associés à la séparation des cadres ..... 127

1.6 Conception et réalisation du système d'insertion du fil de trame ..... 128

1.7 Conception et réalisation du guidage du peigne sur machine à tisser ..... 130

1.8 Conception et réalisation du système de mise en tension et de blocage des fils de chaîne 131

1.9 Production des tissus 3D interlocks chaînes sur la machine à tisser CARBOMAT modifiée 132

### **2. Améliorations de la machine à tisser TTF ..... 134**

2.1 Problématiques rencontrées ..... 134

2.2 Modification du système de tassage ..... 135

2.3 Modification des cadres ..... 136

2.4 Autres adaptations réalisées sur la machine à tisser TTF ..... 137

2.5 Production réalisée sur la machine à tisser TTF modifiée ..... 137

### **3. Conclusion du chapitre ..... 138**

## **Conclusion générale ..... 139**

## **Bibliographie ..... 142**

# Table des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Utilisateurs finaux du projet MAPICC3D .....   | 7  |
| Figure 2 : Autres partenaires du Programme MAPPIC3D.....  | 8  |
| Figure 3 : Exemples de représentation des polymères thermoplastiques et thermodurcissables : (gauche) époxyde – (droite) polypropylène. ....          | 23 |
| Figure 4 : Vues microscopiques : a, fibre de verre, b, fibre de polypropylène et c, vue de coupe transverse d'un fil commélé .....                    | 25 |
| Figure 5 : Fil hybride verre (fibres blanches) / Polypropylène (fibres noires) .....  | 25 |
| Figure 6 : Différents types de renforts fibreux [38].....   | 26 |
| Figure 7 : Classification des préformes selon la direction des renforts [38].....   | 27 |
| Figure 8 : Classification des composites à renfort fibreux en termes de plans d'alignements des fibres constitutives [39].....                        | 27 |
| Figure 9 : Système de placement de fibres (gauche) - et d'enroulement filamentaire (droite). ...  | 28 |
| Figure 10 : Différents types de structures 2D : (de gauche à droite) une tresse, un tissu, un tricot et un non-tissé.....                             | 28 |
| Figure 11 : Différents types de structures 3D : (de gauche à droite) une tresse, un tissu 3D interlock chaîne, un tissu multiaxial et un tricot. .... | 29 |
| Figure 12. Représentation schématique par une vue en coupe des fils de trame d'une structure tissée 3D interlock chaîne.....                          | 30 |
| Figure 13. Les 4 classes de tissus 3D interlocks chaînes selon la classification de Hu [19].....  | 31 |
| Figure 14 : Vue en face avant des différents éléments d'une machine à tisser .....  | 32 |
| Figure 15. Vue latérale lors du mouvement de la formation de la foule.....  | 32 |
| Figure 16 : Deux types de machine à tisser : (gauche) Armuré – (droite) Jacquard .....  | 32 |
| Figure 17 : Deux types d'alimentation en fils de chaîne : (gauche) par ensouples ou (droite) par bobines .....  | 33 |
| Figure 18 : Tissu présentant des différences de densité en fils de chaîne (gauche) : densité plus forte - (droite) : densité plus faible. ....        | 34 |
| Figure 19 : Tissu présentant des différences de densité trame (haut) plus forte densité – (bas) plus faible densité. ....                             | 34 |
| Figure 20 : Technique de tissage par déliage.....   | 35 |
| Figure 21 : Technique de tissage tubulaire .....  | 35 |
| Figure 22 : Technique de tissage par parties.....   | 35 |
| Figure 23 : Technique de tissage créneau .....  | 36 |
| Figure 24 : Procédé de consolidation par moulage au contact.....  | 37 |
| Figure 25 : Procédé d'infusion sous vide.....   | 37 |
| Figure 26 : Procédé d'injection .....   | 38 |
| Figure 27 : Principe de la thermo-compression pour des fabrications en grande série [73] .....  | 39 |
| Figure 28 : Solution composite AUTO-MAPICC sur géométrie de type carter d'huile.....  | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 29 : Courbes de température et de pression du cycle de cuisson de la solution AUTO-MAPICC .....   | 43 |
| Figure 30 : Architecture du tissu 3D interlock chaîne retenue pour la solution AUTO-MAPICC .....   | 44 |
| Figure 31 : Système d'emboutissage des préformes textiles à température ambiante .....   | 45 |
| Figure 32 : Poinçons utilisés : (gauche) poinçon de forme hémisphérique - (droite) poinçon en forme de gousset .....   | 45 |
| Figure 33 : Mesure de l'avalement lors d'un essai de mise en forme d'une structure tissée 3D interlock chaîne.....   | 46 |
| Figure 34 : Mesure de l'angle de cisaillement en surface de la structure tissée .....  | 47 |
| Figure 35 : Carte des angles de cisaillement mesurés sur une préforme .....  | 47 |
| Figure 36 : Mesure de l'épaisseur en différents points de la structure tissée déformée .....   | 47 |
| Figure 37 : Mesure du glissement entre les deux couches extérieures .....  | 48 |
| Figure 38 : Évolution du logarithme de la résistivité d'une solution conductrice en fonction du taux de charge ; représentation de l'arrangement des particules conductrices selon la zone [100] ..... | 50 |
| Figure 39 : Fils commelés enduits de latex pour la réalisation de fils capteurs.....   | 51 |
| Figure 40 : Fils commelés enduits avec la solution de latex : PEDOT-PSS .....  | 51 |
| Figure 41 : Aperçu de l'enroulement entre le fil commelé capteur et le fil de cuivre.....  | 52 |
| Figure 42 : Aperçu du fil capteur réalisé à base de fil commelé verre-polypropylène.....   | 52 |
| Figure 43 : Test de calibration des fils capteurs sur banc de traction .....   | 52 |
| Figure 44 : Pont diviseur de tension.....  | 53 |
| Figure 45. Interface du logiciel d'acquisition QuickDAQ .....  | 53 |
| Figure 46 : Exemple de courbe d'étalonnage .....   | 54 |
| Figure 47 : Architectures des tissus 3D interlocks chaînes (gauche) couche à couche ou O/L– (milieu) orthogonal ou O/T– (droite) angle ou A/T .....  | 55 |
| Figure 48 : Machine à tisser utilisée pour le tissage des architectures pour l'application AUTO-MAPICC .....   | 55 |
| Figure 49 : Apparence des structures réalisées (gauche) angle – (milieu) couche à couche – (droite) orthogonal. ....   | 56 |
| Figure 50 : Mesures de l'avalement des différentes structures (0 : coin de préforme) .....   | 56 |
| Figure 51 : Mesures du glissement entre les couches extérieures des différentes architectures ..   | 57 |
| Figure 52 : Mesures d'épaisseur pour les différentes architectures. ....   | 57 |
| Figure 53 : Mesures des angles de cisaillement de surface pour les architectures interlocks (gauche), d'angle – (milieu), Orthogonal – (droite) couche à couche. ....                                  | 58 |
| Figure 54 : Description des architectures interlocks couche à couche testées avec différentes armures de surface : (gauche) base satin de 4 (droite) base sergé 4-4 contredit [102].....               | 59 |
| Figure 55 : Structures déformées avec le gousset : base satin de 4 à gauche et base sergé 4-4 contredit à droite .....   | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 56 : Mesures des angles de cisaillement de surface pour les architectures interlocks couche à couche testées avec différentes armures de surface : (gauche) base satin de 4 (droite) base sergé 4-4 contredit [102].....   | 60 |
| Figure 57 : Mesures de l'épaisseur des architectures interlocks couche à couche testées avec différentes armures de surface : (bleu) base satin de 4 et (rouge) base sergé 4-4 contredit [102] .....                              | 60 |
| Figure 58 : Mesures du glissement entre les couches extérieures des architectures interlocks couche à couche testées avec différentes armures de surface : (bleu) base satin de 4 et (rouge) base sergé 4-4 contredit [102] ..... | 61 |
| Figure 59 : Structures tissées 3D interlocks chaines testées à l'emboutissage suivie par caméra et fils capteurs : croisé 2-2 (gauche) et satin de 4 à répétition (droite) .....  | 61 |
| Figure 60 : Représentation d'une préforme avec 3 plans ; supérieur, central et inférieur avec la position des fils capteurs en sens chaîne et trame.....  | 62 |
| Figure 61 : Représentation et photographie du montage réalisé avec les caméras.....   | 62 |
| Figure 62 : Zones où se trouvent les capteurs : en rouge en sens chaîne et en vert en sens trame .....  | 63 |
| Figure 63 : Zones où se trouvent les capteurs : en rouge en sens chaîne et en vert en sens trame .....  | 64 |
| Figure 64 : Comparaison des résultats d'emboutissage par capteurs et par caméra pour l'armure de surface croisé 2-2 .....   | 65 |
| Figure 65 : Comparaison des résultats d'emboutissage par capteurs en surface et à l'intérieur de la préforme pour le tissu en base croisé 2-2.....  | 66 |
| Figure 66 : Résultats de l'essai d'emboutissage avec le tissu 3D interlock chaîne en base satin de 4 à répétition.....  | 67 |
| Figure 67 : Comparaison des résultats d'emboutissage par capteurs en surface et à l'intérieur de la préforme pour le tissu en base satin de 4 à répétition .....  | 69 |
| Figure 68 : Résultats des essais d'emboutissage de la préforme en base croisé 2-2 et satin de 4. ....   | 70 |
| Figure 69 : Version métallique initiale de l'assise de siège TRUCK-MAPICC .....   | 72 |
| Figure 70 : Zones soumises aux efforts d'arrachage et zones de soudure de l'assise de siège composite TRUCK-MAPICC .....  | 72 |
| Figure 71 : Assemblages avec la solution TRUCK-MAPICC : gauche : Représentation CAO et droite : Assemblage réel .....   | 72 |
| Figure 72 : Architecture de la solution TRUCK-MAPICC : a. Armures et b. Zones associées aux armures sur la préforme TRUCK-MAPICC.....   | 74 |
| Figure 73 : Position des inserts métalliques dans la préforme TRUCK-MAPICC .....  | 74 |
| Figure 74 : Pièce consolidée sous bûche à vide à gauche et sous autoclave à droite .....  | 75 |
| Figure 75 : Exemple d'assemblage mécanique par rivetage [109] .....   | 76 |
| Figure 76 : Soudage semi-automatique [110].....   | 76 |
| Figure 77 : Tresse métallique utilisée .....  | 77 |
| Figure 78 : Soudage par point .....   | 77 |
| Figure 79 : Soudage semi-automatique.....   | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 80 : Structure réalisée pour l'intégration des tresses métalliques.....  | 78 |
| Figure 81 : Intégration de tresses métalliques en sens trame .....  | 78 |
| Figure 82 : Intégration de tresses métalliques en sens chaîne .....   | 79 |
| Figure 83 : Cycle de consolidation final des plaques comprenant les tresses métalliques.....  | 79 |
| Figure 84 : Plaques consolidées : a : pression 15 bar vue de dessus, b : pression 15 bar vue de<br>dessous, c : pression 35 bar vue de dessus, d : pression 35 bar vue de dessous .....                       | 80 |
| Figure 85 : Plaques consolidées sous 35 bar de pression et avec du film aluminium pour<br>compenser l'écart d'épaisseur (gauche : vue de dessus avec les tresses apparentes, droite :<br>vue de dessous)..... | 80 |
| Figure 86 : Représentation de la seconde structure réalisée pour les essais de soudage .....  | 81 |
| Figure 87 : Seconde structure réalisée pour les essais de soudage.....  | 82 |
| Figure 88 : Structure consolidée.....   | 82 |
| Figure 89 : Apparence de l'assemblage composite/métal soudé .....   | 83 |
| Figure 90 : Contraintes subies par l'assise de siège lors d'un crash test.....  | 83 |
| Figure 91 : Schéma représentatif de la forme des éprouvettes réalisées pour les essais<br>d'arrachage.....  | 84 |
| Figure 92 : Différentes familles d'armures testées lors des essais d'arrachage : toile (a1 :<br>zone 1, a2 : zone 2), sergé (b1 : zone 1, b2 : zone 2) et satin (c1 : zone 1, c2 : zone 2).....               | 85 |
| Figure 93 : Essai d'arrachage développé par l'université de Riga.....   | 86 |
| Figure 94 : Aperçu d'une éprouvette avant et après un essai d'arrachage.....  | 86 |
| Figure 95 : Dimensions des prototypes de l'application RAIL-MAPICC.....   | 88 |
| Figure 96 : Solution Railmapicc : a. version métallique et b. version composite .....   | 88 |
| Figure 97 : Solution Railmapicc : assemblage et simulation réalisée sur un wagon.....   | 89 |
| Figure 98 : Solution Railmapicc comprenant les différentes techniques.....  | 89 |
| Figure 99 : Solution Railmapicc : Armures pour chaque partie de la préforme Rail-Mapicc .....   | 90 |
| Figure 100 : Solution Railmapicc : a. un déliage et b. un créneau.....  | 90 |
| Figure 101 : Solution Railmapicc : a. Première version et b. Deuxième version.....  | 91 |
| Figure 102 : Premier système de consolidation Railmapicc : a. modélisation et b. système<br>réalisé .....   | 91 |
| Figure 103 : Deuxième système de consolidation Railmapicc : a. modélisation et b. système<br>réalisé .....  | 91 |
| Figure 104 : Insertion d'un tube métallique dans le premier système de consolidation .....  | 92 |
| Figure 105 : Essai de flexion 3 points.....   | 94 |
| Figure 106 : Résultats des essais de flexion 3 points. a. avec les préformes avec déliage et b.<br>avec les préformes avec le tissage créneau .....   | 95 |
| Figure 107 : Essai de flexion 5 points.....   | 96 |
| Figure 108 : Résultats des essais de flexion 4 points. a. Eprouvettes avec un déliage et b.<br>Eprouvettes avec un créneau .....  | 96 |
| Figure 109 : Essai de cisaillement dans le plan .....   | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 110 : Résultats des essais de cisaillement dans le plan. a. Eprouvettes avec un déliage et une pré-tension de 3N, b. Eprouvettes avec un déliage et une pré-tension de 5N et c. Eprouvettes avec un créneau et une pré-tension de 5N..... | 97  |
| Figure 111 : Etat des tubes consolidés avec le premier système de consolidation à gauche et le deuxième système de consolidation à droite.....   | 99  |
| Figure 112 : Tissage de la deuxième partie de la préforme composée de deux zones en tissage créneau et d'une zone centrale interlock.....  | 99  |
| Figure 113 : Préforme sans adaptation à gauche, et préforme finale à droite.....   | 100 |
| Figure 114 : Aperçu global de la préforme tissée finale.....   | 100 |
| Figure 115 : Deux géométries de la pièce RAIL-MAPICC : a. Première géométrie et b. Deuxième géométrie.....   | 101 |
| Figure 116 : Techniques utilisées pour le tissage de la première préforme : a. tissage par parties, b. déliage et c. tissage tubulaire.....  | 102 |
| Figure 117 : Résultat de la technique de tissage créneau .....   | 102 |
| Figure 118 : À gauche, la nouvelle forme de pièce composite adaptée à la géométrie de la première préforme et à droite, le système de consolidation correspondant.....   | 103 |
| Figure 119 : Préforme consolidée avec le premier système de consolidation .....  | 103 |
| Figure 120 : Second système de consolidation avec inserts interchangeables en fonction de la version de préforme à consolider .....  | 104 |
| Figure 121 : Solution Aeromapicc : a. Assemblage et b. Dimensions .....  | 105 |
| Figure 122 : Description de la préforme pour la solution Aeromapicc. a: dans le cas d'un sergé de 3. b: dans le cas d'un satin de 5 avec un décrochement de 3 .....  | 106 |
| Figure 123 : Deux versions de la préforme en F : la première version à gauche et la deuxième version à droite.....   | 106 |
| Figure 124 : Variante du F avec une armure sergé de 3 .....  | 107 |
| Figure 125 : Machine à tisser utilisée pour le tissage des préformes de l'application Aéronautique.....  | 110 |
| Figure 126 : Mesure de la variation d'épaisseur.....   | 110 |
| Figure 127 : Variation de la densité des fils par couche.....  | 110 |
| Figure 128 : Mesure de la variation de densité.....  | 111 |
| Figure 129 : Variation d'épaisseur en fonction de l'angle de courbure.....   | 111 |
| Figure 130 : Variation de densité par couche (1 : couche inférieure, 2 : couche supérieure) ...  | 112 |
| Figure 131 : Système de consolidation .....  | 113 |
| Figure 132 : Vues en coupe d'une préforme consolidée : à gauche, la partie pleine de la pièce et à droite, le pli.....   | 113 |
| Figure 133 : Variation d'épaisseur relative à l'épaisseur des branches en fonction de l'angle de pliage .....  | 114 |
| Figure 134 : Variation de densité par couche relative à la densité de la couche à l'intérieur du pli .....   | 114 |
| Figure 135 : Conditions de travail : a. équipements de protection, b. machine à tisser dans une salle dédiée et c. système d'aspiration et de filtration de l'air.....   | 119 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 136 : Conservation du système électro-magnétique de sélection des cadres et du boîtier de lecture électronique de programme de dessin. ....   | 120 |
| Figure 137 : Ouverture de foule bloquée par la dégradation subie par les fils de chaîne de carbone.....  | 120 |
| Figure 138 : Différentes alimentations en fils de chaîne : a. Par une ensouple ourdie manuellement et b. En accrochant l'extrémité des fils de chaîne sur des barres de fixation ....                              | 121 |
| Figure 139 : Cadres sur la machine à tisser (modèle précédent).....  | 122 |
| Figure 140 : Navette utilisée sur les machines à tisser d'échantillonnage à insertion manuelle.....  | 122 |
| Figure 141 : Système de tassage de la machine à tisser CARBOMAT.....   | 123 |
| Figure 142 : Système de mise en tension et de blocage des fils de chaîne de la machine à tisser CARBOMAT.....  | 123 |
| Figure 143 : Ourdissoir conçu pour réaliser les ensouples de la machine à tisser CARBOMAT.....   | 124 |
| Figure 144 : Représentation d'une ensouple de la machine à tisser CARBOMAT.....  | 125 |
| Figure 145 : Cantre d'ensouple de la machine à tisser CARBOMAT : à gauche, représentation en mode conception et à droite une photographie du cantre une fois la préparation de la machine au tissage réalisée..... | 126 |
| Figure 146 : Système utilisé pour l'avance du système de sélection.....  | 127 |
| Figure 147 : Première de séparation des cadres de la machine à tisser CARBOMAT.....  | 127 |
| Figure 148 : Second système de séparation des cadres : a. cale, b. assemblage des cales sur les cadres et c. Photographie de l'assemblage réalisé.....   | 128 |
| Figure 149 : Différentes navettes utilisées avec la machine à tisser : a. Navette initiale, b. Navette issue de la première conception et c. Navette avec crémaillère.....   | 129 |
| Figure 150 : Système d'insertion de la navette finale.....   | 129 |
| Figure 151 : Conception du système de guidage du peigne et du réglage en position verticale.....   | 130 |
| Figure 152 : Photographie du système de tassage.....   | 130 |
| Figure 153 : Conception du système de blocage des fils de chaîne.....  | 131 |
| Figure 154 : Photographie du système de tassage.....   | 132 |
| Figure 155 : Tissu réalisé pour les mesures de dégradation.....  | 132 |
| Figure 156 : Schéma présentant la position des zones de prélèvement des fils de chaîne.....  | 133 |
| Figure 157 : Production sur la machine à tisser TTF.....   | 134 |
| Figure 158 : Position des vérins de tassage : à gauche avant les modifications et à droite après les modifications.....  | 135 |
| Figure 159 : Ancien système de tassage.....  | 135 |
| Figure 160 : Représentation et photographie du nouveau système de tassage.....   | 136 |
| Figure 161 : Problème de positionnement vertical des cadres lors du tissage.....   | 136 |
| Figure 162 : Nouveaux cadres avec le système de séparation des cadres de la machine à tisser TTF.....  | 137 |
| Figure 163 : Vérins d'alimentation en fils de trame de la « TTF ».....   | 137 |



# Liste des tableaux

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 1 : Comparaison des propriétés mécaniques obtenues par les différents procédés de moulage pour un Twintex équilibré 1/1 de 745 g/m <sup>2</sup> [73] ..... | 39  |
| Tableau 2 : Caractéristiques du fil utilisé ainsi que de la structure tissée développée pour l'application AUTO-MAPICC.....  | 44  |
| Tableau 3 : Facteurs de jauge par plage de résistance initiale.....  | 54  |
| Tableau 4 : Caractéristiques du fil utilisé ainsi que de la structure tissée développée pour l'application TRUCK-MAPICC .....                                      | 75  |
| Tableau 5 : Mesures d'épaisseur de la première structure réalisée avec les tresses métalliques .....   | 81  |
| Tableau 6 : Mesures d'épaisseur sur les plaques réalisées avec la seconde architecture .....   | 82  |
| Tableau 7: Caractéristiques du fil utilisé ainsi que de la structure tissée développée pour l'application Railmapicc.....  | 92  |
| Tableau 8 : Caractéristiques de chaque partie de la pièce composite développée pour l'application Railmapicc.....  | 93  |
| Tableau 9: Caractéristiques du fil utilisé ainsi que de la structure tissée développée pour l'application Aeromapicc .....   | 107 |
| Tableau 10 : Essais réalisés par l'université de Riga.....   | 108 |
| Tableau 11 : Résultats des essais réalisés par l'université de Riga.....   | 109 |
| Tableau 12: Résultats des mesures de dégradation en masse sur les fils de carbone .....  | 133 |

# Chapitre 1 :

## Choix des matériaux et procédés pour les applications du projet MAPICC 3D

Ce premier chapitre permet en s'appuyant sur l'état de l'art d'introduire les matériaux et structures fibreuses qui répondront aux besoins de chaque partenaire du projet MAPICC 3D en fonction des exigences liées à son domaine d'application. Pour cela, une orientation vers les solutions composites a été privilégiée s'expliquant par les choix des matières premières, du procédé de fabrication textile ainsi que du procédé de mise en forme et de consolidation de la préforme textile pour obtenir la pièce finale 3D en matériau composite.

Table des matières :

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introduction.....</b>   | <b>22</b> |
| <b>2. Choix des renforts fibreux et des résines pour les solutions composites MAPICC3D .....</b>        | <b>22</b> |
| <b>3. Choix de Structures des fils. ....</b>  | <b>23</b> |
| <b>4. Choix du procédé textile pour les renforts fibreux des solutions composites MAPICC3D .....</b>    | <b>26</b> |
| 4.1 Classification des architectures de renforts.....   | 26        |
| 4.2 Structures tissées 3D de type Interlock chaîne.....   | 29        |
| 4.3 Propriétés et élaboration des tissus 3D Interlocks chaînes.....                                     | 31        |
| <b>5. Choix du procédé de mise en forme et de consolidation des solutions composites MAPICC3D .....</b> | <b>36</b> |
| <b>6. Synthèse.....</b>   | <b>39</b> |

## 1. Introduction

Dans le cadre du projet MAPICC3D [1], les différents partenaires industriels sont répartis selon les 4 domaines d'application du transport automobile, routier, ferroviaire et aéronautique ont défini leurs besoins de nouvelles pièces plus légères pour répondre aux exigences de réduction de poids et de coûts (matières premières et production). Pour cela, parmi les différentes pièces proposées, différentes solutions ont été identifiées. Ces solutions reposent sur des choix matériaux et procédés permettant de fournir des pièces optimisées en termes de poids/performance mais également initient l'introduction de ces nouveaux matériaux en remplacement des solutions actuellement utilisées tant au niveau de la conception que de leur intégration. Parmi, les différentes familles de matériaux existantes, l'orientation vers les solutions à base de matériaux composites permet de répondre aux besoins exprimés par les industriels du projet MAPICC3D. En effet, les matériaux métalliques sont généralement tenaces, ductiles avec une bonne résistance à la propagation brutale de fissures, mais ces matériaux possèdent une masse volumique élevée. Inversement, les matières plastiques possèdent en général une masse volumique plus faible, mais présentent de plus faibles tenues mécaniques, notamment pour des températures maximales d'utilisation. Enfin, les matériaux céramiques sont rigides et ont des températures d'utilisation élevées, mais sont également fragiles. Les matériaux composites sont définis comme étant constitués de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles, conférant au matériau résultant des propriétés moyennes supérieures à celles de ses différents constituants, tout en bénéficiant des avantages combinés de ceux-ci. Ainsi, en fonction du renfort fibreux et de la résine choisis, les matériaux composites peuvent présenter des tenues mécaniques équivalentes aux métaux, mais avec une masse inférieure, et avec des propriétés supplémentaires [2,3]. Les propriétés physico-chimiques et thermo-mécaniques de ces matériaux composites sont également intrinsèquement liées à la structuration du renfort fibreux et du mode de consolidation adapté [4,5].

Ainsi, ce premier chapitre expose les différents choix effectués au niveau des constituants, le type de renfort fibreux, la résine à utiliser pour chacune des solutions composites du projet MAPICC3D, mais également les modes d'élaboration d'une part des renforts fibreux, basés sur le tissage ainsi que les étapes d'imprégnation et de polymérisation.

## 2. Choix des renforts fibreux et des résines pour les solutions composites MAPICC3D

Les renforts fibreux utilisés pour des applications à usage technique peuvent se distinguer en deux catégories : organiques et inorganiques [6]. Dans la catégorie des fibres organiques se situent les familles suivantes : acrylique, alcool polyvinylique, aramide, chlorofibre, fluorofibre, phénolique, polyacrylate, polyamide, polyester, polybenzimidazole, polyétheréthercétone, polyéthylène, polypropylène, polysulfure de phénylène et viscose HT. Pour la catégorie des fibres inorganiques, les différentes familles de fibres sont : bore, carbone, carbure de silicium, céramique, métallique, silice et verre. Au sein de la famille des fibres organiques, le recours à des fibres naturelles (chanvre, coton, jute, ramie, laine, lin), ou des fibres artificielles (acétate, tri-acétate, viscose), permet de répondre au besoin de recyclabilité ou de bio-compatibilité des marchés actuels des matériaux composites [7-17].

Suivant l'usage du matériau composite, les propriétés physico-chimiques et thermo-mécaniques des fibres, mais également leur adéquation relativement au procédé de fabrication des composites, le choix du renfort fibreux s'effectue au sein de ces différentes familles de fibres.

Dans le cadre du projet MAPICC3D, les besoins exprimés par les industriels du transport terrestre se différencient légèrement des besoins des partenaires du secteur aéronautique. En

effet, pour des applications aéronautiques, les matériaux fibreux les plus couramment utilisés sont les fibres de carbone de par leur forte ténacité [18]. Par contre les fibres de carbone sont relativement onéreuses et sont généralement remplacées par des fibres de verre, moins résistantes, et dédiées à des applications où les coûts doivent être plus faibles [19,20]. Des fibres céramiques peuvent également être utilisées pour des applications nécessitant, par exemple, un fonctionnement à haute température.

Dans le cadre de la solution composite développée par le partenaire industriel aéronautique du projet MAPICC3D, le choix s'est orienté vers des fils de carbone qualifiés par les utilisateurs finaux des pièces composites aéronautiques et à base de multi-filaments continus.

Pour les solutions développées pour les secteurs automobile, routier et ferroviaire, le choix de la nature du renfort fibreux s'est porté sur de la fibre de verre E qui apparaît comme étant un bon compromis entre les performances et le coût.

Différents matériaux peuvent être utilisés pour la résine à présente au sein d'un matériau composite. Parmi ces matériaux, les matrices organiques sont faites de polymères et se distinguent en deux catégories : les polymères thermodurcissables et les polymères thermoplastiques (Figure 3).

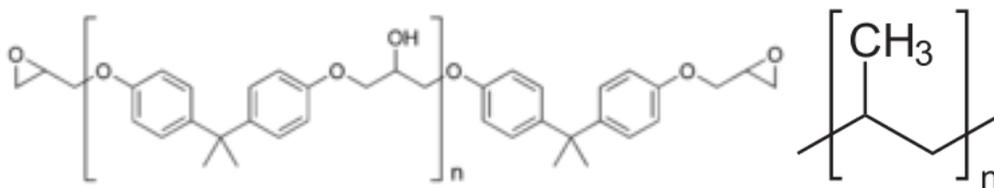


Figure 3 : Exemples de représentation des polymères thermoplastiques et thermodurcissables : (gauche) époxyde – (droite) polypropylène.

Les polymères thermodurcissables, ne possèdent pas de phase de fusion, mais une température de dégradation au-delà de laquelle les chaînes de polymères se briseront, réduisant ainsi leur masse moléculaire et donc leur tenue mécanique. Ces derniers ne peuvent donc pas revenir à l'état liquide une fois formés, compliquant les procédés de réparation des pièces composites. Ceux-ci sont formés par réticulation du monomère correspondant. Leur viscosité étant relativement faible, il est possible d'injecter un mélange contenant le monomère ainsi que le durcisseur permettant la polymérisation au sein du renfort, puis de réaliser un cycle de cuisson afin d'obtenir la pièce composite [18].

Les polymères thermoplastiques ont une température de transition vitreuse, au-delà de laquelle le polymère devient plus ductile, ainsi qu'une température de fusion au-delà de laquelle le polymère se trouvera à l'état liquide. A l'état liquide, les matrices thermoplastiques sont bien plus visqueuses que les résines thermodurcissables avant réticulation, rendant leur imprégnation plus difficile.

Dans le cadre du projet MAPICC, les solutions proposées pour les différents domaines d'application seront fondées sur des méthodes d'imprégnation rapide et à faible coût. Ainsi, des résines thermoplastiques seront privilégiées pour faciliter la mise en œuvre dans le cadre d'une consolidation par thermoformage. A contrario, des résines thermodurcissables de type époxy seront utilisées pour des solutions composites nécessitant l'utilisation de matrice qualifiée pour le domaine de l'aéronautique.

### 3. Choix des structures de fils

Pour les applications aéronautiques, comme précisé précédemment le renfort fibreux sera un multi-filament de carbone de titre 400 tex à partir duquel seront élaborées des structures de renforts qui seront par la suite injectées de résine epoxy, car qualifiée pour l'aéronautique. Pour les secteurs automobile, routier et ferroviaire, un objectif du projet MAPPIC est de

répondre à l'accélération des procédés de fabrication. Afin de réduire les temps d'injection et de polymérisation lors des procédés de type LCM [21], la solution proposée, à partir des choix de fibreux (verre E) et de résine thermoplastique (PP, PA) est d'effectuer ce mélange intime à l'échelle de la structure de renfort. Cette intégration peut se réaliser à l'échelle de la préforme où les polymères thermoplastiques sont mélangés au renfort au moment de leur élaboration par intégration de certains fils thermoplastiques dans la structure. Une seconde possibilité est de réaliser ce mélange intime à l'échelle du fil, soit avant l'élaboration des préformes, en utilisant la notion de fils comelés, qui intègre un pourcentage de fibres thermoplastiques et de filaments fibreux.

L'intérêt pour les composites thermoplastiques s'est accru ces dernières années grâce à leurs propriétés spécifiques comme des cycles de consolidation court [22], une bonne stabilité des polymères thermoplastiques, rendant possible leur stockage à température ambiante pendant de longues périodes, ou encore la facilité de recyclage ainsi que leurs propriétés à l'impact [23,24].

Par contre, la forte viscosité des polymères thermoplastiques liquides rend beaucoup plus difficile l'étape d'imprégnation des renforts fibreux comparativement à l'utilisation de résines thermodurcissables qui sont beaucoup plus fluides. Pour résoudre les problèmes liés à l'imprégnation, des techniques de fabrication ont été développées dans le but de mélanger la matrice avec les renforts textiles [25]. La matrice peut être utilisée sous forme de poudre ou de films fins appliqués sur un textile. La matrice peut être insérée pendant l'étape de mise en place des couches de renforts dans le moule, ou via l'étape de conception du renfort par le biais de fibres de résines générant ainsi des tissus hybrides. Ces développements permettent la réduction de la longueur d'écoulement des résines thermoplastiques après leur fusion. Les fils comelés [26-28] ont été développés dans cette même perspective [29,30]. Immédiatement après être sortis de filière, les filaments thermoplastiques sont mélangés avec des fibres de renfort donnant un fil comelé qui peut être utilisé dans divers procédés textiles tels que le tissage [31], le tressage [32], ou encore en maille [25].

Les textiles fabriqués à partir de ces fils hybrides peuvent ensuite être utilisés au sein de pièces composites par thermocompression. La combinaison entre fibres de verre et fibres de polypropylène est particulièrement adaptée pour des applications automobiles nécessitant une production à bas coût ainsi qu'une forte productivité tels que des pare-chocs, des protections frontales, latérales et arrières ou encore des becquets [33]. Les fils comelés sont assemblés par un système de mélange de fibres par jet d'air de fibres de verre (Figure 4.a) et de fibres de polypropylène (Figure 4.b).

La proportion en masse du fil verre/polypropylène est de 70/30, ce qui correspond en volume à 44% de fibres de verre et 56% de fibres de matrice de polypropylène.

La structure du fil comelé ainsi que son hétérogénéité a été étudiée par le biais d'images micrographiques sur des coupes polies de fils résinés (Figure 4.c). La distribution de fibres au sein du fil est visible par le fait que les fibres de verre apparaissent grises ou blanches et les fibres de polypropylène noires. Du fait du procédé de mélange au jet d'air, il n'a pas été possible de définir une géométrie de coupe transverse du fil. On peut toutefois noter que la dispersion des fibres de verre et de polypropylène dans le fil est aléatoire.

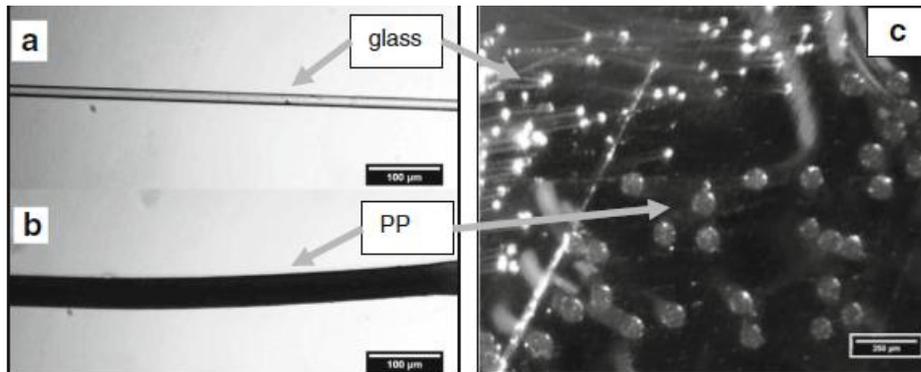


Figure 4 : Vues microscopiques : a, fibre de verre, b, fibre de polypropylène et c, vue de coupe transverse d'un fil commélé

À travers les fils comelés [34-36], les fibres de renfort peuvent être directement mélangées au sein d'un même fil à des fibres de polymères thermoplastiques tels que le polypropylène ou le polyamide. Ces polymères thermoplastiques passeront à l'état liquide avec l'augmentation de la température lors de l'étape de mise de consolidation par chauffage. Ainsi, l'imprégnation de la résine au sein du renfort fibreux (Figure 5) est facilitée par ce contact intime de la matrice avec le renfort fibreux et devient ainsi moins dépendante des paramètres classiques intervenant lors de l'imprégnation tels que : la viscosité, la vitesse d'écoulement, ou l'augmentation des valeurs de pression.

Dans le cadre du projet MAPPIC cette solution de fils comelés a été retenue car elle permet une intégration plus fine du polymère au sein du renfort, par ailleurs cette solution s'intègre dans une chaîne de production de renforts par tissage. La préforme est ensuite chauffée jusqu'à la température de fusion du polymère, sous pression, afin de polymériser le composite [34,37].

Ainsi, pour des raisons de faible coût et de basse température de fusion, les fibres de polypropylène comelés avec les fibres de verre E seront utilisées en tant qu'apport de résine à l'échelle du fil lors de la fusion du polymère à l'étape de consolidation à chaud.

Pour des applications nécessitant des propriétés de résistance au feu, plus exactement retardatrice à la flamme, le fil comelé utilisé pour ces applications s'est orienté sur un assemblage de fibres de verre E et de fibre de polyamide [6].

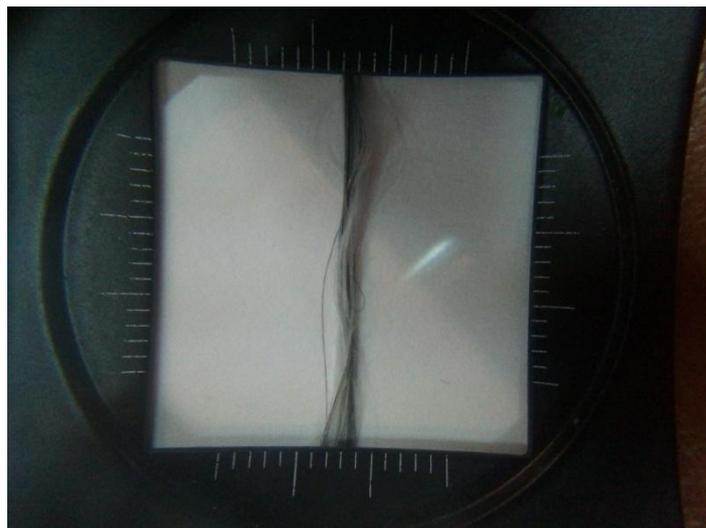


Figure 5 : Fil hybride verre (fibres blanches) / Polypropylène (fibres noires)

## 4. Choix du procédé textile pour les renforts fibreux des solutions composites MAPICC3D

### 4.1 Classification des architectures de renforts

Suite au choix des constituants exposé dans les paragraphes précédents, les propriétés mécaniques des matériaux composites sont fortement influencées par le choix des architectures de renforts. [2].

Différentes classifications sont présentées dans la littérature pour les renforts textiles en fonction de leur technologie de fabrication ; des directions d'alignement ou des orientations des fibres constitutives. Du point de vue de la technologie de fabrication, les procédés textiles conventionnels sont utilisés pour concevoir et fabriquer des renforts fibreux tels que le tissage, le tricotage, le piquage et le tressage. La Figure 6 donne un aperçu des différents renforts fibreux existants.

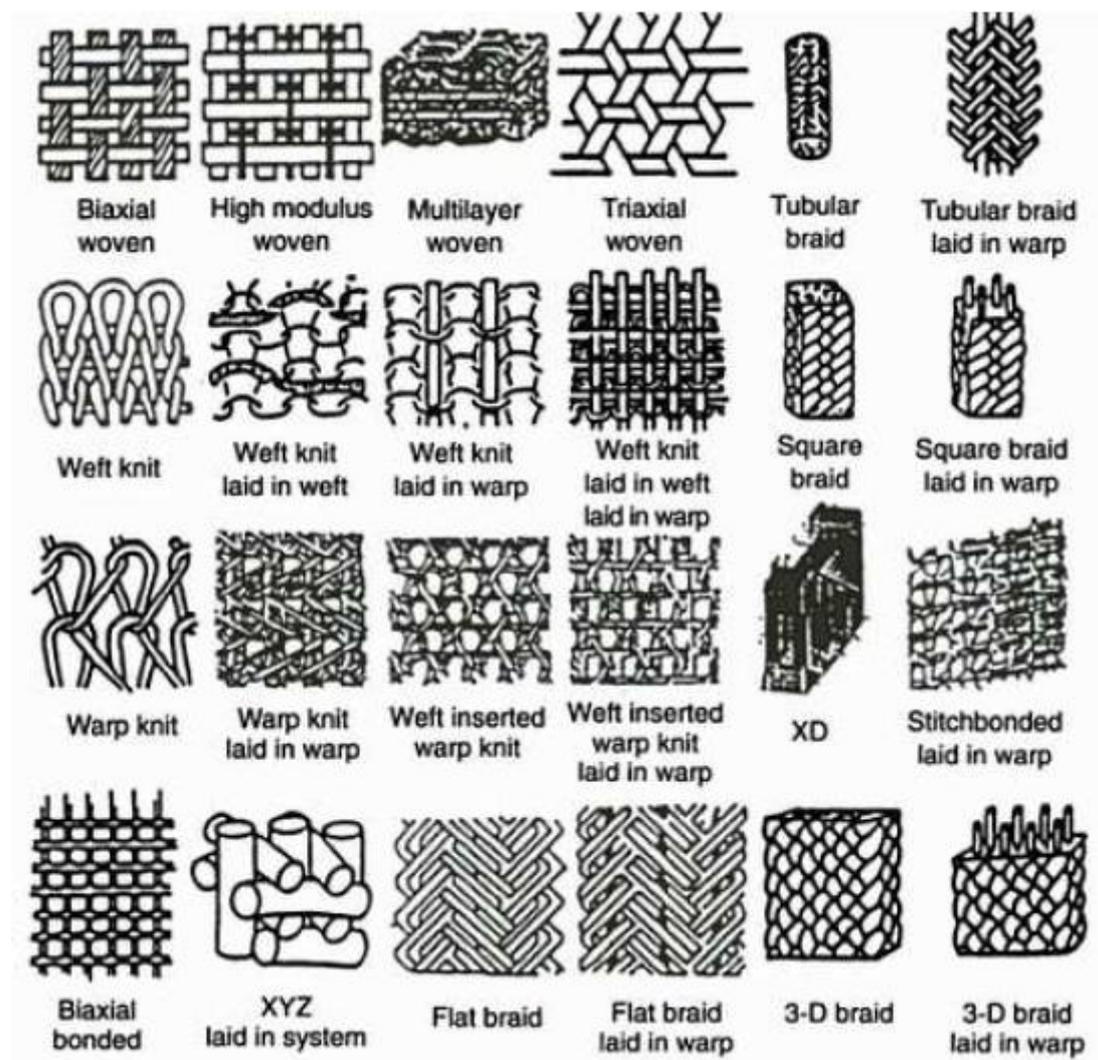


Figure 6 : Différents types de renforts fibreux [38]

En termes de direction d'alignement des fibres, les composites à renfort fibreux sont classifiés en trois groupes comme l'indique la Figure 7.

- Les composites renforcés, avec des fibres parallèles et alignées dans une direction (1D).
- Les composites renforcés avec des fibres alignées dans un plan de la structure (2D).

- Les composites renforcés avec des fibres alignées dans un plan, mais également selon l'axe orthogonal au plan, appelées "fibres de renfort hors plan" ou "fibres en Z". (3D)

Sur ce critère d'alignement des renforts, une classification des préformes est présentée Figure 7.

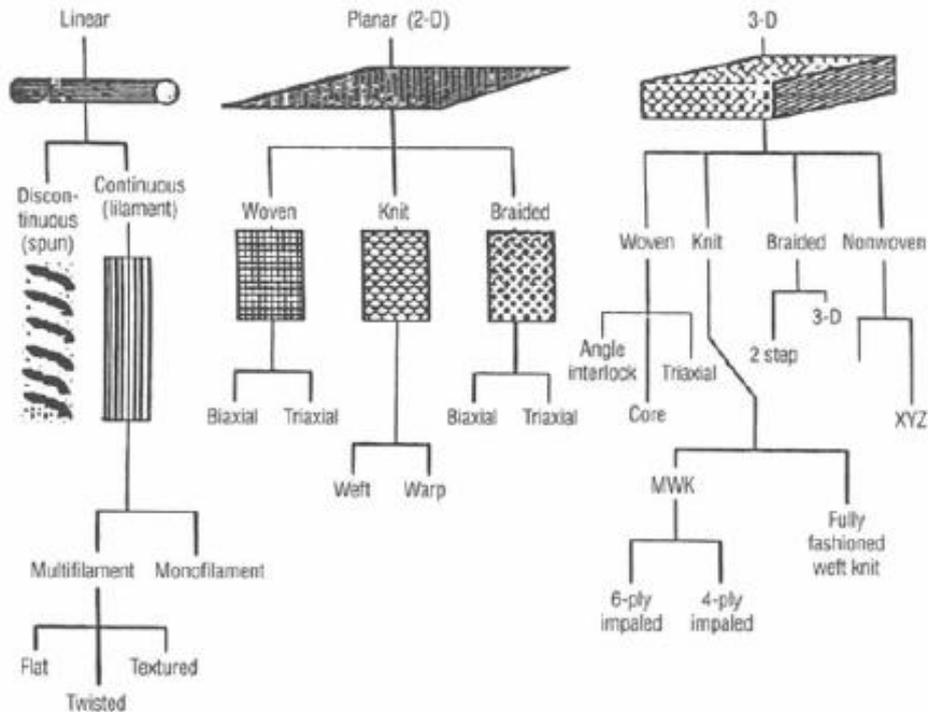


Figure 7 : Classification des préformes selon la direction des renforts [38].

| AXIS<br>Dimension |                | AXIS      |                        |                 |                   |                      |
|-------------------|----------------|-----------|------------------------|-----------------|-------------------|----------------------|
|                   |                | Non-axial | Mono-axial             | Biaxial         | Triaxial          | Multi-axial          |
| 1D                |                |           | Roving yarn            |                 |                   |                      |
| 2D                |                | Chopped   | Pre-impregnation sheet | Plane weave     | Triaxial weave    | Multi-axial          |
| 3D                | Linear element | Strandmat | 3D braid               | Multi-ply WEAVE | Triaxial 3D weave | Multi-axial 3D weave |
|                   | Plane element  |           | Laminate type          | H or I beam     | Honeycomb type    |                      |

Figure 8 : Classification des composites à renfort fibreux en termes de plans d'alignements des fibres constitutives [39]

La dernière classification, présentée Figure 8, regroupe les critères (orientations, dimensions) tout en citant quelques technologies d'assemblage permettant d'élaborer ces renforts. En revance, ces classifications ne permettent pas de distinguer les matériaux 3D pleins des matériaux 3D creux obtenus par révolution.

Ainsi, parmi les renforts à un seul axe de fabrication pour obtenir des pièces de révolution 3D, nous pouvons citer les systèmes de placement de fibres (Figure 9 - gauche) et les systèmes d'enroulement filamentaire (Figure 9 - droite).



Figure 9 : Système de placement de fibres (gauche) - et d'enroulement filamentaire (droite).

D'autres types de renforts dits 2D peuvent être empilés pour obtenir de plus fortes épaisseurs et liés par des systèmes de couture ou de piquage [40]. Ces renforts 2D sont des tresses, des tissus, des tricots et des non-tissés (Figure 10).



Figure 10 : Différents types de structures 2D : (de gauche à droite) une tresse, un tissu, un tricot et un non-tissé.

Au sein des renforts unidirectionnels, l'ensemble des fibres est orientée suivant une direction principale et celles-ci sont maintenues entre elles par quelques fils en sens transverse. Les renforts unidirectionnels permettent d'obtenir une très bonne tenue mécanique ainsi que de très faibles déformations dans le sens des fibres et une tenue mécanique plus faible dans le sens transverse.

Concernant les renforts bidirectionnels, les préformes tressées sont des structures comportant des fils dans deux directions entrelacées. Les renforts tissés sont similaires mis à part que les deux directions sont la direction de production et la direction perpendiculaire [5,41,42]. Les structures tissées et tressées possèdent également de bonnes tenues mécaniques et de relatives faibles déformations dans les deux directions des fils. Il existe aussi des renforts tissés multiaxiaux où l'on vient tisser des fils dans d'autres directions que les deux directions chaîne et trame, permettant ainsi d'obtenir un renfort quasi-isotrope [43]. Les tresses peuvent également être renforcées par des fils suivant la direction de production.

Les renforts tricotés peuvent être divisés en deux classes : les tricots trame où l'ensemble de la structure est réalisée par l'entrelacement d'un fil sur lui-même par l'intermédiaire de boucles et les tricots chaînes où l'on trouve plusieurs fils s'entremêlant avec des fils voisins parallèles. Du fait des boucles que comportent les structures tricotées, celles-ci ont de très fortes déformations admissibles, particulièrement avec les structures tricotées trame, ainsi qu'une relative faible tenue mécanique, qui peut être améliorée en plaçant des fibres de renfort, alignées, dans la structure [44-48].

Enfin, les renforts non-tissés sont réalisés par l'arrangement de fibres courtes sans direction privilégiée. Les non-tissés disposent de propriétés mécaniques réduites relativement aux renforts à fibres alignées.

Au-delà des renforts 2D, il existe des renforts dits 3D volumiques, formant des structures avec une épaisseur plus importante que dans les renforts 2D, mais aussi des renforts 3D surfaciques [49]. Parmi les renforts 3D, on peut citer les tresses 3D, les tissus 3D interlocks chaînes, les tissus 3D multiaxiaux, ainsi que les tricots 3D (Figure 11). Même si les renforts 3D sont plus complexes et demandent généralement des procédés de fabrication adaptés, ces structures ont l'avantage d'avoir un liage entre les couches et donc une tenue mécanique fortement améliorée dans l'épaisseur.

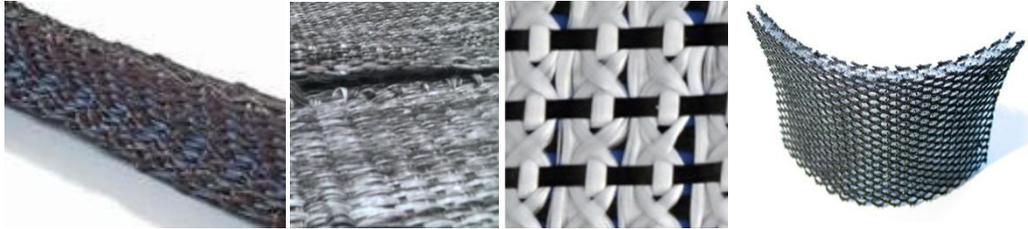


Figure 11 : Différents types de structures 3D : (de gauche à droite) une tresse, un tissu 3D interlock chaîne, un tissu multiaxial et un tricot.

En fonction des paramètres internes de ces matériaux, ces renforts 3D volumiques possèdent des capacités de déformation convexe ou concave dans les deux directions du plan, ce qui contribue à les déformer plus ou moins facilement lors de la mise en œuvre en 3D pour la réalisation de pièces composites complexes. Ainsi, dans le cadre du projet MAPICC3D, différents types de renforts ont été choisis par les différents partenaires responsables de la réalisation des architectures fibreuses, tels que : les tresses [50], les tricots 3D et les tissus 3D interlocks chaînes [51].

#### 4.2 Structures tissées 3D de type Interlock chaîne

Dans le cadre de notre étude au sein du projet MAPICC3D, nous avons utilisé les tissus 3D interlocks chaînes, dont les caractéristiques produits et le procédé de fabrication associé se sont avérés adaptés à la réalisation de renforts fibreux 3D à base de fils thermoplastiques comelés.

La structure tissée 3D interlock chaîne consiste en l'assemblage de fils chaîne et trame dans le plan des couches mais également dans l'épaisseur de la structure. Plusieurs arrangements de fils peuvent être réalisés et permettent d'obtenir une grande quantité de structure 3D [18]. Un tissu 3D interlock chaîne, ou tissu 3D est un renfort tissé qui, comme les tissus 2D, présente des fibres entrelacées non seulement dans les deux directions du plan (chaîne et trame), mais aussi un troisième type de fil évoluant dans l'épaisseur, apportant ainsi une cohésion à l'ensemble du renfort.

Là où les tissus 2D ne peuvent que faire varier leur motif d'entrelacement dans le plan, les tissus 3D interlocks chaînes présentent une modularité permettant l'élaboration d'un grand nombre de renforts. On peut observer que le tissu 3D interlock chaîne est renforcé dans les 3 directions, chaque groupe de fils assurant une fonction bien précise au sein de la structure [52]. La représentation schématique d'une structure tissée 3D interlock chaîne (Figure 12) illustre le rôle de chaque fil intervenant dans sa fabrication [53].

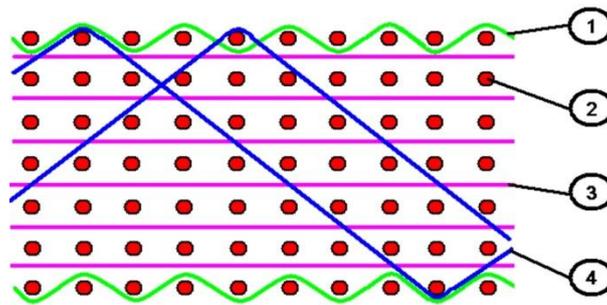


Figure 12. Représentation schématique par une vue en coupe des fils de trame d'une structure tissée 3D interlock chaîne.

1. Les fils de chaîne de surface (surface weaver) sont intégrés dans la structure tissée lorsque celle-ci requiert un état de surface de chaque face du tissu avec une rugosité plus ou moins précise. Ces fils n'ont pas de grande influence sur les propriétés mécaniques du tissu, ils ont plutôt un rôle « esthétique »
2. Les fils de trame (fill yarns) sont perpendiculaires aux fils de chaîne et insérés à chaque formation de foule sur machine à tisser. Ces fils déterminent le nombre de couches de la structure tissée 3D interlock chaîne et contribuent essentiellement aux propriétés mécaniques transversales du tissu multi-couche.
3. Les fils de chaîne de renfort (Stuffer yarns or longitudinal yarns) sont également des fils de chaîne positionnés sur la machine à tisser et contribuent aux propriétés mécaniques longitudinales du tissu multi-couche.
4. Les fils de chaîne de liaison (Weavers or web yarns) sont directement positionnés sur la machine à tisser et permettent de lier dans l'épaisseur les différentes couches du tissu. Ces fils contribuent essentiellement à maintenir la cohésion de l'ensemble de la structure tissée en fonction de leur densité dans la structure multi-couches et apportent donc de la résistance inter-laminaire.

De façon à définir les tissus 3D interlocks chaînes, différentes méthodes de classification ont été abordées dans la littérature [54].

La classification de Hu [19], reprise par Ansar et al. [55], regroupe les tissus 3D interlocks chaînes en 4 classes, chacune de ces classes étant représentée sans fil de chaîne de renfort en Figure 13. Comme le résume Ha-Minh [56], deux paramètres géométriques sont utilisés pour distinguer les tissus 3D interlocks chaînes, le premier paramètre est relatif à l'angle d'ondulation des fils de chaîne de liaison dans l'épaisseur, et le second paramètre correspond à la profondeur à laquelle les fils de chaîne pénètrent dans l'épaisseur. En combinant ces deux paramètres, on obtient quatre classes de tissu 3D interlock chaîne.

Cette distinction se rapproche de la nomination des structures interlocks dits par couplage orthogonal ou couplage d'angle défini par Sheng et al. [57] et Gu et al. [58], puis représentée par Nauman [59].

- « angle interlock/through thickness bonding » (A/T) - interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur. Dans cette configuration, les fils de chaîne lient toute l'épaisseur de la structure dans une direction diagonale.
- « angle interlock/layer to layer bonding » (A/L) - interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne couche à couche. Dans cette structure, les fils de chaîne lient les couches entre elles dans une direction diagonale et non plus à travers l'épaisseur de la structure.
- « orthogonal interlock/through thickness bonding » (O/T) - interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur. Les fils de chaîne vont lier les couches entre elles dans l'épaisseur de la structure avec un angle d'inclinaison orthogonal.
- « orthogonal interlock/layer to layer bonding » (O/L) - interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne couche à couche. Les fils de chaîne lient ici au moins deux couches entre elles entre deux colonnes de fils de trame.

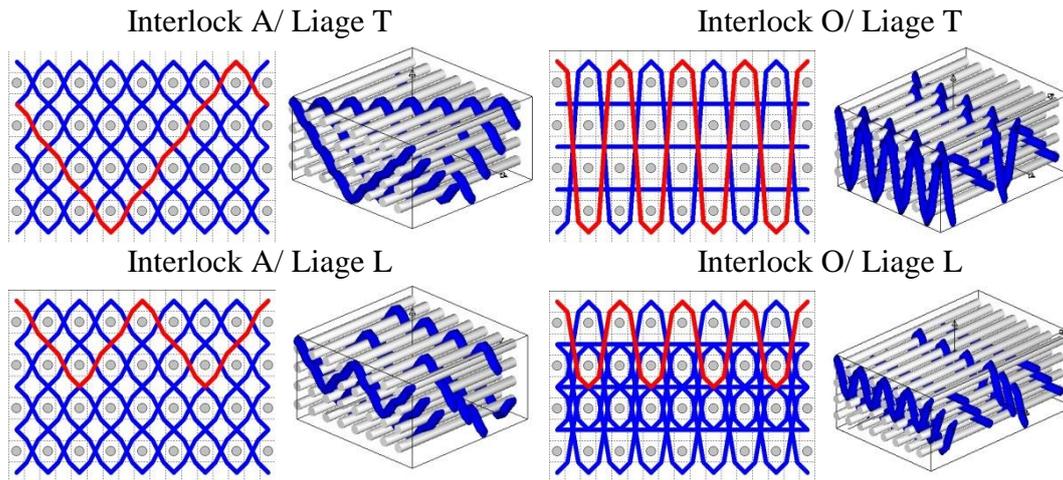


Figure 13. Les 4 classes de tissus 3D interlocks chaines selon la classification de Hu [19].

Cette approche de classification [60,61] permet une description générique de tous les types de liage; ce qui permet d'aboutir à une définition générale de toutes les structures interlocks.

Récemment, afin de mieux connaître les différentes possibilités de liage définissant les architectures des tissus 3D interlocks chaines, une définition générale de ces structures tissées a été proposée afin d'aider le non expert en tissage à définir les différents paramètres produits spécifiques [62].

#### 4.3 Propriétés et élaboration des tissus 3D Interlocks chaines

Fort de cette précision sur les différents types d'architectures des tissus 3D interlocks chaines, nous pouvons distinguer leurs différentes propriétés et comportements en fonction de l'architecture choisie.

Les tissus interlocks orthogonaux possèdent des fils de chaîne qui passent à travers l'ensemble de la structure en une colonne de fils de trame, rendant la structure très compacte et rigide [63,64].

Les tissus interlocks d'angle, ont certains fils de chaîne qui passent également à travers de l'ensemble de la structure, mais de manière progressive, ainsi qu'à travers plusieurs colonnes de fils de trame, rendant la structure relativement élastique [65,66].

Les tissus interlocks à liage en couche à couche permettent d'obtenir des structures moins denses et rigides que les tissus interlocks orthogonaux à liage à travers l'épaisseur sans être aussi élastiques que les structures angles interlocks à liage dans l'épaisseur [67].

Ces différentes propriétés résultantes du choix des architectures seront utilisées dans notre étude pour les différents fils comelés afin de trouver le meilleur compromis entre les propriétés mécaniques et leur capacité de drapage lors de l'étape de mise en forme.

De plus, les tissus 3D interlocks chaines peuvent être produits sur des machines à tisser conventionnelles plus ou moins adaptées en fonction de la matière utilisée du fil. Pour réaliser ce type de structure, la cinématique de tissage reste la même que pour la réalisation des tissus 2D (Figure 14).



Figure 14 : Vue en face avant des différents éléments d'une machine à tisser

Les principales étapes de la fabrication d'un tissu sont : l'ouverture de la foule permettant de passer un fil de trame au travers des deux nappes de fils de chaîne (Figure 15), le recul du peigne, l'insertion du fil de trame, le tassage pour placer le fil de trame contre le tissu et le changement de foule pour passer à l'insertion de la duite suivante.

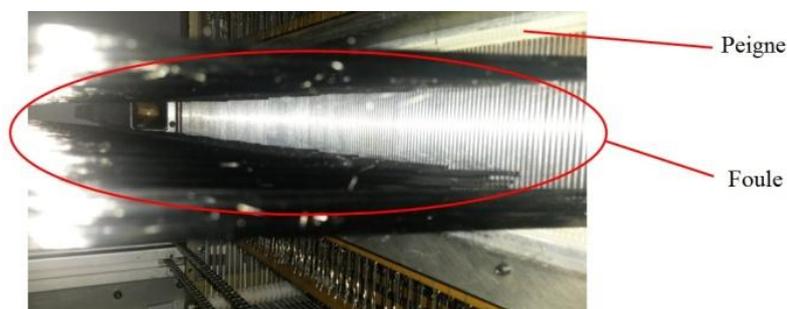


Figure 15. Vue latérale lors du mouvement de la formation de la foule

Parmi les machines à tisser conventionnelles, deux types de fonctionnement se différencient par la méthode de mise en mouvement des fils de chaîne : les machines à tisser armurées et Jacquard (Figure 16). Concernant le tissage armuré, les fils de chaîne sont levés ou baissés par groupe à travers des cadres pour former la foule, limitant le nombre d'évolutions différentes de fils de chaîne au nombre de cadres disponibles sur la machine à tisser. Les machines à tisser de type Jacquard, où les fils de chaîne sont levés ou baissés individuellement, n'ont pas l'inconvénient du premier type de machine, mais contraignent le tissu à une densité limitée dépendant de la densité des arcades placées sur la machine à tisser. Dans le cadre du projet MAPICC3D, nous avons utilisé des machines à tisser armurées, du laboratoire GEMTEX, adaptées au tissage des tissus 3D interlocks chaînes pour les préformes à base de fils carbonés, la machine CARBOMAT, et pour les fils comelés la machine TTF [68].



Figure 16 : Deux types de machine à tisser : (gauche) Armuré – (droite) Jacquard

L'alimentation en fils de chaîne des machines à tisser peut être effectuée de deux façons différentes : par une ou des ensouples ou directement par les bobines (Figure 17). Sur ensouple, les fils de chaîne sont enroulés en groupe sur un cylindre que l'on doit préparer

pendant la phase d'ourdissage. Puis les différentes ensouples sont placées sur un cantre d'ensouples. Avec ce système d'alimentation, la tension des fils est contrôlée de manière identique pour l'ensemble des fils alors qu'avec des bobines, la tension des fils est régulée individuellement pour chaque fil de chaîne. Dans le cadre du projet MAPICC3D, nous avons utilisé l'alimentation par cantre d'ensouples pour le tissage des structures tissées 3D interlocks chaines.



Figure 17 : Deux types d'alimentation en fils de chaîne : (gauche) par ensouples ou (droite) par bobines

Les machines à tisser Jacquard permettant un nombre plus important d'évolutions de fils de chaînes que les machines à tisser armurées, les possibilités de consommations différentes de fils de chaînes sont aussi grandes que le nombre d'évolutions différentes possibles et donc, peuvent créer autant de problèmes si la tension des fils de chaîne n'est pas régulée individuellement. C'est pourquoi, les machines à tisser Jacquard sont relativement souvent associées à un système de cantre pour contrôler au mieux la tension des fils de chaîne, alors que les métiers armurés utilisent souvent des ensouples qui peuvent être regroupées par consommation similaire.

Afin de pouvoir limiter au maximum les problèmes de tension sur une machine à tisser armurée, les fils de chaîne rentrés dans un cadre peuvent être associés à une même ensouple. Ce système nécessite donc autant d'ensouples que de cadres afin de pouvoir tisser des structures comportant des variations de consommation en fils de chaîne comme les structures tissées 3D interlocks chaines. Dans cette optique, une machine à tisser de prototypage équipée de 24 cadres comportant un cantre pouvant accueillir 24 ensouples a été réalisée au sein du laboratoire GEMTEX [68].

Suivant les paramètres géométriques ou mécaniques désirés, différentes techniques de tissage peuvent être employées. Dans le cadre de nos travaux de recherche répondant aux solutions développées pour les partenaires du projet MAPICC3D, les techniques à employer sont respectivement : le tissage avec différentes densités de fils de chaînes dans des préformes, le tissage avec des variations de densité en sens trame, le tissage par déliage, le tissage tubulaire, le tissage par partie et le tissage créneau. En fonction des applications, ces techniques peuvent être adaptées et/ou assemblées les unes aux autres afin de former des préformes complexes.

La technique de tissage permettant différentes densités de fils de chaînes consiste à doubler certains fils de chaînes ou à réaliser une armure locale avec un plus grand nombre d'évolutions de fils de chaînes différentes, dont l'effet sur un tissu est représenté en Figure 18. L'avantage de la première solution est que l'on n'augmente pas le nombre d'évolutions dans la structure et donc le nombre de cadres nécessaires. Par contre, le fait de doubler des fils de chaînes revient à obtenir un tissu avec des fils de chaînes deux fois moins fins, ce qui peut

engendrer une différence d'homogénéité au sein de la structure et des gradients d'épaisseur pouvant perturber la cinétique de diffusion de la chaleur au sein de la préforme.

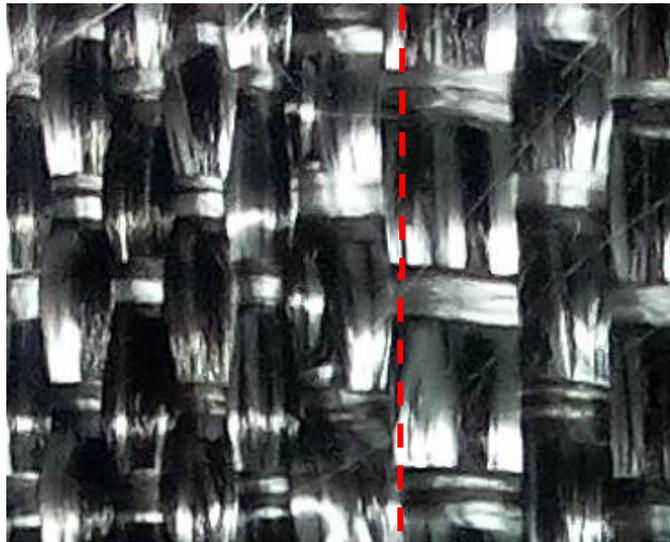


Figure 18 : Tissu présentant des différences de densité en fils de chaîne (gauche) : densité plus forte - (droite) : densité plus faible.

La technique de tissage permettant la variation de densité en sens trame consiste à réduire l'avance de la machine à tisser ou du tirage du tissu dans la zone que l'on désire plus épaisse, tout en adaptant la structure pour que les fils supplémentaires viennent doubler d'autres fils de trame où soient tissés de manière à augmenter le nombre de fils de trame par colonnes afin d'augmenter au mieux l'épaisseur du tissu. L'effet de cette technique sur un tissu est représenté en Figure 19.

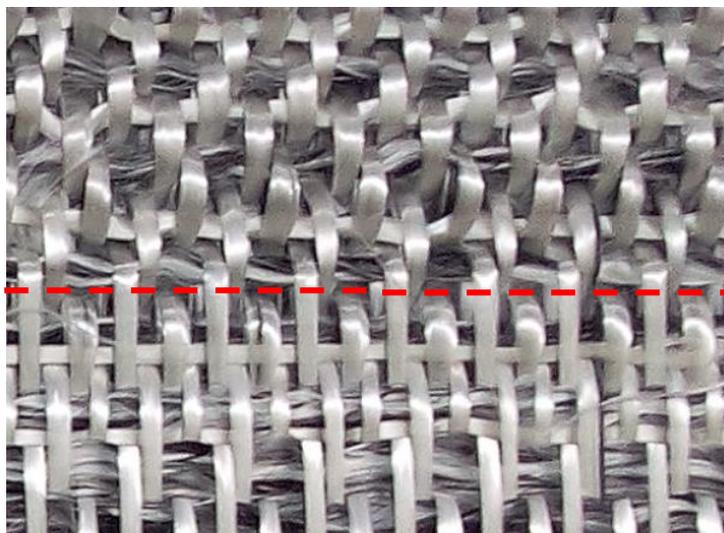


Figure 19 : Tissu présentant des différences de densité trame (haut) plus forte densité – (bas) plus faible densité.

La technique de tissage par déliage permet de séparer un tissu 3D interlock chaîne en deux tissus plus fins et sans liage. Dans les structures 3D interlocks chaînes, le liage des couches de tissu se fait via les fils de chaînes liants. Pour séparer un tissu 3D interlock chaîne, il faut donc repérer les fils de chaîne qui lient les deux parties du tissu que l'on désire, puis de prévoir de nouvelles trajectoires pour chacun des fils repérés afin de ne plus avoir de liage entre les deux parties du tissu. Cette technique permet de tisser un tube « à plat » dans le sens opposé au sens de production tel que représenté en Figure 20.

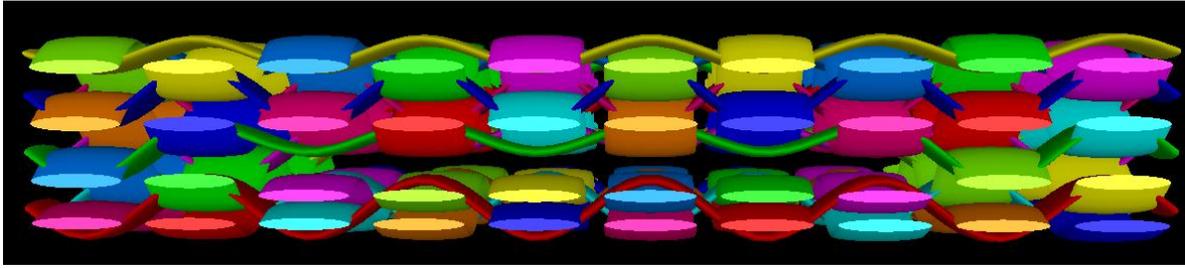


Figure 20 : Technique de tissage par déliage

La technique de tissage tubulaire permet de tisser un tube dans le sens de production. Dans un tissu 2D, un tube est réalisé en tissant le premier fil de trame pour réaliser la première moitié de la section du tube, puis la deuxième moitié de la section du tube avec le deuxième fil de trame et ainsi de suite. Cette technique peut être adaptée au tissage 3D interlock chaîne, dont un exemple est présenté à la Figure 21, où l'on vient tisser une couche de l'interlock par cycle. Cette technique nécessite que le fil de trame soit continu afin de relier les deux parties pour former la partie tubulaire.

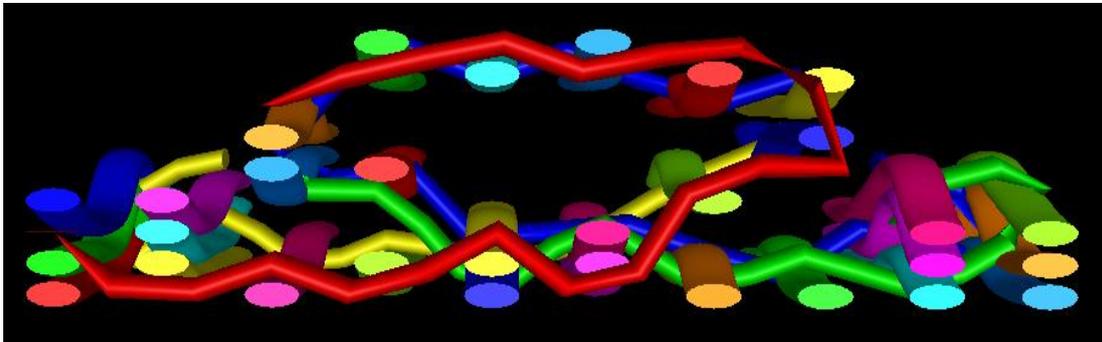


Figure 21 : Technique de tissage tubulaire

La technique de tissage par parties permet d'insérer un fil de trame sur une partie de la laize, permettant ainsi de tisser plusieurs zones successivement comme le montre la Figure 22. Par contre, cette technique nécessite un rentrage des fils de chaînes par parties, ce qui augmente le nombre de sélection des fils de chaîne et rend le nombre total de cadres utilisés plus important.



Figure 22 : Technique de tissage par parties

Enfin, la technique de tissage créneau appliquée à un déliage permet de réaliser une structure déliée dont l'une des deux parties est plus longue que l'autre, et permet donc la réalisation d'un tube en sens opposé au sens de production dont l'axe est excentré par rapport au plan du tissu comme le montre la Figure 23. Cette technique nécessite un système d'avance par retour en arrière de la machine à tisser afin de relier les deux parties en fin de tubulaire, ainsi qu'un système de régulation de tension de certains fils de chaîne afin que ceux-ci soient toujours tendus, même pendant la phase où l'on relie les deux parties de la structure.

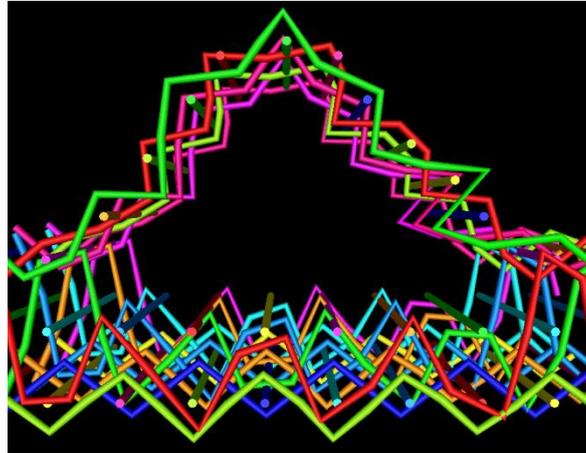


Figure 23 : Technique de tissage créneau

## 5. Choix du procédé de mise en forme et de consolidation des solutions composites MAPICC3D

Dans différents travaux de recherche [36,44,69,70], un lien important entre la préforme réalisée et le système de consolidation associé a été révélé. En effet, la préforme qui va être drapée est déduite de la géométrie finale de la pièce composite, par conséquent les dimensions de la préforme ainsi que les techniques utilisées dépendent donc également de cette étape de préformage. Il est donc possible d'adapter le système de consolidation en fonction de la géométrie de la préforme et inversement, d'adapter la préforme au système de consolidation [65].

Afin d'obtenir la forme la plus proche possible de la géométrie de la pièce composite finale, les procédés de mise en forme et de consolidation sont le plus souvent réunis en un même procédé. Ainsi, le moule pour la mise en forme sert le plus souvent aussi pour la consolidation.

Comme pour les renforts, il existe différentes familles de procédés de mise en forme et de consolidation qui peuvent se différencier par les cadences de production, ainsi que par les constituants et notamment la résine.

Suivant le polymère utilisé, celui-ci peut être inséré dans le renfort pendant la phase de consolidation par des procédés d'infusion ou d'injection, mais peut aussi être déjà présent dans le renfort par l'utilisation de pré-imprégnés, de renforts utilisant des fils comelés ou des fils de matrice. Le renfort peut également être injecté sous forme de fibres en même temps que la matrice par un procédé de pultrusion, permettant ainsi des cadences de production très élevées, mais des tenues mécaniques des pièces composites assez médiocres.

Quand le polymère, dans le cas d'un thermoplastique, ou le monomère, dans le cas d'un thermodurcissable, est relativement peu visqueux, il est généralement inséré dans le renfort par trois types de procédés : le moulage au contact, l'infusion et l'injection. Dans ces trois

procédés, le renfort et le système de consolidation peuvent être chauffés lors de l'étape de consolidation.

Dans le cas du procédé de consolidation par moulage au contact (Figure 24), la première couche de renfort est placée dans un moule aux formes de la pièce composite, puis une couche de résine est appliquée avant de placer la deuxième couche de renfort, et ainsi de suite par une succession de couches de renfort et de couches de résine avant de consolider l'ensemble en chauffant. L'absence de pression appliquée pendant le procédé implique un taux de résine important et donc un faible taux de fibres dans la pièce composite ainsi qu'un grand taux de porosité, ce qui se traduit par une tenue mécanique plus faible.

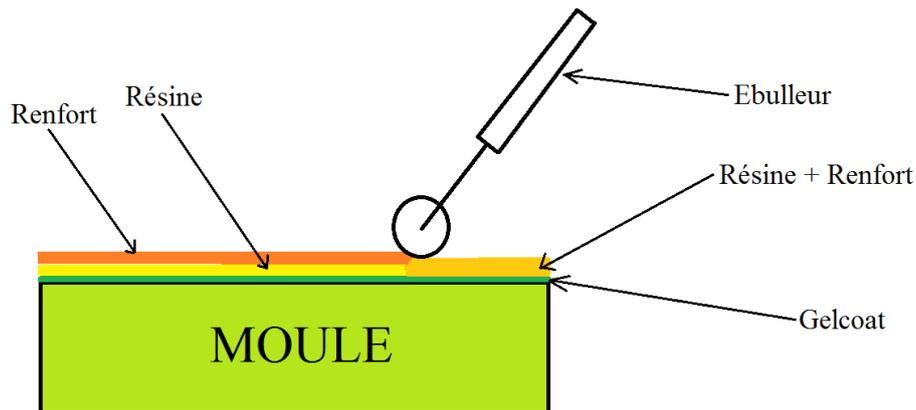


Figure 24 : Procédé de consolidation par moulage au contact

Dans le cas du procédé de consolidation par infusion, le renfort est placé entre un moule donnant la forme de la pièce composite et une bâche (Figure 25) [71]. D'un côté, l'air se situant entre la bâche et le moule est aspiré et, de l'autre côté, la résine est aspirée jusqu'à l'imprégnation complète du renfort. Ainsi, la résine est aspirée et peut imprégner le renfort. La pression appliquée par la bâche sur le renfort permet d'obtenir une bonne imprégnation du renfort par la matrice. Bien qu'il y ait une pression appliquée, celle-ci reste relativement faible, car elle dépend de la pompe à vide ainsi que de la rigidité de la bâche, conférant ainsi de meilleurs taux de fibres à ce type de matériaux composite qu'avec le moulage au contact. De plus, l'épaisseur de la pièce composite fabriquée par infusion est relativement peu maîtrisée. La pression appliquée par la bâche peut être augmentée en plaçant l'ensemble du système de consolidation dans un autoclave.

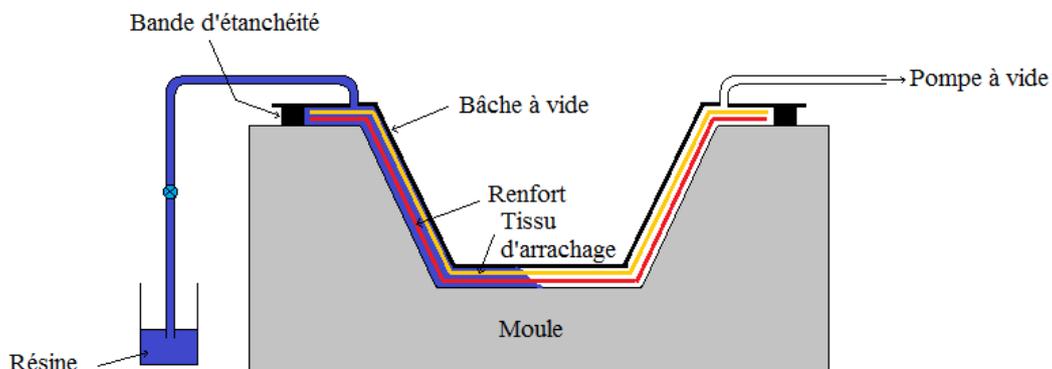


Figure 25 : Procédé d'infusion sous vide

Dans le cas du procédé de consolidation par injection, aussi appelé procédé RTM (Resin Transfer Molding), le renfort est embouti entre un moule et un contre-moule, permettant ainsi

une maîtrise plus importante de la forme et de l'épaisseur de la pièce composite (Figure 26) [72]. Le procédé d'insertion de la résine est le même que pour l'infusion à la différence qu'un contre moule remplace la bâche et que la résine est injectée. Ce procédé permet également de placer le système de consolidation dans une presse, et donc, d'obtenir une pression bien plus importante qu'avec les deux procédés décrits précédemment, conférant au matériau composite un volume de fibres plus important, même si le procédé est plus coûteux que les deux procédés décrits précédemment.

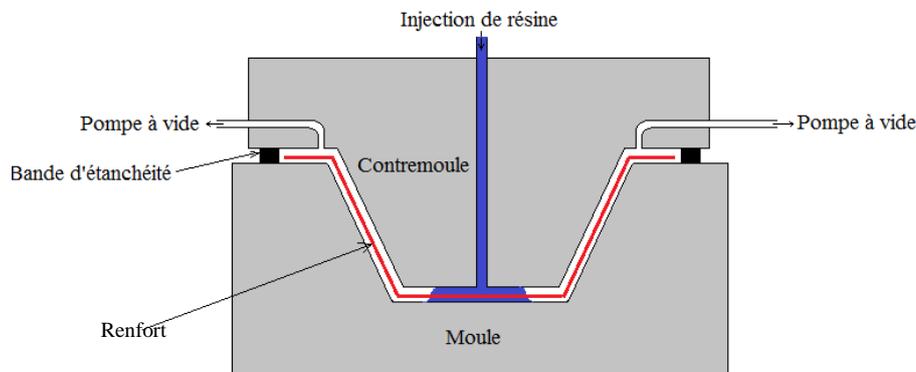


Figure 26 : Procédé d'injection

Dans le cas où le polymère thermoplastique ou le mélange monomère/durcisseur est trop visqueux, ceux-ci peuvent être intégrés au renfort avant l'étape de mise en forme.

Dans le cas d'un mélange monomère/durcisseur, ceux-ci ne doivent pas ou peu réagir avant l'étape de consolidation. La réaction de polymérisation est généralement contrôlée en ralentissant fortement celle-ci sous de basses températures et en l'accéléralant sous de plus fortes températures lors de l'étape de consolidation.

Pour le développement d'une des solutions MAPICC3D appliquée au secteur de l'aéronautique, le procédé de consolidation par injection de résine a été retenu afin de garantir l'homogénéité de la répartition de la résine au sein du renfort fibreux mais également par l'utilisation de résine qualifiée par ce domaine d'application.

Concernant les applications à base de fils comelés, le procédé de consolidation est basé sur la thermocompression. Ce procédé s'effectue par compression de plaque chaude à des pressions pouvant atteindre 150 à 300 bar pour remplir le moule par fluage. La différence avec le thermo-estampage est au niveau des pressions de moulage mise en œuvre et des épaisseurs des pièces, qui sont respectivement :

- inférieures à 20 bars et 2,5 mm d'épaisseur pour le thermo-estampage ;
- de 100 à 300 bars et plus de 2.5 mm pour la thermo-compression

Le principe consiste à découper des flans de dimensions supérieures à celles développées de la pièce et de chauffer ceux-ci dans un four (à panneau radiant, IR, gaz, etc.). Le flan chaud est transporté dans le moule, la presse est alors fermée et exerce une forte pression. On procède enfin au refroidissement et au démoulage après 30 secondes (Figure 27). Le cycle est très rapide. Les installations des lignes thermoplastiques conviennent parfaitement à la thermo-compression des composites TP renforcés de fibres longues ou continues sous forme de tissus ou d'UD. Les fours IR et air chaud sont des matériels de chauffage convenant parfaitement au chauffage de ces matériaux. Les moules sont de préférences en acier pour résister à la forte pression de moulage de 100 à 300 bars.

Les propriétés mécaniques sont essentiellement conditionnées par la consolidation des plaques mise en œuvre, l'optimisation des résistances mécaniques passe par la qualité d'imprégnation de toutes les fibres de renfort. Le couple (pression, température) est essentiel sur cette qualité d'imprégnation.

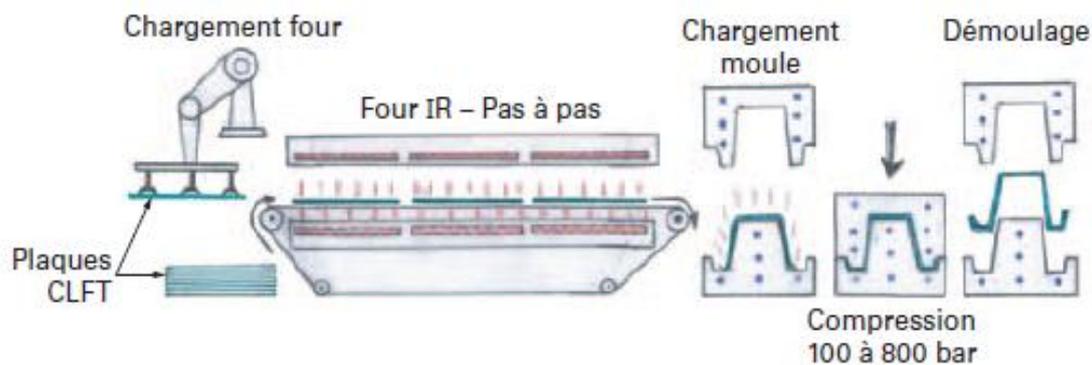


Figure 27 : Principe de la thermo-compression pour des fabrications en grande série [73]

Tableau 1 : Comparaison des propriétés mécaniques obtenues par les différents procédés de moulage pour un Twintex équilibré 1/1 de 745 g/m<sup>2</sup> [73]

| Caractéristiques                      | Thermocompression Plaques | Chaud-froid Compression | Moulage sous vide | Moulage au diaphragme sans et avec pression d'air |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------|---|
| Contrainte de flexion..... (MPa)      | 150                       | 220                     | 240               | 220 à 330   |
| Module de flexion ..... (MPa)         | 12 115                    | 12 170                  | 11 400            | 11 500 à 14 000                                   |
| Résilience ..... (kJ/m <sup>2</sup> ) | 143                       | 142                     | 148               | 90 à 135  |

Les essais sont réalisés suivant les normes NF EN ISO 179-1 et NF EN ISO 14125 sur une éprouvette de 3 mm d'épaisseur, de 15 x 50 mm pour l'essai de choc Charpy et de 15 x 100 mm pour l'essai en flexion (valeur indicative).

## 6. Synthèse

Les solutions développées pour répondre aux besoins exprimés par les différents partenaires du projet MAPICC3D s'orientent toutes vers des matériaux composites avec des choix différents concernant les matières premières, les résines, les procédés de fabrication des renforts textiles et les procédés de mise en forme et de consolidation associés. Pour le domaine du transport aéronautique, l'exigence de qualification des matériaux permet de justifier l'emploi de fils de carbone pour le renfort fibreux et de résine époxy à injecter par procédé de type RTM. L'architecture du renfort fibreux s'est orientée vers des tissus 3D interlocks chaînes dont les procédés de fabrication et les différentes techniques de tissage apparaissent les plus adaptés à la réalisation de cette solution. Pour le domaine du transport terrestre, l'exigence des coûts, plus ou moins prononcée en fonction du secteur, a conforté le choix d'un fil comélé à base de multi-filaments de verre E et de filaments continus de polymère thermoplastique comme renfort fibreux. Le procédé de fabrication textile s'est orienté dans le cadre de nos travaux de recherche sur le tissage 3D interlock chaîne dont le choix des architectures sera adapté au besoin des préformes en termes d'homogénéité des dimensions de la structure et de capacité à se déformer par drapage ou pliage.



## Chapitre 2 :

# Solutions composites par application du projet MAPICC3D

Ce deuxième chapitre décrit les différentes problématiques des partenaires des secteurs du transport automobile, routier, ferroviaire et aéronautique. Les solutions composites répondant à ces différents partenaires sont détaillées au travers des études menées dans le cadre de mes travaux de recherche. Pour cela, les phénomènes à étudier ont été définis, puis des paramètres déterminants ont été sélectionnés. Les résultats de ces études seront présentés pour chaque application.

### Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Solution AUTO-MAPICC pour l'application automobile .....</b>  | <b>43</b> |
| 1.1 Problématique du partenaire .....   | 43        |
| 1.2 Élaboration de préformes et présentation du banc de mise en forme .....   | 44        |
| 1.3 Élaboration et intégration des fils capteurs dans les préformes 3D .....  | 49        |
| 1.4 Étude de l'influence de différents paramètres des tissus 3D interlocks chaînes sur la mise en forme par emboutissage..... | 55        |
| A. Emboutissage hémisphérique .....   | 55        |
| B. Emboutissage gousset.....  | 59        |
| C. Emboutissage avec fils-capteurs.....   | 61        |
| 1.5 Conclusion de la solution AUTO-MAPICC .....   | 71        |
| <b>2. Solution TRUCK-MAPICC pour l'application du transport routier .....</b>   | <b>71</b> |
| 2.1 Problématique du partenaire .....   | 71        |
| 2.2 Détail de la solution développée TRUCK-MAPICC .....   | 73        |
| 2.3 Étude de la jonction entre une pièce en matériau composite et une pièce en métal.....                                     | 75        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>2.4</b> | <b>Influence de l'armure de surface du renfort tissé 3D interlock chaîne lors d'essais d'arrachage d'un assemblage composite/métal.....</b> | <b>83</b>  |
| <b>2.5</b> | <b>Conclusion de la solution TRUCK-MAPICC .....</b>   | <b>86</b>  |
| <b>3.</b>  | <b>Solution RAIL-MAPICC pour l'application ferroviaire.....</b>   | <b>87</b>  |
| <b>3.1</b> | <b>Problématique du partenaire .....</b>  | <b>87</b>  |
| <b>3.2</b> | <b>Solution développée .....</b>  | <b>88</b>  |
| A.         | Élaboration des préformes et consolidation .....  | 88         |
| B.         | Caractérisations mécaniques .....   | 93         |
| <b>3.3</b> | <b>Étude de la dépendance entre paramètres géométriques à différentes étapes de fabrication de la pièce composite.....</b>                  | <b>98</b>  |
| A.         | Influence de l'architecture d'une préforme sur sa géométrie .....   | 98         |
| B.         | Dépendance entre les paramètres géométriques de la préforme et le procédé de mise en forme et de consolidation.....                         | 101        |
| <b>3.4</b> | <b>Conclusion sur la solution RAIL-MAPICC .....</b>   | <b>104</b> |
| <b>4.</b>  | <b>Solution AERO-MAPICC pour l'application Aéronautique.....</b>  | <b>104</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Problématique du partenaire .....</b>  | <b>104</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Solution développée .....</b>  | <b>105</b> |
|            | Élaboration des préformes.....  | 105        |
| <b>4.3</b> | <b>Étude du pliage de structures tissées 3D interlocks chaînes carbone.....</b>   | <b>109</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Conclusion sur la solution AERO-MAPICC.....</b>  | <b>115</b> |
| <b>5.</b>  | <b>Conclusions du chapitre.....</b>   | <b>115</b> |

# 1. Solution AUTO-MAPICC pour l'application automobile

## 1.1 Problématique du partenaire

Le partenaire MECAPLAST, étant un sous-traitant du secteur automobile, celui-ci recherche des coûts de fabrication relativement faibles ainsi que des cadences de production assez importantes pour faire face aux grandes séries demandées. Afin de répondre à ces contraintes, les solutions (AUTO-MAPPIC) proposées, sur la pièce support choisie par ce partenaire (carter d'huile, représenté Figure 28) s'appuient sur les concepts suivants :

- Le développement de préformes 3D de sorte à accélérer les temps de mise en œuvre, par la réalisation de préformes multicouches renforcées dans l'épaisseur (tissées 3D Interlocks chaînes [62]), mais également par le choix de composites thermoplastiques afin de minimiser les temps de consolidation (thermoc compression ou thermoformage)
- Le choix, en entrée matière, de fils comelés alliant tenues mécaniques, coût raisonnable et tissabilité de préformes 3D.

Sur ces concepts, un fil comelé verre E-polypropylène a été proposé par un des partenaires du programme. Ce polymère thermoplastique présent au sein du fil, sera plus rapidement diffusé au sein du renfort lors de l'étape de thermoformage. Les caractéristiques physiques, chimiques et thermiques du fil comelé à base de fibres de verre E et de polypropylène sont précisées dans le Tableau 2. Les premiers essais de consolidation sous presses chauffantes de préformes élaborées à base de ce fil comelé ont conduit à optimiser les paramètres pression-température, comme représenté en Figure 29.

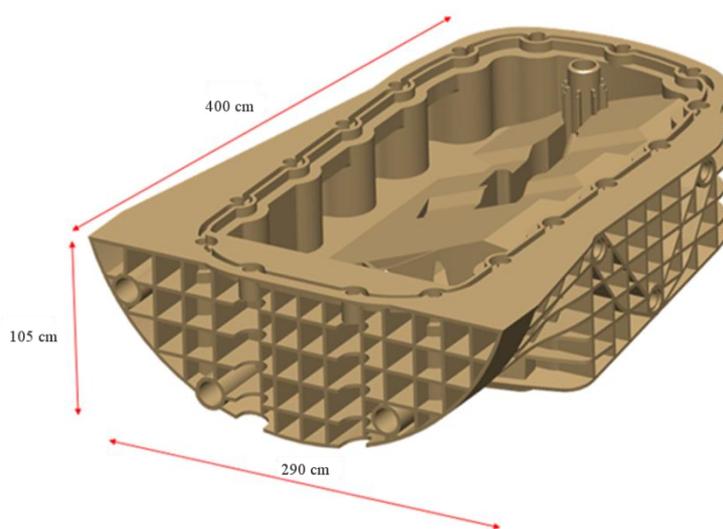


Figure 28 : Solution composite AUTO-MAPICC sur géométrie de type carter d'huile

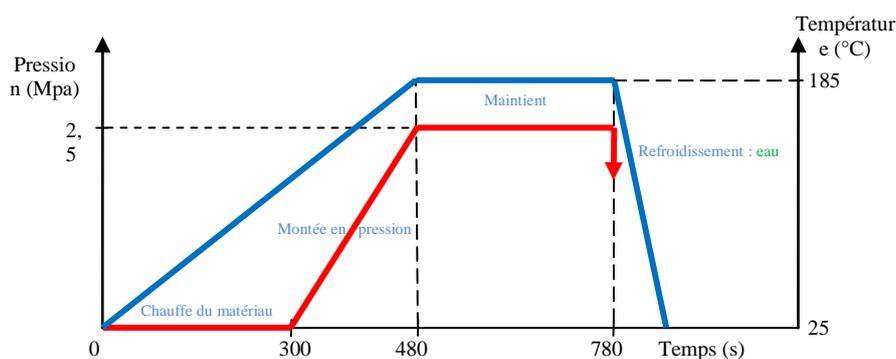


Figure 29 : Courbes de température et de pression du cycle de cuisson de la solution AUTO-MAPICC

Afin d'optimiser l'étape de tissage des structures interlocks multi-couches à base de fils comelés, une première option a consisté à produire des préformes selon une architecture unique et homogène en termes de consommation de fils de chaîne.

Dans un second temps, afin de déterminer l'architecture la plus adaptée à l'étape de mise en forme par emboutissage, différentes familles d'architectures tissées 3D interlocks chaînes ont été testées.

Associé à l'élaboration des préformes 3D et de l'étude de leur déformabilité lors de la mise en forme, le développement de moyens de mesure des déformations, par le biais de fils capteurs innovants, a été intégré, et ce afin de qualifier la capacité de déformation des architectures des tissus 3D interlocks chaînes.

### 1.2 **Élaboration de préformes et présentation du banc de mise en forme**

Afin d'obtenir une production des préformes la plus simple possible, il a été décidé de réaliser une préforme à base d'une structure tissée 3D interlock chaîne comportant le même rapport d'armure et les mêmes densités de fils sur l'ensemble de la préforme. Pour respecter la valeur de l'épaisseur de la pièce composite demandée, le tissu 3D interlock chaîne a été tissé avec 4 couches. Les différentes études [74] ont permis de mettre en évidence le bon comportement à la mise en forme de la structure 3D interlock chaîne couche à couche dont l'armure de surface est à base d'un sergé 4-4 contredit se basant sur une structure en sergé en alternant cordon à droite et cordon à gauche et en inversant l'effet d'un rapport d'armure à l'autre, comme représenté en Figure 30.

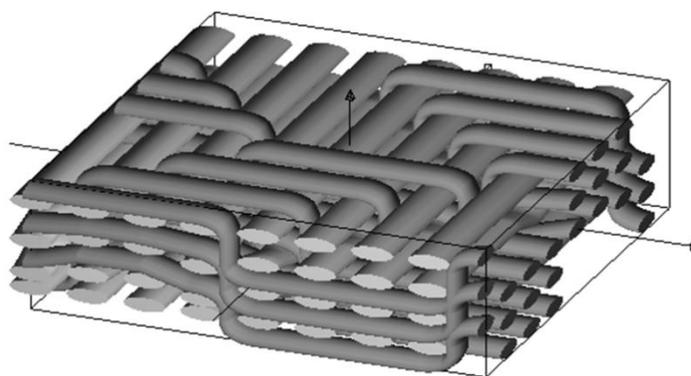


Figure 30 : Architecture du tissu 3D interlock chaîne retenue pour la solution AUTO-MAPICC

Le Tableau 2 résume les principales propriétés finales du tissu 3D interlock chaîne réalisé pour l'application automobile. Le fil utilisé n'a pas été retordu pendant la préparation au tissage.

Tableau 2 : Caractéristiques du fil utilisé ainsi que de la structure tissée développée pour l'application AUTO-MAPICC

| Fil                                       |                         | Préforme  |                          |
|---|-------------------------|---|--------------------------|
| Titre                                     | 842 Tex                 | Densité de surface<br>Chaîne/Trame (colonnes /cm) | 4 / 3                    |
| % Verre E / % Polypropylène<br>(% volume) | 46 % /<br>54 %          | Nombre de couches                                 | 4                        |
| Diamètre fibres<br>Verre/polypropylène    | 14,5 µm<br>/ 43,0<br>µm | Masse surfacique                                  | 3500<br>g/m <sup>2</sup> |
| Module de Young                           | 10,5 GPa                | Épaisseur de la préforme                          | 4 mm                     |
| Élongation à la rupture                   | 3,22 %                  |   |                          |
| Ténacité                                  | 20,78<br>cN/tex         |   |                          |

Le banc d'emboutissage du GEMTEX [74-78] présenté en Figure 31, permettant la mise en forme à température ambiante, a été utilisé pour l'analyse de la déformabilité des préformes réalisées.

Ce banc d'emboutissage est composé :

- d'un vérin pneumatique d'emboutissage, sur lequel des poinçons de formes différentes peuvent être fixés. Ce vérin est doté d'une interface d'acquisition, permettant de suivre l'évolution de la force d'emboutissage.
- de quatre vérins portant un cadre métallique de forme carré permettant la répartition de la pression sur le serre flan qui la transmet à son tour sur l'ensemble de la préforme. L'effort de serre flan sur cette machine est réglable. Dans le cas de nos études, la pression du serre flan a été réglée à 0,2 MPa pour l'ensemble des essais.

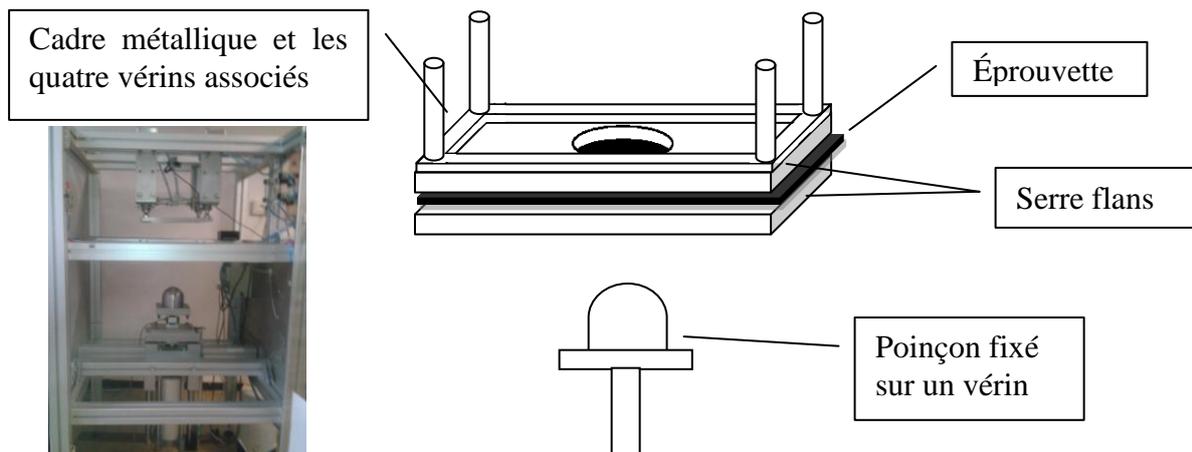


Figure 31 : Système d'emboutissage des préformes textiles à température ambiante

La spécificité de cette machine est que le serre flan est transparent (plaque en PPMA) et que la contre-matrice est ouverte. Cela permet d'observer le renfort lors du procédé à l'aide de mesures sans contact par prises d'images à partir d'une caméra située au dessus du banc. Le traitement de ces images permettant de déduire la mesure de quantités globales telles que l'avalement, mais également locales comme l'angle de cisaillement sur les faces supérieures de la préforme.

Les poinçons utilisés sont de forme hémisphérique ou de gousset comme cela est présentés en Figure 32, ce qui permet d'analyser la déformabilité sur des formes de complexités différentes pour les structures tissées.

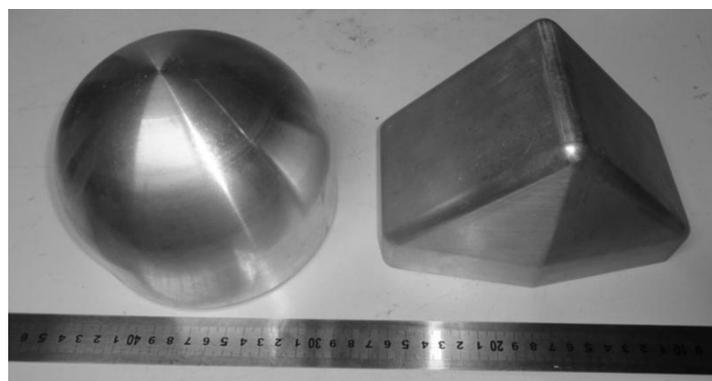


Figure 32 : Poinçons utilisés : (gauche) poinçon de forme hémisphérique - (droite) poinçon en forme de gousset

La déformabilité des préformes s'appuie sur un certain nombre de paramètres, mesurés et quantifiés lors du procédé. Concernant la mise en forme des renforts minces, ces paramètres caractérisent principalement [36,69,70,79] le comportement membranaire, par l'avalement de

matière, mais également par les angles de cisaillement entre fils de chaîne et fils de trame. Les études [74,80-84] portant sur la mise en forme des préformes épaisses et/ou multiplis ont montré la nécessité de quantifier également d'une part, les variations d'épaisseur et d'autre part, le glissement entre les couches.

Ces différents paramètres permettent de quantifier la capacité de la préforme à se déformer et permettent de comparer les différentes structures de manière objective. Ils sont par ailleurs utilisés dans la littérature car ils sont source des corrélations avec des résultats obtenus par simulations numériques [77,78,85-93]. On reporte ci-dessous la démarche expérimentale menée afin de mesurer ces paramètres.

L'avalement de matière, représenté en Figure 33, correspond à la longueur de matière « avalée » au sein de la préforme pendant l'étape d'emboutissage. Ce paramètre est mesuré dans les sens chaîne et trame par l'intermédiaire de prises de vues centrées et perpendiculaires à la surface du point central de la préforme. Les profils des formes obtenues peuvent ainsi être reconstitués.

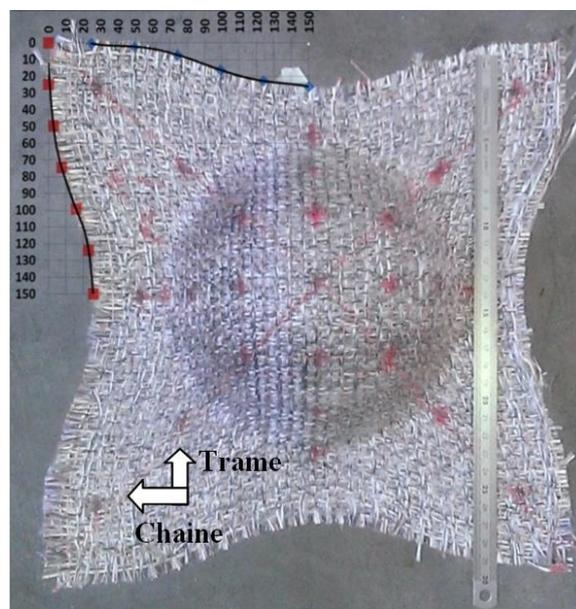


Figure 33 : Mesure de l'avalement lors d'un essai de mise en forme d'une structure tissée 3D interlock chaîne

Les angles de cisaillement entre les fils de chaîne et trame, dont le mode de mesure est représenté en Figure 34, ont été calculés en surface de la structure tissée. Les angles entre les fils de chaîne et les fils de trame ont été mesurés pour chaque point à l'aide de la mesure sans contact. Pour chaque préforme, une grille régulière composée de fils de couleur rouge appelés fils traceurs a été intégrée en surface lors du tissage, permettant de repérer des points particuliers sur la préforme correspondant à un nombre entier de rapport d'armure, mais aussi de repérer les directions de fils. Pour chaque point, les angles opposés ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) entre les fils de chaîne et trame ont été mesurés et moyennés puis l'angle de cisaillement ( $\gamma$ ) a été déduit relativement à l'angle initial entre les fils ( $90^\circ$ ).

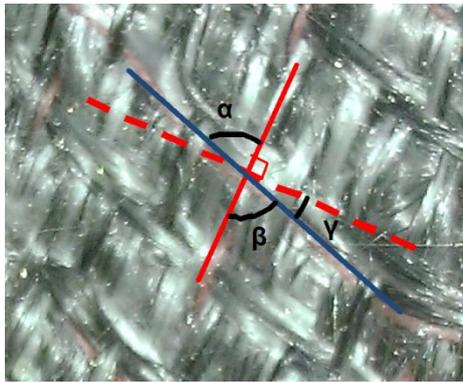


Figure 34 : Mesure de l'angle de cisaillement en surface de la structure tissée

Une carte des angles de cisaillement peut alors être établie, à la suite de ces mesures, comme représenté Figure 35.

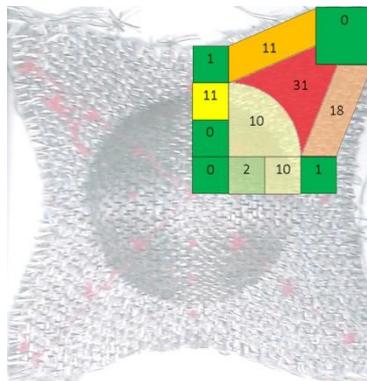


Figure 35 : Carte des angles de cisaillement mesurés sur une préforme

La spécificité des structures multicouches nécessite des mesures de quantités hors-plan, comme l'épaisseur. Les mesures des épaisseurs ont été effectuées sur les différentes zones des préformes par l'intermédiaire de coupes réalisées dans les sections. Pour réaliser ces mesures, il est essentiel de figer les préformes afin qu'elles conservent leur forme après le démoulage. Pour cela, un agent chimique de fixation a été pulvérisé en surface de la préforme. Afin de pouvoir accéder facilement aux zones à mesurer sur les préformes, des découpes préalables ont été réalisées comme cela est présenté en Figure 36.

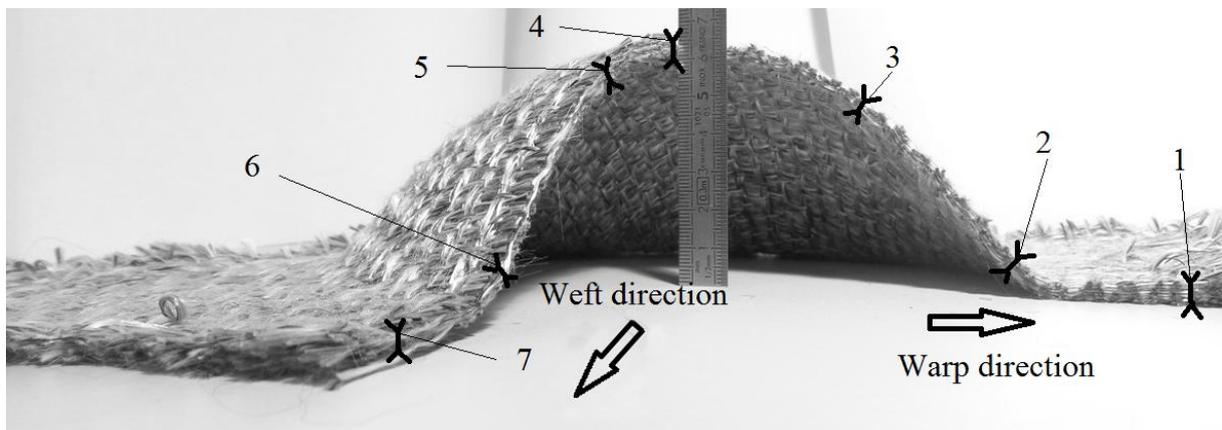


Figure 36 : Mesure de l'épaisseur en différents points de la structure tissée déformée

Le glissement entre les deux couches extérieures a été mesuré par l'intermédiaire de prises de vues des faces supérieures et inférieures (en contact avec le poinçon) des préformes. Pour ce paramètre, comme schématisé en Figure 37, la mesure de la différence de position, de points

placés symétriquement par rapport au centre de la préforme sur les surfaces extérieures (identiques à ceux utilisés pour les autres mesures). Ces positions sont analysées avant et à l'issue du procédé.

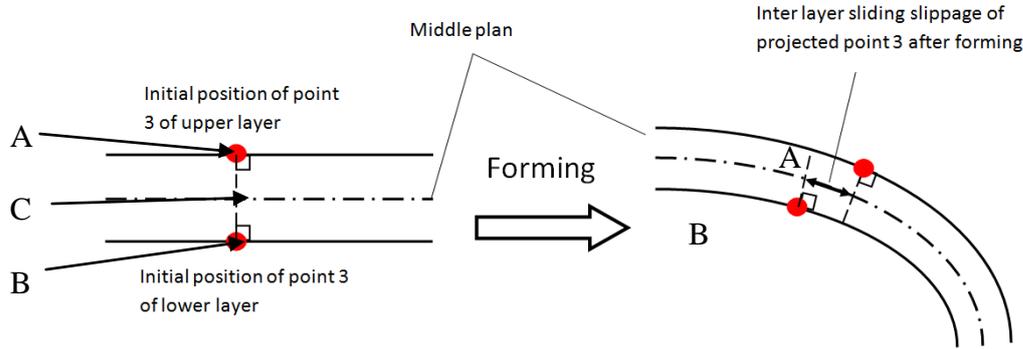


Figure 37 : Mesure du glissement entre les deux couches extérieures

La mesure de la position des points après la mise en forme s'appuie sur leur projection dans le plan défini par la préforme avant la mise en forme. Afin d'obtenir la position spatiale de ces points, il faut alors tenir compte de la géométrie du poinçon et de sa position pour calculer la troisième dimension manquante.

Par exemple, pour un poinçon hémisphérique de rayon  $r$  et avec l'origine confondue avec le centre de l'hémisphère et une préforme d'épaisseur  $e$ , la formule utilisée pour retrouver la position suivant l'axe  $Z$  manquante, est décrite par l'Equation 1:

$$Z = \sqrt{R^2 - X^2 - Y^2} \quad \text{Eq. 1}$$

avec :

$X$  et  $Y$ , la position dans le plan horizontal de la projection du point,

$R$ , le rayon de l'hémisphère formé par la préforme ( $R = r$  pour la face inférieure ou  $R = r + e$  pour la face supérieure, avec  $e$  l'épaisseur).

Une fois la position spatiale des points connue, l'ensemble des points est projeté sur le plan médian de la structure mise en forme afin de mesurer la distance qui les sépare.

Pour une forme hémisphérique, pour avoir la projection  $(X', Y', Z')$  du point  $C$  de coordonnées  $(X, Y, Z)$  sur le plan médian de la préforme mise en forme,  $r$  étant le rayon du poinçon et  $e$  étant l'épaisseur de la préforme, la mesure de la distance entre les deux points est :

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = k * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 2}$$

avec  $k = \left(1 + \frac{e}{2 \times r}\right)$  pour un point se situant sur la face inférieure,

Ou  $k = \left(1 - \frac{e}{2 \times (r + e)}\right)$  pour un point se situant sur la face supérieure.

Enfin, pour calculer le glissement entre les deux couches extérieures, il faut calculer la distance entre les projections sur le plan moyen des points  $A = (X'_a, Y'_a, Z'_a)$ ,  $B = (X'_b, Y'_b, Z'_b)$  respectivement sur la face inférieure et supérieure de la préforme après mise en forme. Cette distance est donnée par l'équation 3 :

$$D = \sqrt{(X'_b - X'_a)^2 + (Y'_b - Y'_a)^2 + (Z'_b - Z'_a)^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Et correspond au glissement entre les deux couches extérieures.

La mesure des déformations le long de fils (ou mèches) de structures de renforts lors de la mise en forme a donné lieu à quelques études expérimentales [94], menées à l'aide de la mesure sans contact par corrélations d'images.

Dans le cadre de cette étude, et afin de quantifier l'homogénéité de ces déformations, y compris dans les couches intermédiaires de l'Interlock tissé, non accessibles par les prises d'images, des fils capteurs ont été intégrés au sein des structures tissées 3D interlocks chaines. L'élaboration de ces fils et leur intégration dans les préformes 3D fait l'objet du paragraphe suivant.

### 1.3 Elaboration et intégration des fils capteurs dans les préformes 3D

Différents types de capteurs pouvant mesurer la déformation d'un renfort fibreux existent, tels que :

- les jauges de déformations, dont l'allongement d'un fil conducteur, se traduit par l'augmentation de sa résistance électrique.
- Les capteurs capacitifs, dont l'allongement produit une déformation d'un circuit électrique en forme de « peigne » et modifie sa capacitance.
- Les capteurs à fibres optiques, dont l'allongement de la fibre optique modifie sa géométrie et ainsi le signal de sortie.
- Les capteurs piézoélectriques, dont la modification de leur géométrie génère dans les fibres piézoélectriques un courant électrique.
- Les capteurs piézo-résistifs, dont l'évolution des dimensions de ces capteurs fait varier leur résistance électrique.

Cette dernière catégorie de capteurs a été étudiée et mise au point au GEMTEX [50,95-98]. Récemment, une enduction piézo-résistive a été développée sur des fils à base de multifilaments de fibres de verre E continus [98]. Cette enduction permet de recouvrir n'importe quel type de fil et de le transformer en capteur. L'intérêt majeur est de pouvoir utiliser les mêmes fils que pour le tissage de la préforme est de limiter la perturbation de la mesure, car l'enduction en question est très extensible par rapport au fil seul. En revanche, l'enduction peut perturber les phénomènes liés à la friction entre les fils. Il convient donc d'intégrer les fils capteurs dans les structures en quantité suffisante pour l'homogénéité de la mesure mais en nombre limité afin de ne pas perturber le comportement de ces structures lors de la mise en forme.

Afin de caractériser le comportement à la déformabilité du renfort textile tridimensionnel, la solution préconisée consiste à intégrer ces capteurs d'allongement au sein de la structure tissée. Ces capteurs permettent de réaliser des mesures directement dans les conditions d'essais avec le système de mise en forme. Les capteurs ont également l'avantage de pouvoir être positionnés dans les deux directions principales de la structure tissée. Cependant leur fabrication repose sur un protocole expérimental, ce qui nécessite de tester les fils capteurs, à la fois seuls afin d'obtenir une loi de comportement fiable de l'enduction en traction mais également au sein des structures tissées.

Pour la fabrication des fils capteurs, les travaux de Nicolas Trifigny [99] ont été utilisés en exploitant la solution piézo-résistive déjà étudiée. La solution enduite est une solution aqueuse de particules conductrices commercialisée par Bayer sous le nom de Clévios™. Les particules sont composées d'un copolymère conducteur de poly (3,4-éthylènedioxythiophène) dénommé PEDOT, polymère intrinsèquement conducteur, et de poly (styrènesulfonate) ou PSS un agent antistatique facilitant la solubilisation du PEDOT dans l'eau.

Il est important lors de la conception de l'enduction de tenir compte du phénomène de percolation électrique dû au principe physique à l'œuvre. La mesure de la résistivité en fonction du taux de charges conductrices met en évidence trois zones distinctes (Figure 38).

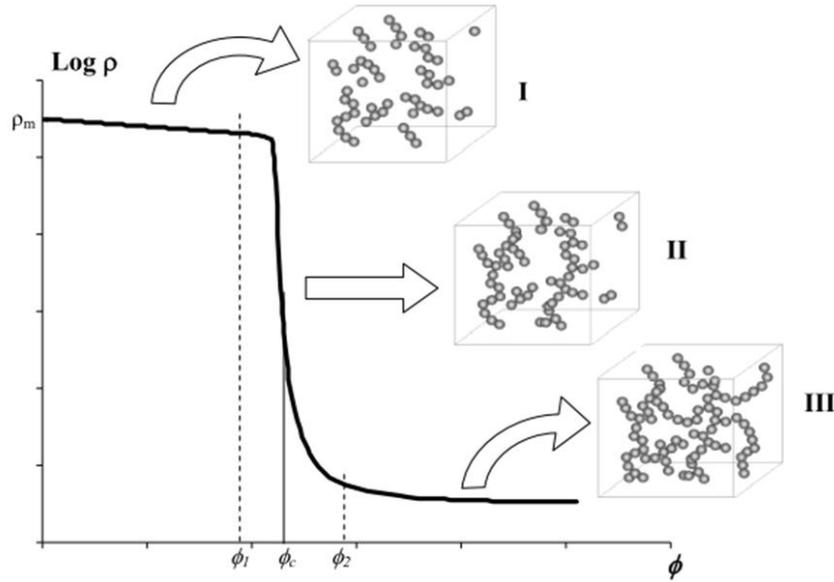


Figure 38 : Évolution du logarithme de la résistivité d'une solution conductrice en fonction du taux de charge ; représentation de l'arrangement des particules conductrices selon la zone [100]

Pour les faibles taux de charge, sur l'axe des abscisses, on observe une diminution régulière et lente de la résistance de la solution, qui s'explique par le faible nombre de particules, insuffisant pour avoir une bonne conduction.

Vient ensuite une chute rapide de la résistivité : à ces taux de charges, les particules sont suffisamment nombreuses pour qu'il y ait conduction par contact direct ou par effet tunnel. C'est ce changement brusque qui est nommé « seuil de percolation ». Enfin après ce seuil de percolation on constate une asymptote dont la valeur correspond à la résistivité de la charge conductrice seule, car les particules sont tellement nombreuses qu'elles forment un réseau conducteur bien établi.

Afin de créer un capteur suffisamment sensible, la concentration en charge conductrice est choisie en général au milieu du seuil de percolation, ainsi la variation de l'allongement modifie de manière importante la conductivité de la solution en faisant évoluer les contacts électriques.

Le protocole de réalisation des fils capteurs repose sur trois enductions différentes à réaliser afin de garantir une sensibilité de mesure suffisante pour de faibles valeurs d'allongement. Les fils capteurs sont réalisés sur la base du fil comélé verre/polypropylène utilisé pour cette application automobile. Une première enduction de latex permet d'homogénéiser la mèche et sert de substrat à la deuxième enduction. La seconde enduction est composée de plusieurs couches sensibles de PEDOT : PSS. La troisième couche est à nouveau une couche de Latex. Cette dernière enduction, facultative, permet de protéger le capteur vis-à-vis des frottements entre fils ainsi qu'avec les éléments des métiers à tisser lors du processus de tissage afin de limiter l'endommagement des fils capteurs, mais aussi afin d'éviter d'éventuels contacts électriques entre les différents fils capteurs.

La solution de latex ne nécessite pas de préparation, elle est utilisée dans sa formulation initiale (latex Appretan N96100), commercialisée par Clariant, contenant un pourcentage de produit sec en solution aqueuse.

La solution de PEDOT : PSS doit être mélangée à du latex qui sert de renfort mécanique au PEDOT : PSS trop cassant. La solution commerciale (Clevios 105D fabriqué par Heraeus) contient 1,3 % de charge en polymère conducteur intrinsèque en phase aqueuse.

Afin de réaliser une enduction avec une conductivité suffisante, un taux de charge de 20 % a été retenu [98]. Après avoir versé le volume de PEDOT : PSS dans un b cher sous agitation, le latex est ajouté progressivement à l'aide d'une pipette, puis, il est nécessaire de laisser le mélange s'homog niser sous agitation avant de s'en servir.

Pour réaliser les capteurs, les différentes étapes à suivre sont :

- de délimiter une longueur de fil à enduire avec le latex, en ajoutant aux extrémités du film aluminium afin d'obtenir des bords d'enduction nets en veillant à ce que les bords d'aluminium soient réguliers et fins.
- de poser le fil entre deux parois, avant l'enduction, afin d'éviter tout contact et que l'exc dent d'enduction puisse s'égoutter. Une fois les fils positionnés, la longueur prévue de fil peut être enduite avec le latex à l'aide d'un pinceau. La Figure 39 donne un aperçu de l'aspect des fils après cette étape.



Figure 39 : Fils comm l s enduits de latex pour la réalisation de fils capteurs

- Une fois le latex sec, il faut enduire au pinceau le fil avec la solution latex/PEDOT : PSS préparée auparavant sur une longueur, inférieure à la longueur enduite de latex afin de ne pas retrouver de PEDOT : PSS directement sur les fibres. La Figure 40 donne un aperçu de l'aspect des fils après cette étape.



Figure 40 : Fils comm l s enduits avec la solution de latex : PEDOT-PSS

- Afin de relier le capteur au système d'acquisition des mesures, des connectiques doivent être fabriquées aux extrémités des enductions conductrices. Celles-ci sont fabriquées par enroulement d'un fil fin de cuivre recouvert d'étain. La largeur de la connectique est importante, elle doit être minimale pour que son extension durant les essais soit minimale. Un effort de serrage doit être appliqué afin de ne pas faire glisser le fil capteur et assurer un bon contact électrique avec la couche piézo-résistive du fil capteur. La Figure 41 donne un aperçu de l'aspect de la connectique après cette étape.



Figure 41 : Aperçu de l'enroulement entre le fil commélé capteur et le fil de cuivre

- Puis, il faut à nouveau enduire le fil capteur avec la solution de latex/PEDOT : PSS entre les connectiques et enduire la connectique d'une goutte de solution de PEDOT : PSS avec le pinceau pour assurer le contact électrique avant de laisser sécher.
- Pour finir, si l'on désire une couche de protection, on peut réaliser une enduction par-dessus les autres enductions avec du latex et faire sécher avant de retirer le film aluminium. La couche de protection a été appliquée sur l'ensemble des capteurs utilisés lors de nos études. La Figure 42 donne un aperçu de l'aspect d'un fil capteur finalisé.



Figure 42 : Aperçu du fil capteur réalisé à base de fil commélé verre-polypropylène

Une fois les capteurs réalisés, une étape de calibration consiste à tester les fils sur un banc de traction qui mesurera leur allongement, auquel on ajoute un montage en sortie des capteurs afin de mesurer leur variation de résistance simultanément aux mesures du banc de traction présenté en Figure 43.

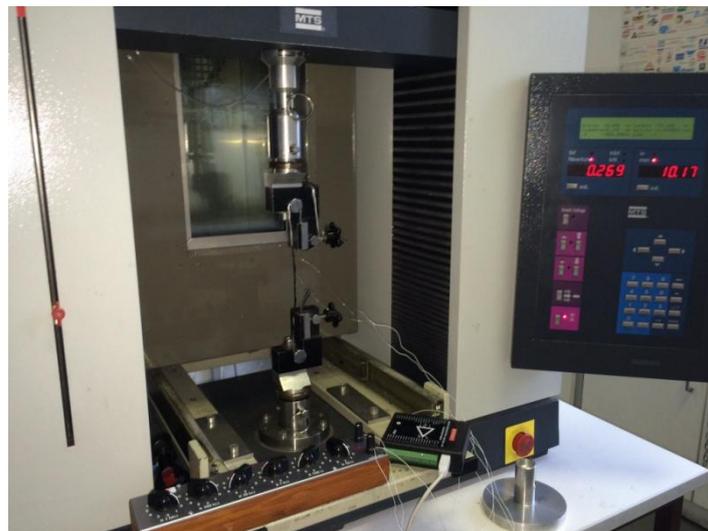


Figure 43 : Test de calibration des fils capteurs sur banc de traction

Les mesures électriques sur les fils capteurs sont réalisées à l'aide d'une carte d'acquisition Keithley KUSB-3100 et du logiciel de traitement correspondant QuickDAQ. Les mesures de tension aux bornes du capteur sont effectuées à travers un montage électrique de type pont diviseur de tension présenté à la Figure 44.

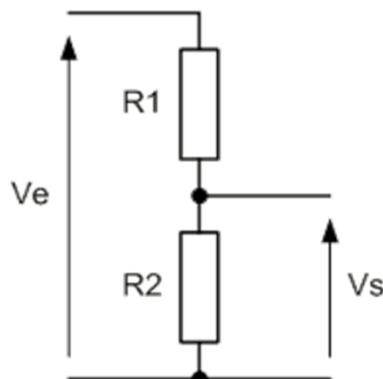


Figure 44 : Pont diviseur de tension

Sur la Figure 44, le fil capteur peut être assimilé à une résistance R2. La résistance R1 est une boîte à décades de résistances, permettant de choisir une valeur proche de la valeur R2 lorsque le fil n'est pas sollicité, et ainsi équilibrer le pont diviseur. Le montage est soumis à la tension  $V_e$ . En appliquant la loi d'Ohm aux bornes de R2, on peut calculer la résistance du capteur à partir de la tension  $V_s$  mesurée par la carte d'acquisition à l'aide de l'équation

$$R_2 = R_1 \times \frac{V_s}{V_e - V_s} \quad \text{Eq. 4}$$

Une série de mesures préalable montre que les connectiques et les fils de connexion représentent une résistance de l'ordre de 1 à 2  $\Omega$ , ce qui est totalement négligeable par rapport à la résistance initiale du capteur supérieure à 10k $\Omega$ .

Lors des essais de calibration, l'interface du logiciel présentée en Figure 45 illustre la variation du signal électrique mesurée avec la variation de l'effort appliqué sur le fil capteur.

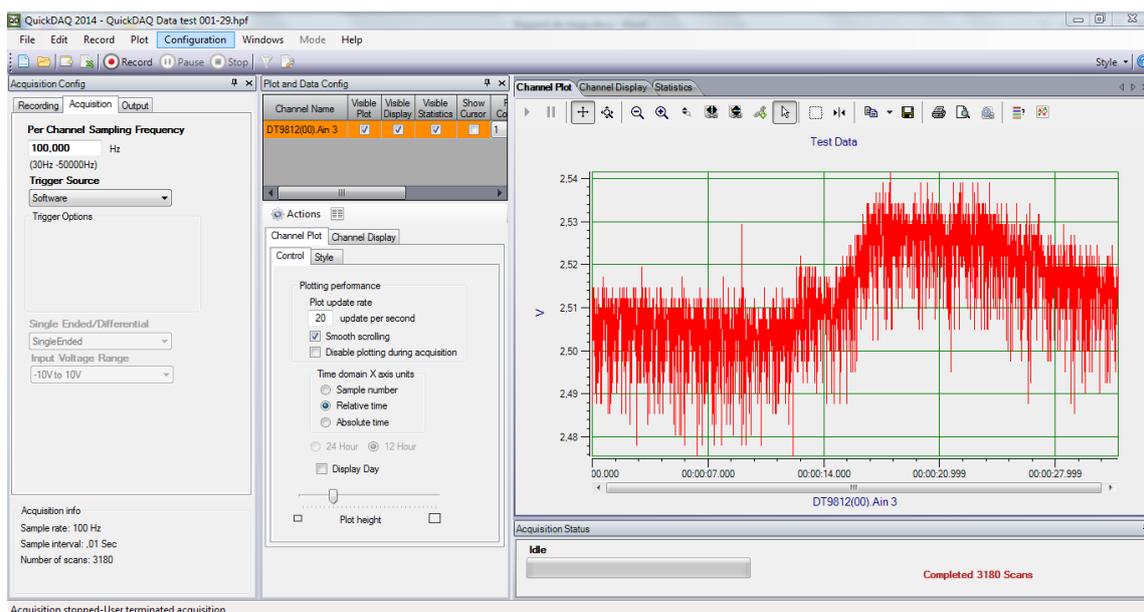


Figure 45. Interface du logiciel d'acquisition QuickDAQ

La fréquence d'échantillonnage peut être sélectionnée entre 30 Hz et 50 000 Hz, mais le bruit de mesure augmente considérablement avec la fréquence d'échantillonnage. De manière

générale, dans le cadre de ce projet, une fréquence de 1 000 Hz est choisie, afin de filtrer le bruit de mesure par moyenne jusqu'à atteindre une fréquence de 10 Hz correspondant à celle du banc de mesure mécanique.

Afin d'obtenir la loi de comportement des capteurs, les courbes de résistance relative  $\frac{R-R_0}{R_0}$  du capteur en fonction de l'allongement  $\frac{L-L_0}{L_0}$  appliqué au fil sont déterminées comme le présente la Figure 46. Nous avons sélectionné la résistance relative pour s'affranchir de la valeur de résistance initiale des capteurs pour constituer la loi de comportement, car la résistance initiale des capteurs peut être sensible au protocole expérimental de production manuelle des fils capteurs. Ensuite, pour obtenir le comportement du fil capteur, on applique une régression linéaire à la courbe précédemment réalisée afin d'obtenir une équation polynomiale de degré 1. Un total de 29 essais électromécaniques sur banc de traction ont été réalisés afin d'obtenir la loi de comportement des capteurs qui a été séparée en 4 catégories en fonction de leur résistance initiale et moyennée sur l'ensemble des essais compris dans chaque catégorie.

Au final, la calibration des capteurs est effectuée par la détermination du Facteur K, équivalent des facteurs de jauge, reliant la variation de résistance relative à la variation d'allongement relatif. Cette loi suit l'équation Eq. 5. Au final, le Tableau 3 donne les valeurs de 1/K pour différentes plages de résistance initiales.

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \frac{1}{K} * \frac{R-R_0}{R_0} \quad \text{Eq. 5}$$

- Avec
- R, la résistance du capteur
  - R0, la résistance du capteur sans élongation, L
  - L, la distance entre les mors du banc de traction
  - L0, la longueur initiale entre les mors du banc de traction
  - K, Le facteur de jauge

Tableau 3 : Facteurs de jauge par plage de résistance initiale

| Plage de résistance initiale | 0 - 100 KΩ | 100 KΩ- 200 KΩ | 200 KΩ- 300 KΩ | 300 KΩ- 500 KΩ |
|------------------------------|------------|----------------|----------------|----------------|
| Facteur 1/K                  | 0,30       | 0,36           | 0,31           | 0,45           |

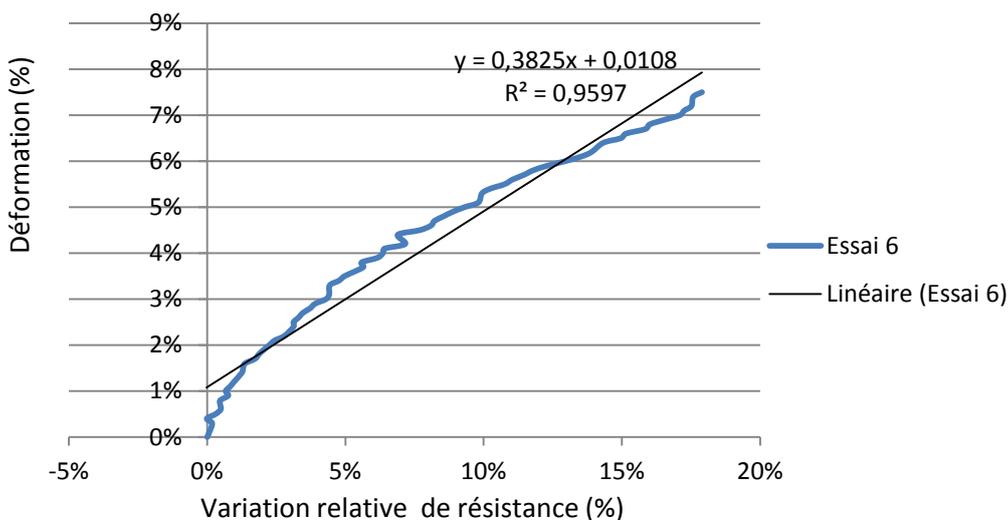


Figure 46 : Exemple de courbe d'étalonnage

Ces fils capteurs ayant été élaborés et qualifiés par leur facteur de jauge, ils ont été intégrés à certaines préformes tissées 3D interlock chaîne afin d'étudier la déformation des couches lors de la mise en forme.

#### 1.4 Étude de l'influence de différents paramètres des tissus 3D interlocks chaines sur la mise en forme par emboutissage.

Si le comportement des interlocks lors du préformage a fait l'objet de quelques études expérimentales et numériques [81,83,101] l'influence de l'architecture sur la déformabilité est assez peu étudiée. Dans le cadre de ce paragraphe la comparaison du comportement de différentes architectures de tissus 3D interlocks chaines telles que : le couche à couche, l'orthogonal et l'Interlock à angle défini en Figure 47 [68] a été effectuée lors de leurs mises en forme avec un poinçon de forme hémisphérique (Figure 32).

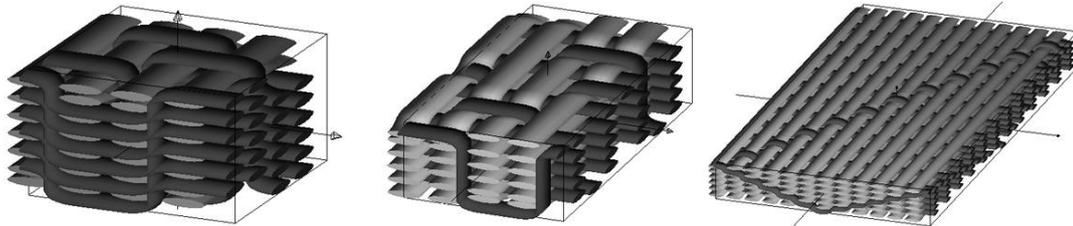


Figure 47 : Architectures des tissus 3D interlocks chaines (gauche) couche à couche ou O/L – (milieu) orthogonal ou O/T – (droite) angle ou A/T

Les architectures présentées en Figure 47 ont été tissées en utilisant du fil comélé verre/polypropylène présenté précédemment ainsi que des fils traceurs de couleur rouge placés régulièrement afin d'obtenir un quadrillage à la surface du tissu avec les mêmes caractéristiques présentées au Tableau 2. Le tissage de ces architectures a été réalisé sur une machine à tisser de prototypage adaptée au tissage 3D interlock chaîne. Cette machine, présentée à la Figure 48 possède 24 cadres permettant le tissage de structures comportant jusqu'à 24 évolutions de fils de chaîne différentes et possède également un système d'insertion des fils de trame sous la forme d'une lance unilatérale rigide. La spécificité de cette machine est que le tissu n'est pas enroulé en sortie de machine sur un rouleau toilier, mais reste immobile alors que la tête de travail est mobile et avance donc avec l'avancée du tissage.

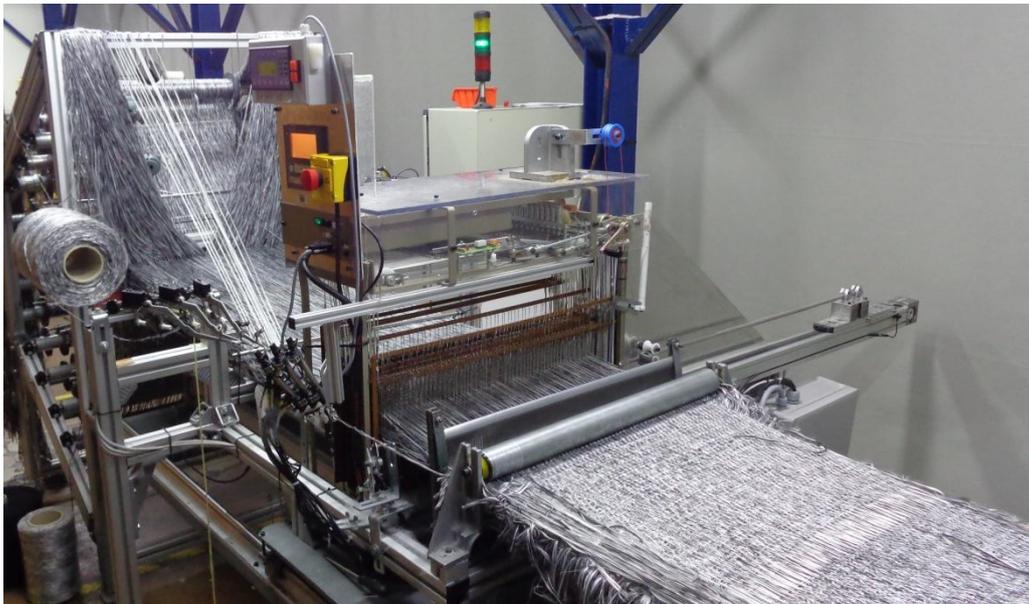


Figure 48 : Machine à tisser utilisée pour le tissage des architectures pour l'application AUTO-MAPICC

##### A. Emboutissage hémisphérique

Après la mise en forme, l'apparence des préformes permet d'obtenir des informations sur les défauts qui apparaissent à la surface de la préforme [94]. Ainsi, on observe sur les structures

interlocks d'angle des défauts en termes de régularité de densité ainsi que des problèmes d'apparition de boucles en surface, contrairement aux autres architectures qui ne présentent pas ce type de défauts. La Figure 49 présente l'aspect de surface de préformes après l'emboutissage pour chaque famille.



Figure 49 : Apparence des structures réalisées (gauche) angle – (milieu) couche à couche – (droite) orthogonal.

L'avalement est légèrement plus important en sens trame qu'en sens chaîne pour les architectures « couche à couche » et « orthogonale » comme le montre la Figure 50, mettant en évidence le caractère non symétrique de celles-ci. Ceci peut être expliqué par l'évolution des fils de chaîne dans ces structures : certains fils de chaîne de l'architecture interlock orthogonal passent « brutalement » d'une surface à l'autre, empêchant ainsi les glissements des fils dans la structure alors que les fils de trame peuvent évoluer plus facilement au sein de la structure par glissement. Dans l'architecture « couche à couche », cette différence est expliquée par le fait que tous les fils de chaîne lient deux couches successives. Ces différences d'architecture dans l'épaisseur impliquent un comportement non symétrique car l'avalement est différent en chaîne et trame.

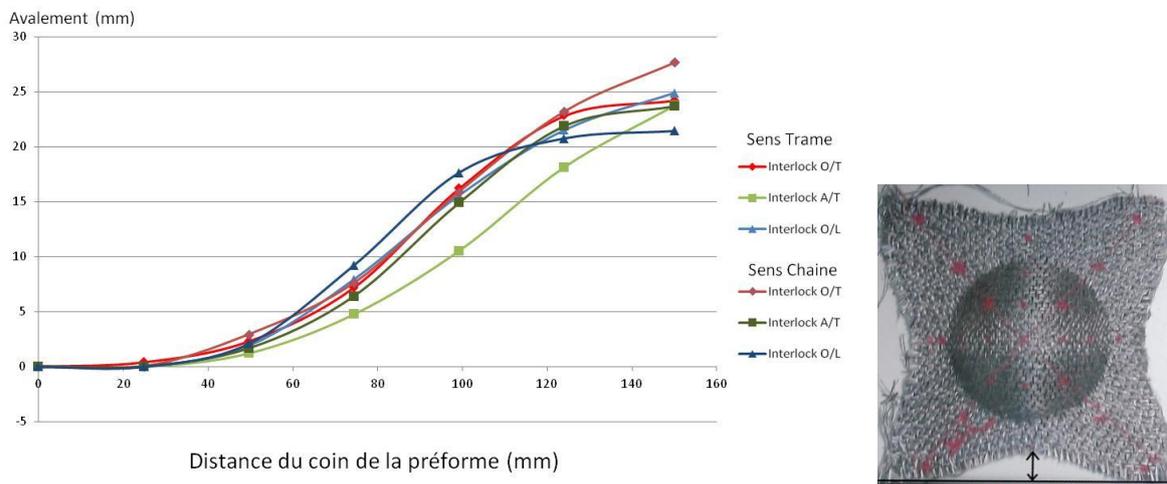


Figure 50 : Mesures de l'avalement des différentes structures (0 : coin de préforme)

Les mesures du glissement entre les couches extérieures des différentes architectures laissent apparaître une évolution plus importante dans le sens chaîne que dans le sens trame comme l'indique le graphique de la Figure 51. Ce résultat indique que la sollicitation des fils de chaîne lors de l'emboutissage amène à une déformation de la structure plus importante, que lorsque les fils de trame sont sollicités.

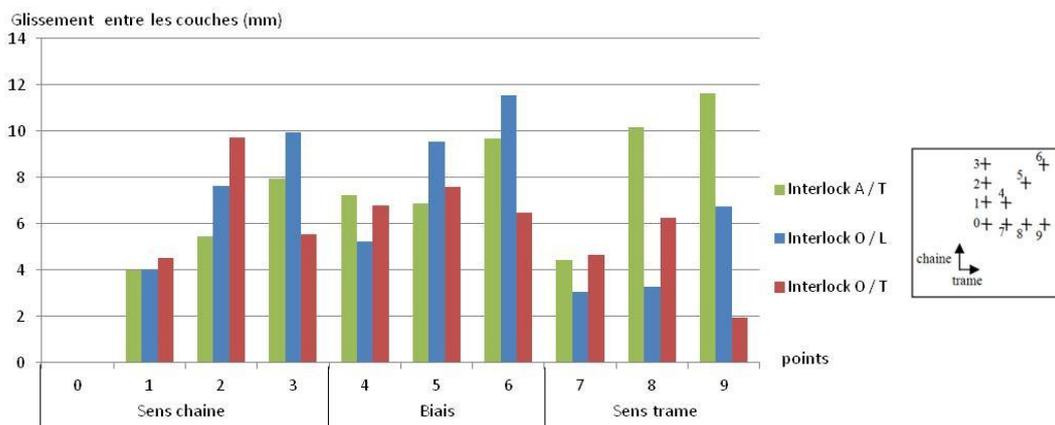


Figure 51 : Mesures du glissement entre les couches extérieures des différentes architectures

Au travers des mesures d'épaisseur sur la préforme, on remarque que les variations d'épaisseur les plus importantes se situent à l'endroit de l'entrée matrice. De plus, on observe que les variations d'épaisseur sont quasiment identiques en sens chaîne par rapport au sens trame. Enfin, on peut noter que les variations d'épaisseur sont les plus importantes pour la structure interlock orthogonal qui se trouve aussi être la structure la plus fine (épaisseur initiale moyenne de 3,1mm contre 3,5mm pour l'interlock d'angle et 3,7mm pour l'interlock couche à couche). Ceci indique une irrégularité en termes d'épaisseur sur cette préforme. L'ensemble de ces résultats est présenté à la Figure 52.

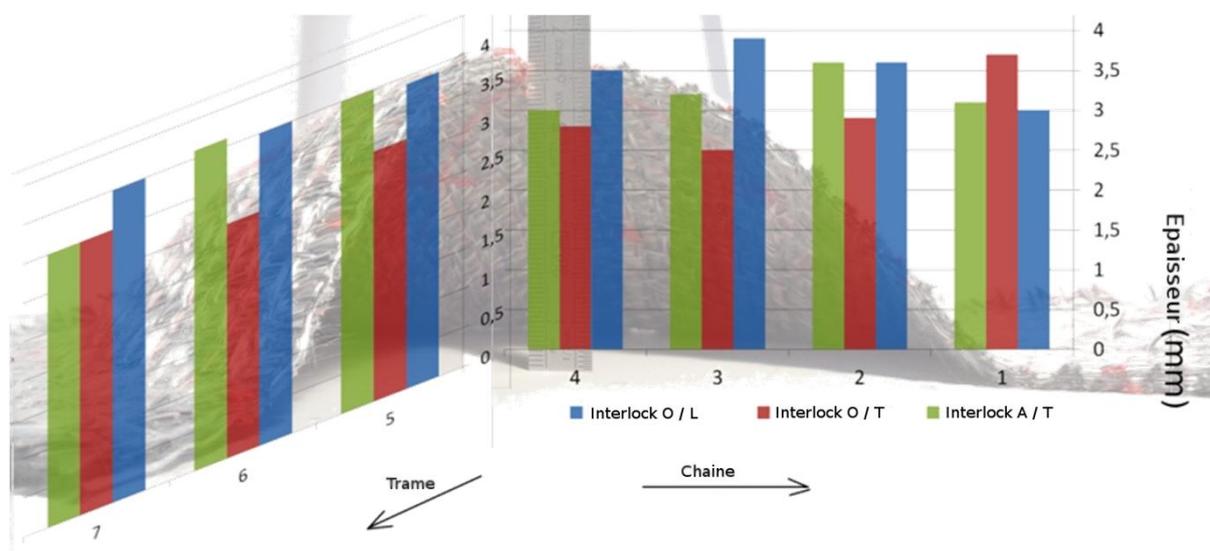


Figure 52 : Mesures d'épaisseur pour les différentes architectures.

Les angles de cisaillement mesurés sur la face supérieure montrent des valeurs maximales à l'entrée de l'hémisphère pour l'ensemble des architectures comme le montre la Figure 53. Les angles de cisaillement sont beaucoup plus faibles dans les autres zones de la préforme indiquant ainsi une faible variation d'orientation entre les directions chaîne et trame. Les mesures des angles de cisaillement ne permettent pas de différencier le comportement du sens chaîne par rapport au sens trame pour les trois architectures des tissus. Si l'on observe l'allure générale des angles de cisaillement, on se rend compte que les armures interlocks orthogonal et d'angle produisent de plus grands angles de cisaillement que l'armure couche à couche.

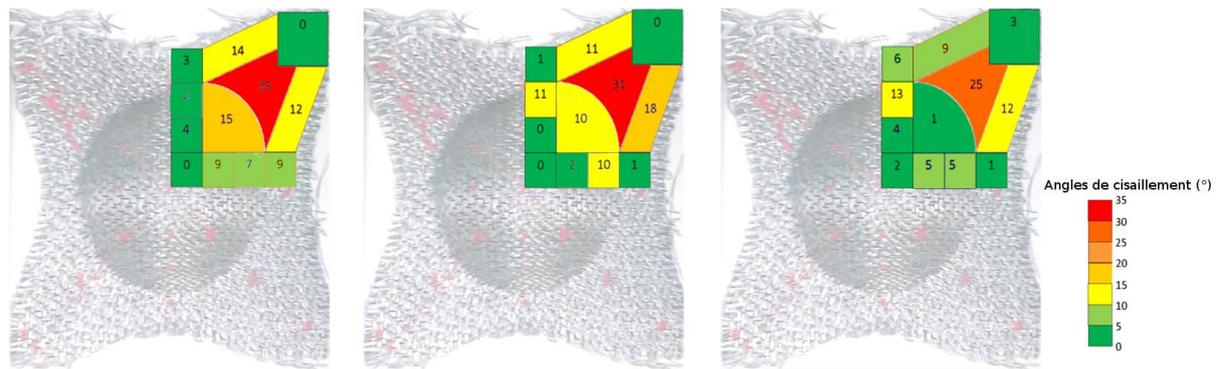


Figure 53 : Mesures des angles de cisaillement de surface pour les architectures interlocks (gauche), d'angle – (milieu), Orthogonal – (droite) couche à couche.

De par le fait que l'avalement de matière se produit de manière plus importante en sens trame qu'en sens chaîne, et que le glissement entre les couches extérieures est plus important en sens chaîne qu'en sens trame, les essais d'emboutissage avec le poinçon de forme hémisphérique indiquent que les fils de trame sont plus mobiles dans la structure que les fils de chaîne. En effet, l'avalement plus important des fils de trame indique qu'ils peuvent plus facilement glisser localement au sein de la structure sans la déformer globalement, de même que le glissement supérieur entre les deux couches extérieures en sens chaîne indique que les fils de chaîne entraînent une partie de la structure lorsqu'ils bougent.

Le manque d'homogénéité de la structure interlock d'angle révèle son comportement lors de la mise en forme par emboutissage. De même, les variations d'épaisseur de la structure interlock orthogonal indiquent une irrégularité de celle-ci dans l'épaisseur. En se basant sur un compromis entre les faibles valeurs des angles de cisaillement, de la régularité de l'épaisseur ainsi que de la structure en surface et un glissement un peu plus important que pour l'architecture interlock orthogonal, on peut conclure que l'architecture interlock couche à couche est donc la structure présentant un comportement à l'emboutissage plus adapté.

Après avoir sélectionné la famille des armures tissées 3D interlocks chaînes couche à couche comme se révélant la plus adaptée à la mise en forme, il a été nécessaire d'étudier l'influence de certains paramètres de ces structures tissées. Ces paramètres, tels que la longueur de flotté ou encore l'armure de surface, permettent d'identifier la structure la plus adaptée à la mise en forme avec la forme de poinçon la plus proche possible de l'application automobile du projet MAPICC3D. Le poinçon expérimental utilisé pour ces études est un gousset, présenté en Figure 32, dont les dimensions permettent de s'approcher de celles du moule de la pièce finale.

Dans un premier temps, pour tester l'influence de la longueur de flotté, une étude a été réalisée en comparant deux structures similaires, mais avec des longueurs de flotté sensiblement différentes. La première structure testée est la même armure couche à couche que précédemment. La seconde structure est une armure semblable à la première armure, mais avec des flottés doublés, passant de deux colonnes pour l'ancienne structure à quatre colonnes pour la seconde structure comme le montre la Figure 54.

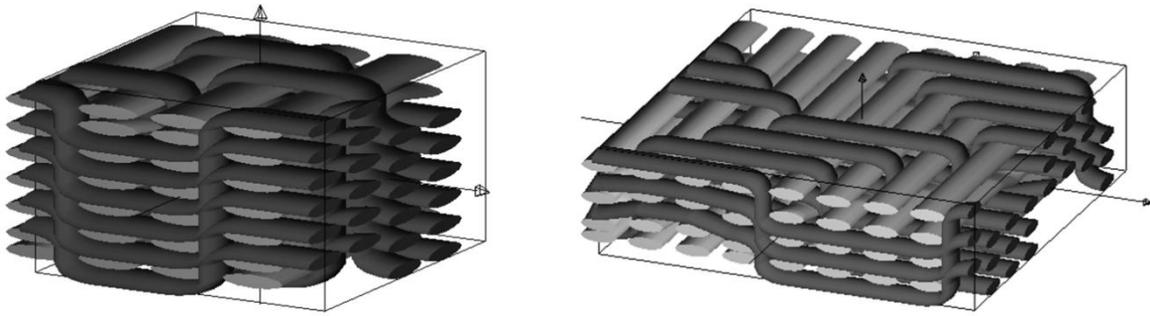


Figure 54 : Description des architectures interlocks couche à couche testées avec différentes armures de surface : (gauche) base satin de 4 (droite) base sergé 4-4 contredit [102]

### B. Emboutissage gousset

Après mise en forme sur le poinçon de géométrie gousset (Figure 32), on mesure les quantités expérimentales.

Comme le montre la Figure 55, on observe sur la nouvelle structure des valeurs d'avalement plus importantes que celles obtenues avec la première architecture, avec des valeurs maximales de 50 mm en sens chaîne et 22,4 mm en sens trame contre 43,6 mm en sens chaîne et 22,4 mm en sens trame pour la première armure ce qui permet de dire qu'il y a plus de matière présente dans la zone utile de la mise en forme. Les valeurs en sens chaîne sont plus importantes qu'en sens trame car le contour du poinçon est plus long dans le sens chaîne et nécessite donc plus de matière à avaler.

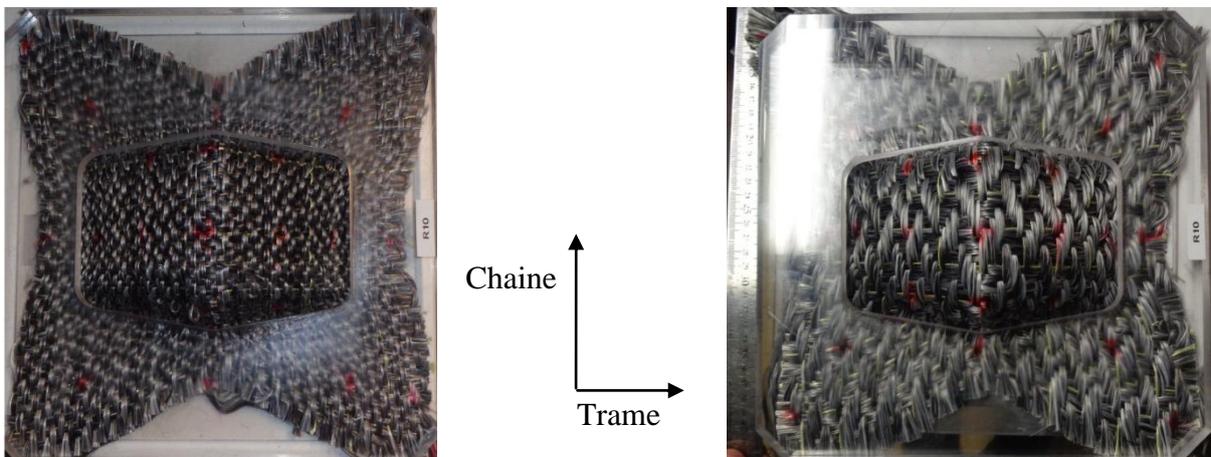


Figure 55 : Structures déformées avec le gousset : base satin de 4 à gauche et base sergé 4-4 contredit à droite

En observant les valeurs des angles de cisaillement de surface présentées à la Figure 56, la structure initiale conduit à des valeurs légèrement plus faibles que la nouvelle structure dans la zone utile de la mise en forme. Ces valeurs peuvent être expliquées par le fait des longueurs de flotté plus importantes pour la nouvelle structure que pour la première, ce qui laisse les fils relativement libres de cisailer dans la structure.

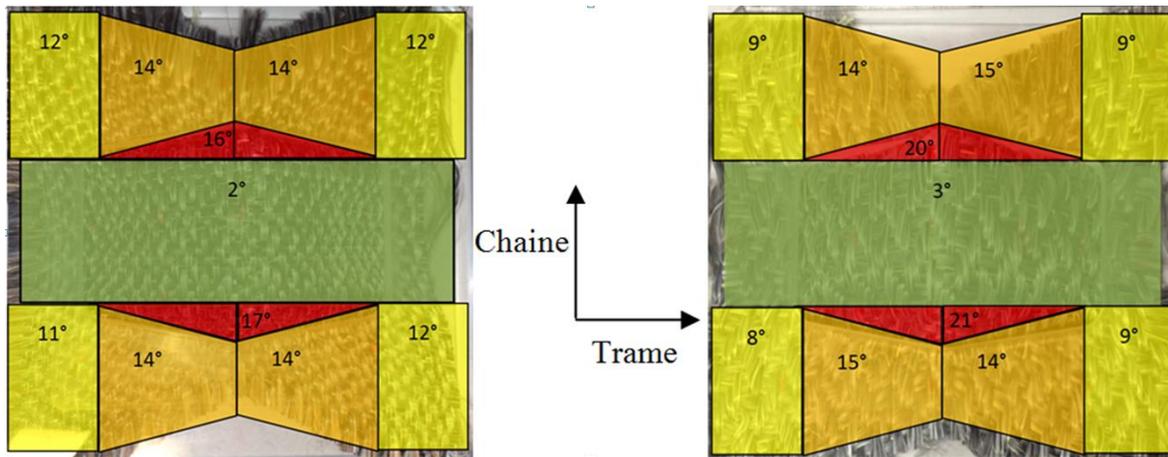


Figure 56 : Mesures des angles de cisaillement de surface pour les architectures interlocks couche à couche testées avec différentes armures de surface : (gauche) base satin de 4 (droite) base sergé 4-4 contredit [102]

La variation d'épaisseur est plus importante en sens chaîne qu'en sens trame car la forme du poinçon varie de manière plus importante dans le sens chaîne. On observe que la variation d'épaisseur est plus importante pour la première structure. Les résultats en termes de variation d'épaisseur sont présentés à la Figure 57.

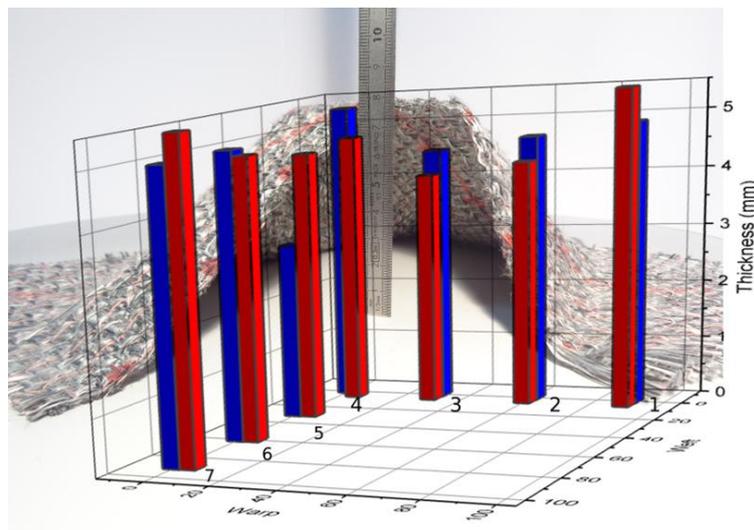


Figure 57 : Mesures de l'épaisseur des architectures interlocks couche à couche testées avec différentes armures de surface : (bleu) base satin de 4 et (rouge) base sergé 4-4 contredit [102]

Les valeurs de glissement entre les couches extérieures sont également plus importantes pour la structure possédant l'armure de surface de base satin de 4 que pour la seconde structure comme le montre la Figure 58. Ces résultats peuvent être expliqués par une densité de liage moins importante pour la deuxième architecture, permettant aux fils de celle-ci d'être plus libres par glissement localement lors de l'avalement sans déformer globalement toute la structure.

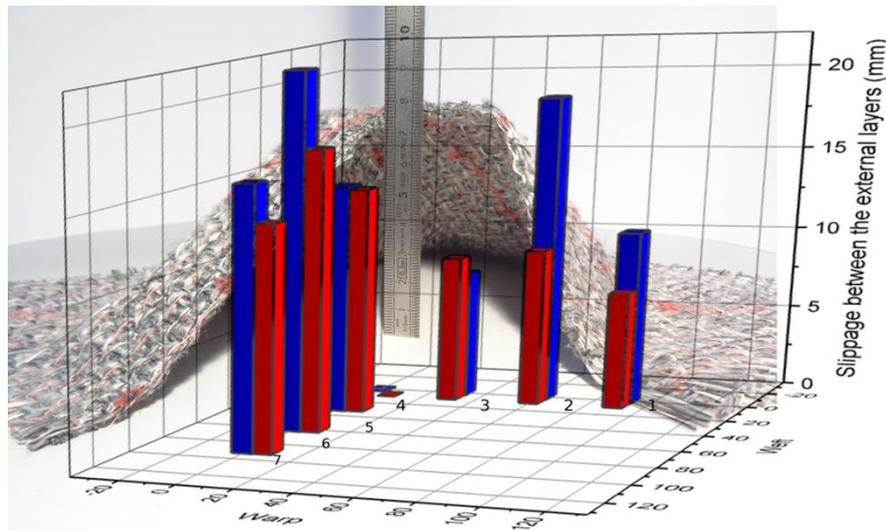


Figure 58 : Mesures du glissement entre les couches extérieures des architectures interlocks couche à couche testées avec différentes armures de surface : (bleu) base satin de 4 et (rouge) base sergé 4-4 contredit [102]

Cette étude a démontré que la structure interlock couche à couche à base de l'armure de surface de base sergé 4-4 contredit composée de longueur de flotté plus importantes obtient de meilleurs résultats que la première structure lors de la mise en forme par emboutissage grâce à une plus faible variation d'épaisseur, un avalement de matière plus important et un glissement entre les couches extérieures plus faible. Cette étude révèle donc que l'architecture tissée 3D interlock chaîne comportant les plus grandes longueurs de flottés, et donc la plus faible concentration de liage est plus adaptée à la mise en forme par emboutissage avec ce type de poinçon.

### C. Emboutissage avec fils capteurs

Dans une dernière étude, deux tissus 3D interlocks chaînes couche à couche avec deux armures de surface ont été conçus afin de vérifier si une différence était observable entre les deux armures au niveau de leur allongement lors d'essais d'emboutissage. Celles-ci ont été conçues de manière à obtenir le même rapport d'armure fixé à 4 ainsi que le même nombre de couches fixé à 6. Puis elles ont été tissées de manière à obtenir les mêmes densités en fils de chaîne et trame fixés à 24 fils/cm. Les deux armures de surface sélectionnées sont un satin de 4 à répétition et un croisé 2-2 comme présenté en Figure 59.

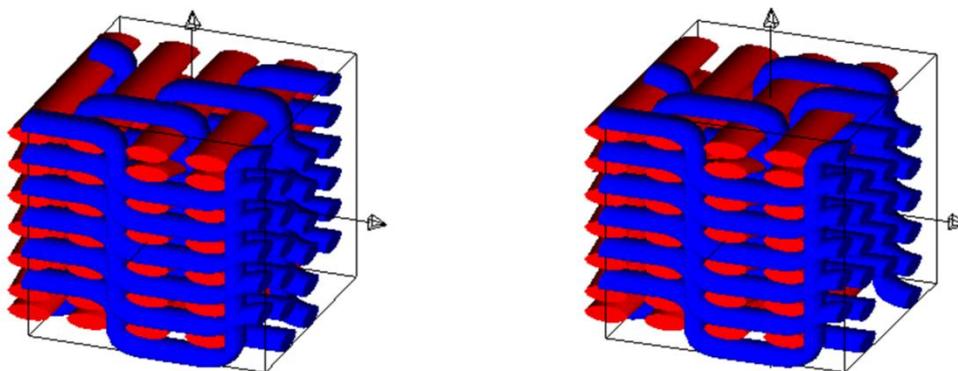


Figure 59 : Structures tissées 3D interlocks chaînes testées à l'emboutissage suivie par caméra et fils capteurs : croisé 2-2 (gauche) et satin de 4 à répétition (droite)

Afin d'obtenir des données sur l'allongement des fils en surface mais aussi dans l'épaisseur, des fils capteurs ont été intégrés aux différentes préformes. Le système de mesure de la résistance des capteurs étant limité à huit mesures différentes simultanées, quatre fils capteurs ont été intégrés en sens chaîne et quatre autres fils capteurs en sens trame. Les fils capteurs

ont été positionnés dans différentes couches de la préforme dans les directions chaîne et trame. Dans les deux directions, deux fils capteurs ont été intégrés au centre de la préforme, d'une part sur la surface supérieure de la préforme (capteurs notés Wp1-Ct en chaîne et Wf1-Ct en trame) et par ailleurs au niveau des couches moyennes de la préforme (capteurs notés Wp2-Ct en chaîne et Wf2-Ct en trame). Les quatre autres capteurs ont été insérés aux 2 bords de la préforme, sur la surface supérieure (capteurs notés Wp3-Ed en chaîne et Wf3-Ed en trame) mais également au niveau des couches moyennes de la préforme (capteurs notés Wp4-Ed en chaîne et Wf4-Ed en trame). La Figure 60 représente la position des fils capteurs sur la préforme.

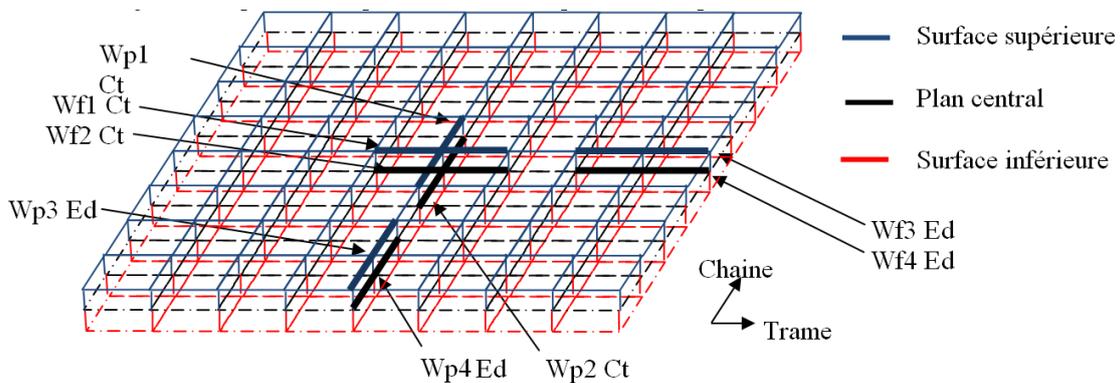


Figure 60 : Représentation d'une préforme avec 3 plans ; supérieur, central et inférieur avec la position des fils capteurs en sens chaîne et trame

Afin de se rapprocher des problématiques de mise en forme de l'application automobile, les essais d'emboutissage ont été réalisés en utilisant un poinçon en forme de gousset. Afin d'obtenir d'autres données concernant le suivi des déformations, trois caméras rapides, avec une définition suffisante pour obtenir une précision de mesure adéquate ont été placées de manière à obtenir la position spatiale de différents points marqués sur la préforme par un logiciel de tracking vidéo. Le montage réalisé lors de cette étude est présenté Figure 61.

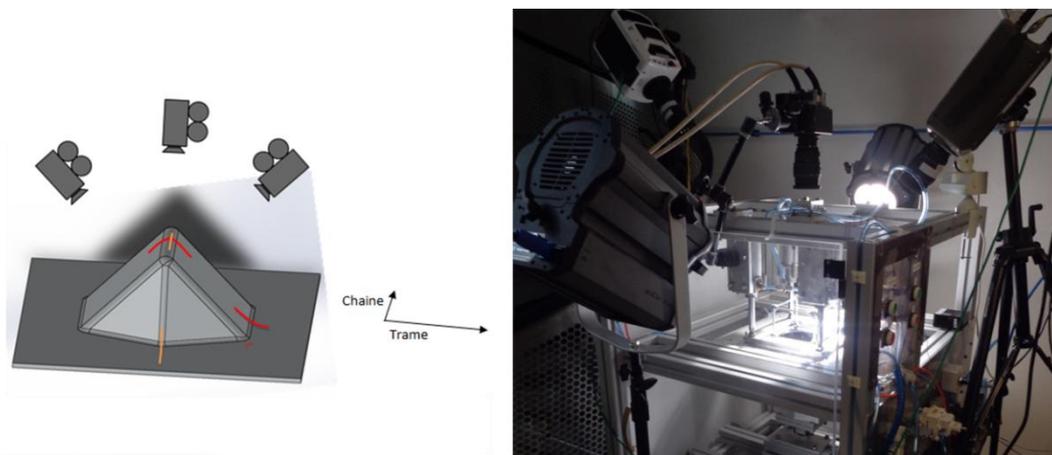


Figure 61 : Représentation et photographie du montage réalisé avec les caméras

A l'aide de ces caméras, la position des différents points marqués est mesurée, afin d'en déduire l'allongement.

Après avoir obtenu la position spatiale des différents points marqués par rapport à la position initiale du point central de la préforme, l'écart entre ces différents points peut être calculé en utilisant l'équation Eq. 6 :

$$D(Pa, Pb) = \sqrt{(xb - xa)^2 + (yb - ya)^2 + (zb - za)^2} \quad \text{Eq. 6}$$

Avec :  $Pa = \begin{pmatrix} xa \\ ya \\ za \end{pmatrix}$  et  $Pb = \begin{pmatrix} xb \\ yb \\ zb \end{pmatrix}$ , deux points marqués de la préforme

A partir de cette distance, l'allongement de la structure entre ces deux points peut être calculé avec l'équation

$$\varepsilon(Pa, Pb) = \frac{D(Pa, Pb)}{D0(Pa, Pb)} * 100 \quad \text{Eq. 7}$$

Avec :  $D(Pa, Pb)$ , l'écart à l'instant t entre Pa et Pb,

$D0(Pa, Pb)$ , l'écart initial entre Pa et Pb,

$\varepsilon(Pa, Pb)$ , l'allongement relatif entre les points Pa et Pb en %

L'écart relatif entre les deux points ne peut être confondu avec l'allongement de la structure que si les deux points en question sont situés sur la même face ou arête du gousset. Si les points ne sont pas sur la même face du gousset, la structure tissée 3D interlock chaîne n'est plus confondue avec le segment regroupant les deux points en question.

Il a donc été nécessaire de détecter les passages de points d'une face à une autre. Ce phénomène se caractérise par une diminution importante de l'écart relatif entre deux points, c'est donc la caractéristique indiquant le passage de points d'une face à une autre. Plus l'angle entre les deux faces est important, plus l'erreur commise sur la mesure est importante.

Les capteurs ayant une longueur approximative de 3cm pour l'autre moyen de mesure, l'allongement de la structure a été calculé sur une distance approximative de 3cm dans les mêmes zones où se situent les capteurs présentés en Figure 62. Ainsi, les valeurs d'allongement mesurées à travers les fils capteurs et les valeurs d'allongement mesurées par caméra peuvent être comparées. Afin de fiabiliser les résultats, les valeurs de déformation sont moyennées avec les valeurs de la zone symétrique par rapport au centre de la préforme.



Figure 62 : Zones où se trouvent les capteurs : en rouge en sens chaîne et en vert en sens trame

Lors des essais d'emboutissage, l'évolution de l'effort subi par le poinçon a été mesurée à l'aide d'un capteur d'effort. La Figure 63 présente une courbe type d'effort d'emboutissage relevée lors de l'emboutissage d'un tissu Interlock 3D chaîne.

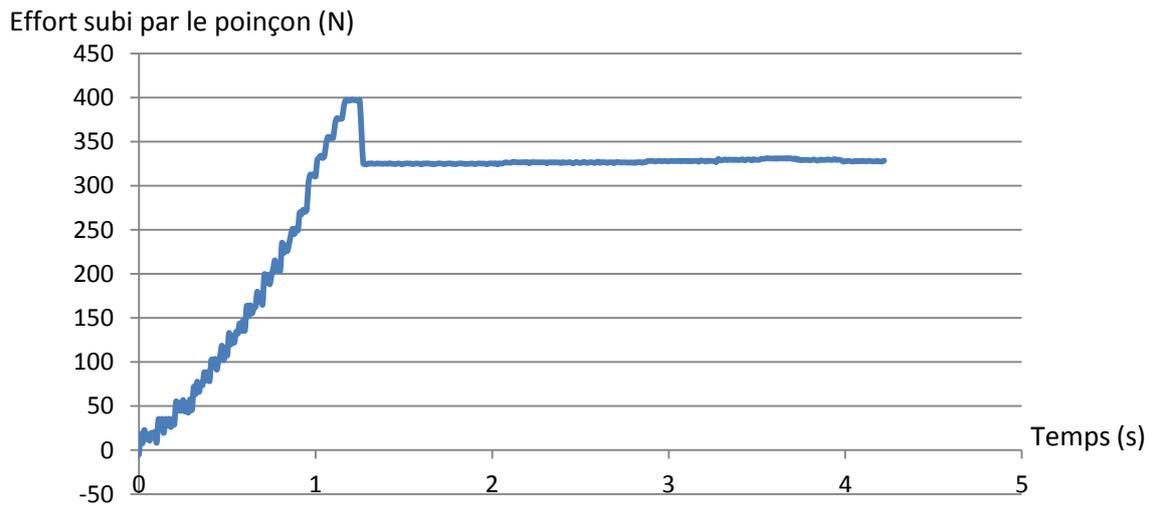
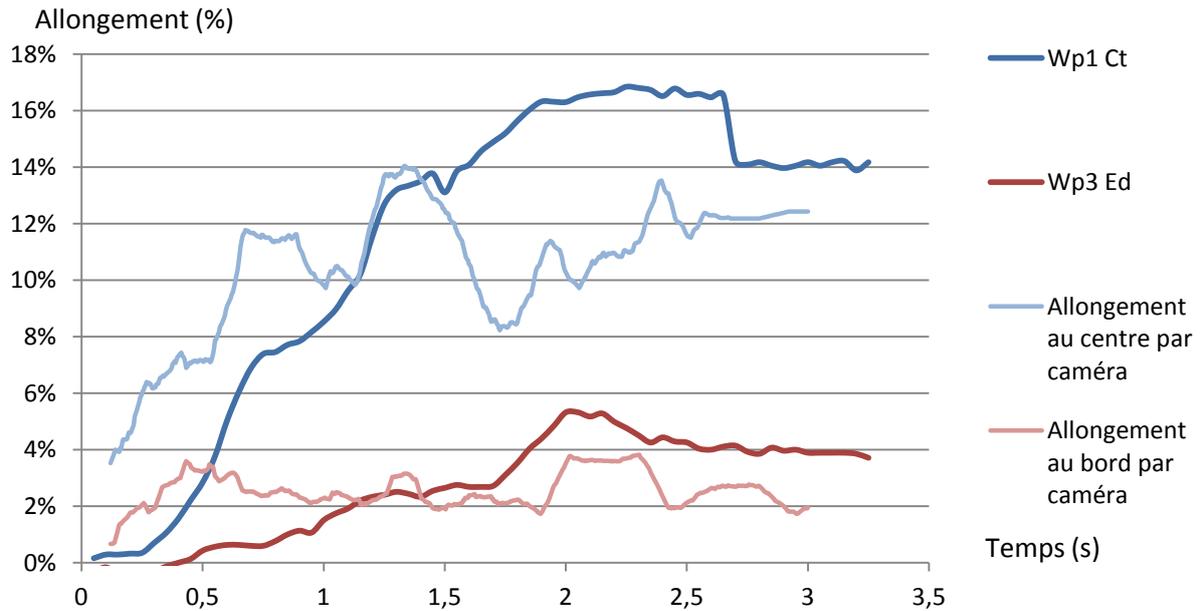


Figure 63 : Zones où se trouvent les capteurs : en rouge en sens chaîne et en vert en sens trame

Sept préformes ont été réalisées. Parmi les 7 préformes, trois sont réalisées en base satin de 4 à répétition et quatre préformes ont été réalisées en base croisé 2-2. Trois préformes ont été embouties avec suivi des déformations par caméra et par fil capteur, parmi lesquelles deux sont en base croisé 2-2 et une en base satin de 4 à répétition. Les quatre dernières préformes ont été embouties avec uniquement un suivi des déformations par les fils capteurs.

Les évolutions des déformations de surface suivies à l'aide des caméras et par le biais des fils capteurs avec une préforme en base croisé 2-2 en sens chaîne et trame au cours du procédé lors du premier essai d'emboutissage sont présentées en Figure 64.

## SENS CHAINE



## SENS TRAME

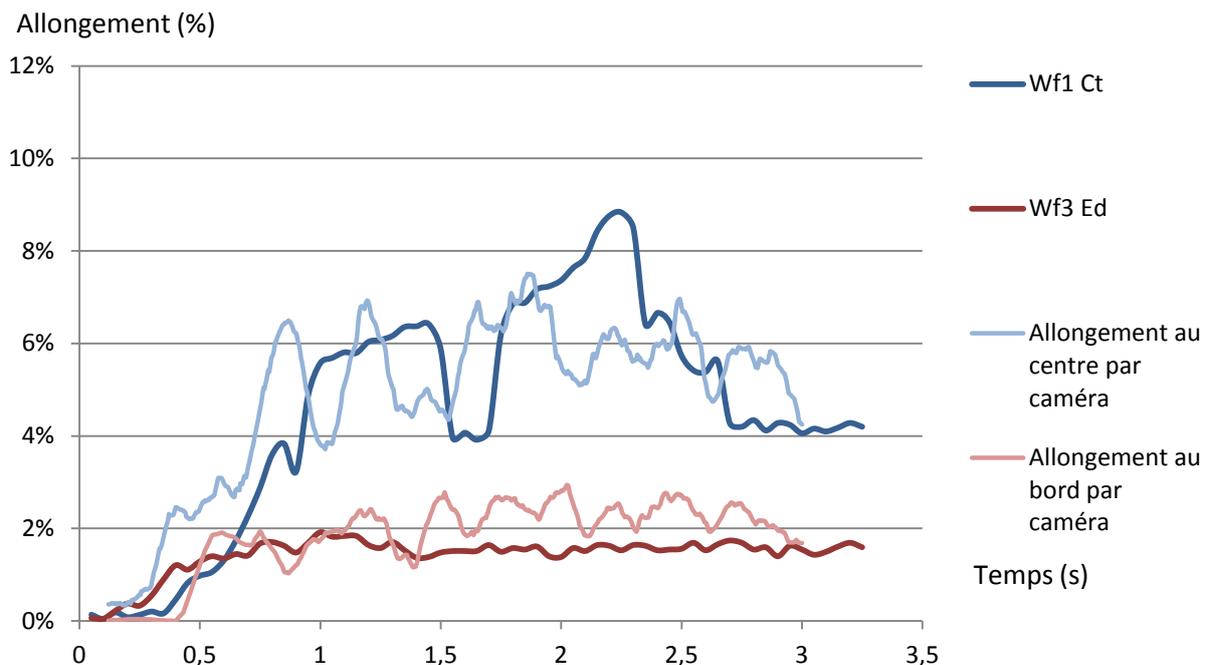


Figure 64 : Comparaison des résultats d'emboutissage par capteurs et par caméra pour l'armure de surface croisé 2-2

Les déformations relevées par les fils capteurs présentent la même tendance lors du procédé que celles mesurées par le suivi de points par les caméras. Lors de la montée du poinçon, les déformations augmentent traduisant la mise en tension du renfort.

L'augmentation des déformations est plus importante lors du procédé, au centre de la préforme (capteurs Wp1Ct, Wf1Ct) que dans les zones initialement aux bords de la préforme (capteurs Wp3-Ed, Wf3-Ed), et ce dans les deux sens chaîne et trame. Les mèches au centre de la préforme sont plus tendues, que celles initialement aux bords.

Si l'on compare les deux directions, on constate que les déformations sont plus importantes dans le sens chaîne que dans le sens trame. La géométrie spécifique du poinçon, gousset, explique ce phénomène. La mèche dans la direction trame (Wf3-Ed) se retrouve, par avalement de matière sur la face du gousset, par contre la mèche dans la direction chaîne

(Wp3-Ed) est positionnée sur une face de géométrie plus sévère qui génère des tensions plus importantes.

La Figure 65 compare les résultats obtenus avec les capteurs positionnés au centre et aux bords de la préforme, en surface et à l'intérieur du tissu 3D interlock chaîne. Ces capteurs sont initialement disposés aux mêmes endroits (Figure 60), seule diffère leur position dans l'épaisseur dans les sens chaîne et trame pour les emboutissages pour les préformes en base croisé 2-2.

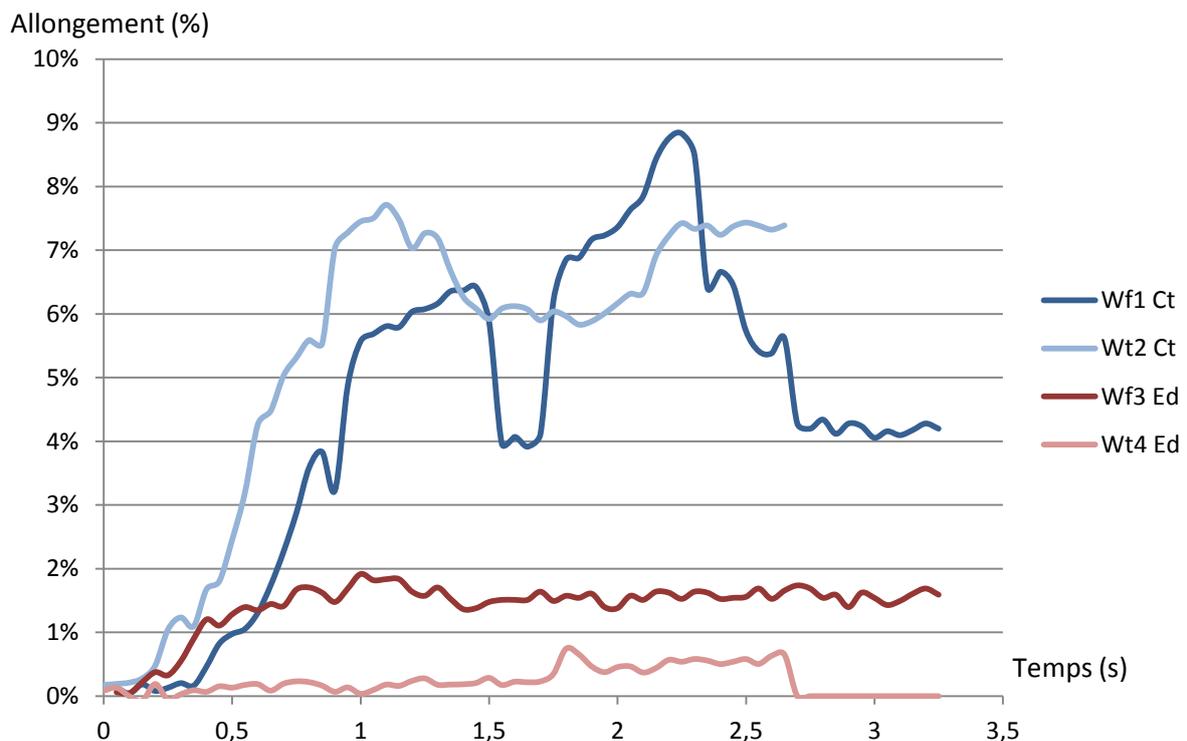
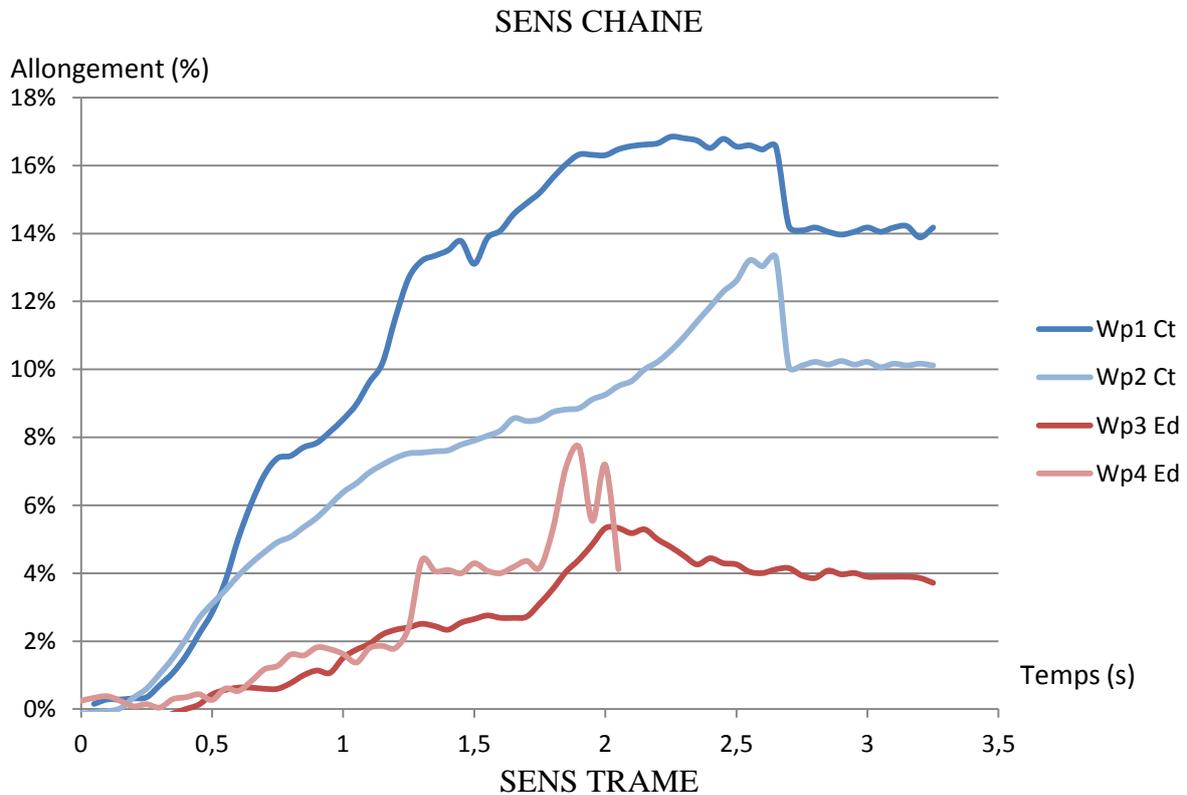


Figure 65 : Comparaison des résultats d'emboutissage par capteurs en surface et à l'intérieur de la préforme pour le tissu en base croisé 2-2

On peut observer que les déformations sur la face supérieure sont généralement plus importantes qu'à l'intérieur du tissu 3D interlock chaîne, et que cette différence est plus marquée au centre de la préforme, qu'aux bords. Le phénomène en question est observé en sens chaîne ainsi qu'en sens trame, malgré des valeurs plus faibles. La différence des valeurs de déformation entre la couche supérieure et celles dans les couches intermédiaires est moins importante en sens trame qu'en sens chaîne.

Les résultats de l'essai d'emboutissage suivi par caméra et à travers des fils capteurs avec une préforme en base satin de 4 à répétition en sens chaîne et trame sont présentés en Figure 66.

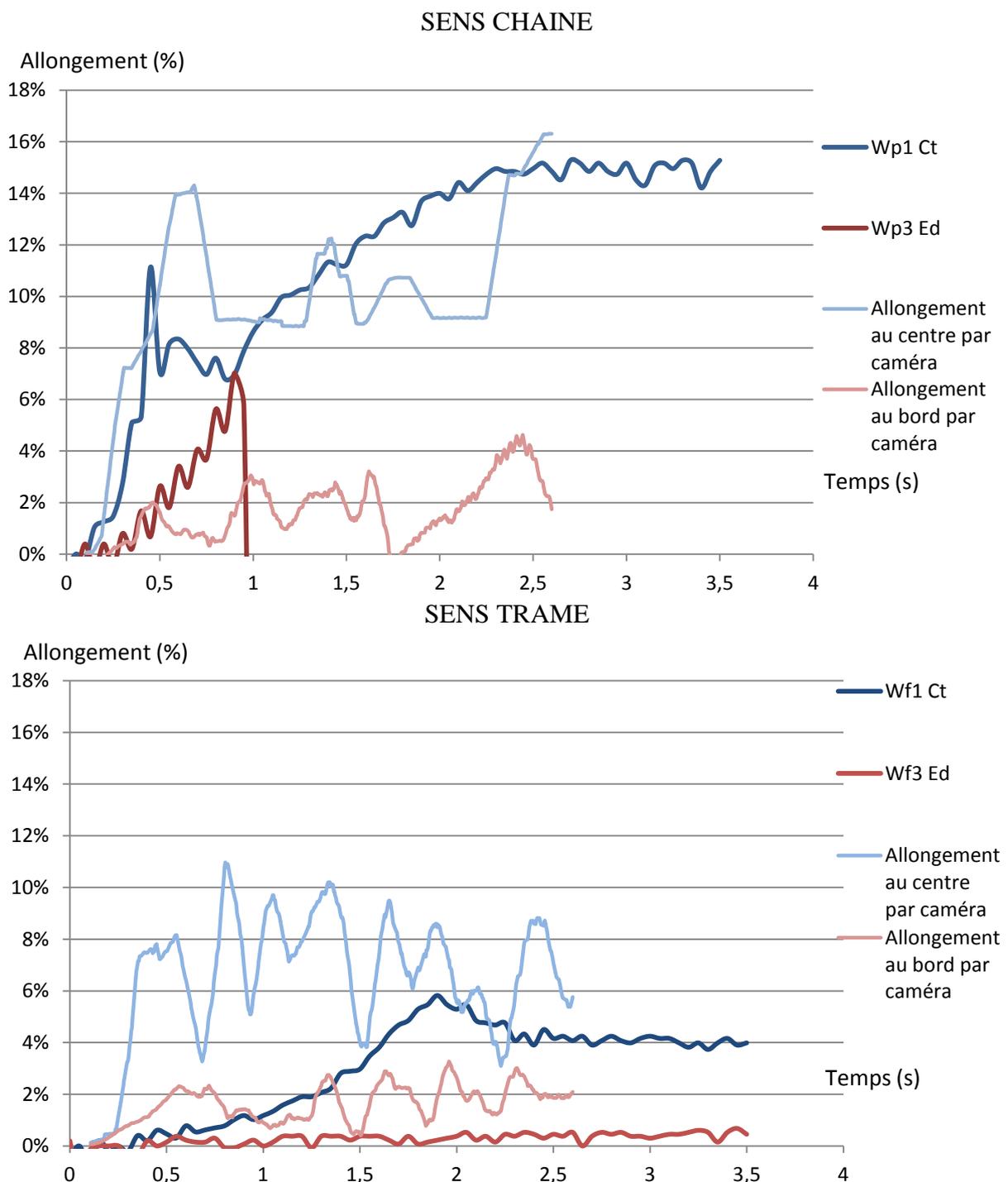


Figure 66 : Résultats de l'essai d'emboutissage avec le tissu 3D interlock chaîne en base satin de 4 à répétition

Les courbes de déformation résultantes de l'essai d'emboutissage avec le tissu 3D interlock chaîne en base satin de 4 à répétition présentent des évolutions similaires aux courbes des essais d'emboutissage en base croisé 2-2.

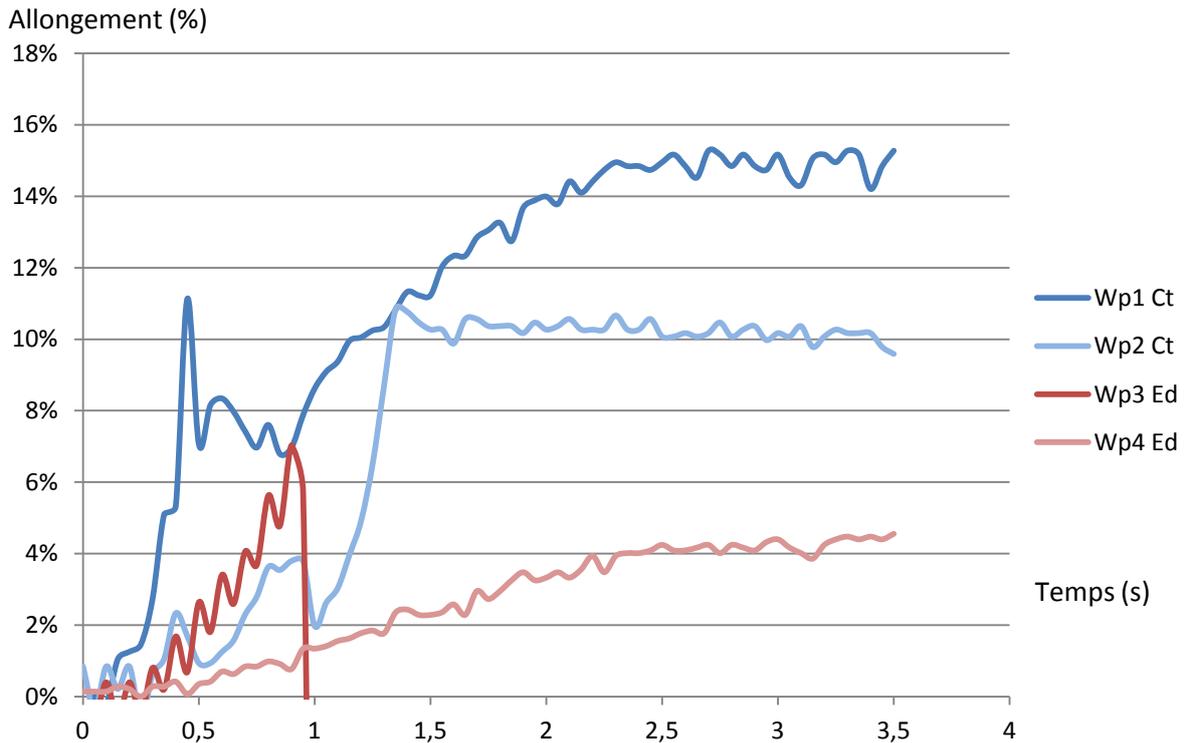
Les déformations relevées par les fils capteurs présentent la même tendance lors du procédé que celles mesurées par le suivi de points par les caméras. Lors de la montée du poinçon, les déformations augmentent traduisant la mise en tension du renfort.

L'augmentation des déformations est plus importante lors du procédé, au centre de la préforme que dans les zones initialement aux bords de la préforme, et ce dans les deux sens chaîne et trame. Les mèches au centre de la préforme sont plus tendues, que celles initialement aux bords.

Si l'on compare les deux directions, on constate que les déformations sont plus importantes dans le sens chaîne que dans le sens trame. La géométrie spécifique du poinçon, gousset, explique ce phénomène. La mèche dans la direction trame se retrouve, par avalement de matière sur la face du gousset, par contre la mèche dans la direction chaîne est positionnée sur une face de géométrie plus sévère qui génère des tensions plus importantes.

La Figure 67 présente les résultats obtenus avec les capteurs présents au centre et aux bords de la préforme, mais aussi en surface et à l'intérieur du tissu 3D interlock chaîne disposés en sens chaîne ainsi qu'en sens trame pour les emboutissages des préformes en base satin de 4 à répétition. Après vérifications, les capteurs insérés dans les préformes en base de satin de 4 et croisé 2-2 se trouvent être approximativement aux mêmes positions après les essais d'emboutissage.

### SENS CHAINE



### SENS TRAME

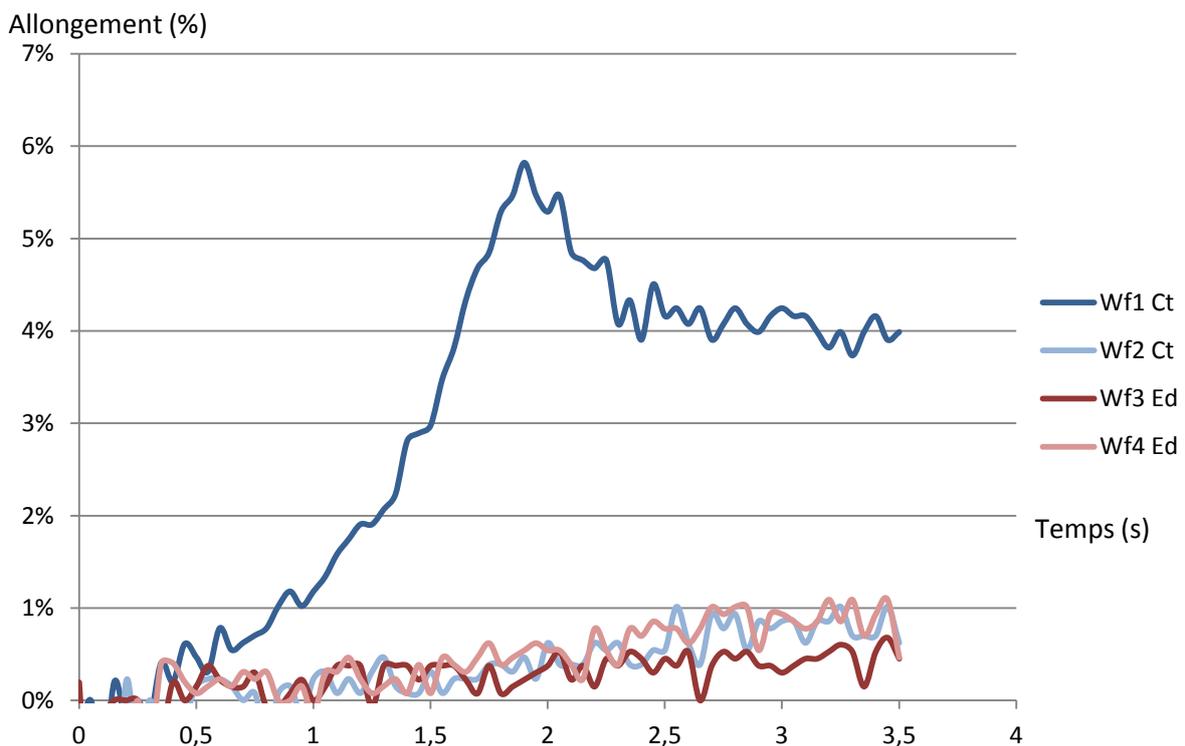


Figure 67 : Comparaison des résultats d'emboutissage par capteurs en surface et à l'intérieur de la préforme pour le tissu en base satin de 4 à répétition

Comme pour les essais d'emboutissage avec le tissu en base croisé 2-2, on observe que les déformations sur la face supérieure sont généralement plus importantes qu'à l'intérieur du tissu 3D interlock chaîne, et cela est plus marqué au centre de la préforme, qu'aux bords de celle-ci. Le phénomène en question est observé en sens chaîne ainsi qu'en sens trame, malgré des valeurs plus faibles. La différence des valeurs de déformation entre la couche supérieure

et celles dans les couches intermédiaires est moins importante en sens trame qu'en sens chaîne.

La Figure 68 permet de comparer les résultats d'emboutissage en termes d'allongement de la préforme tissée 3D interlock chaîne ayant une armure de surface en croisé 2-2 avec la préforme tissée 3D interlock chaîne d'armure de surface en satin de 4. On peut observer que les courbes des capteurs positionnées de la même manière pour les deux essais évoluent de façon identique et atteignent les mêmes niveaux d'allongement en fin de mise en forme, ce qui traduit une faible influence de l'armure de surface d'un tissu 3D interlock chaîne sur la mise en forme de cette structure, si l'on conserve la même longueur de flotté.

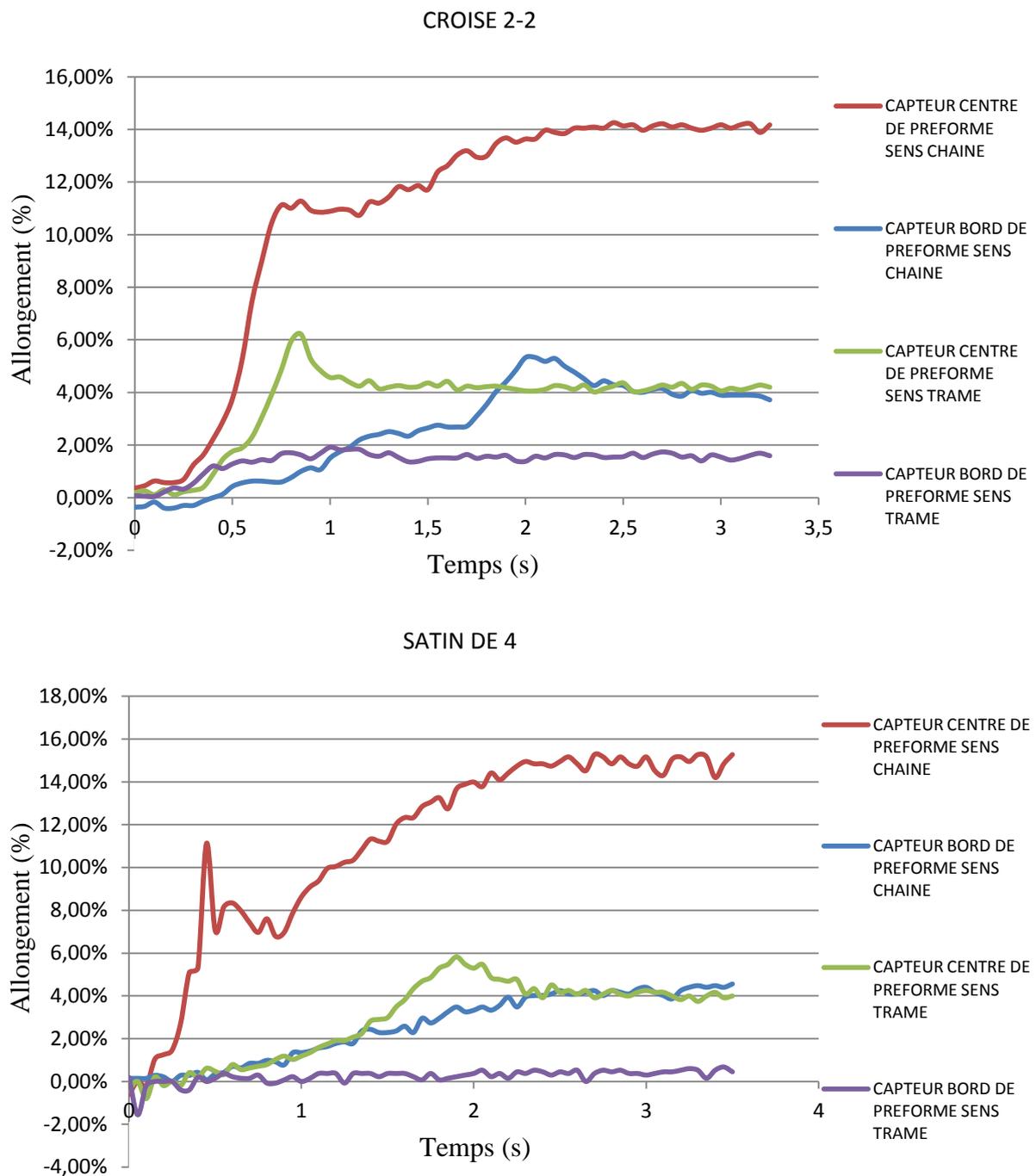


Figure 68 : Résultats des essais d'emboutissage de la préforme en base croisé 2-2 et satin de 4.

## 1.5 Conclusion de la solution AUTO-MAPICC

Dans cette partie, des études ont été réalisées sur l'emboutissage de différentes structures tissées 3D interlocks chaines. Une première étude a permis de mettre en évidence le bon comportement à la mise en forme, avec un poinçon de forme hémisphérique, de la famille des tissus 3D interlocks chaines avec un liage couche à couche par rapport aux liages en angle et orthogonal. Une seconde étude portant sur la mise en forme de deux structures couche à couche avec une longueur de flotté différente et un poinçon en forme de gousset, a mis en évidence que l'augmentation de la longueur de flotté permet une meilleure mise en forme. Enfin, une dernière étude portant sur la mise en forme de deux structures couche à couche avec deux armures de surface, mais ayant les mêmes longueurs de flotté a permis de mettre en évidence la faible influence de l'armure de surface à équi-longueur de flotté sur la mise en forme. Cette dernière étude a également permis de mettre en évidence le bon comportement de capteurs intégrés dans les structures par une comparaison avec une méthode de suivi des déformations par caméra.

À partir des résultats de ces études, une architecture optimisée pour l'application AUTO-MAPICC a pu être définie afin d'obtenir une qualité de mise en forme optimale.

Cette application a permis de démontrer l'efficacité des capteurs pour détecter les allongements dans les couches intermédiaires des tissus 3D interlocks chaines, qui ne peuvent être mesurés par les méthodes actuelles sans contact par corrélation d'images.

## 2. Solution TRUCK-MAPICC pour l'application du transport routier

### 2.1 Problématique du partenaire

Le partenaire, Volvo Truck, est un fabricant de camions, une industrie réalisant des grosses séries, sans toutefois avoir des volumes aussi importants que dans le domaine automobile. Ce qui est primordial dans les solutions en matériaux composites pour le secteur du transport routier est d'une part un gain de masse afin d'augmenter la charge utile des poids lourds mais également un coût de fabrication relativement modeste, permettant une implantation plus aisée des innovations au sein des pièces produites.

Dans le cadre du Programme MAPICC, la pièce support de cette étude consiste en une assise de siège actuellement réalisée en matériau métallique et représentée en Figure 69. Cette assise de siège est une pièce qui ne doit pas céder lors d'un essai de crash, par ailleurs elle supporte le poids du siège ainsi que celui du conducteur, le cahier des charges impose donc que cette pièce ait une tenue mécanique assez importante. Les zones soumises à l'arrachage lors des tests-crash sont représentées en Figure 70. Le remplacement du matériau métallique par une solution composite nécessite de considérer les conditions de fixation de la pièce. Celle-ci est actuellement soudée par points au plancher de la cabine, sur les zones représentées en Figure 70. La masse de la version métallique de l'assise de siège est de 3,46 Kg.



Figure 69 : Version métallique initiale de l'assise de siège TRUCK-MAPICC

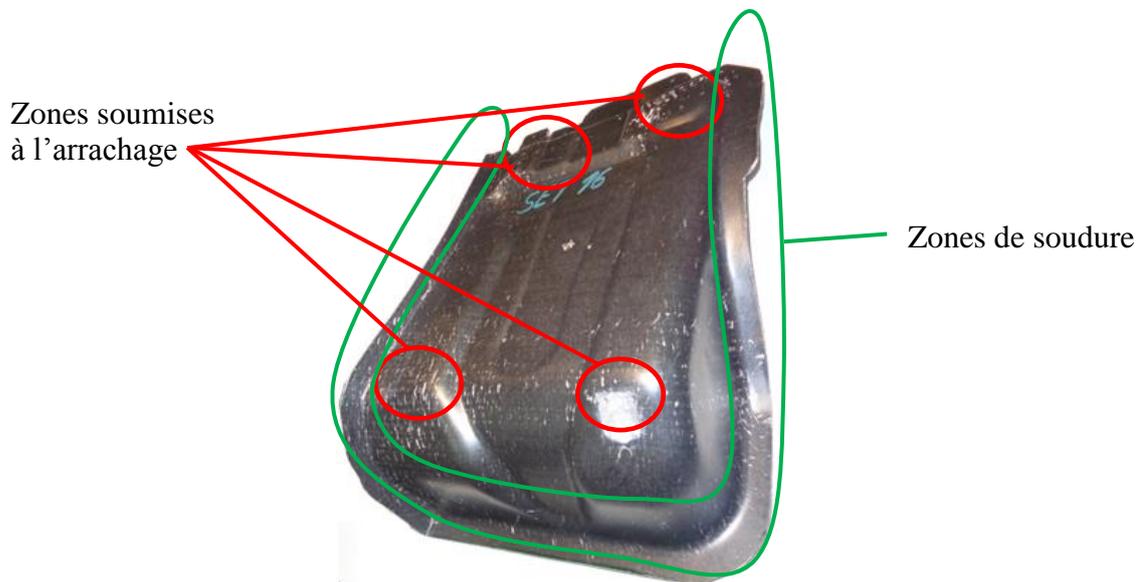


Figure 70 : Zones soumises aux efforts d'arrachage et zones de soudure de l'assise de siège composite TRUCK-MAPICC

En Figure 71, apparaissent les zones d'assemblages de l'assise, représentées sur un schéma CAO et en réalité.

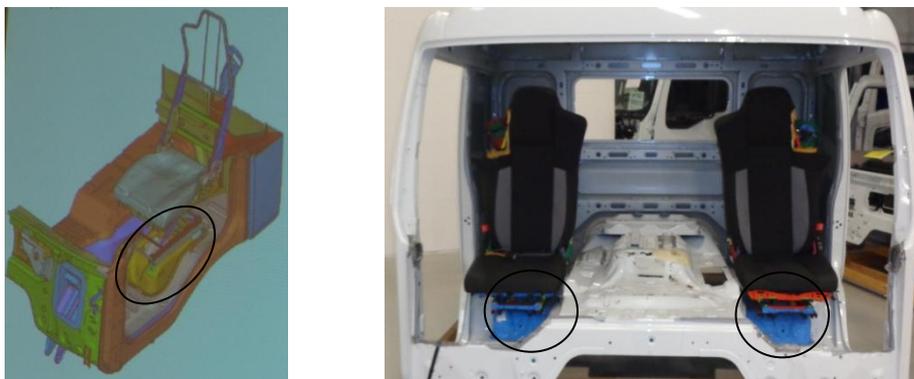


Figure 71 : Assemblages avec la solution TRUCK-MAPICC : gauche : Représentation CAO et droite : Assemblage réel

Relativement à ce cahier des charges, la solution en matériau composite, intitulée TRUCK-MAPPIC, s'appuie sur les concepts suivants :

- La pièce sera sur la base d'une structure tissée 3D interlock chaîne élaborée à partir d'un fil comélé de verre/PP, qui sera emboutie puis thermo-consolidée.

Ces choix permettent ainsi de satisfaire des coûts matières relativement faibles, des tenues mécaniques importantes, par le choix du verre, ainsi que des cadences de production plus rapides, lors du procédé d'imprégnation, que les procédés d'injection. Les caractéristiques physiques, chimiques et thermiques du fil comélé utilisé pour l'application automobile ont été présentées au Tableau 4.

- Comme le montre la Figure 69, la forme de l'assise de siège pouvant plus ou moins être assimilée à une forme rectangulaire, les problématiques de mise en forme restent les mêmes que pour l'application automobile décrite dans la partie précédente, avec une forme de pièce comportant des coins et des arêtes plus ou moins prononcés. Les études menées dans la partie 1 restent donc aussi valables pour cette application.
- Concernant le choix des épaisseurs, on considèrera une épaisseur générale de la pièce composite de 3 mm, soit une épaisseur de la préforme de 6 mm. Concernant les zones les plus sollicitées des épaisseurs de la pièce composite de 13 mm seraient nécessaires notamment au niveau de l'assemblage avec le siège, ce qui nécessiterait une épaisseur de renfort sec d'au moins 26 mm, ce qui n'est pas réalisable sur la machine à tisser utilisée pour produire les préformes. Afin de régler ce problème, et pour aider l'assemblage avec le siège, des inserts métalliques ont été ajoutés aux préformes dans les zones les plus sollicitées afin d'augmenter leur tenue mécanique.
- Afin de tenir compte des conditions d'assemblage par soudage, des tresses métalliques ont été intégrées lors de l'étape de tissage à la surface des structures tissées 3D interlocks chaînes, aux endroits associés aux zones de soudage. Et ce afin de tester par la suite la soudure des pièces composites avec une pièce métallique en suivant la même technique que celle utilisée pour souder la pièce au plancher de la cabine.
- Afin de répondre à des problématiques d'arrachage qui se produisent lors du crash au niveau du support de siège, nous avons également étudié l'influence de différentes armures de surface d'un tissu 3D interlock chaîne sur le phénomène d'arrachage qui se produit au niveau des zones repérées en rouge en Figure 70.

## 2.2 Détail de la solution développée TRUCK-MAPICC

L'application développée ici étant un renfort de siège initialement en métal, l'idée était de proposer une solution tissée 3D interlock chaîne réalisée en utilisant un fil comélé verre/polypropylène. La version métallique est présentée en Figure 69 et la version composite de la pièce est présentée en Figure 70. La pièce étant placée entre le sol et le siège du conducteur ou du passager comme le montre la Figure 71, le cahier des charges de cette application demande une bonne tenue mécanique ainsi qu'une tenue au crash.

La tenue mécanique est un paramètre important. C'est pourquoi il a été décidé de réaliser des préformes avec différentes épaisseurs, les zones les plus épaisses étant les zones les plus contraintes mécaniquement. La solution tissée 3D interlock chaîne initiale comporte 4 épaisseurs différentes. Après le premier essai de tissage, les différentes zones n'étaient pas assez épaisses. Il a donc été décidé de simplifier la préforme à trois zones d'épaisseur différentes afin de libérer des cadres pour augmenter les densités en fils de chaîne ainsi qu'en fils de trame dans les zones les plus contraintes, comme le décrit la Figure 72. L'ensemble des préformes TRUCK-MAPICC a été réalisé sur la même machine à tisser que pour l'application AUTO-MAPICC avec des modifications sur celles-ci afin de tisser avec une laize de 58 cm et un système de tassage renforcé. Ces modifications seront décrites au chapitre 3.

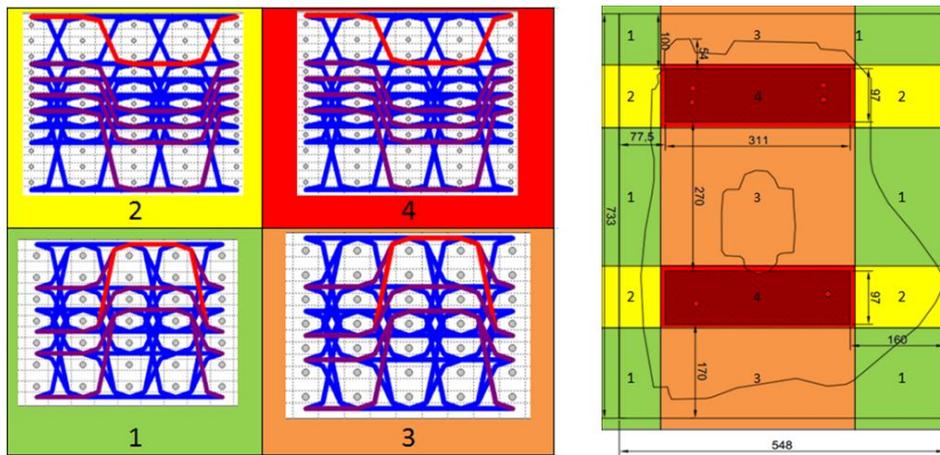


Figure 72 : Architecture de la solution TRUCK-MAPICC : a. Armures et b. Zones associées aux armures sur la préforme TRUCK-MAPICC

En complément de l'augmentation d'épaisseur, et pour répondre aux tenues mécaniques demandées, il a été décidé avec les partenaires du projet Mapicc 3D de placer un insert métallique dans la préforme. L'ensemble préforme/insert sera ensuite assemblée par vissage à l'ensemble siège lors de l'assemblage comme le montre la Figure 73.

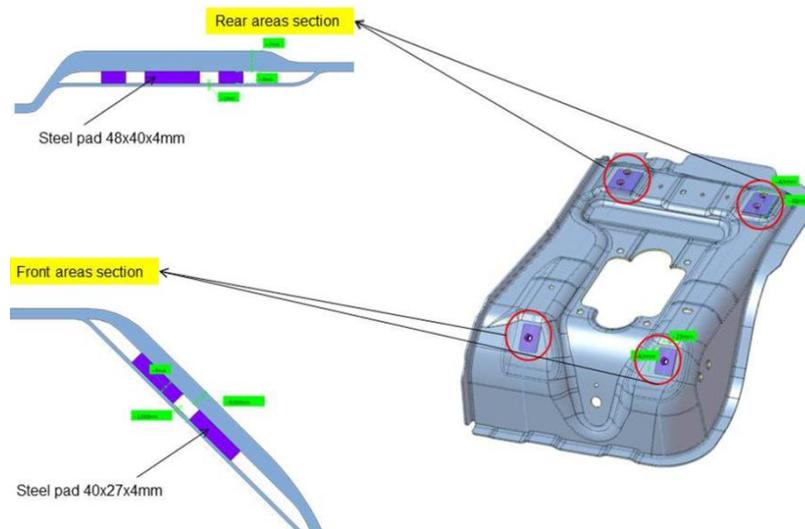


Figure 73 : Position des inserts métalliques dans la préforme TRUCK-MAPICC

Afin de répondre à des problématiques de jonction composite-métal [103,104], il a été décidé de tester l'intégration de tresses métalliques au sein d'un tissu 3D interlock chaîne au moment du tissage pour ensuite tester leur consolidation lors de l'étape de thermoformage. Enfin, des tests de soudure par points sur ces tresses métalliques intégrées à la structure composite thermoformée ont été réalisés.

Le Tableau 4 résume les principales caractéristiques de la préforme réalisée 3D interlock chaîne pour l'application du transport routier. Les numéros des zones sont associés à la Figure 72.

Tableau 4 : Caractéristiques du fil utilisé ainsi que de la structure tissée développée pour l'application TRUCK-MAPICC

| Fil                                       |                         | Préforme   |   |
|---|-------------------------|--|---|
| Titre                                     | 842 Tex                 | Densité de surface<br>Chaine/Trame (colonnes /cm)      | 4 / 2,5   |
| % Verre E / %<br>Polypropylène (% volume) | 46 % /<br>54 %          | Nombre de couches<br>Zones 4 / zones 1                 | 7 / 11  |
| Diamètre fibres<br>Verre/polypropylène    | 14,5 µm<br>/ 43,0<br>µm | Masses surfaciques<br>Zones 4 / zones 1                | 5000 g/m <sup>2</sup><br>/4100 g/m <sup>2</sup> |
| Module de Young                           | 10,5 GPa                | Épaisseur de la préforme<br>sèche<br>Zones 4 / zones 1 | 10 mm /<br>6 mm                                 |
| Élongation à la rupture                   | 3,22 %                  |  |   |
| Ténacité                                  | 20,78<br>cN/tex         |  |   |

Pour la phase de consolidation, un moule spécifique a été développé afin de consolider les préformes sous bâche à vide avec un cycle de cuisson adapté. Après les premiers essais, il s'est avéré que la pression appliquée par la bâche était insuffisante du fait de la faible rigidité de la bâche et de l'épaisseur trop importante des préformes. La solution trouvée pour améliorer la consolidation de la préforme a donc été d'augmenter la pression en réalisant la consolidation dans un autoclave.

Au final, le prototype consolidé sous autoclave s'est avéré être mieux imprégné que les prototypes consolidés sous bâche à vide comme le montre la Figure 74. Même si la consolidation peut encore être améliorée par une consolidation avec un système moule / contre-moule, ce prototype a pu être utilisé pour un essai d'arrachage.



Figure 74 : Pièce consolidée sous bâche à vide à gauche et sous autoclave à droite

La pièce faisant partie d'un assemblage de plusieurs pièces allant du sol au siège, les problématiques de jonctions entre la pièce composite et les autres éléments de l'assemblage ont été étudiées.

### 2.3 Étude de la jonction entre une pièce en matériau composite et une pièce en métal

La jonction entre deux pièces peut être réalisée à travers différentes méthodes, celles-ci étant l'assemblage mécanique, le soudage et le collage.

Parmi ces méthodes, la plus communément utilisée et connue est l'assemblage mécanique par boulonnage ou, comme le décrit la Figure 75, par rivetage. Ces méthodes consistent à percer les deux pièces à assembler, superposer les perçages, puis à placer une vis ou un rivet afin de maintenir les deux pièces ensemble. L'assemblage mécanique présente plusieurs avantages au

regard du démontage, de l'absence de traitements des surfaces ou encore de la facilité de contrôle des assemblages mécaniques. Par contre, pour les pièces composites, les perçages affaiblissent les pièces en cassant la continuité du renfort et en concentrant les contraintes à leur emplacement et peuvent également créer des amorces de rupture. [105-108] Afin d'éviter la coupe du renfort, il est possible de dévier les fibres de renfort par l'ajout d'un insert au moment de la consolidation de la pièce composite ou du tissage de celle-ci, évitant par la même occasion le perçage.

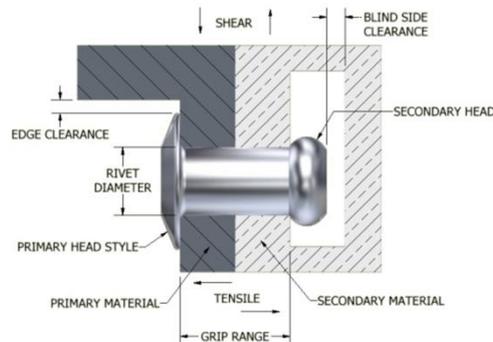


Figure 75 : Exemple d'assemblage mécanique par rivetage [109]

Une autre méthode également très utilisée est le soudage qui consiste à assurer la continuité entre deux pièces à assembler. Le soudage dépend entièrement des propriétés des matériaux concernés contrairement à l'assemblage mécanique. Il existe de très nombreuses méthodes de soudage pour les métaux [110] telles que le soudage aluminothermique, le soudage à l'arc avec électrode fusible sous flux gazeux ou encore le soudage par plasma. Il existe aussi quelques techniques de soudage des polymères thermoplastiques telles que le soudage par ultrasons, le soudage par laser ou encore le soudage semi-automatique présenté en Figure 76. Le principe de toutes ces techniques est le même : apporter de l'énergie afin de permettre l'assemblage des composants au niveau moléculaire. Par contre, il est quasiment impossible de souder directement des matériaux de natures aussi différentes que les métaux avec les plastiques, à moins d'utiliser des traitements spécifiques [111]. Le soudage a l'avantage d'apporter une tenue en température de la soudure plus ou moins importante suivant le procédé utilisé. Par contre, la soudure nécessite une préparation relativement importante des pièces à souder [103,105,112-114].



Figure 76 : Soudage semi-automatique [110]

Les techniques de collage sont relativement mal connues au niveau industriel. Ces techniques consistent à ajouter de la matière entre les deux éléments à assembler, afin de créer une réaction chimique permettant de lier les deux éléments à assembler. Cette technique a l'avantage de ne pas affaiblir les pièces à assembler, mais aussi de pouvoir assembler deux matériaux de nature différente. En revanche, le collage est irréversible et nécessite une

préparation importante des pièces à coller afin que la liaison se fasse correctement et la solidité n'est pas aussi importante qu'avec les techniques de soudage.

Afin d'assembler une pièce composite à une pièce métallique, le soudage direct ne peut pas être envisagé à moins que le composite ait une matrice métallique [115]. Les techniques pouvant être mises en place pour réaliser la jonction entre ces deux types de pièces sont l'assemblage métallique ou le collage.

Cependant, l'assemblage mécanique affaiblissant les deux pièces à associer et le collage étant moins solide, il est nécessaire d'envisager d'autres méthodes de jonction. La méthode investiguée ici consiste en l'intégration d'un élément métallique sous la forme d'une tresse métallique présentée en Figure 77 au sein d'une structure tissée 3D interlock chaîne lors du procédé de tissage, puis à la réalisation d'un essai de soudure par point et semi-automatique.

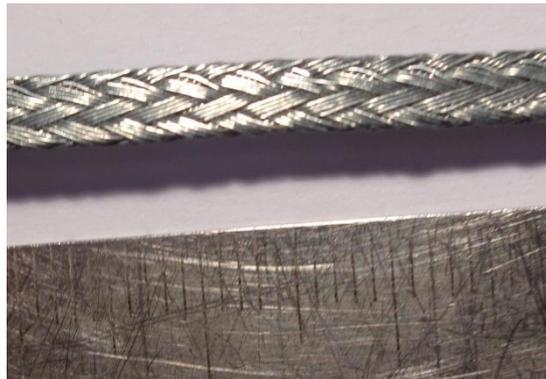


Figure 77 : Tresse métallique utilisée

Le soudage par point présenté en Figure 78 est un procédé de soudage utilisant le principe de soudage par résistance à électrode non fusible pour permettre l'élévation de température jusqu'au point de fusion du métal auquel s'ajoute à une forte pression mécanique. Deux électrodes de cuivre non fusibles compriment les pièces à souder l'une contre l'autre puis sont traversées par un courant de très forte intensité, chauffant ainsi la zone impliquée jusqu'à la fusion du métal.



Figure 78 : Soudage par point

Le soudage semi-automatique, présenté en Figure 79 est un procédé de soudage utilisant le principe du soudage à l'arc. Le poste à souder délivre un courant électrique. La pièce à souder est reliée à un pôle et sur le second pôle est relié un fil à souder qui transporte le courant électrique. Lorsque l'on amène le fil à souder à frôler la surface de la pièce à souder, un arc électrique se forme et provoque l'échauffement du métal de la pièce à souder et la fonte du fil à souder dont la matière vient ensuite se déposer en surface de la zone à souder.



Figure 79 : Soudage semi-automatique

Lors du premier essai d'intégration, la structure tissée 3D interlock chaîne tissée a été conservée identique au niveau du liage, à la structure présentée en Figure 72, mais avec une armure de surface modifiée. Et ce afin de permettre aux tresses métalliques de recouvrir un maximum de la surface du tissu, en remplaçant 4 fils de trame de surface par des tresses plates métalliques, puis en remplaçant 4 fils de chaîne de surface par des tresses métalliques identiques. L'objectif est de fournir une surface métallique pour les premières éprouvettes, soit par des fils de chaîne métalliques, soit par des fils de trame métalliques. Cette armure est présentée en Figure 80.

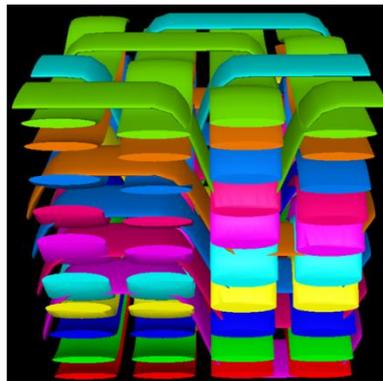


Figure 80 : Structure réalisée pour l'intégration des tresses métalliques

L'insertion des tresses plates métalliques en sens trame s'est effectuée sans torsion afin de conserver des surfaces planes métalliques nécessaires à l'étape de soudage. La largeur des tresses étant calculée pour couvrir en grande partie la largeur des colonnes de la structure tissée, la surface du tissu 3D interlock chaîne était donc en grande partie recouverte de tresses métalliques. Le fait de tisser des tresses métalliques en sens trame n'a pas créé de dégradation importante au niveau du tissu comme le montre la Figure 81.



Figure 81 : Intégration de tresses métalliques en sens trame

La surface des tresses métalliques étant relativement rugueuse, celles-ci ont créé beaucoup de frictions avec les fils comelés lors du tissage avec les tresses métalliques en sens chaîne, créant ainsi une dégradation très importante dans cette zone comme le montre la Figure 82.



Figure 82 : Intégration de tresses métalliques en sens chaîne

La consolidation des tresses s'est faite sous presse chauffante en utilisant le cycle présenté à la Figure 83.

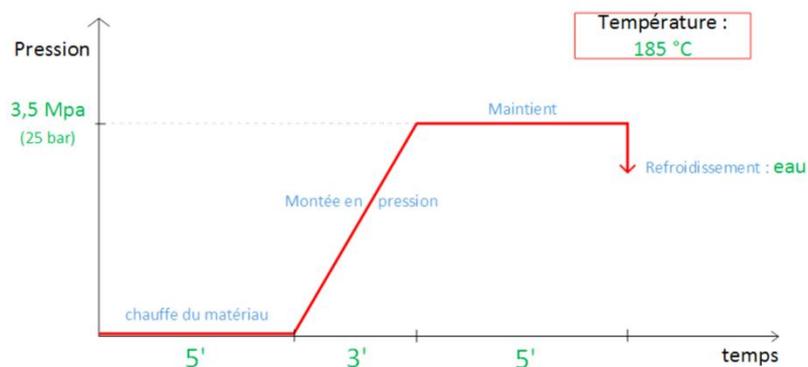


Figure 83 : Cycle de consolidation final des plaques comprenant les tresses métalliques

Du point de vue de la consolidation, les zones où les tresses métalliques sont présentes sont de plus fortes épaisseurs relativement aux autres endroits. Cette différence d'épaisseur crée une disparité de compression. Par conséquent, une modification de la pression (de 15 bar à une pression de 35 bar) a permis une meilleure consolidation. Des vues de dessus et de dessous des plaques consolidées avec différents paramètres sont présentées en Figure 84.

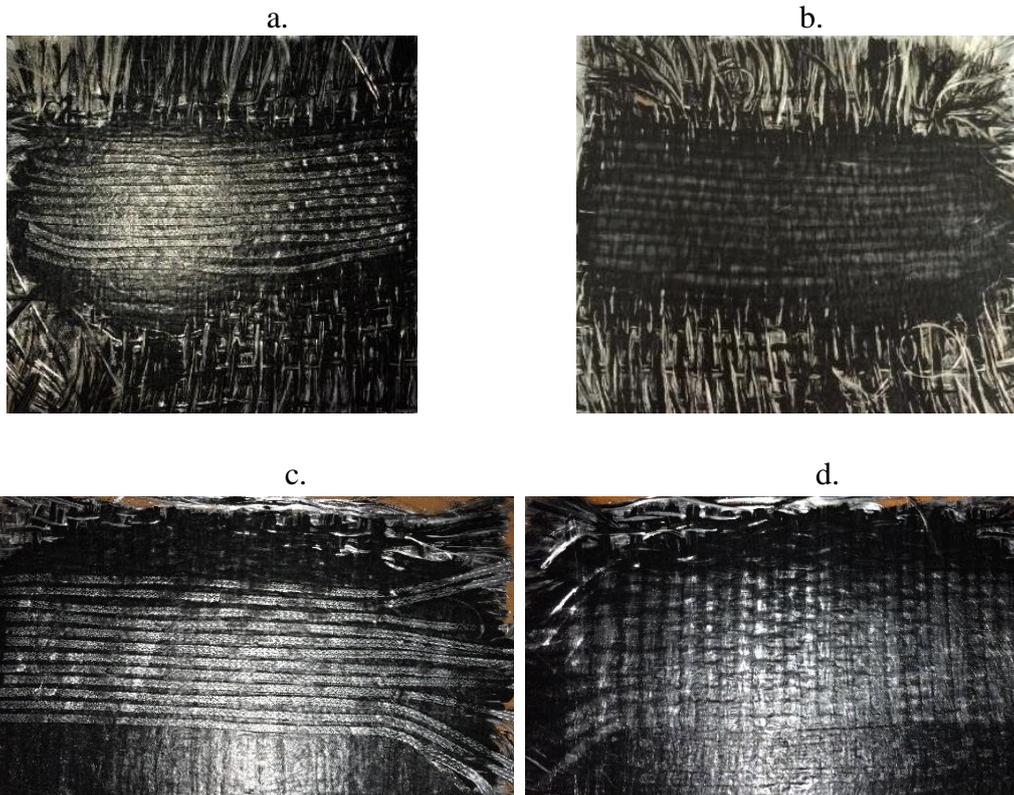


Figure 84 : Plaques consolidées : a : pression 15 bar vue de dessus, b : pression 15 bar vue de dessous, c : pression 35 bar vue de dessus, d : pression 35 bar vue de dessous

Au final, les endroits où les tresses métalliques sont situées présentent de faible quantité de résine qui a flué vers les autres zones. C'est pourquoi, lors des essais de consolidation suivants, une surépaisseur a été créée dans les zones où il n'y a pas de tresses métalliques en ajoutant un certain nombre de couches de film aluminium. Après plusieurs essais, il apparaît que les plaques sont légèrement plus homogènes, mais on distingue malgré tout un léger manque de résine sous les tresses métalliques comme le montre la Figure 85.



Figure 85 : Plaques consolidées sous 35 bar de pression et avec du film aluminium pour compenser l'écart d'épaisseur (gauche : vue de dessus avec les tresses apparentes, droite : vue de dessous)

Les résultats obtenus pour les mesures d'épaisseur sont affichés au Tableau 5.

Tableau 5 : Mesures d'épaisseur de la première structure réalisée avec les tresses métalliques

| Essai                             | Zones avec les tresses |            | Zones sans les tresses |            |
|-----------------------------------|------------------------|------------|------------------------|------------|
|                                   | Épaisseur moyenne (mm) | Écart-type | Épaisseur moyenne (mm) | Écart-type |
| <b>15 bar sans film aluminium</b> | 2,42                   | 0,08       | 2,07                   | 0,06       |
| <b>25 bar sans film aluminium</b> | 2,24                   | 0,02       | 1,93                   | 0,02       |
| <b>35 bar sans film aluminium</b> | 2,29                   | 0,06       | 1,76                   | 0,04       |
| <b>35 bar avec film aluminium</b> | 2,27                   | 0,03       | 1,53                   | 0,06       |

Afin de réaliser les essais de soudage, il s'est révélé qu'avec les techniques utilisées par Volvo truck, il était nécessaire d'avoir un contact électrique des deux côtés de la plaque. Or, avec cette première version de plaques avec des tresses métalliques intégrées, les tresses métalliques n'apparaissent que sur l'une des deux surfaces de la plaque, empêchant donc leur soudure.

Pour résoudre ce problème, une nouvelle architecture a été conçue pour que les tresses métalliques passent à travers l'ensemble de la structure en sens chaîne. Cette architecture est représentée à la Figure 86. Dans cette version, les tresses métalliques réalisent un liage orthogonal, se retrouvant seules dans une broche du peigne. Afin de conserver de la résine ainsi que des fibres de renfort dans les zones de tresses, nous avons décidé de placer une colonne de fils comelés entre chaque tresse métallique. Le reste de la structure reste identique à la version précédente.

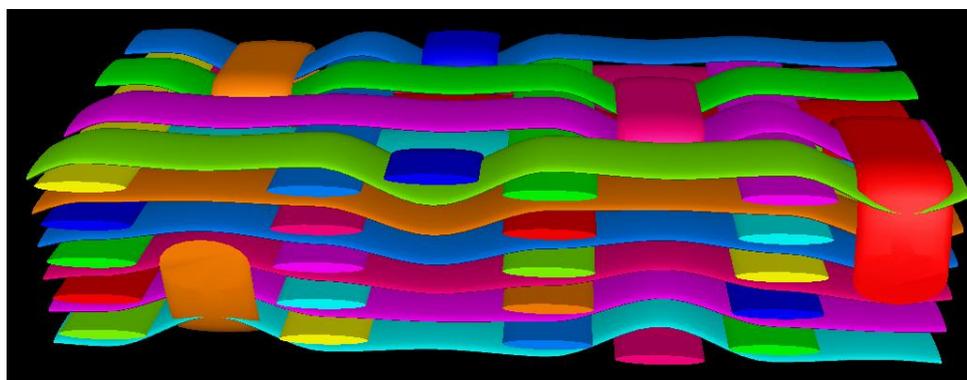


Figure 86 : Représentation de la seconde structure réalisée pour les essais de soudage

La tresse métallique se retrouvant seule dans une broche de peigne, les contacts avec les fibres diminuent de manière importante. Au final, les fibres entourant ces tresses métalliques se dégradent beaucoup moins même si une légère dégradation demeure du fait de la présence des tresses métalliques dans la foule de la machine à tisser. Le résultat de l'intégration des tresses métalliques au sein du tissu 3D interlock chaîne est présenté en Figure 87.



Figure 87 : Seconde structure réalisée pour les essais de soudage

Du point de vue de la consolidation, le cycle appliqué est le même que précédemment. Du fait que les tresses métalliques soient seules dans l'épaisseur du tissu, on observe qu'il n'y a plus de zones sans résine et que la tresse métallique est bien intégrée à la structure sans créer de surépaisseur comme le montre la Figure 88. Le Tableau 6 indique les épaisseurs mesurées au niveau des tresses métalliques et hors des tresses métalliques de la pièce consolidée.

Tableau 6 : Mesures d'épaisseur sur les plaques réalisées avec la seconde architecture

|                | Zones avec les tresses métalliques | Zones sans les tresses métalliques |
|----------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Épaisseur (mm) | 2,17                               | 2,12                               |
| Écart-type     | 0,04                               | 0,08                               |



Figure 88 : Structure consolidée

Ces pièces ont ensuite été envoyées sur le site de Saint-Priest de Volvo truck afin de réaliser des essais de soudage par point et au soudage semi-automatique.

Les essais de soudure par point n'ont pas fonctionné car les deux électrodes doivent être alignées sur le même axe et, comme la tresse est liée au reste de la structure, lorsqu'elle est apparente sur une surface, elle ne peut l'être sur l'autre surface, empêchant par la même occasion le passage de l'arc électrique.

Les essais de soudure semi-automatiques ont été fructueux, comme le montre la Figure 89, on observe que le fil fusible a bien fondu et permet de lier la pièce composite avec une pièce métallique. Cependant, la matière plastique en contact avec les points de soudure a été

dégradée, réduisant les propriétés mécaniques locales du matériau composite. Par ailleurs, les points de soudure ne sont pas très résistants.



Figure 89 : Apparence de l'assemblage composite/métal soudé

Au final, même si le soudage semi-automatique a fonctionné, aucune des deux solutions de soudage ne semble adaptée pour souder la plaque composite développée avec une partie métallique. La solution n'est donc pas retenue par le partenaire qui a développé un assemblage par collage en remplacement de la soudure. Afin d'améliorer le soudage, d'autres techniques de soudage peuvent encore être testées, et des adaptations peuvent également être envisagées au niveau de la structure tissée 3D interlock chaîne, mais également sur les matériaux utilisés pour réaliser la surface métallique, comme l'utilisation d'un fil métallique moins rugueux ou à base d'un alliage plus adapté à des soudures de plus faibles températures.

#### 2.4 Influence de l'armure de surface du renfort tissé 3D interlock chaîne lors d'essais d'arrachage d'un assemblage composite/métal.

Le support de siège développé doit résister à un crash test. Lors de celui-ci, le conducteur, ou le passager est entraîné par inertie vers l'avant de la cabine, entraînant avec lui le siège et le support de siège via la ceinture de sécurité. Le support de siège est fixé au siège par assemblage mécanique boulonné en quatre zones différentes réparties de manière à former un rectangle sur la préforme. Lors du crash test, les fixations de l'arrière de la pièce subissent un effort d'arrachage important et ne doivent pas rompre. On représente en Figure 90 les contraintes calculées par simulation lors d'un crash sur cette assise.

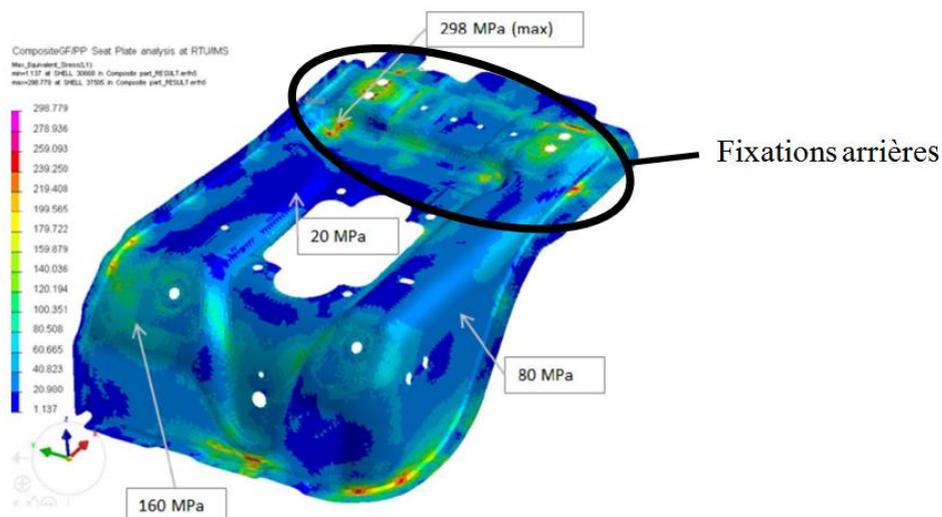


Figure 90 : Contraintes subies par l'assise de siège lors d'un crash test

Afin de reproduire cet effet, à moindre échelle que lors d'un crash test, l'Université de Riga, partenaire du projet Mapicc 3D, a développé un essai permettant de mesurer l'effort à fournir afin d'arracher l'assemblage de la pièce composite.

Les éprouvettes devant contenir un insert métallique, celles-ci ont été conçues avec un déliage dans la partie centrale afin de réaliser une poche pour accueillir l'insert, qui sera consolidé avec l'éprouvette. La Figure 91 représente la géométrie des éprouvettes réalisées pour les essais d'arrachage.

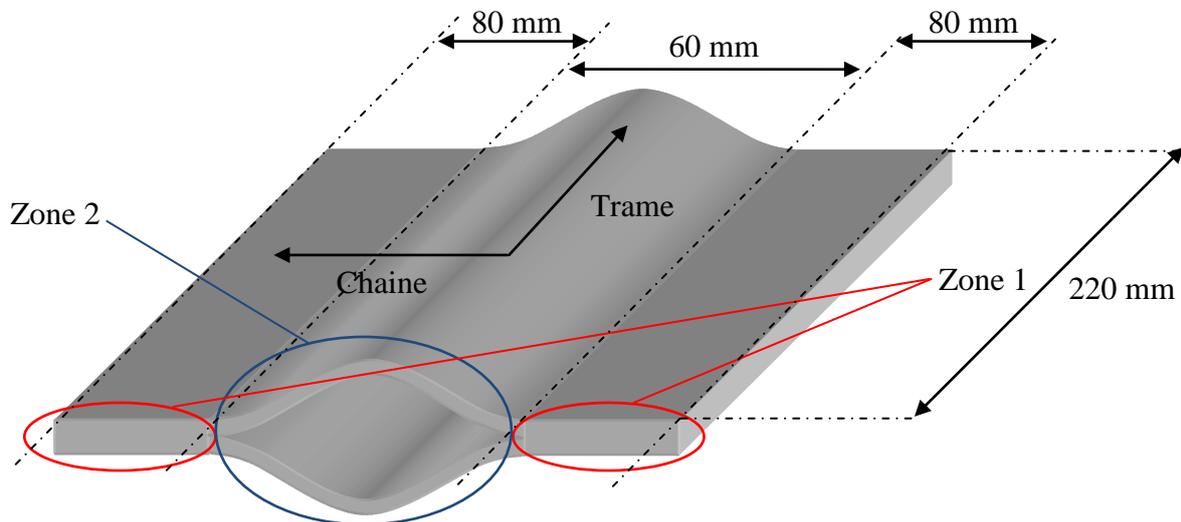


Figure 91 : Schéma représentatif de la forme des éprouvettes réalisées pour les essais d'arrachage

Afin d'étudier l'influence de la structure du renfort tissé 3D interlock chaîne lors de cet essai d'arrachage, une armure de surface a été réalisée par famille d'armure (toile, sergé, satin) sans changer le mode de liage dans l'épaisseur, ni les densités de fils de chaîne et de trame entre les différentes armures. Les structures réalisées avec les architectures locales des zones 1 et 2 pour chaque famille d'armure, sont présentées en Figure 92.

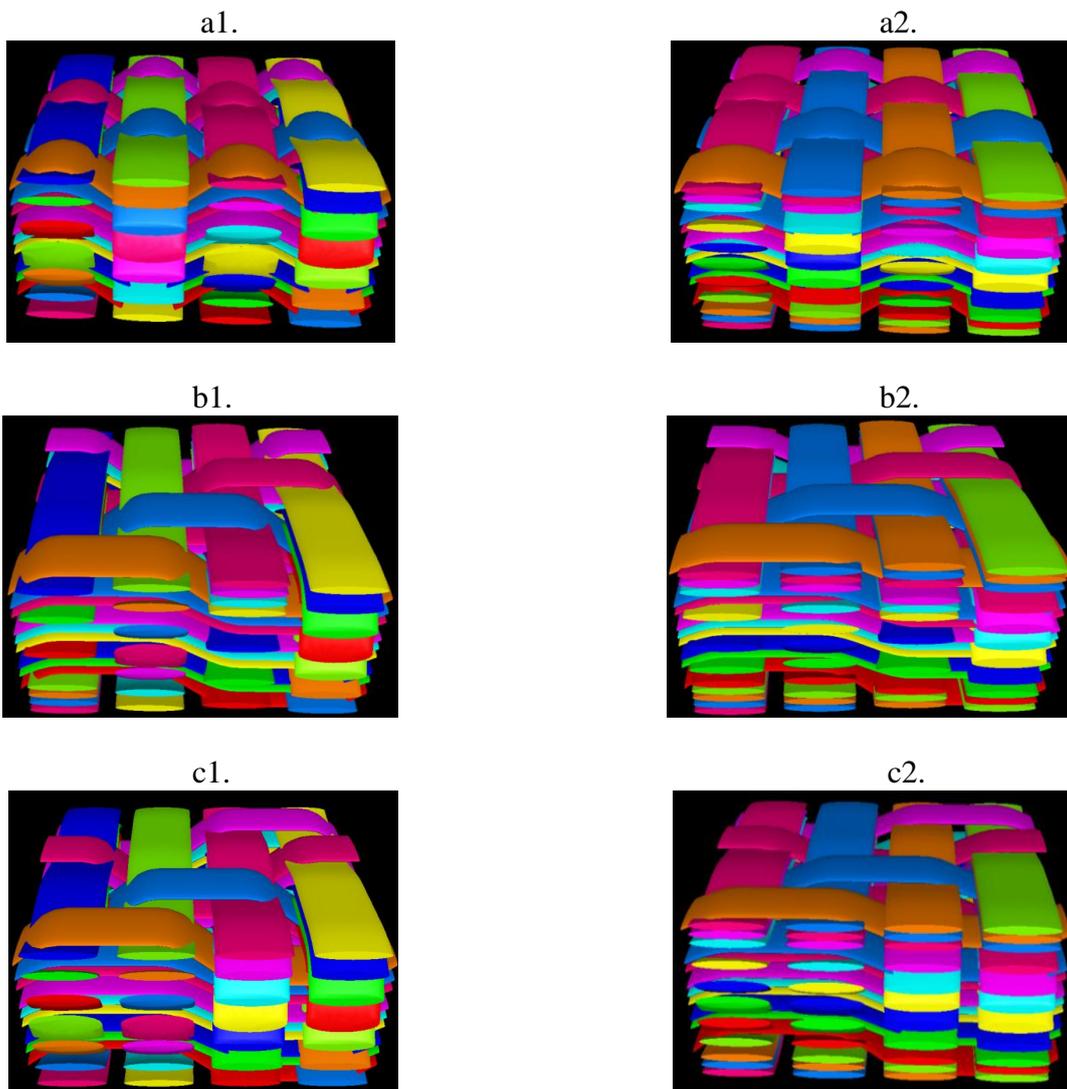


Figure 92 : Différentes familles d'armures testées lors des essais d'arrachage : toile (a1 : zone 1, a2 : zone 2), sergé (b1 : zone 1, b2 : zone 2) et satin (c1 : zone 1, c2 : zone 2).

Après le tissage, les éprouvettes ont été envoyées à l'Université de Riga, afin de réaliser la consolidation des préformes sous bâche à vide. Les préformes sont placées dans le moule avec l'insert préalablement introduit, puis une plaque est ajoutée afin d'obtenir une surface complètement plane autour de l'insert avant de placer la bâche à vide, puis de fermer hermétiquement l'espace autour de la préforme sous la bâche et de faire le vide. Les préformes sont ensuite envoyées dans une étuve où elles subissent un cycle de cuisson à 190 °C pendant 30 minutes.

Après les premiers essais de consolidation réalisés, il s'est avéré que les éprouvettes n'ont pas été consolidées correctement, à cause d'une trop faible pression sur la pièce. C'est pourquoi l'Université de Riga a décidé d'envoyer les préformes au partenaire Tencate afin de les consolider sous autoclave.

Les pièces consolidées sont ensuite percées en huit endroits aux bords de la pièce afin de la fixer à un bâti incliné à 20° par rapport à l'horizontale. La pièce est aussi reliée au système en son centre qui permettra d'appliquer une traction verticale dont les efforts sont transmis par assemblage mécanique à l'insert. Le système utilisé pour réaliser les essais d'arrachage est présenté en Figure 93

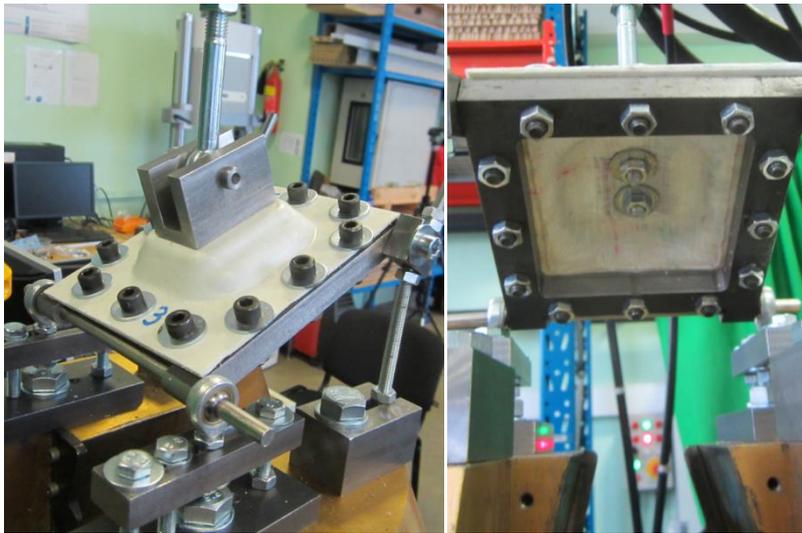


Figure 93 : Essai d'arrachage développé par l'université de Riga

À l'heure de la rédaction de ce manuscrit, les préformes n'ont pas encore été consolidées sous autoclave. Cependant, les éprouvettes consolidées sous bâche à vide ont pu être testées. La Figure 94 présente l'état de l'une de ces éprouvettes avant et après un essai d'arrachage.

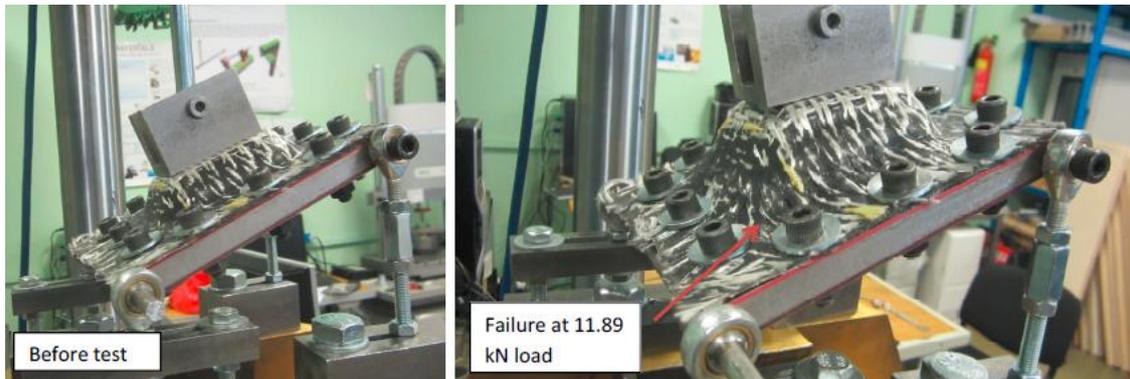


Figure 94 : Aperçu d'une éprouvette avant et après un essai d'arrachage

Trois essais mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes consolidées sous bâche à vide avec des efforts à la rupture de 11,89kN, 15,25kN et 21,71kN. Les trois essais n'ont pas respecté le cahier des charges, car l'effort à la rupture minimale à respecter était de 21,71kN. La grande variabilité de ces résultats est probablement due à la mauvaise consolidation. D'autres essais seront réalisés avec les éprouvettes consolidées sous autoclave et devraient donner de meilleurs résultats.

## 2.5 Conclusion de la solution TRUCK-MAPICC

Au final, dans cette partie, des études ont été réalisées sur la jonction entre une pièce composite et une pièce métallique par l'insertion de tresses métalliques au sein de la structure tissée 3D interlock chaîne et des essais d'arrachage avec différentes armures de surface ont été programmés.

Malgré le manque de résultats de ces études, les résultats des études menées pour l'application AUTO-MAPICC sont également valables pour l'application TRUCK-MAPICC et ont permis de définir des architectures afin d'obtenir une préforme optimisée pour l'application TRUCK-MAPICC. Avec une consolidation par un système moule-contre-moule, l'assise de siège de camion développée ici devrait permettre de répondre au cahier des charges de l'application TRUCK-MAPICC.

### **3. Solution RAIL-MAPICC pour l'application ferroviaire**

#### **3.1 Problématique du partenaire**

Le partenaire ALSTOM, étant un fabricant dans le domaine du transport ferroviaire, celui-ci recherche des coûts de fabrication relativement faibles ainsi que des cadences de production importantes pour faire face aux grandes séries demandées comme pour les deux précédentes applications. La principale différence dans le cahier des charges de cette application par rapport aux autres applications est le besoin d'une bonne tenue au feu de la pièce développée du fait de son positionnement au sein du véhicule transportant des passagers. Par conséquent des exigences de sécurité plus sévères que dans d'autres applications doivent être appliquées aux matériaux utilisés tels que le caractère non inflammable ou encore la non-toxicité en cas de dégagement de fumées.

Ainsi la technologie choisie pour la solution RAIL-MAPICC afin de réaliser un croisement de tubes en matériau composite s'est orientée vers une mise en forme suivie d'une consolidation relativement rapide des préformes, de sorte à atteindre des cadences de production suffisamment importantes avec la consolidation d'une structure tissée 3D interlock chaîne. Notons que dans le cadre du projet MAPICC3D, des solutions alternatives basées sur d'autres technologies textiles de réalisation de préformes ont également été investiguées (croisement d'Interlock, mais également tresses) [50,116-122].

Pour obtenir des tenues mécaniques relativement importantes avec des coûts matières relativement faibles, la fibre de verre a été sélectionnée comme fil de renfort au sein du fil comélé. Pour des raisons de tenue au feu, le polymère thermoplastique utilisé pour cette application ne sera pas du polypropylène, mais du polyamide. Ainsi, ce polymère déjà présent dans le fil, sera plus rapidement diffusé au sein de la préforme lors de l'étape de thermoformage. Les caractéristiques physiques, chimiques et thermiques du fil comélé à base de fibres de verre E et de polyamide sont précisées au Tableau 7.

La pièce composite développée ici est donc réalisée par thermoformage d'une architecture tissée dont la fabrication combine plusieurs techniques de tissage différentes, qui ont été adaptées au tissage 3D interlock chaîne. Parmi ces techniques, on trouve le tissage par parties, permettant de tisser une préforme avec plusieurs parties de géométrie différentes, le tissage tubulaire, permettant la réalisation de tubes dans le sens de la production, le déliage permettant la séparation d'un tissu en deux parties dans l'épaisseur et le tissage créneau permettant la réalisation d'une partie plus longue que l'autre partie d'un déliage.

Le partenaire RAIL-MAPICC ayant laissé beaucoup de liberté au niveau des dimensions des démonstrateurs à réaliser, nous avons décidé de réaliser des prototypes de mêmes dimensions que ceux réalisés avec les autres technologies de fabrication de renforts, à savoir des tubes de diamètre de 41 mm au sein de prototypes faisant 30cm de côté (Figure 95).

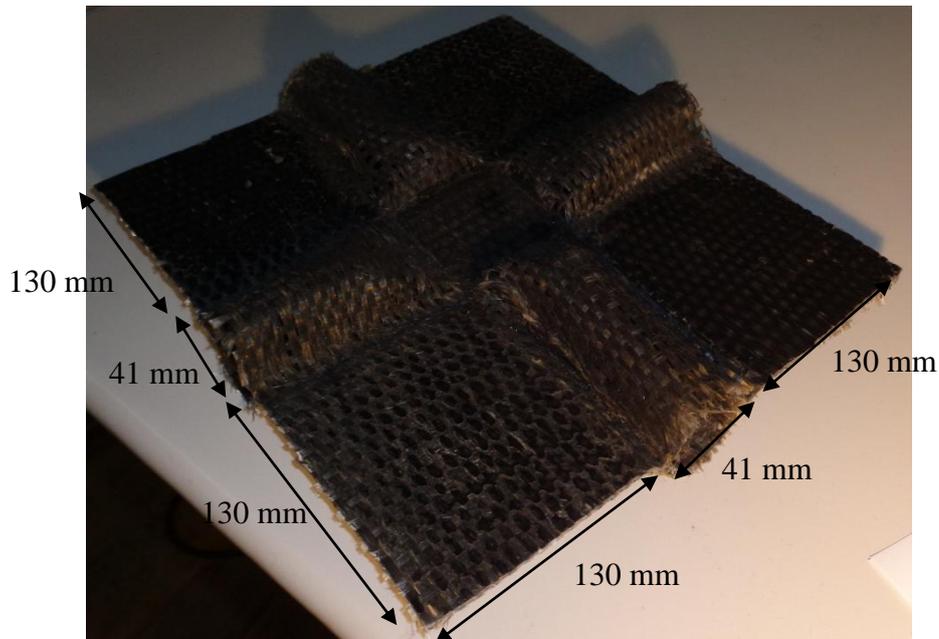


Figure 95 : Dimensions des prototypes de l'application RAIL-MAPICC

Ces dimensions ont évolué lors de l'élaboration des différents prototypes de la pièce, en fonction de l'influence du choix des architectures de préforme, de la mise en forme, mais également des étapes de consolidation.

Concernant cette application, dans un premier temps l'élaboration de la pièce (préforme, consolidation) sera détaillée ainsi que les essais mécaniques réalisés. Dans un second temps les effets des paramètres d'architecture de la préforme seront exposés. Enfin dans une troisième partie, l'influence de la géométrie de la préforme sera abordée.

### 3.2 Solution développée

#### A. Élaboration des préformes et consolidation

L'application développée ici est un croisement de tubes, pièce initialement réalisée en métal. La version métallique ainsi que l'une des versions composites sont présentés à la Figure 96.

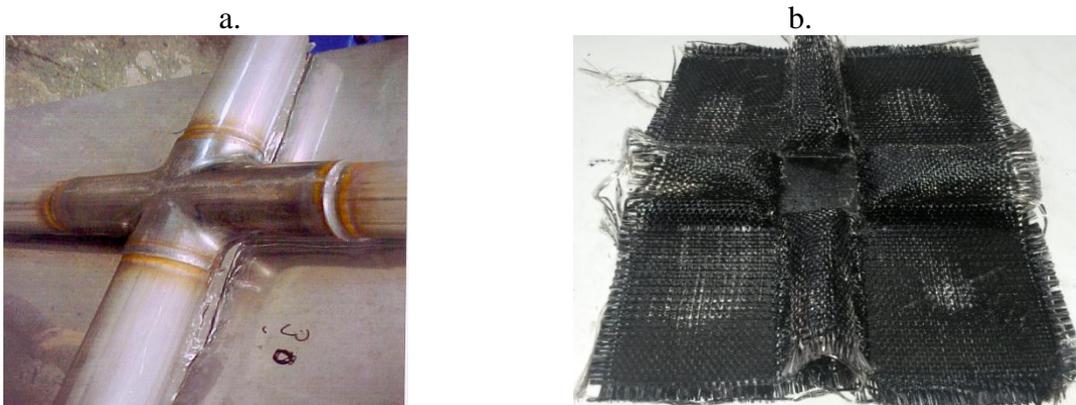


Figure 96 : Solution Railmapicc : a. version métallique et b. version composite

Cette pièce permet de faire la jonction entre différents profilés tubulaires permettant la réalisation de l'architecture structurale du wagon dont l'habillage final est réalisé par collage des tôles métalliques. Différentes simulations des déformations, subies par l'assemblage structure et plaques formant le wagon, ont été réalisées afin de s'assurer du respect du cahier des charges comme présenté en Figure 97 (en bas à droite).

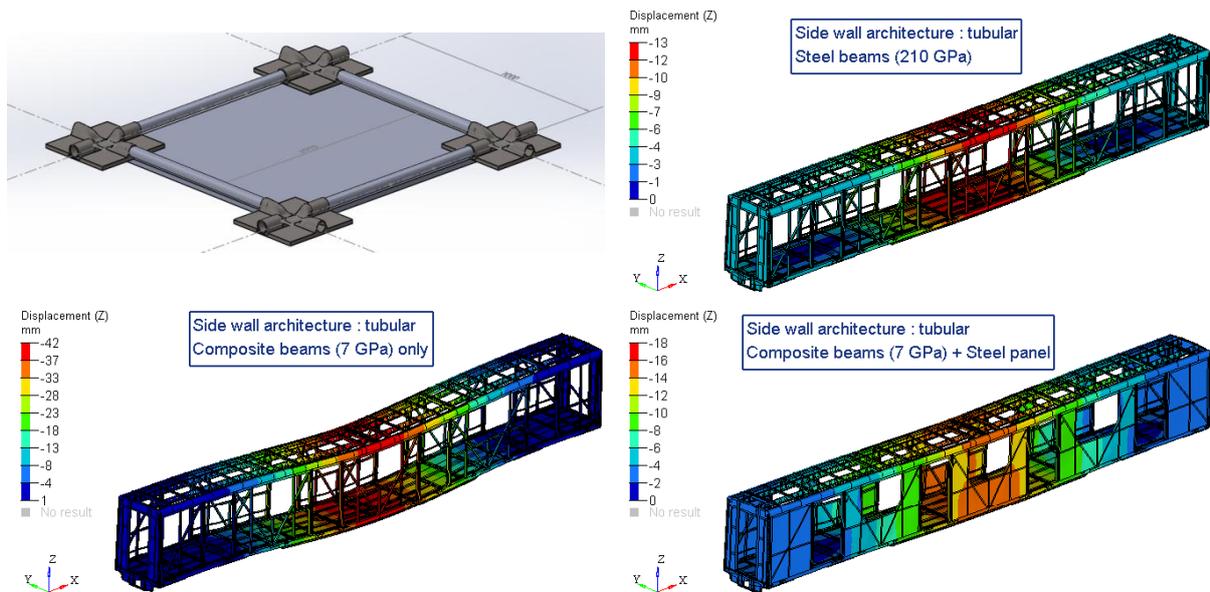


Figure 97 : Solution Railmapicc : assemblage et simulation réalisée sur un wagon

La spécificité relativement aux autres applications est que le partenaire ferroviaire, a intégré une tenue au feu au cahier des charges, impliquant l'utilisation de polyamide à la place de polypropylène. L'idée était donc de proposer une solution tissée 3D interlock chaîne réalisée en utilisant un fil comélé verre/polyamide. Le fait d'utiliser des fils comelés permet de ne pas injecter le polymère dans le renfort en intégrant la matrice au sein du fil.

La particularité de cette pièce relève de la complexité géométrique à considérer lors du tissage de la préforme. En effet, pour développer la géométrie de la pièce en conservant la continuité des fils de chaîne et de trame, il a fallu combiner plusieurs techniques de tissage telles que :

- le tissage tubulaire pour le tube dans le sens de production, en rouge sur la Figure 98,
- le tissage par parties afin de réaliser les zones latérales 1, 2 et 3, représentées par des traits verts sur la Figure 98,
- le déliage pour une première variante de préforme ou le tissage créneau pour une seconde variante, permettant ainsi la réalisation des tubes dans le sens trame représenté en bleu sur la Figure 98.

Il a fallu également adapter ces techniques afin de réaliser la préforme en tissu 3D interlock chaîne. Pour réaliser ces préformes, la machine à tisser doit être équipée d'un système de navette afin que la technique de tissage tubulaire puisse être réalisée.

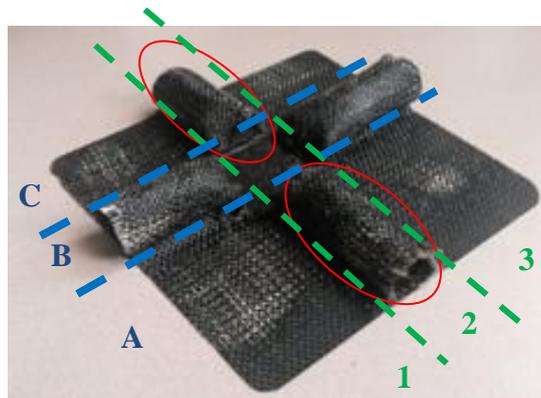


Figure 98 : Solution Railmapicc comprenant les différentes techniques

La préforme comprend par conséquent, comme décrit sur la Figure 99:

- les 4 tubes perpendiculaires,
- 4 panneaux 3D interlock chaîne entre les tubes,
- et un autre tissu 3D interlock chaîne au milieu de la préforme.

Afin de réaliser la préforme sur une machine à tisser comportant 24 cadres, il a été nécessaire de réduire l'épaisseur de la pièce à travers une préforme tissée 3D interlock chaîne avec 3 couches.

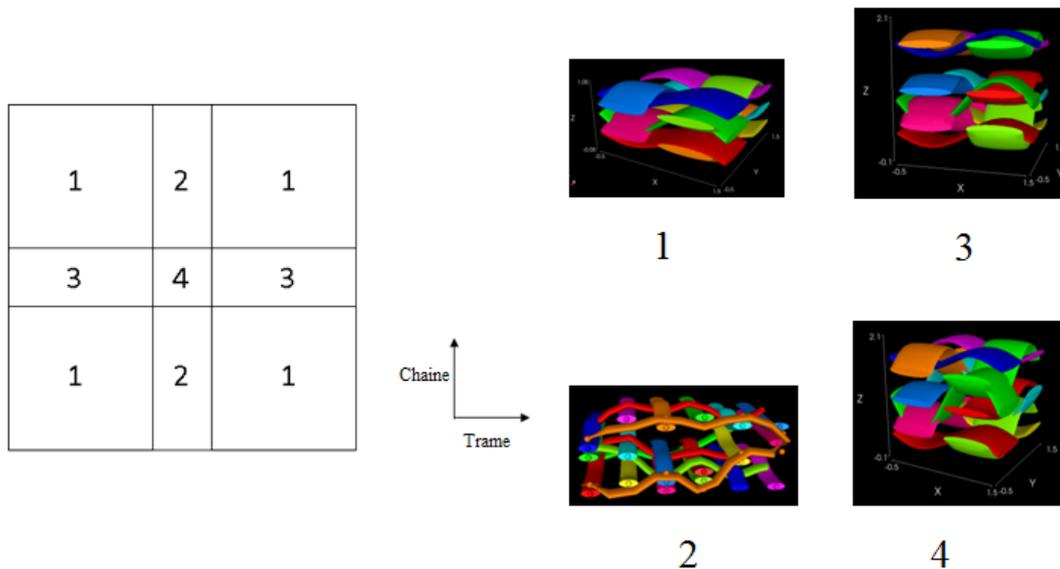


Figure 99 : Solution Railmapicc : Armures pour chaque partie de la préforme Rail-Mapicc

Il existe donc deux différentes préformes différenciées par les tubes en sens trame présentés en Figure 100 :

- La première version appelée « déliage » possède deux tubes en sens trame, réalisés à travers la technique du déliage, permettant la formation de deux tissus de longueur identique. Afin de minimiser la formation de plis lors de la mise en forme de la préforme, les parties tubulaires réalisées dans le sens de la production ont été détachées du reste de la préforme. Les tubes dans l'autre sens ont été réalisés par un déliage d'une couche par rapport aux deux autres couches de la préforme avant de les relier, après avoir tissé une longueur de tissu de 65mm, et ce afin d'obtenir un diamètre de tube de 41 mm.
- La seconde version appelée « créneau » possède deux tubes en sens trame réalisés à partir de la technique du créneau, permettant la réalisation d'un déliage dont les deux longueurs de tissu ne sont pas identiques.



Figure 100 : Solution Railmapicc : a. un déliage et b. un créneau

Deux géométries différentes de la pièce composite ont également été conçues.

La première géométrie de la pièce composite est présentée à la Figure 101.a, avec la préforme par « déliage », et possède les axes des tubes confondus avec le plan des tissus 3D interlock chaîne. Cette géométrie peut également être obtenue avec la préforme « créneau », en créant une superposition similaire à celle présente en sens chaîne.

La deuxième version de la pièce composite, illustrée en Figure 101.b se distingue de la précédente par le positionnement des axes des tubes hors du plan permettant l'obtention d'une surface de la pièce plane, ce qui peut aider à l'assemblage des plaques métalliques. Cette géométrie peut être uniquement obtenue par l'utilisation de la préforme « créneau ».

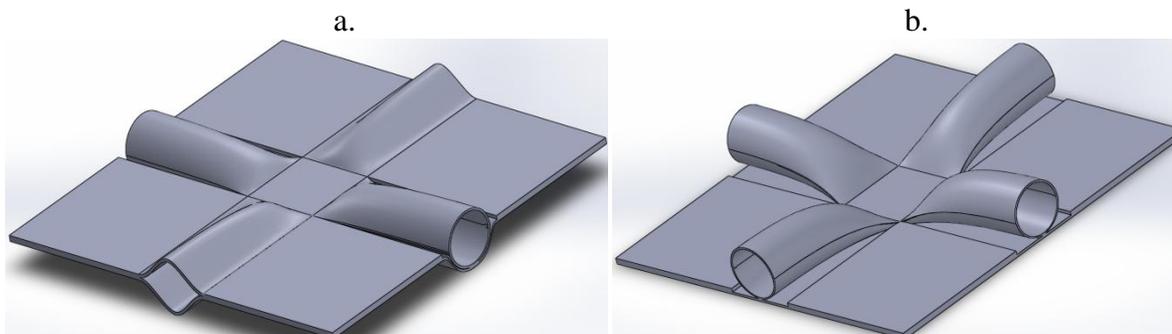


Figure 101 : Solution Railmapicc : a. Première version et b. Deuxième version

Afin de consolider ces deux types de préformes, deux systèmes de mise en forme, adaptables aux deux versions de préformes, ont été conçus et fabriqués afin de conférer la meilleure forme possible à la préforme avant de chauffer pour la consolider. Le premier système de consolidation est présenté en Figure 102 et le deuxième système de consolidation est présenté en Figure 103.



Figure 102 : Premier système de consolidation Railmapicc : a. modélisation et b. système réalisé

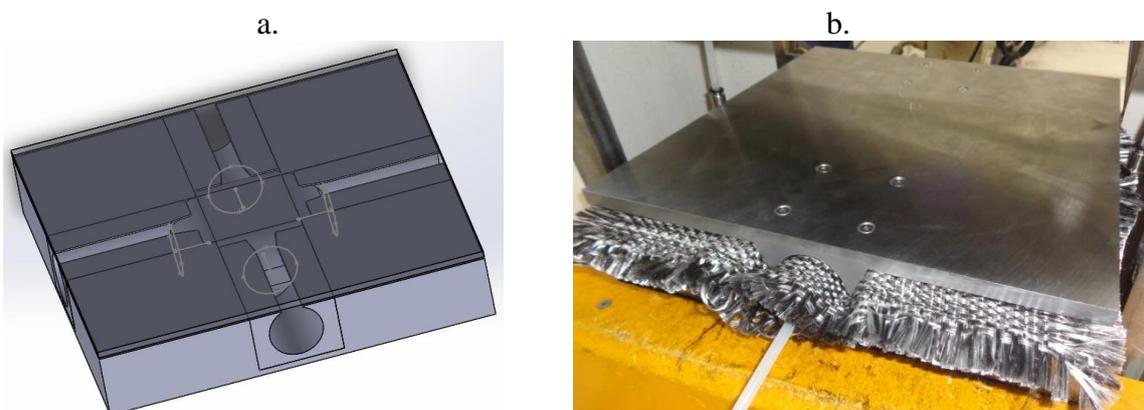


Figure 103 : Deuxième système de consolidation Railmapicc : a. modélisation et b. système réalisé

La consolidation avec le premier système de mise en forme consiste à appliquer une pression sur les parties plates de la préforme avant d'insérer un tube métallique dans les parties tubulaires à l'aide d'un rail de guidage présenté en Figure 104. Ce guide permet de contrôler la position des tubes lors de leur insertion dans la préforme et, éventuellement de placer une bâche sur les parties tubulaires afin d'appliquer une pression par le vide sur ces zones. Le système de consolidation est ensuite placé dans une étuve où la préforme sera portée à 250°C pendant 30 minutes tout en conservant une pression sur les plaques.



Figure 104 : Insertion d'un tube métallique dans le premier système de consolidation

Le deuxième système consiste également à presser légèrement les zones plates, puis à insérer une vessie gonflable dans chaque tube pour les gonfler, afin d'appliquer une pression sur les tubes entre les vessies et le moule. Le système de consolidation est placé dans une presse chauffante afin de consolider la préforme à 230°C et 60 bars de pression.

Le système de consolidation étant épais, son inertie thermique est importante. Le cycle de cuisson s'est donc résumé à la montée en température du système de consolidation, puis à son refroidissement immédiatement après l'obtention de la température de cuisson.

Les principales caractéristiques techniques des préformes sèches sont résumées dans le Tableau 7.

Tableau 7: Caractéristiques du fil utilisé ainsi que de la structure tissée développée pour l'application Railmapic

| Fil                                   |                         | Préforme  |                       |
|---------------------------------------|-------------------------|---|-----------------------|
| Titre                                 | 960 Tex                 | Densité de surface<br>Chaine/Trame (colonnes /cm) | 4 / 3,5               |
| % Verre E / % Polyamide<br>(% volume) | 41% /<br>59%            | Nombre de couches                                 | 3                     |
| Diamètre fibres<br>Verre/polyamide    | 16,7 µm<br>/ 31,6<br>µm | Masse surfacique globale                          | 2300 g/m <sup>2</sup> |
| Module de Young                       | 10,5 GPa                | Epaisseur de la préforme                          | 1,8 mm                |
| Élongation à la rupture               | 3,22 %                  |   |                       |
| Ténacité                              | 20,78<br>cN/tex         |   |                       |

## B. Caractérisations mécaniques

Des essais mécaniques ont été réalisés par l'Université de Riga sur les structures tissées consolidées pour chaque partie de la pièce composite ainsi que sur la pièce composite dans sa globalité.

Trois types de structures représentatives des différentes zones de la préforme ont été réalisés et consolidés pour être testés afin de déterminer différentes caractéristiques mécaniques, à travers des essais de traction selon la norme ISO527-4, des essais de flexion 3 et 4 points selon la norme ISO14125 et des essais de cisaillement plan selon la norme ASTM3518. Le Tableau 8 donne les résultats des différents essais mécaniques réalisés sur les différentes structures.

Tableau 8 : Caractéristiques de chaque partie de la pièce composite développée pour l'application Railmapicc

|  | 1 couche |        | 2 couches |        | 3 couches |        |
|--|----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
|  | Chaîne   | Trame  | Chaîne    | Trame  | Chaîne    | Trame  |
| <b>Caractéristiques en Traction (vitesse d'essai : 2mm/min)</b>            |          |        |           |        |           |        |
| Module de Young (GPa)  | 11,18    | 9,33   | 11,9      | 9,98   | 14,72     | 12,26  |
| Résistance à la traction (MPa)   | 220,02   | 187,7  | 184,14    | 196,66 | 204,08    | 201,82 |
| Elongation à rupture (%)   | 1,86     | 2,16   | 1,67      | 2,33   | 1,64      | 1,99   |
| Coefficient de Poisson   | 0,33     | 0,3    | 0,31      | 0,23   | 0,23      | 0,21   |
| <b>Caractéristiques en cisaillement plan (vitesse d'essai : 15 mm/min)</b> |          |        |           |        |           |        |
| Module de cisaillement (GPa)   | 5,84     |        | 7,1       |        | 8,32      |        |
| Effort maximum de cisaillement plan (MPa)                                  | 21,28    |        | 25,08     |        | 29,58     |        |
| <b>Caractéristiques en Flexion 3 points</b>                                |          |        |           |        |           |        |
| Module de flexion 3 pts 5mm/min(GPa)                                       | 4,97     | 3,75   | 7,77      | 6,39   | 13,84     | 6,08   |
| Module de flexion 3pts 50mm/min(GPa)                                       | 5,12     | 4,14   | 8,92      | 7,43   | 13,76     | 6,18   |
| Module de flexion 3pts 500mm/min(GPa)                                      | 4,97     | 4,31   | 9,65      | 7,48   | 14,22     | 5,99   |
| Résistance à la flexion 3pts 5mm/min (MPa)                                 | 155,91   | 144,24 | 160,92    | 124,49 | 225,94    | 152,4  |
| Résistance à la flexion 3pts 50mm/min (MPa)                                | 172,83   | 162,71 | 194,83    | 146,42 | 269,74    | 160,59 |
| Résistance à la flexion 3pts 500mm/min (MPa)                               | 193,25   | 181,24 | 266,78    | 174,17 | 279,61    | 173,49 |
| <b>Caractéristiques en Flexion 4 points</b>                                |          |        |           |        |           |        |
| Module de flexion 4pts 5mm/min(GPa)  | 6,09     | 6,64   | 9,99      | 9,15   | 15,25     | 6,48   |
| Module de flexion 4pts 50mm/min(GPa)                                       | 6,87     | 6,01   | 11,63     | 8,12   | 14,77     | 5,8    |
| Module de flexion 4pts 500mm/min(GPa)                                      | 4,76     | 6,94   | 9,71      | 9,58   | 16,39     | 6,76   |
| Résistance à la flexion 4pts 5mm/min (MPa)                                 | 79,04    | 81,1   | 191,57    | 122,84 | 468,56    | 120,92 |
| Résistance à la flexion 4pts 50mm/min (MPa)                                | 85,68    | 77,44  | 213,98    | 127,25 | 339,02    | 112,86 |
| Résistance à la flexion 4pts 500mm/min (MPa)                               | 68,45    | 73,98  | 185,45    | 151,06 | 306,27    | 126,6  |

On peut observer que la tenue mécanique est plus importante en sens chaîne qu'en sens trame pour l'ensemble des essais en traction, flexion et cisaillement, ce qui s'explique par des densités en fils de chaîne plus importantes que les densités en fils de trame.

De même, la tenue mécanique augmente avec le nombre de couches, mis à part les essais de traction avec une pièce composite composée d'une couche de tissu simple en sens chaîne qui s'est avérée obtenir de meilleurs résultats qu'en deux couches.

Enfin, mis à part quelques résultats contradictoires, l'augmentation de la vitesse de déformation augmente la rigidité des pièces composites, ce qui peut être expliqué par une augmentation de la rigidité des polymères en fonction de la vitesse croissante de déformation.

Dans un second temps la caractérisation a concerné deux variantes de croix. Ces préformes, avec un déliage pour la première version et avec un créneau pour la deuxième version de la préforme présentées en Figure 101, ont été consolidées de manière à obtenir les plaques dans le plan tangent aux tubes. Après consolidation, les pièces ont été soumises à trois types d'essais différents : un essai de flexion 3 points, un essai de flexion 5 points et un essai de cisaillement dans le plan.

Les essais de flexion 3 points ont été réalisés comme illustré en Figure 105. Ce banc mesure les efforts appliqués pour un déplacement allant jusqu'à 25mm. L'écart entre les appuis est de 260mm et le diamètre de la pièce d'appui centrale de 40mm.

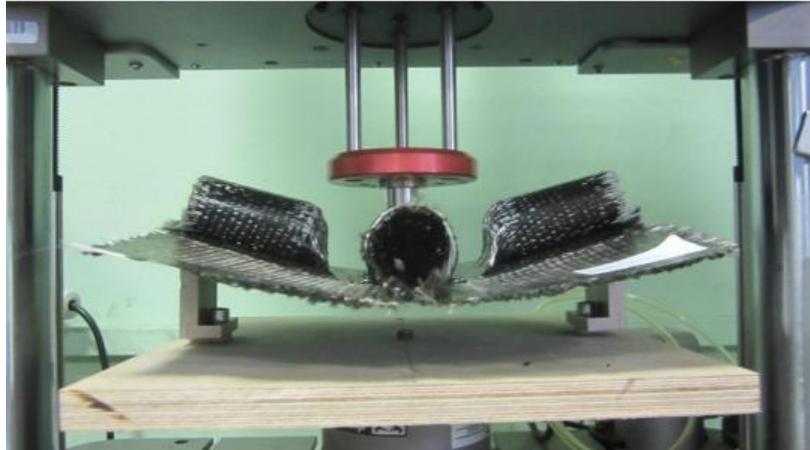


Figure 105 : Essai de flexion 3 points

Deux types de préformes, réalisés d'une part avec la technique de tissage créneau (Spécimens 1 à 6), d'autre part avec la technique du tissage par déliage (Spécimens 7 à 12), ont été concernés par ces essais.

Les résultats des essais de flexion 3 points sont présentés en Figure 106, dans les sens chaîne et trame.

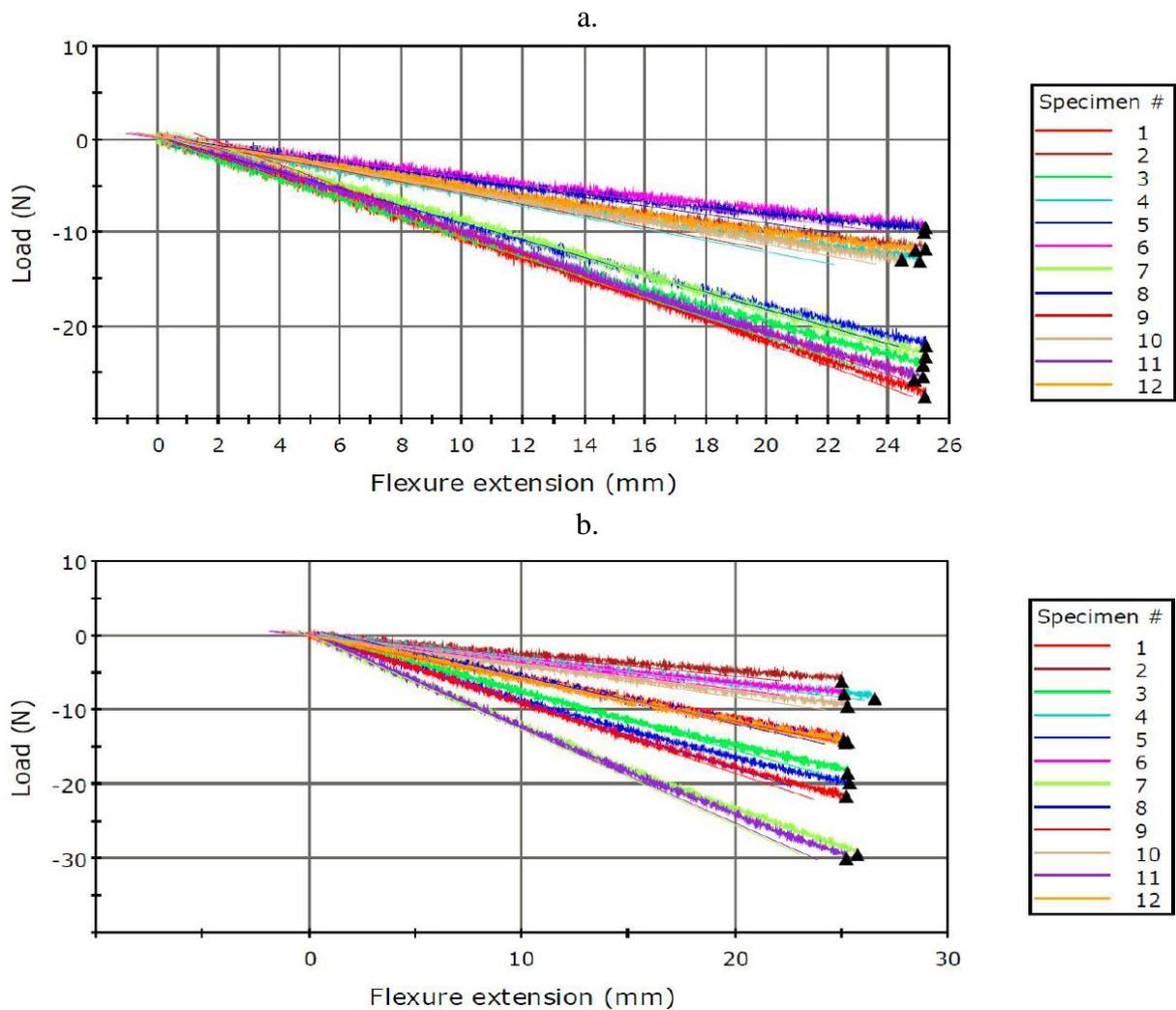


Figure 106 : Résultats des essais de flexion 3 points. a. avec les préformes avec déliage et b. avec les préformes avec le tissage crêneau

Pour les essais réalisés en utilisant les pièces composites réalisées à partir des préformes avec un déliage, les courbes du groupe supérieur sont les essais en sens chaîne et les autres sont les essais en sens trame. La rigidité des pièces est donc plus importante dans le sens chaîne qu'en sens trame, ce qui peut s'expliquer par le fait d'une densité de fils plus importante en sens chaîne qu'en sens trame.

Les conclusions sont également valables en ce qui concerne les essais avec les pièces composites comportant un tissage crêneau, bien que la dispersion des résultats rende moins significative la différence entre les essais en sens chaîne et trame. La dispersion de ces résultats peut être expliquée par une plus grande irrégularité du tissu dans les zones des crêneaux.

Les essais de flexion 5 points ont été réalisés de la même manière que les essais de flexion 3 points, en ajoutant deux points d'appui de manière à obtenir  $90^\circ$  entre chaque point d'appui. La Figure 107 donne un aperçu du montage réalisé pour cet essai.

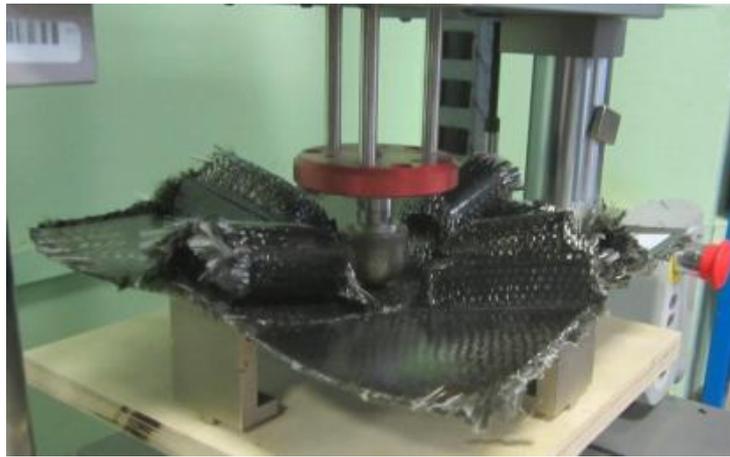


Figure 107 : Essai de flexion 5 points

Les résultats des essais de flexion 5 points sont présentés en Figure 108.

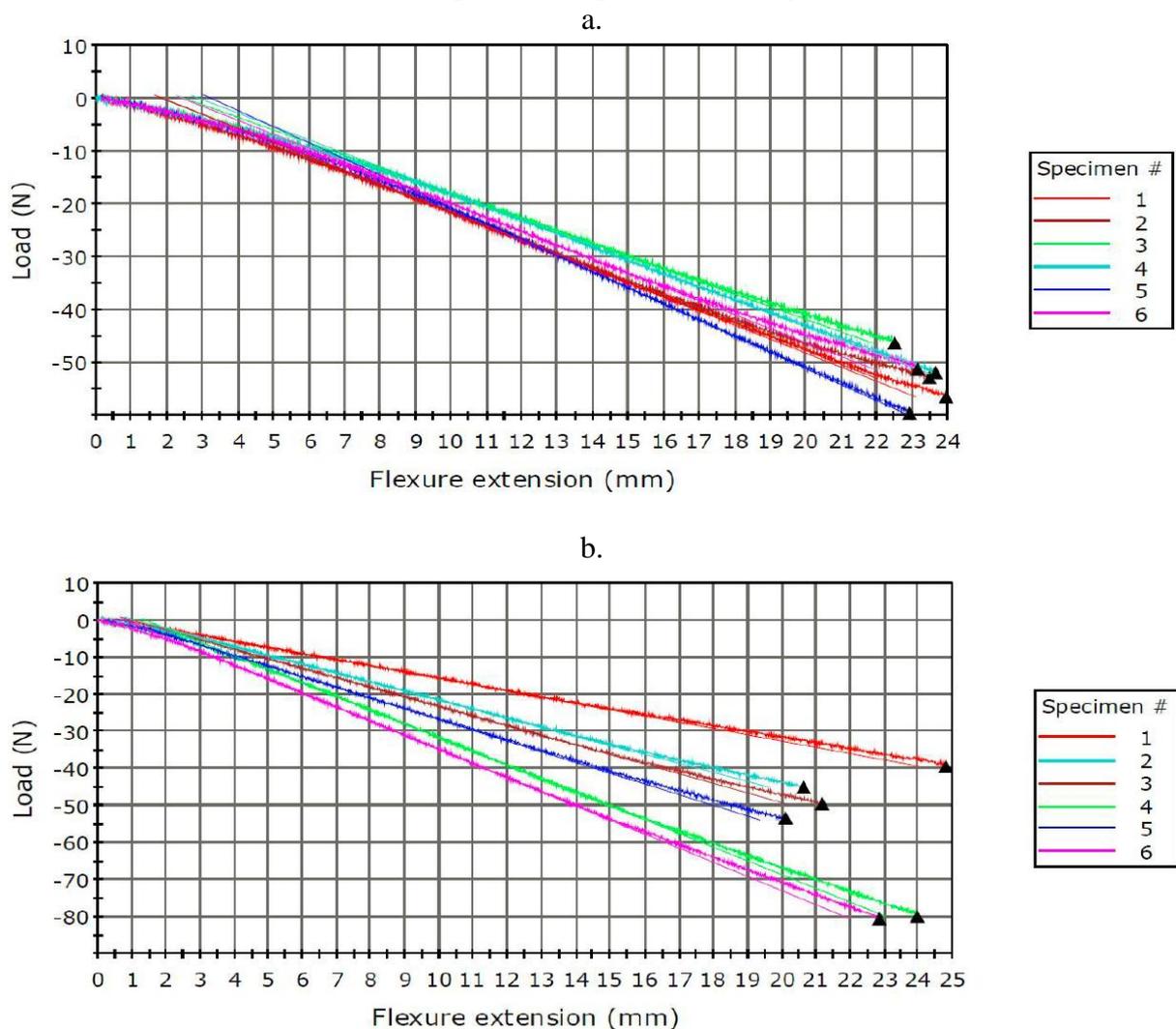


Figure 108 : Résultats des essais de flexion 4 points. a. Eprouvettes avec un déliage et b. Eprouvettes avec un créneau

Ces essais mettent également en évidence une dispersion importante des résultats obtenus pour les éprouvettes réalisées avec un créneau, relativement à ceux obtenus avec un déliage. Les éprouvettes avec un créneau présentent un allongement moyen à la rupture plus faible que les éprouvettes avec un déliage, mais avec un effort moyen à rupture plus important.

Les essais de cisaillement plan ont été réalisés par la méthode « Picture frame » avec un point d'attache uniquement au niveau de chaque tube de la pièce composite après consolidation testée. La Figure 109 donne un aperçu du montage réalisé pour cet essai.



Figure 109 : Essai de cisaillement dans le plan

Les résultats des essais de cisaillement dans le plan sont présentés en Figure 110.

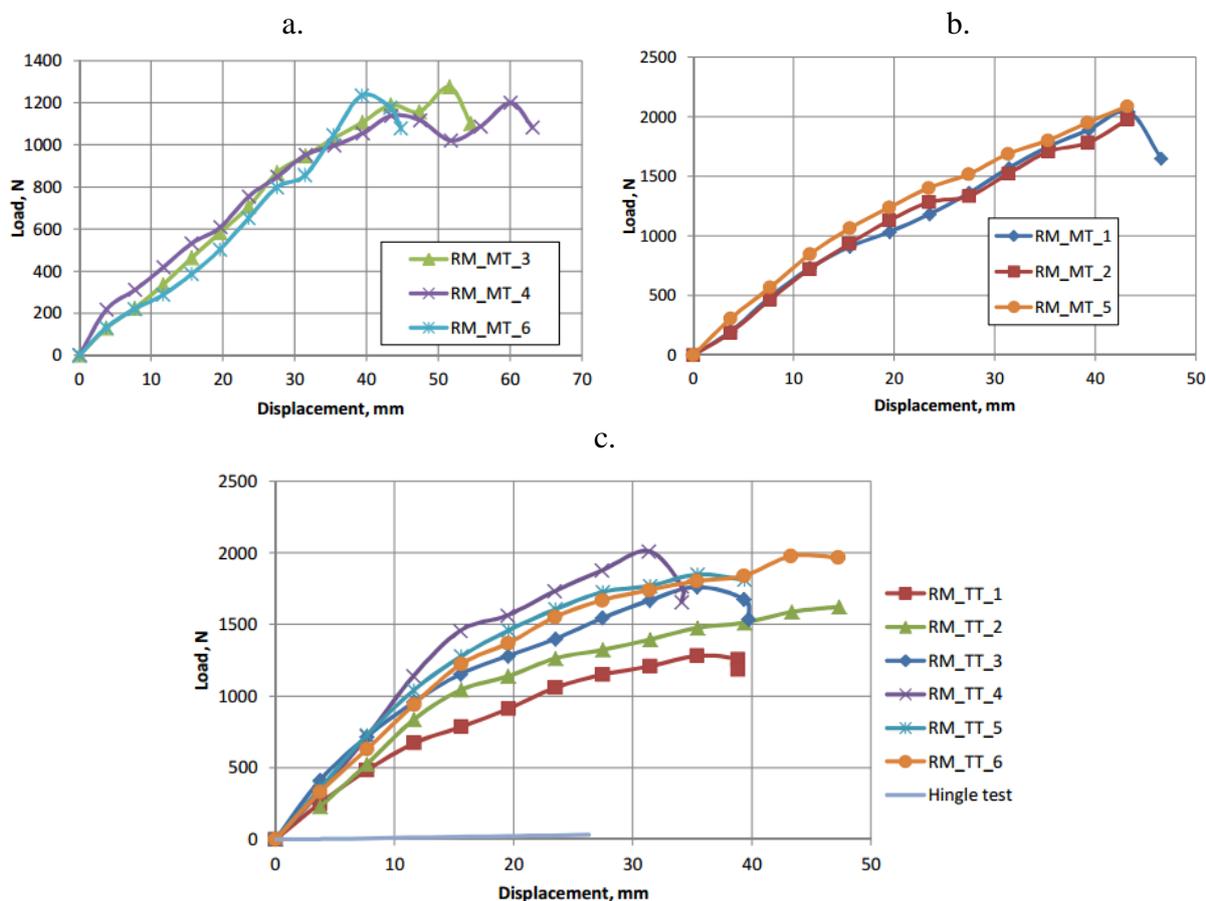


Figure 110 : Résultats des essais de cisaillement dans le plan. a. Eprouvettes avec un déliage et une pré-tension de 3N, b. Eprouvettes avec un déliage et une pré-tension de 5N et c. Eprouvettes avec un créneau et une pré-tension de 5N

Ces essais ont été réalisés avec les épreuves comportant une technique de tissage par déliage en faisant varier la pré-tension de 3 et 5N. L'influence du choix de cette pré-tension est conséquente sur ce comportement en cisaillement plan.

Comme pour les essais précédents, les essais avec les épreuves comportant une technique de tissage créneau présentent des résultats avec une variabilité plus importante entre les

éprouvettes. On peut constater que ces éprouvettes (avec un créneau) se déforment moins que les éprouvettes avec un déliage, et on observe une rupture par arrachage du tube pour les éprouvettes avec un créneau alors que ce phénomène n'a pas été constaté pour les éprouvettes avec un déliage.

### **3.3 Étude de la dépendance entre paramètres géométriques à différentes étapes de fabrication de la pièce composite.**

#### **A. Influence de l'architecture d'une préforme sur sa géométrie**

Lors du développement de la version du croisement de tubes «par déliage», comportant un déliage pour la réalisation des tubes en sens trame, certains choix techniques ont été réalisés, notamment un tissage par zone au niveau des parties A et C de la préforme représentées en Figure 98 afin de créer une zone centrale (zone 2) et deux zones latérales distinctes (zones 1 et 3). Afin de réaliser le croisement de tubes, chaque zone (1, 2 et 3) est séparée en trois parties (A, B, C), mais dans le sens de la production. Ainsi, au début du tissage des préformes, les zones 1 et 3 réalisent un tissu 3D interlock chaîne alors que la zone 2 utilise la technique de tissage tubulaire. Ensuite, dans la partie B, les zones 1 et 3 doivent réaliser un tube en sens trame, à partir de la technique de déliage pour la première version afin d'obtenir les mêmes longueurs de tissu délié ou à partir de la technique de tissage créneau pour la seconde version de la préforme afin d'obtenir une longueur de tissu délié plus importante que l'autre, et la zone centrale doit réaliser un tissu 3D interlock chaîne identique à ceux réalisés dans la première partie dans les zones latérales. Enfin, la partie C est identique à la première partie de la préforme.

La partie centrale (zone 2, partie B) de la préforme est tissée sans utiliser la technique de tissage créneau. Dans les parties A et C du tissage des préformes, la zone 2 des préformes est un tubulaire en tissu 2D pour des raisons de limitation technique et les zones 1 et 3 sont un tissu 3D interlock chaîne. Dans la partie B des préformes, la zone 2 est un tissu 3D interlock chaîne et les parties latérales sont, soit des déliages, soit des tissages de type créneau suivant les versions du croisement de tube.

Après avoir réalisé les premiers essais de mise en forme et de consolidation, différentes adaptations de la structure ont été appliquées afin de corriger les défauts observés. Un exemple d'adaptation consistait à doubler la densité en fils de chaîne aux bords des tubes en sens chaîne afin de contrebalancer la baisse de densité apparaissant à cet endroit lors de la mise en forme, de 4 colonnes/cm au centre à 3,5 colonnes/cm au bord du tube. Une autre adaptation consistait à augmenter la densité en fils de trame pour les tubes en sens trame afin d'augmenter le facteur de couverture, passant d'une densité en fils de trame pour la nouvelle préforme de 2,8 colonnes/cm avant mise en forme à 2,2 colonnes/cm après mise en forme, soit une diminution de densité de 21%.

La Figure 111 présente l'état des tubes consolidés avec le premier et le deuxième système de consolidation.

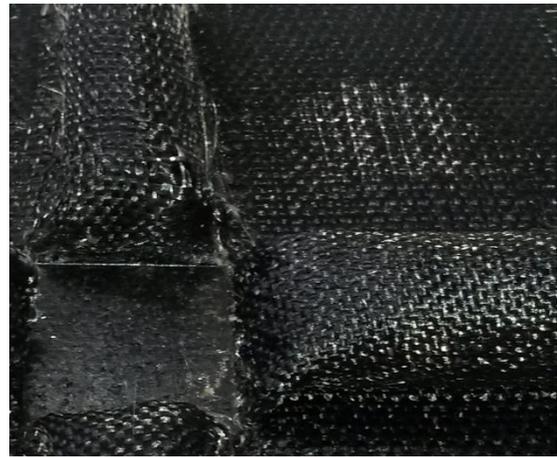


Figure 111 : Etat des tubes consolidés avec le premier système de consolidation à gauche et le deuxième système de consolidation à droite

L'adaptation de la préforme à la mise en forme de la seconde version de la pièce s'est donc faite en changeant la technique de tissage des tubes en sens trame, qui était initialement réalisée à partir de la technique de déliage, par la technique de tissage créneau, permettant la réalisation de la géométrie de préforme présentée en Figure 112.

Afin d'obtenir la même densité en fils de trame sur la surface du créneau déjà en forme, ainsi qu'à la surface du tissu 3D interlock chaîne à plat de la première et de la dernière partie, il a été nécessaire d'augmenter la densité théorique locale au niveau de la zone centrale. Or, la densité trame étant déjà maximale au niveau de la zone centrale, celle-ci se retrouvait donc avec une longueur de tissu plus importante que les zones latérales, entraînant une augmentation importante de la longueur tissée à la base du créneau accompagnée d'une perte de densité très importante. Nous avons décidé de compenser le défaut de la zone centrale par une zone en amont et en aval du créneau en tissu 2D, permettant ainsi de compenser le défaut rencontré ici, mais modifiant les dimensions de la partie centrale de la préforme par rapport à ce qui avait été conçu initialement.

Le problème rencontré ici permet de mettre en évidence le fait que la géométrie de la préforme doit parfois être modifiée en fonction des limitations techniques rencontrées.



Figure 112 : Tissage de la deuxième partie de la préforme composée de deux zones en tissage créneau et d'une zone centrale interlock

Un autre problème rencontré lors de la technique par tissage créneau sur machine de prototypage à insertion manuelle des fils de trame réside dans l'irrégularité de positionnement des fils de trame lors de l'opération de tissage par le peigne, ce qui rend difficile le contrôle de la densité en fils de trame par l'opérateur. C'est pourquoi, les préformes ont été tissées avec la densité trame maximale pour une densité chaîne fixée à quatre colonnes de tissu 3D interlock chaîne par centimètre. Par contre, la densité de surface maximum n'étant pas la

même pour un tissu 2D que pour un tissu 3D interlock chaîne, les préformes tissées à partir des premières conceptions des tubes réalisés avec la technique du tissage créneau se sont révélés avoir des diamètres bien trop faibles par rapport à ce qui avait été conçu avec des diamètres inférieurs à 25mm contre un diamètre théorique de 41mm. Ce problème met en lumière la difficulté d'adaptation d'une préforme à une géométrie donnée. La Figure 113 permet d'illustrer ce problème avec, à gauche la préforme sans adaptation, et à droite, la préforme finale.



Figure 113 : Préforme sans adaptation à gauche, et préforme finale à droite

Afin de régler le problème, et sans augmenter la densité en fils de trame au niveau de la zone 2, nous avons décidé d'utiliser la technique de tissage par parties dans la deuxième partie de la préforme afin de pouvoir insérer des fils de trame supplémentaires dans les zones 1 et 3. Cela nous a permis d'augmenter mécaniquement le diamètre du tube, sans augmenter la densité en fils de trame dans la partie centrale. La Figure 114 donne un aperçu global de la préforme finale.



Figure 114 : Aperçu global de la préforme tissée finale

Dans la première partie et la dernière partie, la zone centrale étant un tubulaire dont les parois sont un tissu 2D, il est nécessaire de réaliser 3 passages de duites afin de réaliser l'équivalent d'une colonne sur les zones latérales tissées 3D interlock chaîne avec 3 couches. Les densités de fils de trame sont donc égales entre les deux zones latérales et la zone centrale. La densité au niveau des fils de chaîne étant la même sur la machine à tisser, on peut donc dire que les trois zones ont les mêmes masses surfaciques théoriques. Cependant, le phénomène de retrait

au niveau du tubulaire étant différent du retrait des zones en tissu 3D interlock chaîne, les tissus réels n'ont pas les mêmes densités de fils de chaîne et donc, le tube n'a pas eu les dimensions escomptées. Ce problème a été résolu en augmentant la densité en fils de chaîne au niveau des tubes en sens chaîne afin d'obtenir la valeur exacte du diamètre.

Ces deux problèmes mettent en évidence l'influence des architectures sur la géométrie d'une préforme, y compris avec des densités théoriques identiques.

### B. Dépendance entre les paramètres géométriques de la préforme et le procédé de mise en forme et de consolidation

En considérant les changements de géométrie de la pièce finale, le système de consolidation a du être adapté.

Ainsi, le développement du croisement de tubes pour l'application RAIL-MAPICC permet d'illustrer cette logique consistant à adapter la géométrie de la préforme en fonction de la géométrie de la pièce. En effet, avec le partenaire RAIL-MAPICC, nous avons décidé d'effectuer un changement de géométrie du croisement de tubes.

En effet, la géométrie initiale du croisement de tube comporte quatre tubes perpendiculaires dans un même plan reliés par cinq plaques situées dans ce même plan. Cette version de la pièce développée pour l'application RAIL-MAPICC présentée Figure 101.a. ne permet pas d'assembler le croisement de tube sur une plaque en ayant une grande surface de contact entre les deux éléments. Pour résoudre ce problème, une géométrie présentée en Figure 101.b. a été développée avec une face complètement plane afin d'obtenir une surface de contact maximale entre le croisement de tubes et la plaque assemblée. Une préforme de chaque géométrie est présentée ainsi que leur assemblage avec une plaque à la

Figure 115.

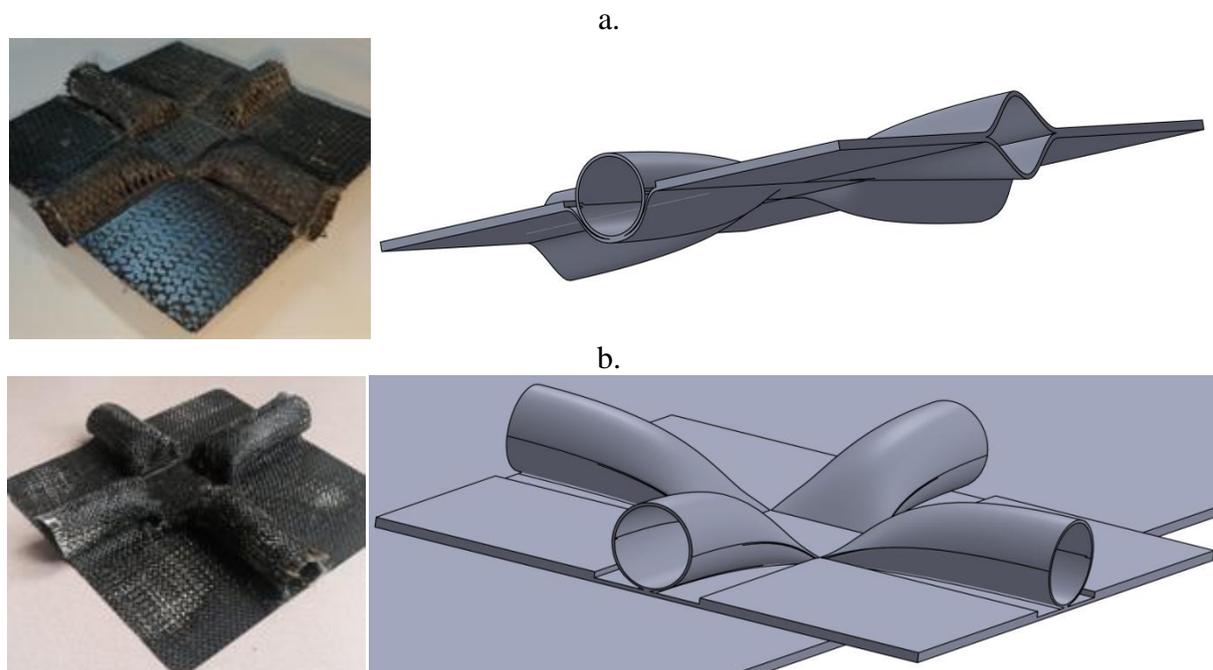


Figure 115 : Deux géométries de la pièce RAIL-MAPICC : a. Première géométrie et b. Deuxième géométrie

Une préforme a été conçue pour s'adapter à la mise en forme de la pièce avec la première géométrie. Avec la forme de pièce en question, la technique de tissage devait permettre d'obtenir deux tissus de même longueur pour l'ensemble des tubes. La technique de déliage, permettant la séparation du tissu 3D interlock chaîne en deux tissus superposés de longueur identique, a été sélectionnée pour les tubes en sens trame. Les tubes en sens chaîne ont été réalisés par une technique de tissage tubulaire, permettant l'obtention d'un tube présentant peu de liage avec le reste de la préforme obtenu avec un tissage par parties, facilitant ainsi la

mise en forme. Entre ces tubes, les plaques ont été réalisées en tissu 3D interlock chaîne. La Figure 116 présente les différentes techniques réalisées sur la préforme.

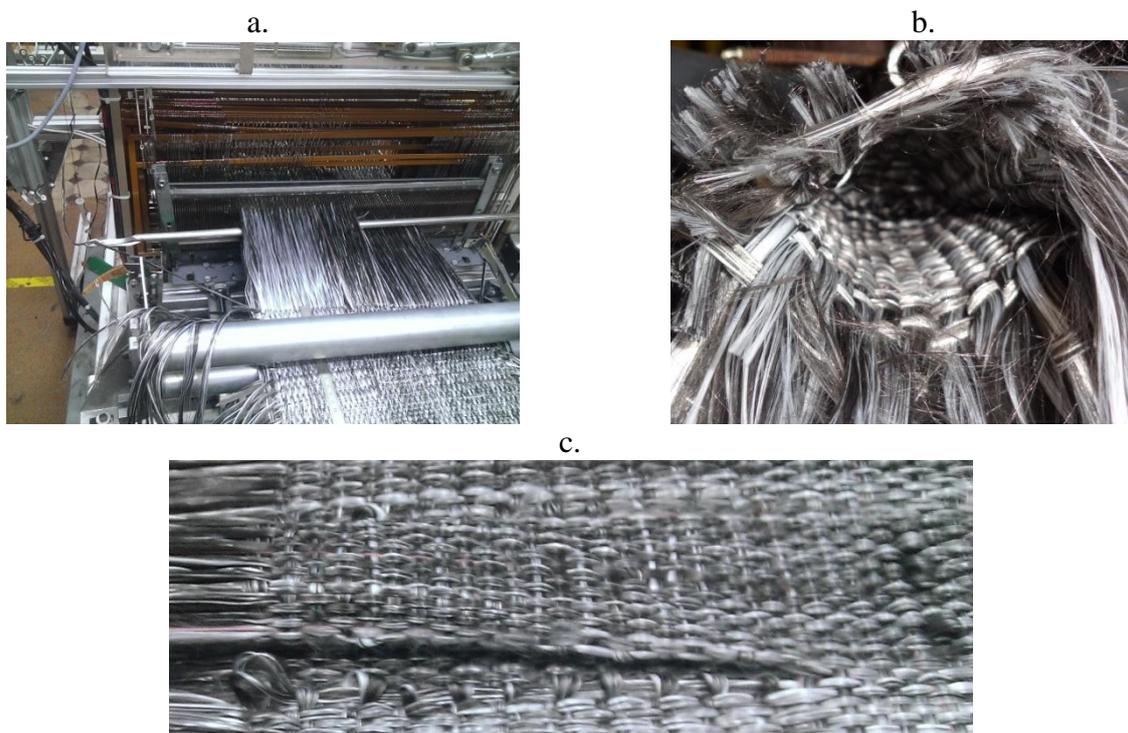


Figure 116 : Techniques utilisées pour le tissage de la première préforme : a. tissage par parties, b. déliage et c. tissage tubulaire

La position des plaques ayant ensuite changée dans la seconde version de la pièce RAIL-MAPICC (Figure 115), la géométrie de la préforme par « déliage » ne pouvait adopter la forme exacte de la seconde géométrie de la pièce RAIL-MAPICC du fait de la même longueur de tissu des deux côtés du déliage ; celle-ci a donc été adaptée, afin de mieux se comporter lors de la mise en forme, en changeant la géométrie des tubes en sens trame afin de ne pas avoir la même longueur de tissu sur la partie supérieure que sur la partie inférieure du tube à travers un tissage créneau dont le résultat est présenté en Figure 117.



Figure 117 : Résultat de la technique de tissage créneau

Lorsque la géométrie de la pièce a changé entre la première et la seconde version de la pièce, des préformes adaptées à la première version de la pièce avaient déjà été produites. Nous avons décidé de mettre en forme et de consolider ces préformes avec la nouvelle forme et il est apparu évident que les tubes en sens trame posaient problème du fait de la liaison entre les tubes en sens trame et les tissus 3D interlocks chaînes se faisaient dans le plan central de la pièce et non de manière tangente aux tubes comme pour les tubes en sens chaîne. Il a donc été

nécessaire d'adapter la forme de la pièce composite afin d'obtenir une mise en forme correcte de la préforme, par l'intermédiaire d'une zone de transition entre les tubes en sens trame et les plaques dans un plan tangent aux tubes. La nouvelle forme de pièce composite adaptée à la géométrie de la première préforme et le système de consolidation correspondant sont présentés en Figure 118.

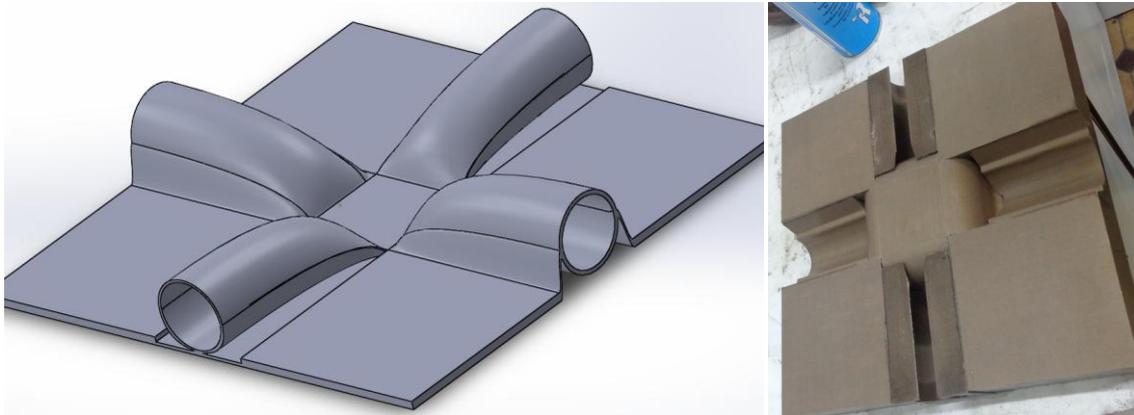


Figure 118 : À gauche, la nouvelle forme de pièce composite adaptée à la géométrie de la première préforme et à droite, le système de consolidation correspondant

Cette adaptation a été réalisée de deux manières différentes. La première a été réalisée par l'adaptation directe du premier système de consolidation décrit en Figure 102, permettant à celui-ci de consolider les deux versions de la préforme par « déliage » et en « créneau ». La deuxième a été effectuée par la conception d'une variante du système optimisé de consolidation et présenté en Figure 103. Cela permet la consolidation de la deuxième géométrie de la pièce présentée en Figure 115.b. De plus, cela nous a permis également de passer d'une version de la préforme à l'autre en changeant la configuration des inserts utilisés au sein du même moule.

Le premier système de consolidation ne permet pas l'application directe de la pression sur l'extérieur des tubes, créant ainsi un défaut de consolidation au niveau des tubes comme le montre la Figure 119. Cependant, une solution partielle consiste à placer un système de bâche à vide au niveau des tubes afin d'appliquer une pression à ces endroits. L'autre problème est que ce système de consolidation ne peut pas aller sous la presse chauffante, la consolidation s'effectue donc dans une étuve, et par conséquent, la pression appliquée sur les préformes au moment de la consolidation est bien plus faible que sous presse, réduisant ainsi le taux de compression des pièces, et donc la qualité de la consolidation.



Figure 119 : Préforme consolidée avec le premier système de consolidation

C'est pourquoi, le second système de consolidation présenté en Figure 120 a été conçu dans le but d'optimiser la consolidation des deux versions de préformes. Le système de consolidation en question est composé d'un bâti et d'un contre-moule servant pour les deux versions des préformes en plaçant différents inserts dans le système de consolidation en fonction de la version de la préforme consolidée. Une pression est appliquée à l'intérieur des tubes par l'intermédiaire d'une vessie gonflable que l'on insère dans les tubes de la préforme.



Figure 120 : Second système de consolidation avec inserts interchangeables en fonction de la version de préforme à consolider

Le premier avantage de ce second système de consolidation réside dans sa capacité à pouvoir être inséré sous presse chauffante, assurant ainsi une meilleure consolidation. L'autre avantage de ce système de consolidation est qu'une pression est appliquée quasiment partout à la surface de la préforme pendant la consolidation, assurant une qualité de consolidation de pièce améliorée.

### 3.4 Conclusion sur la solution RAIL-MAPICC

Pour la solution RAIL-MAPICC, nous avons pu observer l'interdépendance entre les paramètres géométriques de la pièce composite et les paramètres géométriques de la préforme, mais également entre les techniques de production des préformes et la géométrie de celles-ci. Cette partie a également permis de montrer que l'assemblage de différentes techniques de tissage est compatible et permet de réaliser une préforme complexe avec certaines limitations techniques.

Nous avons également pu montrer que la conception du système de consolidation et le protocole de consolidation sont liés et ont une influence primordiale dans la qualité de la pièce finale.

Des essais mécaniques ont pu être réalisés sur les structures composant la pièce composite, permettant la détermination de différents coefficients, mais aussi sur les pièces elles-mêmes afin de déterminer la tenue de la pièce composite. Du au faible nombre de couches, (1 couche dans les tubes, jusqu'à 3 couches dans les zones planes) la tenue de la pièce composite est relativement faible, mais celle-ci peut facilement être améliorée en augmentant le nombre de couches par l'utilisation d'une machine à tisser comportant un plus grand nombre d'évolutions différentes de fils de chaîne.

## 4. Solution AERO-MAPICC pour l'application Aéronautique

### 4.1 Problématique du partenaire

Dans les applications aéronautiques, la tenue mécanique est un aspect primordial du cahier des charges par rapport aux coûts des matériaux et de leur mise en œuvre, comparativement aux applications détaillées précédemment. Pour ce type d'application, les pièces en matériau composite utilisent des renforts fibreux ainsi que des résines à haute performance mécanique

et certifiés pour une utilisation en aéronautique, tels que des fils de carbone et de la résine époxy infusée par procédé RTM.

L'application développée ici est une pièce en forme de F dont l'objectif principal est de réaliser la jonction entre deux plaques perpendiculaires comme le montre la Figure 121.

L'objectif est de remplacer une pièce composite composée initialement d'un renfort stratifié à base de tissus 2D (référence Hexcel G09026) et formé de 8 couches, par une préforme tissée 3D interlock chaîne comportant 8 couches et munie d'une armure de surface en satin de 5 effet trame décochement de 2.

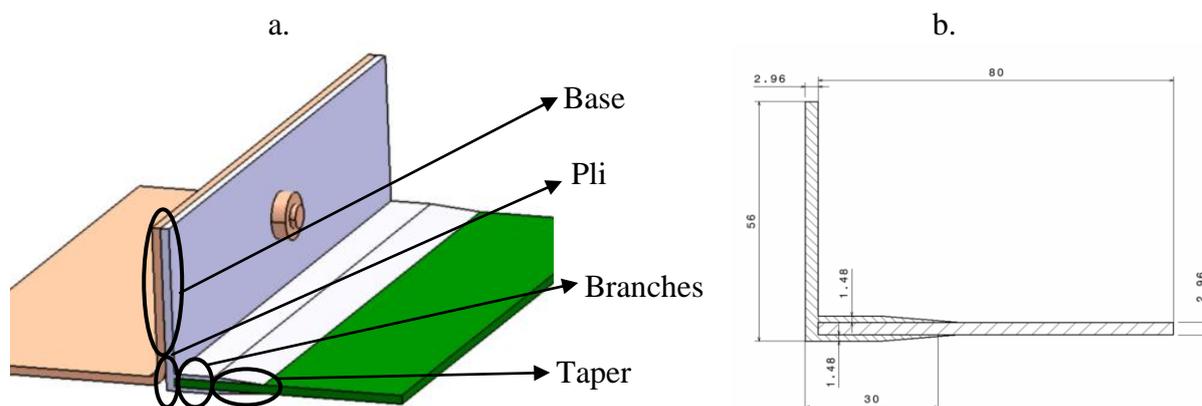


Figure 121 : Solution Aeromapicc : a. Assemblage et b. Dimensions

## 4.2 Solution développée

### Élaboration des préformes

Suivant les limites techniques associées aux machines à tisser, la préforme peut être tissée pour réaliser une poutre dont la section du F correspond à une colonne de fils de trame, ou dans l'autre sens, si l'on inverse les directions chaîne et trame, où la section du F correspond à une colonne de fils de chaîne.

Le fil utilisé ici est un fil de carbone HTA40 E13 6K (TohoTenax), de même référence que celui utilisé pour fabriquer le tissu 2D (G0926).

Le processus de certification des renforts dans le secteur aéronautique nécessitant un grand nombre d'essais, il a été décidé d'utiliser des structures déjà certifiées telles que l'armure satin de 5 effet trame décochement de 2 ou le sergé de 3 effet chaîne cordon à droite afin de limiter le nombre d'essais au minimum.

Cette pièce comporte deux zones sensibles : la zone du taper qui se trouve à l'extrémité des branches du F, ainsi que la zone du pli à 90°. La préforme tissée 3D interlock chaîne est produite à plat, puis nécessite une mise en forme par pliage pour réaliser la géométrie en forme de F présentée en Figure 121.

Les solutions fondées sur le sergé de 3 et le satin de 5 effet chaîne décochement 2 avec la géométrie initiale sont présentées en Figure 122.

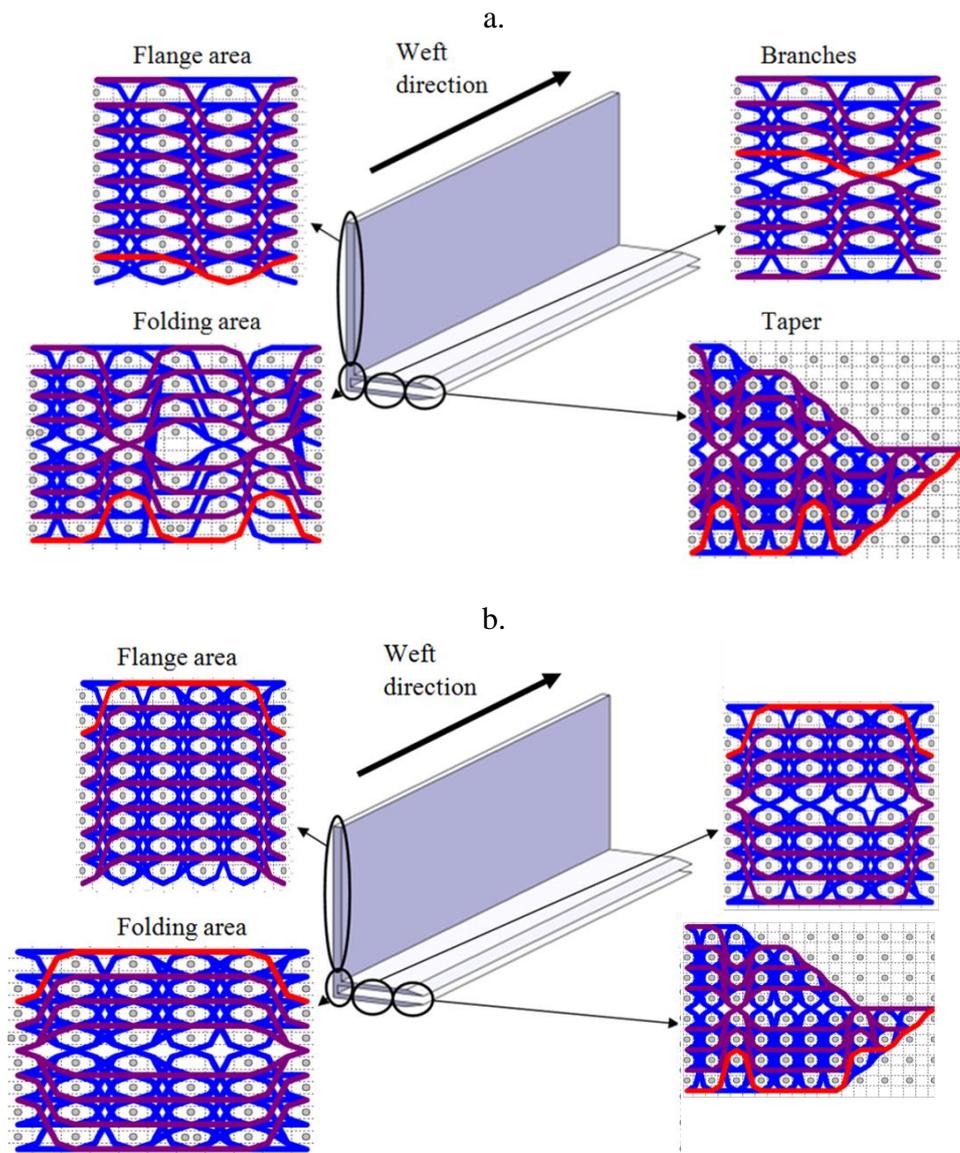


Figure 122 : Description de la préforme pour la solution Aeromapicc. a: dans le cas d'un sergé de 3. b: dans le cas d'un satin de 5 avec un décrochement de 3

Une variante du taper a été développée où la plaque insérée entre les branches est déformée de manière à ce que la face extérieure soit plane. La géométrie de cette variante et la géométrie initiale sont présentées à la Figure 123.

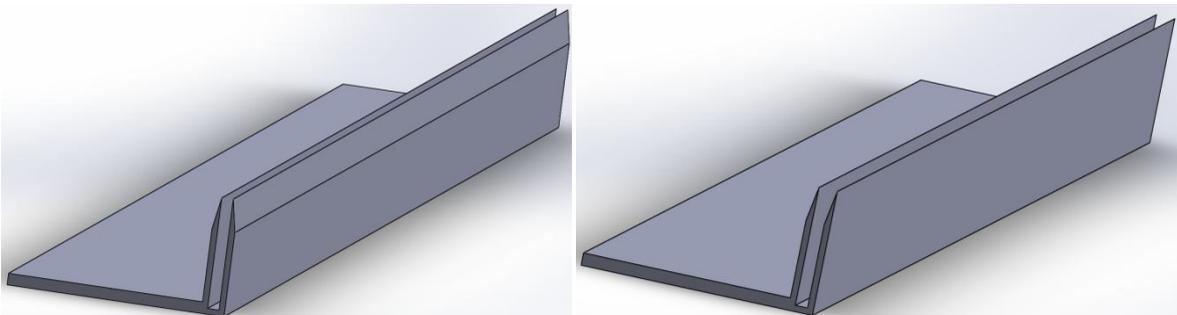


Figure 123 : Deux versions de la préforme en F : la première version à gauche et la deuxième version à droite

Pour cette variante du taper, une nouvelle définition des armures sergé de 3 et satin de 5 avec un décrochement de 3 a donc été réalisée. La variante avec le sergé de 3 est présentée en Figure 124.

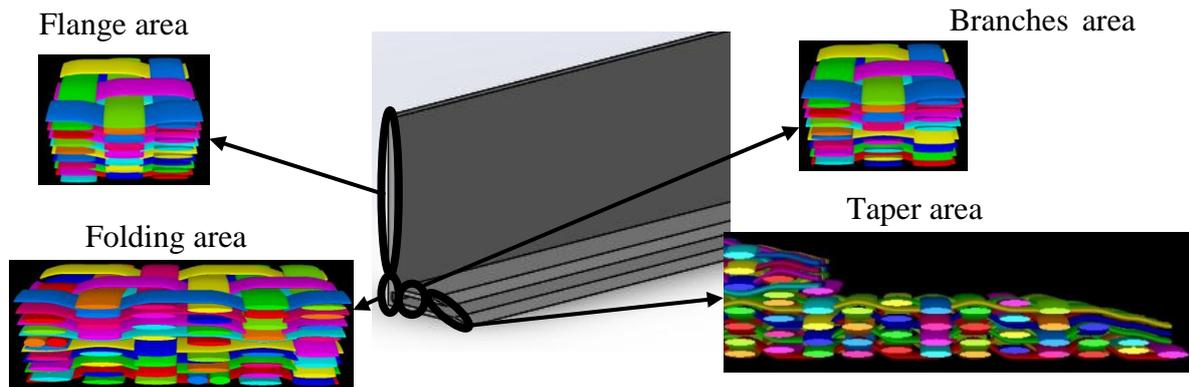


Figure 124 : Variante du F avec une armure sergé de 3

La difficulté au niveau de la zone de pliage consiste à gérer la réorganisation de la structure de telle sorte que la densité des fils orientés dans l'axe du pli reste la plus homogène possible après le pliage et que les phénomènes de retour élastique soient maîtrisés [123].

L'adaptation au pliage de la structure tissée consiste à insérer un fil supplémentaire au niveau de la couche extérieure du pli, et à enlever un fil à l'intérieur du pli. De plus, à cet endroit, un déliage est également ajouté, ce qui vient complexifier l'architecture au niveau de cette zone de pliage car la structure doit être totalement symétrique au niveau des plis.

La difficulté au niveau du taper réside dans le fait que l'on doit contrôler au maximum l'angle du taper au niveau de la préforme afin d'obtenir une pièce composite régulière à cet endroit. Pour cela des fils sont enlevés progressivement et l'architecture est adaptée de manière à réduire progressivement l'épaisseur.

Deux versions du taper ont été développées. Une version où le renfort se situe entre les branches du taper et n'est pas plié ce qui le rend symétrique comme le montre l'illustration de gauche de la Figure 123. Une deuxième version où le renfort situé dans les branches du F est plié de manière à ce que la surface extérieure soit plane, comme le montre l'illustration de droite de la Figure 123.

La pièce sera ensuite injectée par une résine époxy au cours d'un procédé RTM dans un moule au sein des locaux du partenaire Aeromapicc. Les pièces composites réalisées, celles-ci ont été caractérisées par des essais mécaniques.

Le Tableau 9 résume les principales caractéristiques de la préforme.

Tableau 9: Caractéristiques du fil utilisé ainsi que de la structure tissée développée pour l'application Aeromapicc

| Fil                      |          | Préforme  |                       |
|--------------------------|----------|---|-----------------------|
| Titre                    | 400 Tex  | Densité de surface<br>Chaine/Trame (colonnes /cm) | 4,6 / 4,6             |
| Résistance à la traction | 4100 MPa | Nombre de couches                                 | 8                     |
| Module de Traction       | 230 GPa  | Masse surfacique                                  | 3100 g/m <sup>2</sup> |
| Allongement à la rupture | 1,8 %    | Epaisseur de la préforme                          | 6 mm                  |

Les deux problématiques majeures rencontrées lors de la conception de la préforme se trouvent d'une part à l'extrémité des branches, dans la zone appelée « taper », où il est important de contrôler l'angle avec lequel le taper se termine, et par ailleurs dans la zone de pliage pour laquelle on observe un déliage afin de passer d'un tissu 3D interlock chaine de 8 couches, à deux branches tissées 3D interlocks chaines, symétriques jusqu'à la zone du taper, de 4 couches chacune.

La pente de l'extrémité du taper dépend beaucoup de la géométrie du moule utilisé ainsi que de la pression utilisée qui déterminera l'épaisseur de la pièce. Or, le moule du partenaire ayant

été fabriqué dans la dernière année du projet, il n'a pas été possible dans le temps restant d'étudier l'angle réel du taper.

En ce qui concerne le pli, il a été néanmoins possible d'étudier la réorganisation de la structure tissée 3D interlock chaîne lors du pliage de celle-ci.

Des plaques composites à base de tissu interlock 3D conçu avec la même architecture et les mêmes densités que pour les F, pour une armure en sergé de 3, ont été testées mécaniquement et thermiquement. Le Tableau 10 présente ces différents essais ainsi que les normes associées.

Tableau 10 : Essais réalisés par l'université de Riga

| <b>Coupons</b>   | <b>Propriétés</b>                             | <b>Standard</b>         |
|--|---|-------------------------|
| Bolt Pull Through  | $F^{bpt}, F_{max}$                            | custom from ASTM D 7332 |
| Open Hole Compressive Strength (diam. 4mm)                 | $F^{ohcu}, B_z$                               | ASTM D 6484             |
| Double-bolt Bearing Strength                               | $E^{br}, F^{bru}$                             | ASTM D 5962             |
| Doubler material for Double-bolt Bearing test specimens    | -   | ASTM D 5962             |
| Bolt Bearing Strength (Single shear with protruding heads) | $E^{br}, F^{bru}$                             | ASTM D 5961             |
| Doubler material for Bolt Bearing test specimens           | -   | ASTM D 5961             |
| Compressive Strength and Modulus                           | $E^c, R^c$                                    | ASTM D 695              |
| Tensile Strength and Modulus                               | $E^t, R^t \mu$                                | ASTM D 3039             |
| Fibre Volume Fraction for Width 10 mm                      | $V_f$   | EN 2564 or ASTM D 3171  |
| In plane shear strength (+/- 45° traction)                 | $E^{f(45)}, G_{13}^{(45)}, R^{f(45)}$         | -                       |
| Short beam In plane shear strength (+/- 45° traction)      | $G_{13} (Out\ of\ plane), v_{12} (In\ plane)$ | ASTM D 2344             |
| Short beam shear with coupon on its lateral side           | $G_{12}, v_{12} (In\ plane)$                  | custom from ASTM D 2344 |
| Short beam shear   | $G_{12}, v_{12} (In\ plane)$                  | ASTM D 2344             |
| 3 Point Flexural Strength and Modulus                      | $G_{13} (Out\ of\ plane)$                     | ASTM D 7264             |
| Glass transition temperature                               | $T_g$   | ASTM D 7028 or custom   |
| Fastened L and T shaped beams tensile strength             | $F_{max}, R^{fast}$                           | custom                  |

Les coefficients résultants des essais sont présentés au Tableau 11.

Tableau 11 : Résultats des essais réalisés par l'université de Riga

| <b>Coefficients</b>      | <b>Moyenne</b> | <b>Ecart-type</b> |
|--------------------------|----------------|-------------------|
| $E^l$ , GPa              | <b>63.20</b>   | <b>6.70</b>       |
| $E^c$ , GPa              | <b>55.57</b>   | <b>6.23</b>       |
| $E^f$ , GPa              | <b>54.64</b>   | <b>4.22</b>       |
| $E^f(45^\circ)$ , GPa    | <b>15.67</b>   | <b>0.49</b>       |
| $G_{12}$ , GPa           | <b>11.67</b>   | <b>15.88</b>      |
| $G_{13}$ , GPa           | <b>5.10</b>    | <b>49.10</b>      |
| $G_{13}(45^\circ)$ , GPa | <b>1.48</b>    | <b>0.21</b>       |
| $R^l$ , MPa              | <b>591.85</b>  | <b>4.92</b>       |
| $R^c$ , MPa              | <b>282.70</b>  | <b>11.8</b>       |
| $R^f$ , MPa              | <b>764.30</b>  | <b>7.30</b>       |
| $R^f(45^\circ)$ , MPa    | <b>273.23</b>  | <b>4.23</b>       |
| $F^{bru} 1 bolt$ , MPa   | <b>456.73</b>  | <b>48.17</b>      |
| $E^{br} 1 bolt$ , MPa    | <b>0.49</b>    | <b>0.13</b>       |
| $F^{bru} 2 bolts$ , MPa  | <b>1203.49</b> | <b>113.41</b>     |
| $E^{br} 2 bolts$ , MPa   | <b>1.67</b>    | <b>1.02</b>       |
| $R^{ohcu}$ , MPa         | <b>234.55</b>  | <b>31.33</b>      |
| $F^{bru}$ , MPa          | <b>21.04</b>   | <b>1.32</b>       |
| $R^{fast}$ , MPa (L)     | <b>38.30</b>   | -                 |
| $R^{fast}$ , MPa (T)     | <b>126.86</b>  | -                 |

La rupture des éprouvettes se trouve dans la zone acceptable pour l'ensemble des essais retenus, de même qu'aucun essai n'a présenté un décollement inhabituel des jauges d'efforts. Les valeurs mesurées les plus précises ont été obtenues par l'utilisation de jauges d'efforts.

Mis à part pour le coefficient  $G_{13}$ , l'ensemble des mesures ont des écarts-types relativement faibles, démontrant ainsi la régularité des tissus 3D interlocks chaînes carbone produits sur la machine à tisser CARBOMAT.

Ces résultats ont ensuite été comparés aux résultats obtenus par simulation, avec pour conclusion des résultats expérimentaux 15 à 20% inférieurs aux résultats obtenus par simulation. Cette différence peut s'expliquer par la dégradation des fils de carbone subie lors du tissage des préformes.

#### 4.3 Étude du pliage de structures tissées 3D interlocks chaîne carbone

Afin d'observer le comportement de la structure tissée 3D interlock chaîne sélectionnée lors du pliage, différents essais sur des préformes ont été réalisés, suivis d'une imprégnation et d'une consolidation après pliage. L'objectif est de conserver la forme et la position des fils dans la structure et de pouvoir les observer à travers des coupes dans la structure consolidée [74,81,124,125].

Lors des premiers essais de pliage, des préformes en F tissées 3D interlocks chaînes avec une armure de surface en satin de 5 avec et sans adaptation au pli ont été réalisés avec quatre couches. Ce choix est associé à la limite de la machine à tisser utilisée pour fabriquer ces préformes avec cette armure, mais également pour mesurer la régularité de la structure tissée dans la zone de pliage, après l'étape de pliage à 90°.

La structure étant déliée en deux parties au niveau des bras du F, les essais de pliage ont donc porté sur deux couches de tissu 3D interlock chaîne.

Les fils de carbone étant très sensibles aux frottements et ayant un faible rayon de courbure, la machine à tisser utilisée pour réaliser les préformes a été conçue de manière à réduire ces frottements[5] ainsi que les angles de courbures que subissent les fils en amont du système de

formation de la foule. La conception de la machine à tisser utilisée et présentée en Figure 125, fera l'objet d'une description plus détaillée au chapitre 3.



Figure 125 : Machine à tisser utilisée pour le tissage des préformes de l'application Aéronautique

L'ensemble des mesures ont été réalisées à l'aide de coupes en différents endroits des structures tissées 3D interlocks chaînes élaborées avec et sans adaptation au pli.

Pour quantifier le comportement de la structure à la mise en forme par pliage à 90°, il a été nécessaire de définir plusieurs paramètres caractérisant cette étape de pliage.

La première caractéristique est associée à la variation d'épaisseur dont la méthode de mesure est présentée en Figure 126. Ces mesures sont réalisées à l'aide de clichés à partir d'une loupe binoculaire en différentes valeurs de courbure (0, 30, 45, 60 et 90°) pour chaque plan de coupe perpendiculaire aux sections et moyennées sur 6 valeurs.

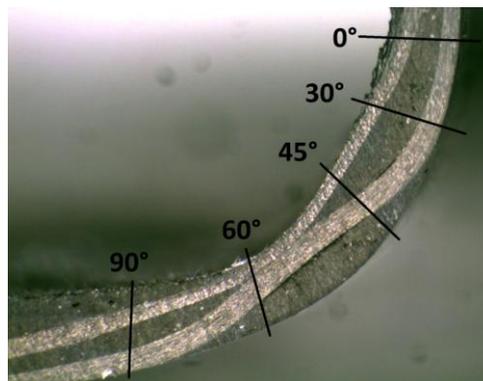


Figure 126 : Mesure de la variation d'épaisseur

La deuxième mesure correspond au phénomène de variation de la densité en fils de trame (augmentation à l'intérieur du pli et diminution à l'extérieur du pli), ce qui correspond à un rapprochement des fils de trame du côté du pli et un éloignement de l'autre côté comme le montre la Figure 127.

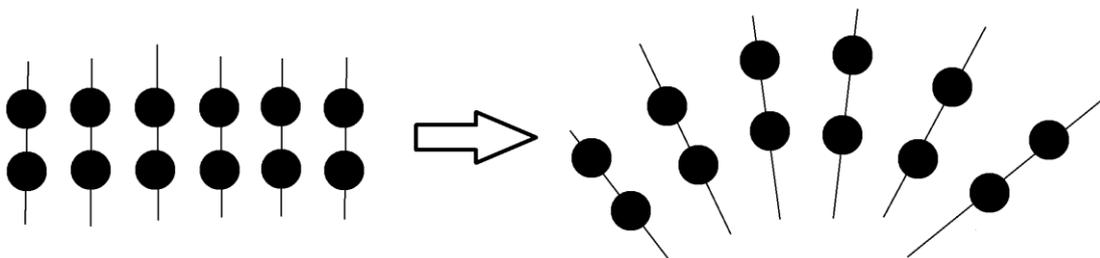


Figure 127 : Variation de la densité des fils par couche

Cette mesure a été faite à l'aide des mêmes clichés que ceux utilisés pour la variation d'épaisseur. La difficulté ici est que l'on ne distingue pas correctement les fils de trame.

La mesure a donc été faite sur les distances caractéristiques des pièces à plat ainsi que des pièces mises en forme comme le montre la Figure 128.

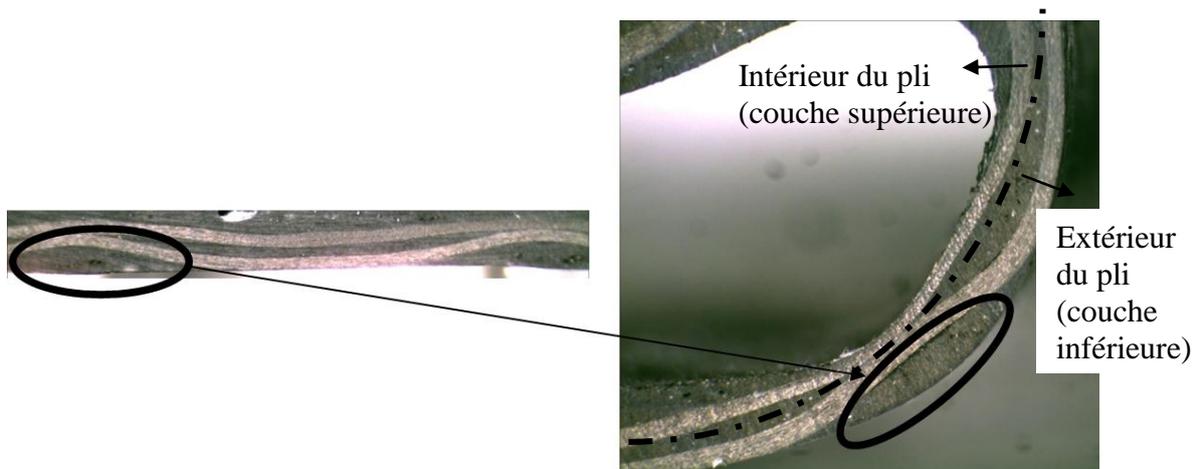


Figure 128 : Mesure de la variation de densité

Les résultats en termes de variation d'épaisseur le long de la courbure sont présentés Figure 129 pour les 2 structures 3D interlocks chaînes élaborées. La formule utilisée pour le calcul de la variation d'épaisseur est donnée par l'équation Eq. 8 :

$$\text{Variation d'épaisseur}(\%) = \left| \frac{\text{épaisseur en forme}(\text{mm}) - \text{épaisseur à plat}(\text{mm})}{\text{épaisseur à plat}(\text{mm})} * 100 \right| \text{ Eq. 8}$$

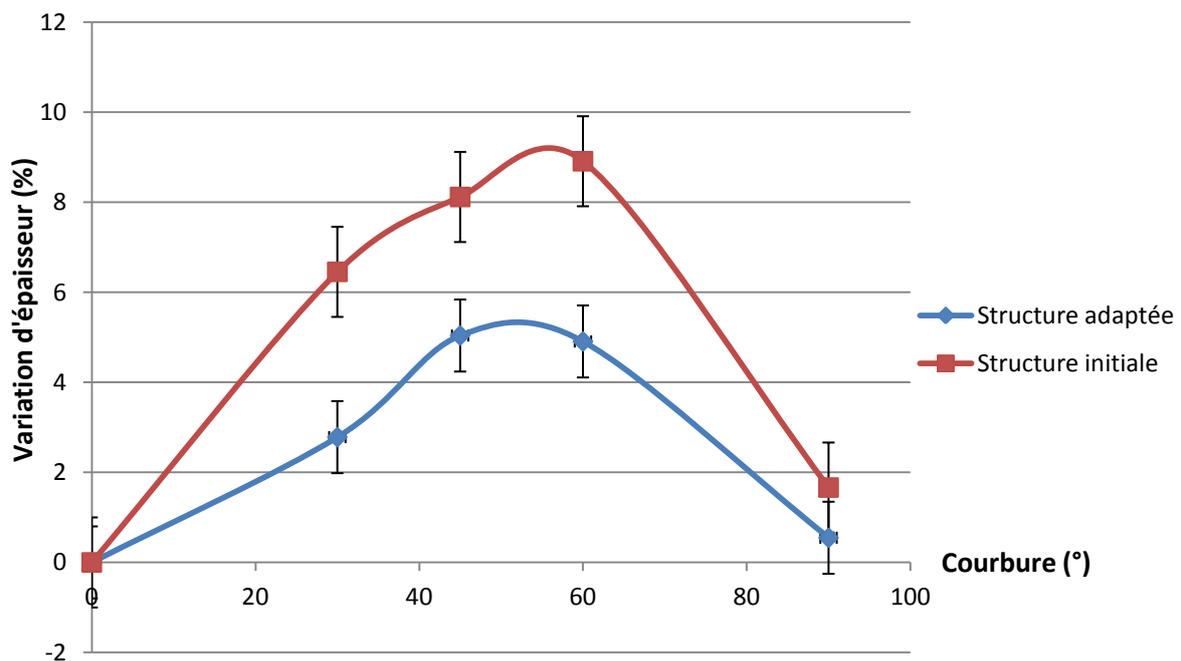


Figure 129 : Variation d'épaisseur en fonction de l'angle de courbure

Les mesures montrent clairement une variation d'épaisseur plus faible pour la structure comportant l'adaptation avec un maximum de variation d'épaisseur d'environ 5% contre une variation maximale de l'épaisseur de la structure de départ de 9%.

On peut également remarquer que le maximum de variation d'épaisseur se situe pour des valeurs de courbure entre 40 et 60°.

Ces résultats montrent clairement que la structure intégrant l'adaptation au pliage se comporte mieux lors du pliage en termes de variation d'épaisseur.

Les résultats en termes de variation de densité sur les faces supérieures et inférieures sont présentés en Figure 130 pour les 2 structures 3D interlocks chaînes élaborées. Cette variation de densité est associée à la variation de densité en fils de trame entre le tissu plat et le tissu mis en forme pour chaque couche.

La formule de calcul est donnée par l'équation Eq. 9:

$$\text{Variation de densité}(\%) = \frac{\text{écart en forme}(\text{mm}) - \text{écart à plat}(\text{mm})}{\text{écart à plat}(\text{mm})} * 100 \text{ Eq. 9}$$

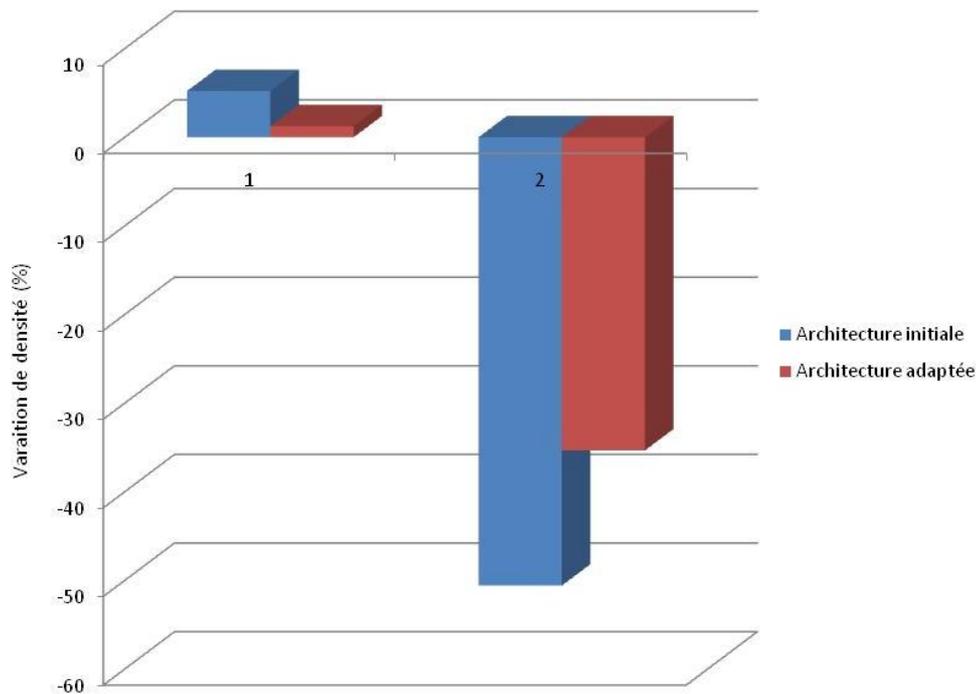


Figure 130 : Variation de densité par couche (1 : couche inférieure, 2 : couche supérieure)

On peut observer que la variation de densité est négative pour la couche supérieure, ce qui traduit une augmentation importante de la densité en trame, alors que les valeurs pour la couche inférieure sont positives, ce qui traduit une perte de densité en trame sur la couche inférieure.

De plus, on observe que la perte en densité reste très faible avec des valeurs d'environ 5% alors que l'augmentation de densité au niveau de la couche supérieure atteint quasiment 50%. Enfin, on observe que la variation de densité est plus faible pour l'architecture adaptée, même si la variation atteint les 30%.

Ces résultats montrent également que la structure intégrant l'adaptation au pliage se comporte mieux lors du pliage en termes de variation d'épaisseur.

D'autres essais de pliage ont ensuite été réalisés afin d'obtenir des informations sur la déformabilité de la structure tissée 3D interlock chaîne plus épaisse que précédemment lors des différentes étapes du pliage, et plus spécifiquement la réorganisation d'une structure tissée 3D interlock chaîne pendant le pliage. Afin de se rapprocher de l'application AERO-MAPICC, les essais de pliage ont été réalisés au niveau du déliage des préformes en « F » identiques à celles développées pour le partenaire AERO-MAPICC présentée en Figure 122.b. Les essais porteront donc sur le pliage de deux fois 4 couches de tissu 3D interlock chaîne. Pour réaliser les différents essais de pliage, six angles de pliage différents compris entre 0° et 90° ont été considérés.

Pour réaliser les essais, un système de consolidation, présenté en Figure 131, a été conçu pour chaque angle de pliage et fabriqué à l'aide d'une imprimante 3D. Ces systèmes de

consolidation permettent de consolider des préformes en F d'une longueur de 15 cm. L'imprégnation des préformes a été réalisée d'abord par avalement de résine, puis remplacée par une imprégnation au pinceau de la résine. L'ensemble est ensuite placé sous étuve à 45°C pendant 24H sous vide afin de faire réticuler la résine.

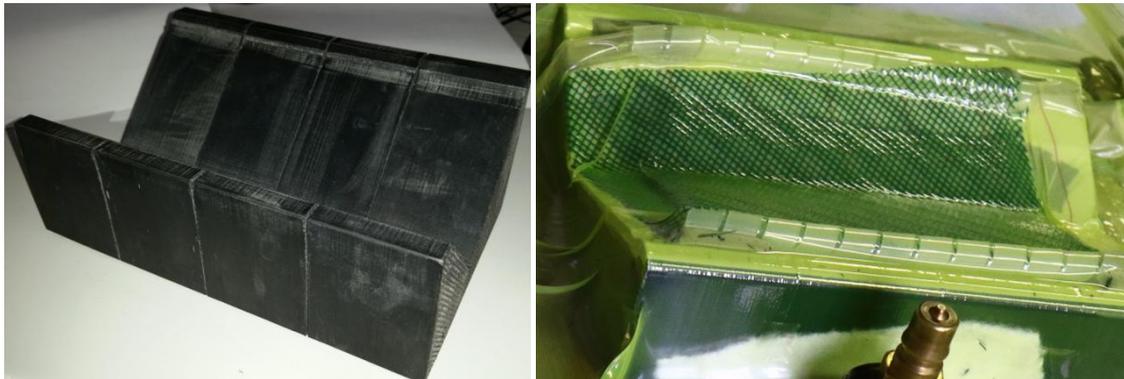


Figure 131 : Système de consolidation

Comme pour l'étude précédente, l'évolution de deux paramètres lors du pliage a été étudiée : la variation d'épaisseur et la variation de densité de fils de carbone pour chaque couche du tissu 3D interlock chaîne au niveau du pli.

Comme les angles de pliage sont multiples, l'épaisseur a été mesurée de la même manière que lors de la première étude, en relevant une mesure au milieu du pli pour chaque angle de pliage, même si des mesures ont également été prises aux extrémités des plis pour parvenir à une variation d'épaisseur au centre du pli par rapport aux extrémités.

Les mesures de variation de densité ont été réalisées de la même manière que lors de la première étude réalisée sur le pliage de la préforme en F. La mesure a ensuite été calculée relativement à la densité de la couche supérieure afin de comparer des pièces n'ayant pas exactement la même densité initiale.

Pour chaque angle de pliage, deux préformes ont été consolidées, auxquelles trois coupes transversales (afin d'observer les structures au microscope) ont été associées, correspondant aux trois différentes colonnes que l'on trouve dans le tissu 3D interlock chaîne, comme le montre la Figure 132.

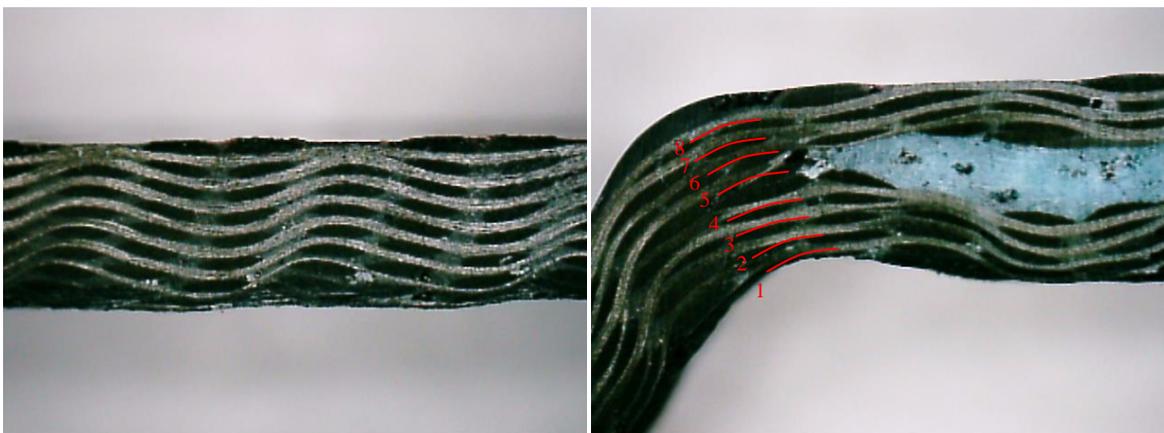


Figure 132 : Vues en coupe d'une préforme consolidée : à gauche, la partie pleine de la pièce et à droite, le pli.

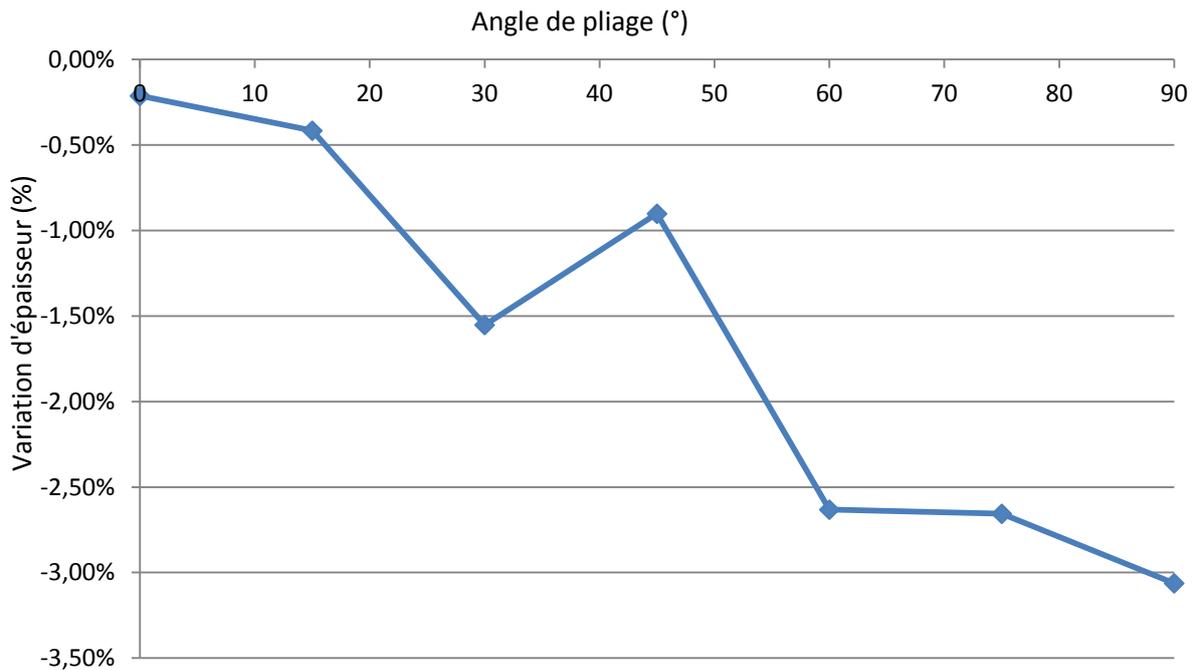


Figure 133 : Variation d'épaisseur relative à l'épaisseur des branches en fonction de l'angle de pliage

La courbe de variation d'épaisseur obtenue en Figure 133 met en évidence le caractère décroissant de la variation d'épaisseur en fonction de l'angle de pliage, avec une variation d'épaisseur minimale de 3% pour un pliage à 90°. On peut observer que cette variation évolue de manière relativement linéaire.

Pour les mesures de variation de densité on désigne les couches 1 à 4, les quatre couches supérieures, pliées pour former le premier bras du F et les couches 5 à 8 celles du deuxième pli.

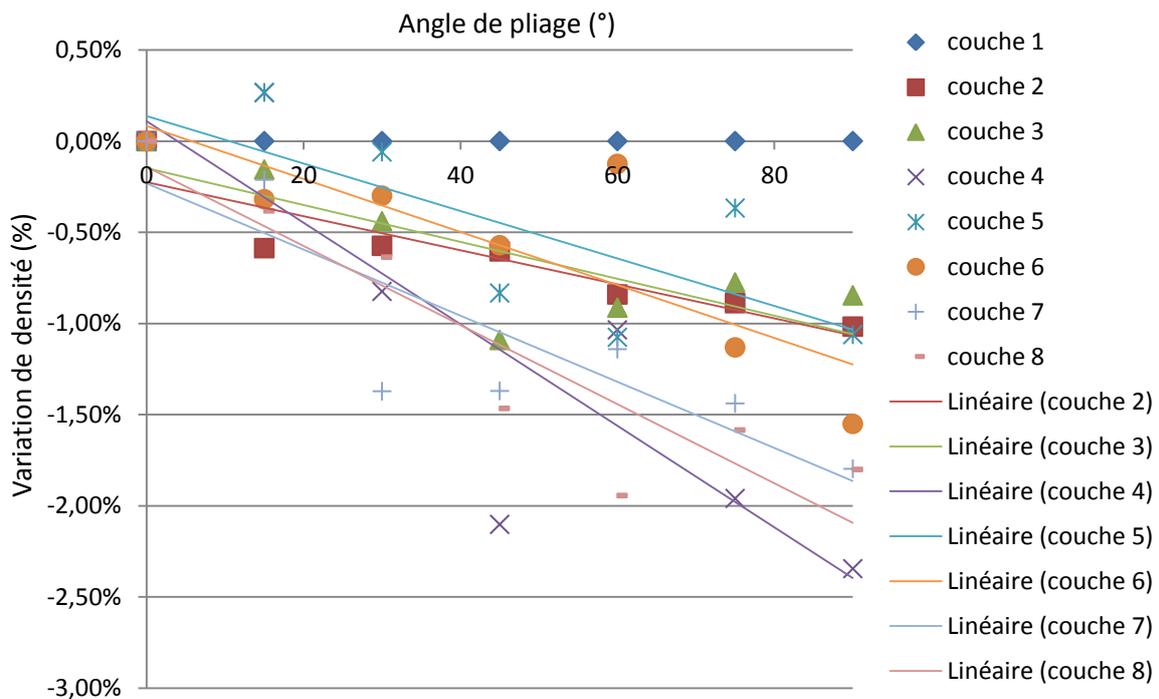


Figure 134 : Variation de densité par couche relative à la densité de la couche à l'intérieur du pli

La courbe de variation de densité par couche obtenue en Figure 134 met en évidence la diminution des densités relatives de chaque couche par rapport à la couche se situant à l'intérieur du pli en fonction de l'angle de pliage.

On peut observer que, plus la couche se situe à l'extérieur du pli, plus la variation de densité est importante.

#### **4.4 Conclusion sur la solution AERO-MAPICC**

Les études ont été réalisées sur le pliage des structures tissées 3D interlocks chaînes à base de fils de carbone. Une adaptation au pliage a été mise au point et a permis de réduire les variations de densité au niveau du pli. Une deuxième étude a été réalisée en utilisant la préforme avec différents angles de pliage, permettant ainsi de mettre en évidence l'évolution des défauts, telles que la variation d'épaisseur ou la variation de densité avec l'évolution de l'angle de pliage.

Ces études ont permis de déterminer une architecture pour la préforme en F répondant au cahier des charges imposé par le partenaire AERO-MAPICC. Des plaques composites et des préformes injectées chez le partenaire AERO-MAPICC ont été testées mécaniquement afin de valider avec succès le cahier des charges.

### **5. Conclusions du chapitre**

Dans ce chapitre, les différentes solutions ont été présentées pour chaque application, telles que le carter d'huile pour l'application AUTO-MAPICC, le support de siège pour l'application TRUCK-MAPICC, la croix pour l'application RAIL-MAPICC ou encore le F pour l'application AERO-MAPICC.

Les pièces composites, dont la conception a été détaillée dans ce chapitre, ont toutes été composées d'une préforme tissée 3D interlock chaîne plus ou moins complexe et mises en forme par emboutissage ou par pliage. Pour l'application Aéronautique, le cahier des charges a nécessité l'utilisation de fils de carbone et d'une matrice époxyde. Pour l'ensemble des autres applications, un fil comélé, composé de fibres de verre et de fibres de polymère thermoplastique (polypropylène ou polyamide), a été utilisé.

Différentes problématiques de mise en forme des préformes développées ont été étudiées telles que la mise en forme par emboutissage, le pliage à 90° d'une structure tissée 3D interlock chaîne, ou encore l'intégration d'éléments métalliques au sein d'une pièce composite pour des problématiques d'assemblage composite/métal.

La consolidation des préformes thermoplastiques a également été étudiée afin d'optimiser l'imprégnation de la résine au sein des renforts fibreux multi-couches. La qualité des pièces composites obtenues a été atteinte, soit avec une consolidation sous bâche à vide dans une étuve, soit avec une consolidation sous presse chauffante.

Enfin, des essais mécaniques et de crash ont été réalisés pour obtenir des informations sur la tenue mécanique des pièces développées et vérifier le respect de celles-ci avec le cahier des charges.

Les solutions composites à base de renforts fibreux de type tissu 3D interlock chaîne ont permis de répondre aux différents besoins exprimés par les différents utilisateurs. Les premiers prototypes obtenus ont permis d'atteindre des performances mécaniques ou des comportements nouveaux par rapport aux solutions existantes. Cependant, des améliorations peuvent être apportées sur ces solutions composites, notamment en optimisant les paramètres produits des tissus 3D interlocks chaînes utilisés.

Les solutions tissées 3D interlocks chaînes ont l'avantage de posséder des propriétés mécaniques variables en fonction de leur architecture, des densités de fils et de la nature des fils utilisés. Ainsi, une structure tissée 3D interlock chaîne peut être très rigide et dense comme le sont les interlocks orthogonaux, mais aussi relativement élastiques comme le sont

les interlocks d'angle. Ces différences de propriétés peuvent être intéressantes pour certaines applications nécessitant une certaine rigidité ou une certaine élasticité tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques. Les différentes propriétés mécaniques de ces structures peuvent faciliter l'étape de mise en forme et permettre l'obtention d'une meilleure régularité de pièce composite.

Dans ce chapitre, nous avons également exposé les limites de ces structures. En effet, le fait de placer de trop fortes densités de fils peut bloquer le tissage de préformes et augmenter la dégradation des fils de chaîne de telle sorte qu'il est plus raisonnable de réduire les densités pour obtenir un tissu de meilleure qualité.

## **Chapitre 3 :**

### **Adaptation des procédés de fabrication utilisés dans le cadre du projet MAPICC3D**

Il existe un grand nombre de machines à tisser permettant la fabrication de préformes tissées 3D très spécifiques, mais ces machines sont limitées lorsque l'on veut produire un autre type de préformes. Le niveau d'adaptation appliqué à une machine à tisser de base permet à la fois d'ouvrir son champ d'applications tout en apportant des limitations techniques.

Ce dernier chapitre décrit les différentes problématiques rencontrées lors de la production des préformes et éprouvettes en tissu interlock 3D chaîne pour le projet européen MAPICC3D, ainsi que les solutions trouvées pour répondre à ces problématiques. La conception de la machine à tisser CARBOMAT, adaptée au tissage des fils de carbone, ainsi que les adaptations de la machine à tisser TTF seront décrites dans ce chapitre.

#### Table des matières

|  |            |
|--|------------|
| <b>1. Conception et améliorations de la machine à tisser CARBOMAT .....</b>                              | <b>119</b> |
| <b>1.1 Problématiques rencontrées lors du tissage des fils de carbone .....</b>                          | <b>119</b> |
| <b>1.2 Conception d'un ourdissoir spécifique aux fils de carbone .....</b>                               | <b>123</b> |
| <b>1.3 Conception et réalisation d'un cantre d'ensouples.....</b>  | <b>124</b> |
| <b>1.4 Avancée de l'ensemble des systèmes de sélection de la machine à tisser .....</b>                  | <b>126</b> |
| <b>1.5 Conception et fabrication des éléments associés à la séparation des cadres .....</b>              | <b>127</b> |
| <b>1.6 Conception et réalisation du système d'insertion du fil de trame .....</b>                        | <b>128</b> |
| <b>1.7 Conception et réalisation du guidage du peigne sur machine à tisser .....</b>                     | <b>130</b> |
| <b>1.8 Conception et réalisation du système de mise en tension et de blocage des fils de chaîne.....</b> | <b>131</b> |
| <b>1.9 Production des tissus 3D interlocks chaînes sur la machine à tisser CARBOMAT modifiée .....</b>   | <b>132</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>2. Améliorations de la machine à tisser TTF .....</b>           | <b>134</b> |
| 2.1 Problématiques rencontrées .....                               | 134        |
| 2.2 Modification du système de tassage.....                        | 135        |
| 2.3 Modification des cadres.....                                   | 136        |
| 2.4 Autres adaptations réalisées sur la machine à tisser TTF ..... | 137        |
| 2.5 Production réalisée sur la machine à tisser TTF modifiée ..... | 137        |
| <b>3. Conclusion du chapitre .....</b>                             | <b>138</b> |

# 1. Conception et améliorations de la machine à tisser CARBOMAT

## 1.1 Problématiques rencontrées lors du tissage des fils de carbone

Les fibres de carbone sont à la fois rigides dans la direction des filaments et fragiles dans les directions transverses aux filaments. Ce type de fibres possède de faibles rayons de courbure admissibles et supportent mal les frottements. De plus, ces fibres sont conductrices de l'électricité et sont susceptibles d'être toxiques.

Une large gamme de machine à tisser spécifiques ont été conçues dans le but de réaliser des préformes tissées 3D particulières[49,78,126-133], mais ces machines sont souvent limitées à la production d'un type précis de préformes. Le fait d'adapter une machine à tisser [61,137-143] permet à la fois d'ouvrir son champ d'applications tout en apportant des limitations techniques. La machine à tisser CARBOMAT a donc été conçue en s'appuyant sur certains éléments d'une machine à tisser existante, tout en adaptant la conception du reste de la machine pour le tissage 3D interlock chaîne de fibres de carbone.

En considérant la tenue mécanique de ces fibres et leur difficulté de manipulation, plusieurs adaptations ont été nécessaires sur la machine à tisser telle qu'elle se présentait auparavant pour produire des tissus 3D interlocks chaînes à partir de ces fibres. La première adaptation concerne l'environnement de travail autour de la machine à tisser et les conditions d'accès pour l'homme au procédé de fabrication. Pour répondre aux problématiques de toxicité, il est donc nécessaire d'être muni d'équipements de protection tels qu'un masque afin de protéger les voies respiratoires des fibres de carbone disséminées dans l'air, une blouse, des surchaussures et des gants afin de ne pas avoir de contact cutané avec les fibres de carbone. Ainsi, un système d'aspiration et de filtration de l'air a été implanté dans la salle hébergeant la machine à tisser CARBOMAT afin de réduire au minimum la concentration en fibres de carbone dispersé dans l'air. Les conditions de travail sont représentées en Figure 135.

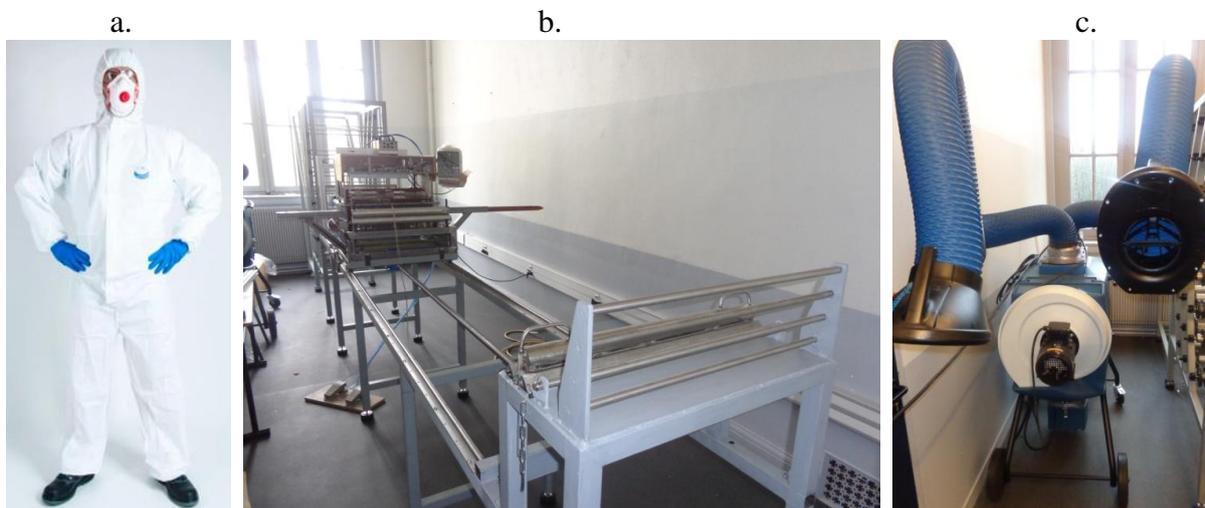


Figure 135 : Conditions de travail : a. équipements de protection, b. machine à tisser dans une salle dédiée et c. système d'aspiration et de filtration de l'air

De nombreux paramètres, comme la tension des fils de chaîne, la densité des fils ou les éléments en contact avec les fils, peuvent créer une dégradation sur les fils pendant le procédé de tissage [5-52-124-144-150]. Afin de contrôler et d'optimiser ces paramètres, la machine à tisser CARBOMAT a été conçue pour développer l'application AEROMAPICC [1]. Ainsi, la quasi-totalité des éléments principaux de la machine à tisser a pu être conçue et adaptée à cette application, tout en conservant le système électro-magnétique de sélection des cadres et son boîtier de lecture électronique de programme de dessin associé (Figure 136). Ce choix se justifie par le souhait de conserver l'interface logicielle existante entre le boîtier de lecture électronique de programme de dessin et l'outil de CAO tissage disponible.



Figure 136 : Conservation du système électro-magnétique de sélection des cadres et du boîtier de lecture électronique de programme de dessin.

Le tissage de structures tissées 3D interlocks chaines, réalisé sur la machine à tisser précédente, avec des fils de carbone créait de fortes dégradations dues aux frottements entre les fils de carbone et les éléments de la machine ainsi qu'entre les fils de carbone. Les dégradations rencontrées pouvaient bloquer l'ouverture de foule allant jusqu'à la casse des fils de chaîne comme représenté en Figure 137.



Figure 137 : Ouverture de foule bloquée par la dégradation subie par les fils de chaîne de carbone

L'alimentation en fils sur la machine à tisser dans la direction chaîne peut s'effectuer, soit par bobines individuelles, soit par groupes de fils stockés sur des ensouples. Pour des questions d'encombrement, la solution d'alimentation individuelle par bobine de fils n'a pas été retenue lors de la conception de la machine à tisser CARBOMAT. La solution de stockage des fils de chaîne sur ensouple a été choisie et le nombre des ensouples a été déterminé en fonction du nombre d'évolutions différentes des fils de chaîne au sein de la structure tissée ainsi qu'en fonction de la densité des fils de chaîne. Initialement, l'étape d'ourdissage a été réalisée manuellement, ce qui a provoqué de fortes disparités au niveau de la longueur de fils de chaîne enroulés sur une même ensouple, entraînant par la suite des problèmes de tension de fils de chaîne lors du tissage et donc une dégradation supplémentaire sur les fils de carbone. Pour remédier à ces différences de longueur de fils de chaîne sur une même ensouple, une solution alternative consistait à insérer les fils de carbone directement au niveau de la machine à tisser que l'on fixe sur des barres au lieu de placer des ensouples. Le principal avantage de

cette solution réside dans un placement des fils de chaîne par couches, reflétant la position de l'évolution des fils de chaîne au sein de la structure tissée multi-couches, ce qui a limité la dégradation des fils provoquée par frottement entre fils. Le principal défaut de cette méthode est que ce type de montage ne permet de tisser qu'une longueur de tissu inférieure à la longueur de fils de carbone préparée sur la machine à tisser avant de devoir remplacer l'ensemble des fils de chaîne. L'autre défaut est que la longueur de fil absorbée par le tissu est fortement limitée du fait que les fils sont fixés en entrée de machine à tisser et dépend de la flexion des fils entre le tissu et le point de fixation. Cette flexion est assurée par l'intermédiaire de poids placés sur les fils. La Figure 138 présente les deux solutions pour alimenter la machine à tisser

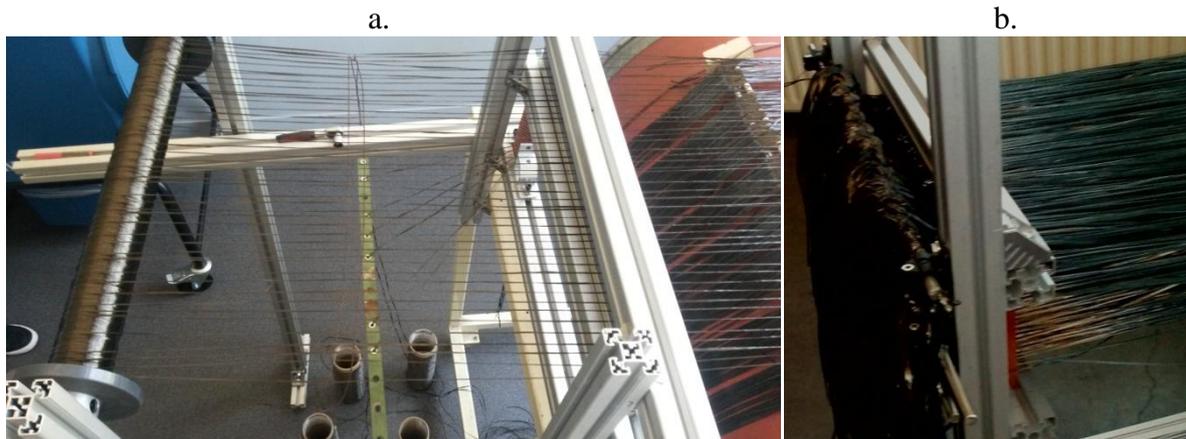


Figure 138 : Différentes alimentations en fils de chaîne : a. Par une ensouple ourdie manuellement et b. En accrochant l'extrémité des fils de chaîne sur des barres de fixation

En utilisant un stockage des fils de chaîne par ensouples, la longueur tissée avant de remplacer les fils de chaîne est inférieure à la longueur de fil enroulé sur les ensouples, soit plusieurs dizaines de mètres, et plus encore pour une machine à tisser industrielle. L'utilisation d'ensouples permettant également un gain de productivité du fait de la plus faible fréquence des changements d'ensouples, mais aussi un gain d'espace considérable par rapport à un système de cantré, cette solution a donc été retenue. Cependant, afin de réduire la dégradation subie par les fils de carbone et d'améliorer l'homogénéité de celles-ci, un ourdissoir adapté à la réalisation d'ensouples de fils de carbone a été conçu et réalisé. Celui-ci sera décrit dans la partie 1.2.

Afin de ne pas avoir de limitations dues à la différence de consommation en fils de chaîne au niveau du choix des structures tissées 3D interlocks chaînes à réaliser, il est nécessaire que tous les fils de chaîne rentrés sur des cadres différents du système de sélection soient répartis sur différentes ensouples. Ainsi, comme le système de sélection des fils de chaîne comporte vingt-quatre cadres, il a été nécessaire de concevoir un cantré d'ensouples pouvant comporter vingt-quatre ensouples. Afin de séparer les nappes de fils de chaîne et de les rapprocher du plan de tissage sans contact entre les différentes couches, un système comportant des barres a été conçu et placé entre les ensouples et la zone de tissage. Le cantré d'ensouples et le système de barres seront décrits dans la partie 1.3.

L'une des particularités de la machine à tisser CARBOMAT réside dans la partie mobile portante des systèmes de sélection des cadres, d'insertion du fil de trame et de tassage par peigne. Pour cela, l'ensemble des systèmes de sélection est placé sur quatre glissières reliées à deux rails autorisant un mouvement de translation uniforme dans le sens des fils de chaîne sur le bâti de la machine à tisser. Le déplacement de l'ensemble des systèmes de sélection est

effectué précisément par le biais d'une vis sans fin. L'assemblage permettant l'avancée du système de sélection sera décrit dans la partie 1.4.

Les cadres de la machine à tisser sont commandés en montée et en descente par des cordes accrochées aux cadres avec des crochets. Des lisses sont insérées dans les cadres afin de relier ces derniers à certains fils de chaîne. La Figure 139 permet d'illustrer le système d'assemblage des cadres.



Figure 139 : Cadres sur la machine à tisser (modèle précédent)

Tels qu'ils étaient assemblés avant les modifications, les cadres étaient libres de mouvement dans la direction des fils de chaîne. Or, les très fortes densités en fils de chaîne que l'on rencontre lors du tissage 3D interlock chaîne ont tendance à entraîner les lisses des cadres vers le tissu par le manque d'espace disponible entre les fils. Les lisses étant reliées aux cadres, celles-ci entraînent donc les cadres vers le tissu qui peuvent se chevaucher ou encore être accrochés par un cadre voisin et ainsi provoquer un défaut dans le tissu ou abîmer les cordes. Afin de résoudre ces problèmes, un système de cale a été mis au point et de nouveaux cadres ont été conçus pour être plus rigides. La conception de ce système de cadres sera présentée dans la partie 1.5.

Le mode d'insertion du fil de trame du métier à tisser à travers une navette a été conservé. La Figure 140 représente une navette utilisée sur les machines à tisser d'échantillonnage par insertion manuelle. En effet, le système d'insertion de la trame par l'intermédiaire d'une navette permet d'avoir une continuité du fil de trame, et donc maintient les fils de chaîne situés aux bords du tissu dans la préforme, tout en permettant également la réalisation de certaines techniques de tissage comme le tissage tubulaire. Par contre, la surface de contact entre les fils de chaîne et une navette étant plus importante qu'avec un système d'insertion par lance, les frottements générés par la navette sur les fils de chaîne sont plus importants. Il a donc été nécessaire de concevoir une nouvelle navette afin d'adapter au maximum la géométrie de celle-ci à la foule afin de réduire les frottements tout en acceptant une grande longueur de fil de chaîne afin d'augmenter la productivité de la machine à tisser. Un système d'entraînement de cette navette a été conçu afin d'automatiser la phase d'insertion du fil de trame. La conception de la navette ainsi que de son système d'entraînement sont décrits dans la partie 1.6.



Figure 140 : Navette utilisée sur les machines à tisser d'échantillonnage à insertion manuelle

De même que pour le système d'insertion de la trame, le principe de fonctionnement du système de tassage a été conservé. En effet, les mouvements du peigne sont commandés par deux vérins pneumatiques. Afin de guider le peigne, une liaison glissière a été réalisée entre le peigne et le bâti du système mobile de sélection à travers deux rails de guidage. Afin de réduire au maximum les frottements des fils de chaîne sur les parties inférieures et supérieures du peigne, le système de tassage peut être réglé afin de centrer le peigne par rapport au plan de tissage. La conception du système de tassage sera décrite dans la partie 1.7. La Figure 141 représente le système de tassage conçu pour la machine à tisser CARBOMAT.

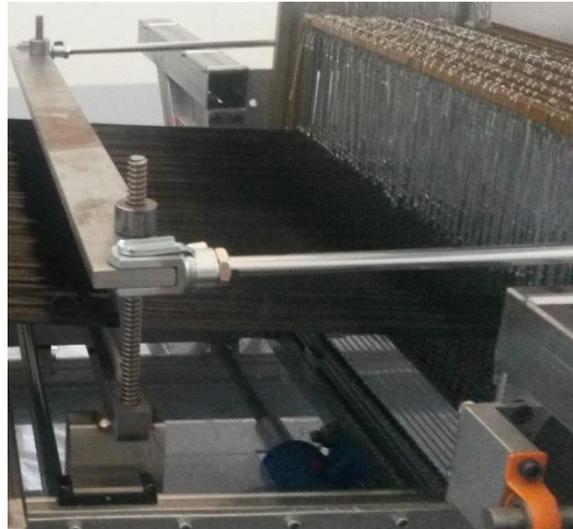


Figure 141 : Système de tassage de la machine à tisser CARBOMAT

Afin d'éviter au maximum les problèmes dus à l'irrégularité de la tension des fils de chaîne tels que : les défauts dans le tissu, les dégradations sur les fils de chaîne ou encore les casses de fils dues à une collision avec la navette dans la foule par manque de tension, le système, présenté en Figure 142 et composé de quatre barres de fixation afin d'éviter tout glissement, a été conçu pour la mise en tension des fils



Figure 142 : Système de mise en tension et de blocage des fils de chaîne de la machine à tisser CARBOMAT

### 1.2 Conception d'un ourdissoir spécifique aux fils de carbone

Dans le but de réduire les problèmes de tension des fils de chaîne dus à l'irrégularité de la longueur enroulée de fil sur les ensouples ainsi que la dégradation sur les fils de chaîne lors de l'étape d'ourdissage, un ourdissoir a été spécialement conçu pour réaliser des ensouples de fils de carbone pour la machine à tisser CARBOMAT.

L'ourdissoir est composé d'un cylindre de grand diamètre permettant l'enroulement d'une grande longueur de fil de carbone sans superposition ou contact entre les fils de carbone, réduisant ainsi les dégradations subies par ces mêmes fils. Afin de réduire les contacts entre les fils et les éléments de l'ourdissoir, le cylindre est composé de huit barres.

Afin d'alimenter l'ourdissoir en fils de carbone en début d'ourdissage ainsi que l'enroulement des fils sur les ensouples en fin d'ourdissage, un élément mobile a été conçu pour se déplacer verticalement lorsque le cylindre est en rotation, dans le but de placer les fils de carbone sans les superposer, puis de faciliter l'enroulement des fils sur une ensouple. Lorsque l'on veut alimenter l'ourdissoir en fils de carbone, il est nécessaire de placer des bobines sur l'élément mobile verticalement. Pour l'enroulement des fils sur une ensouple, il faut placer l'ensouple sur l'élément mobile à l'endroit prévu à cet effet. La Figure 143 représente l'ourdissoir tel qu'il a été conçu.

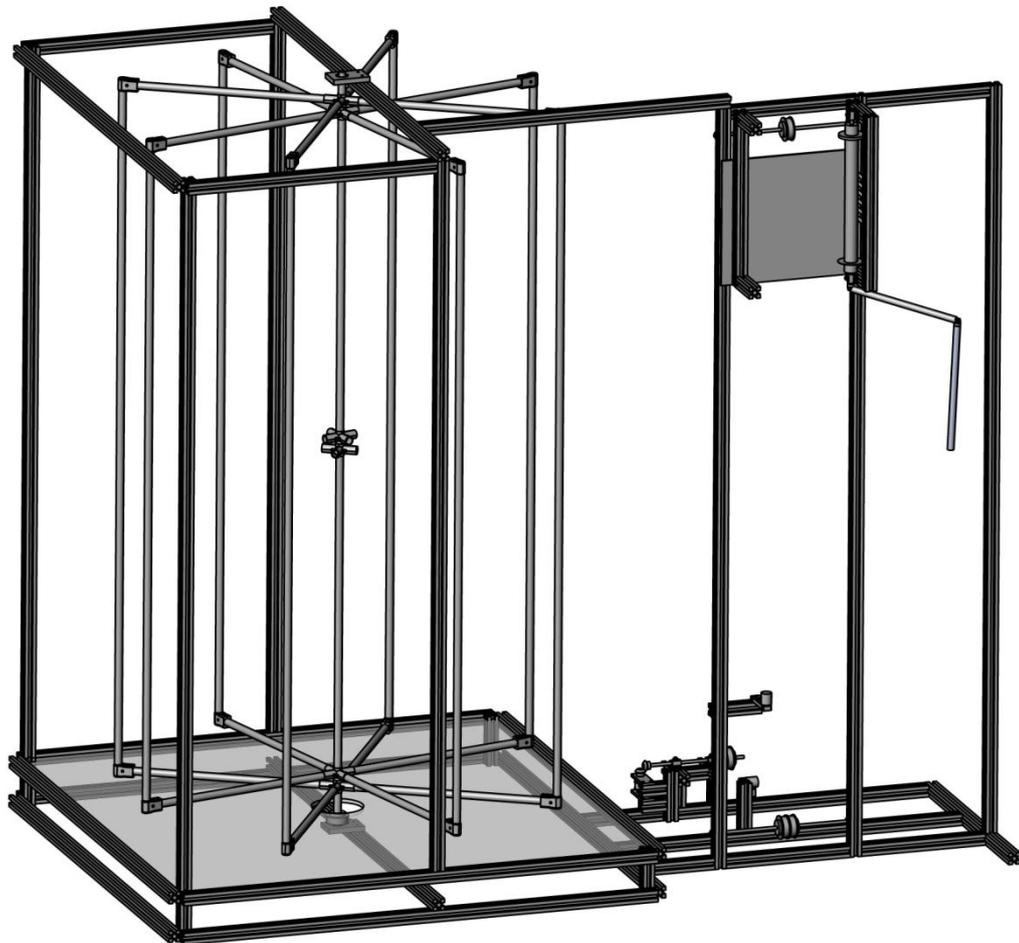


Figure 143 : Ourdissoir conçu pour réaliser les ensouples de la machine à tisser CARBOMAT

Au final, l'ourdissoir décrit ici permet la réalisation d'ensouples ayant une laize inférieure à 60cm et une longueur de 20 mètres. De plus importantes longueurs peuvent être réalisées si l'on diminue la laize de l'ensouple.

### 1.3 Conception et réalisation d'un cadre d'ensouples

Pour alimenter la machine à tisser en fils de chaîne, tout en minimisant les différences de mouvement entre les évolutions de fils de chaîne de la structure tissée 3D interlock chaîne, à chaque cadre de sélection des fils de chaîne est associée une ensouple. Les ensouples mentionnées ici sont de taille réduite. Elles doivent permettre de fournir des fils de chaîne sur une largeur de 50cm correspondant à la laize maximale de la machine à tisser.

Les ensouples sont également limitées quant à la longueur de fil de chaîne enroulée afin d'obtenir un cantre avec des dimensions réduites. Toutefois, les ensouples permettent d'enrouler 25 à 30 mètres de fil de chaîne, longueur suffisante pour la machine à tisser de prototypage CARBOMAT.

Afin de changer facilement de laize, les ensouples sont composées de flasques que l'on peut déplacer sur l'ensouple afin d'avoir une largeur d'enroulement de fils de chaîne adaptée.

Afin de conserver une tension correcte sur les fils de chaîne lors du tissage tout en permettant le déroulement des ensouples, un câble métallique a été relié, enroulé sur les ensouples et relié à un poids à l'autre extrémité du câble pour assurer une tension constante des fils de chaîne. La Figure 144 représente une ensouple de la machine à tisser CARBOMAT.

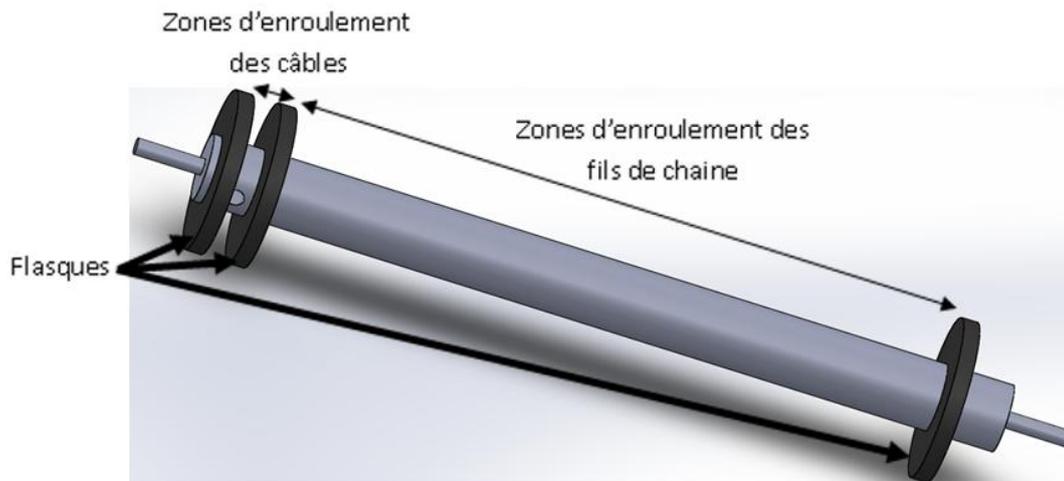


Figure 144 : Représentation d'une ensouple de la machine à tisser CARBOMAT

Afin de pouvoir dérouler une grande longueur de fils de chaîne sur les ensouples montées sur la machine à tisser, les câbles sont déportés vers un cantre supplémentaire afin de permettre un grand mouvement des poids sans avoir de contact entre les câbles.

La sensibilité des fils de carbone aux frottements ainsi qu'aux trop faibles rayons de courbures, mais aussi selon les contraintes d'encombrement du cantre d'ensouples, celui-ci à été conçu de manière à placer 3 rangées de 8 ensouples pour alimenter les 24 cadres de la machine à tisser. Les deuxième et troisième rangées sont placées de manière à ce que les nappes de fils de chaîne passent entre deux ensouples des rangées à traverser, sans pour autant avoir de contacts entre les nappes de fils et les ensouples. La Figure 145 représente le cantre d'ensouples de la machine à tisser CARBOMAT.



Figure 145 : Cantre d'ensouple de la machine à tisser CARBOMAT : à gauche, représentation en mode conception et à droite une photographie du cantre une fois la préparation de la machine au tissage réalisée

#### 1.4 Avancée de l'ensemble des systèmes de sélection de la machine à tisser

La principale différence de la machine à tisser CARBOMAT par rapport à la machine à tisser ARM utilisée précédemment réside dans la mobilité des systèmes de sélection afin d'assurer les trois fonctions principales du tissage : la sélection des fils de chaîne pour ouverture et fermeture de la foule, l'insertion du fil de trame, et le tassage du fil de trame inséré sur la ligne de formation du tissu. Pour rendre mobile cet ensemble de sélection, deux rails de guidage ont été fixés sur le bâti de la machine à tisser. La liaison glissière entre le système de sélection de la machine à tisser et le bâti est réalisée par l'intermédiaire de deux paliers à billes sur chaque rail.

La mise en mouvement du système de sélection se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin. L'opérateur peut commander l'avance de la machine à tisser (Figure 146) par l'intermédiaire d'une poulie excentrée. La précision obtenue par ce système d'engrenage interne à l'écrou fait qu'une rotation d'un tour de la commande de l'écrou permet un mouvement d'un millimètre d'avance de l'ensemble du système de sélection.

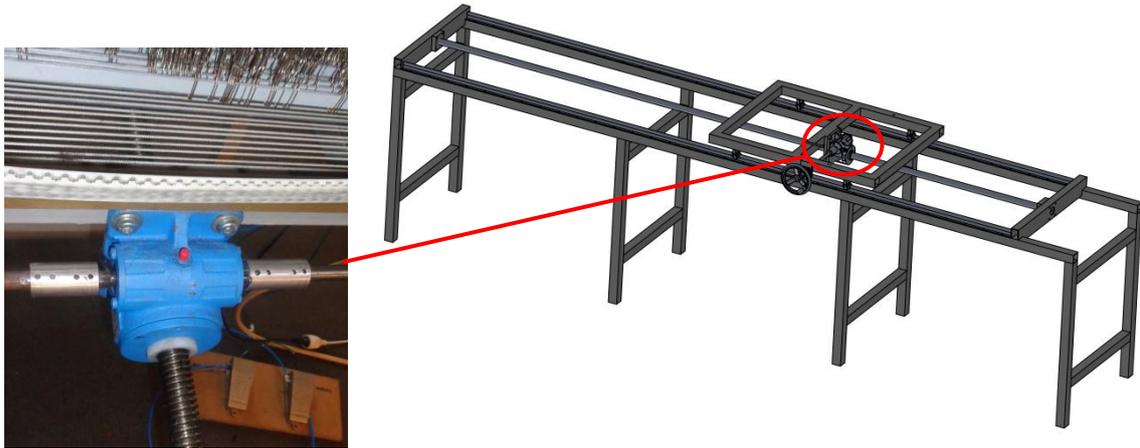


Figure 146 : Système utilisé pour l'avance du système de sélection

Au final, le système de sélection de la machine à tisser peut évoluer sur une longueur de 230cm, permettant la production d'une longueur tissée équivalente dans la direction des fils de chaîne.

Dans un premier temps, la machine à tisser a été utilisée manuellement afin de répondre à un impératif de production et de mise au point.

Dans un second temps, une phase d'automatisation de la machine à tisser a été réalisée.

### 1.5 Conception et fabrication des éléments associés à la séparation des cadres

L'une des causes principales des défauts occasionnés lors de la production des tissus 3D interlocks chaînes réside dans le défaut de positionnement des cadres entre eux par superposition ou par frottement.

Afin de résoudre ce type de problème, un guidage latéral des cadres, représenté en Figure 147, au sein de rainures d'une pièce de séparation des cadres a été ajouté sur la machine à tisser. Ce système de séparation des cadres a permis une réduction significative du défaut de positionnement des cadres par sélection verticale, même si certains cadres pouvaient passer d'une rainure à une autre et ainsi créer le même type de défauts qu'auparavant.

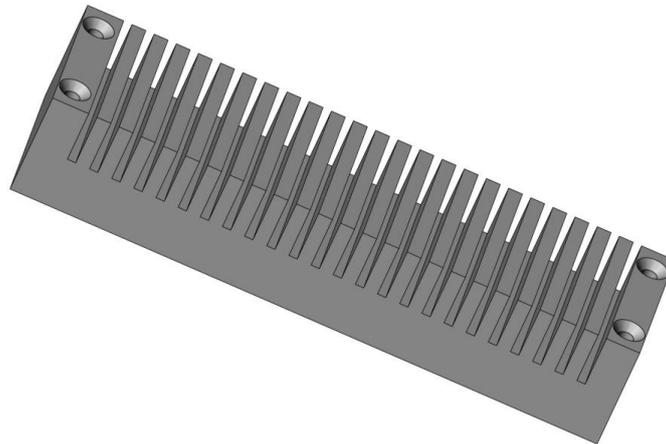


Figure 147 : Pièce de séparation des cadres de la machine à tisser CARBOMAT

Pour résoudre ce problème, un nouveau système de séparation des cadres a été conçu. Celui-ci est composé de plusieurs cales séparant les cadres et réduisant le jeu entre les cadres et les cales, simplifiant ainsi l'assemblage des cadres. Chaque cale est insérée entre deux cadres qui ne peuvent donc plus être en contact entre eux à leurs extrémités droite et gauche.

En complément du deuxième système de séparation des cadres, de nouveaux cadres ont été également conçus de manière à être plus rigide afin de ne pas se déformer avec l'avancée de la machine à tisser. La Figure 148 représente les cales utilisées pour séparer les cadres.

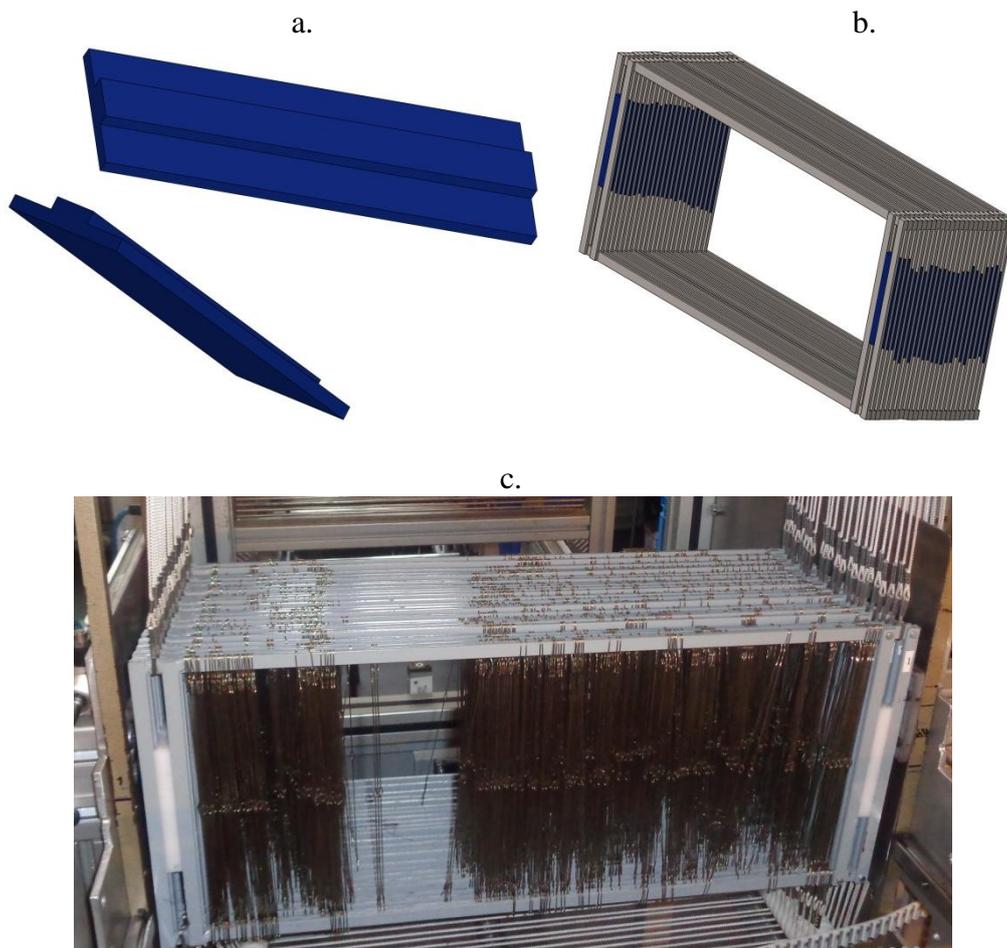


Figure 148 : Second système de séparation des cadres : a. cale, b. assemblage des cales sur les cadres et c. Photographie de l'assemblage réalisé

Au final, le second système de cales a pu être testé sur la machine à tisser CARBOMAT et a permis de régler les défauts de sélection des cadres.

### 1.6 Conception et réalisation du système d'insertion du fil de trame

Le système d'insertion du fil de trame utilisé pour la machine à tisser CARBOMAT repose sur une navette porteuse d'une bobine de fil comportant une longueur de fil pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres pour le tissage en continu sur machine à tisser.

L'utilisation d'une navette permet la réalisation de préformes nécessitant une continuité du fil de trame aux extrémités du tissu 3D interlock chaîne. Cependant, ce support de bobine de fil de trame par navette peut induire une dégradation supplémentaire par rapport à un système de lance, principalement due à une plus grande surface de contact entre la navette et les fils de chaîne pour une même hauteur de foule. De plus, la hauteur de foule obtenue sur la machine à tisser doit être suffisante pour le passage de la navette mais doit être minimisée lors de la production de tissus 3D interlocks chaînes à base de fils de carbone.

Afin d'optimiser le système d'insertion des fils de trame, une navette a été conçue de manière à être la plus fine possible, tout en stockant une longueur importante de fil de trame pour assurer une production en continu. Une première version de la navette conçue en bois n'a pas pu être retenue du fait de sa trop grande hauteur, provoquant une trop forte dégradation sur les fils de chaîne.

Afin de résoudre ce problème, une seconde navette a été conçue de manière à être plus fine. La crémaillère, permettant la mise en mouvement de la navette qui se trouvait au dessous de la navette, a été placée sur le côté de la seconde navette, de manière à se trouver du côté du peigne sur la machine à tisser, réglant également un autre problème de dégradation lié au

contact entre la crémaillère et les fils de chaîne. La deuxième version de la navette comporte également un système de rappel de la canette basé sur un ressort à chaque extrémité, évitant ainsi un blocage du fil de trame lors du tissage. La Figure 149 présente les différentes versions des navettes utilisées sur la machine à tisser CARBOMAT.

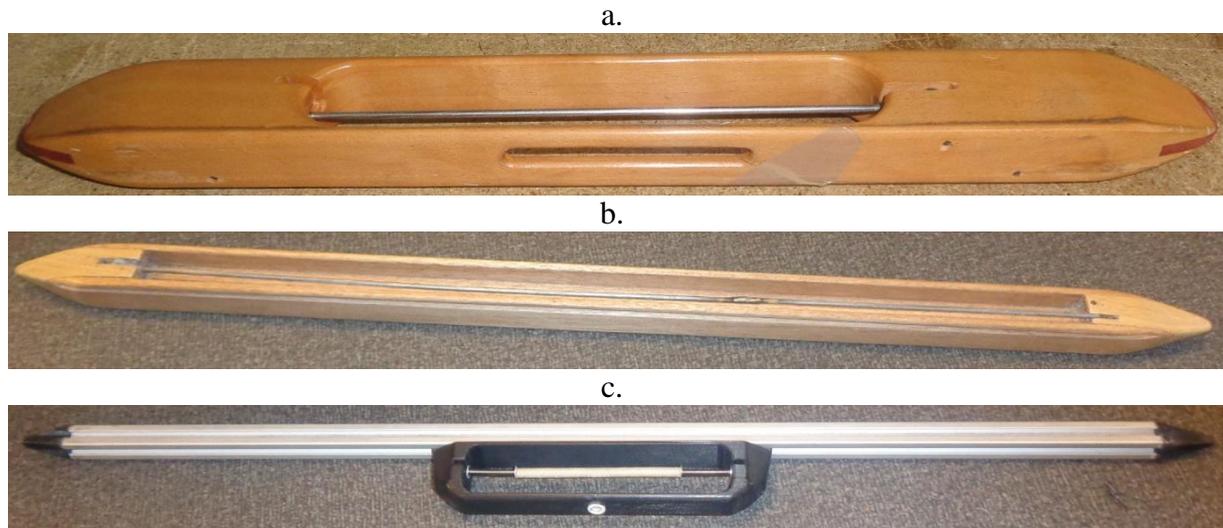


Figure 149 : Différentes navettes utilisées avec la machine à tisser : a. Navette initiale, b. Navette issue de la première conception et c. Navette avec crémaillère

Un système de mise en mouvement de la navette est composé d'une crémaillère métallique disposée sur la navette et entraînée par deux roues dentées disposées de chaque côté de la machine à tisser. La navette et la crémaillère ont des dimensions suffisantes pour toujours être engrainées sur l'une des deux roues dentées. Les roues dentées sont synchronisées à l'aide d'un système pignons-chaîne passant au dessous du peigne remplacé par la suite par un système poulie courroie plus fiable et facile à monter. Enfin, le mouvement de la navette peut être commandé sur un arbre de transmission par une manivelle ou par un moteur. La Figure 150 présente l'assemblage permettant la translation de la navette à travers la foule. Ce système est réalisé de manière identique des deux côtés de la machine à tisser.



Figure 150 : Système d'insertion de la navette finale

### 1.7 Conception et réalisation du guidage du peigne sur machine à tisser

Le système de tassage est composé du peigne, de sa fixation, du système de coulissement du peigne lors du tassage et du système de commande du mouvement du peigne.

Afin de permettre l'utilisation de peignes de dimensions différentes, le système de fixation du peigne est composé de deux parties métalliques comprenant une rainure chacune, dans laquelle vient se loger les parties supérieures et inférieures du peigne. Afin de bloquer le peigne par un système de butées, des vis ont été installées dans les deux pièces métalliques. Afin de régler l'espace entre les deux pièces métalliques, celles-ci sont reliées à travers deux vis et quatre boulons de taille suffisante pour limiter les déformations au maximum. Ce même système permet également de positionner le peigne de manière à le centrer par rapport au plan de tissage. Les deux vis sont fixées à un palier à bille chacune et des rails de guidage sont fixés sur le bâti du système de sélection de manière à permettre le coulissement du peigne lors du tassage. La Figure 151 représente le système de guidage du peigne conçu pour la machine à tisser CARBOMAT.

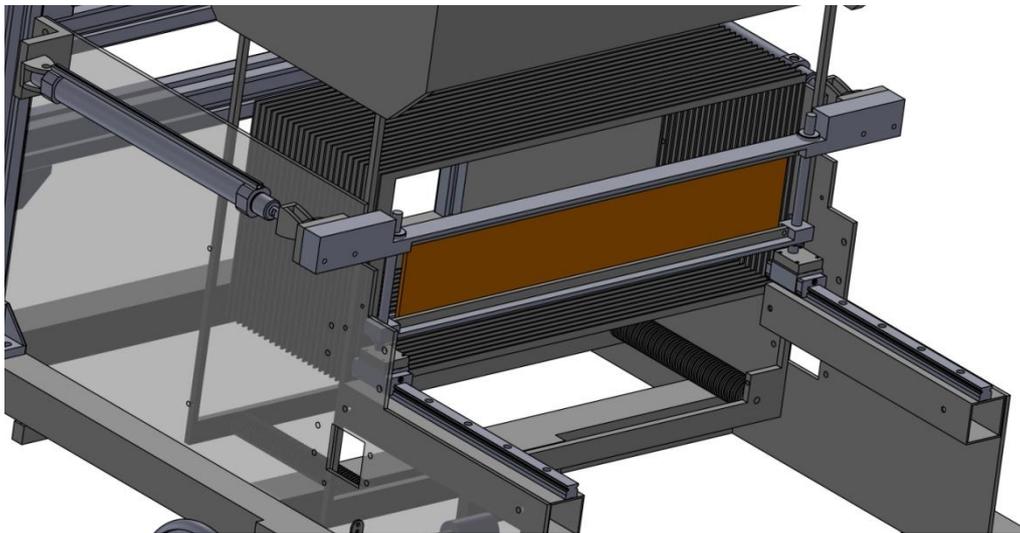


Figure 151 : Conception du système de guidage du peigne et du réglage en position verticale

Enfin, la mise en mouvement du peigne se fait par l'intermédiaire de deux vérins pneumatiques reliés à la pièce métallique supérieure du système de fixation. Les deux vérins sont positionnés de manière à être en poussée lors de l'opération de tassage, qui nécessite parfois une force de poussée maximale afin d'obtenir les densités prévues en fils de trame. La Figure 152 présente le système de tassage pendant le tissage sur la machine à tisser CARBOMAT.



Figure 152 : Photographie du système de tassage

## 1.8 Conception et réalisation du système de mise en tension et de blocage des fils de chaîne

Le système de mise en tension et de blocage des fils de chaîne est une partie essentielle de la machine à tisser car elle permet l'obtention d'une tension des fils de chaîne la plus régulière possible. Ce système permet également d'éviter les glissements de fils, de conserver la tension initiale sur les fils de chaîne, ce qui facilite ainsi le tissage des premiers rapports d'armure de la production et réduit le nombre de défauts apparaissant sur le tissu.

Afin d'obtenir une tension sur les fils de chaîne régulière avec des valeurs importantes en densité de fils de chaîne des tissus 3D interlocks chaînes, la mise en tension est réalisée à travers des nœuds comportant un faible nombre de fils disposés sur quatre barres afin d'avoir assez d'espace pour tendre tous les fils. Afin de ne pas avoir de trajectoires différentes de fil de chaîne, créant des problèmes de tension lors du tissage, l'ensemble des fils de chaîne est positionné dans le plan du tissu par une barre de maintien. Afin de conserver une tension identique sur l'ensemble des fils de chaîne pendant cette étape de préparation, les ensouples doivent être bloquées. La Figure 153 représente le système de blocage des fils de chaîne de la machine à tisser CARBOMAT.

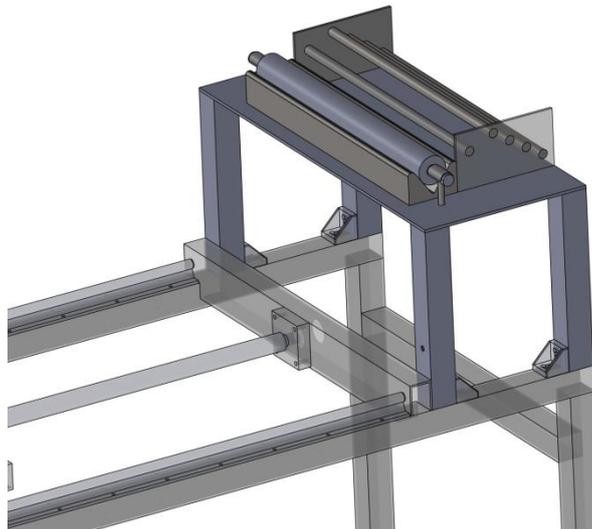


Figure 153 : Conception du système de blocage des fils de chaîne

Le blocage des fils créant un avalement de l'ensemble des fils de chaîne, ce système nécessite que les ensouples soient libres de se dérouler pour éviter une sur-contrainte des fils de chaîne tout en conservant une tension sur l'ensemble des fils. La Figure 154 représente le système de blocage des fils de chaîne réalisé.



Figure 154 : Photographie du système de tassage

### 1.9 Production des tissus 3D interlocks chaînes sur la machine à tisser CARBOMAT modifiée

Après avoir finalisé les adaptations de la machine à tisser CARBOMAT, une production a été réalisée afin de déterminer la dégradation totale en masse subie par les fils de chaîne entre les fils sortis de bobine et les fils dans le tissu.

Le tissu réalisé est un tissu 3D interlock chaîne couche à couche avec 8 couches ainsi qu'une armure de surface en sergé de 3 avec des fils de carbone HTA40 E13 6K identiques aux fils utilisés pour réaliser les préformes de l'application AEROMAPICC. La Figure 155 représente la structure réalisée pour les mesures de dégradations.

La définition générale du tissu 3D interlock chaîne est : tissu 3D interlock O-L 2-2-8 Liage {Sergé 3 effet chaîne cordon à droite} {2 10 18 – 3 11 19 – 4 12 20 – 5 13 21 – 6 14 22 – 7 15 23 – 8 16 24 - # - # } – Surface {Sergé 3 effet chaîne cordon à droite} {1 9 17-# - #- #- #- #- #- #- #- #}

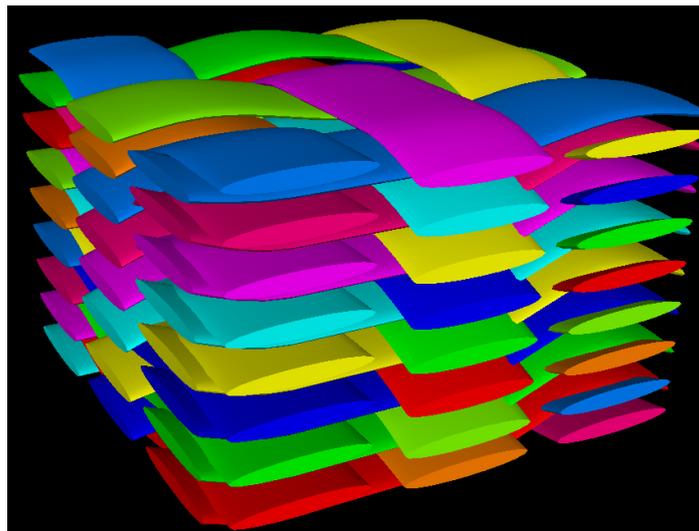


Figure 155 : Tissu réalisé pour les mesures de dégradation

Des fils de chaîne ont été prélevés sur l'ensemble de la laize du tissu. La laize a été divisée en 9 sections de 5 centimètres de large préalablement délimitées par l'ajout de fils traceurs. Une sélection de 25 fils de chaîne de liage a été réalisée sur chaque zone, chaque fil ensuite coupé sur une longueur de 10 centimètres, permettant ainsi de mesurer la masse de 25×10 fils soit

250 centimètres de longueur de fil par zone. La Figure 156 permet d'illustrer la position des différentes zones de prélèvement des fils de chaîne.

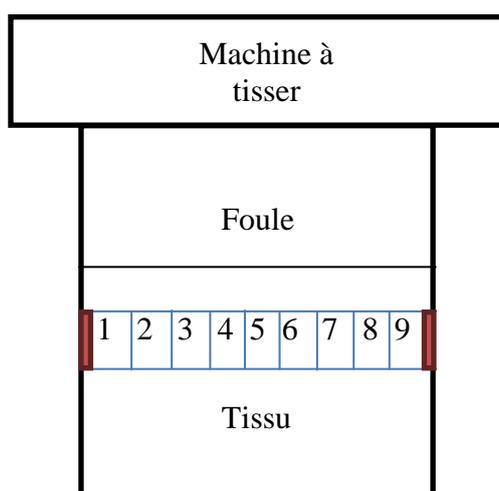


Figure 156 : Schéma présentant la position des zones de prélèvement des fils de chaîne

Le Tableau 12 donne les résultats des mesures de dégradation en masse.

Tableau 12: Résultats des mesures de dégradation en masse sur les fils de carbone

| Fils issus de bobine |                   |                   |                |                      |                      |                          |
|----------------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| masse fils (g)       | longueur fil (cm) | Nombre de fils    |                | longueur totale (cm) | masse linéique (g/m) |                          |
| 40,849               | 1                 | 10000             |                | 10000                | 0,4085               |                          |
| Fils issus du tissu  |                   |                   |                |                      |                      |                          |
| zone                 | masse fils (g)    | longueur fil (cm) | Nombre de fils | longueur totale (cm) | masse linéique (g/m) | Dégradation en masse (%) |
| 1                    | 0,999             | 10                | 25             | 250                  | 0,3996               | 2,176%                   |
| 2                    | 1,024             | 10                | 25             | 250                  | 0,4096               | -                        |
| 3                    | 1,014             | 10                | 25             | 250                  | 0,4056               | 0,707%                   |
| 4                    | 0,943             | 10                | 25             | 250                  | 0,3772               | 7,660%                   |
| 5                    | 1,060             | 10                | 27             | 270                  | 0,3926               | 3,892%                   |
| 6                    | 1,088             | 10                | 27             | 270                  | 0,4030               | 1,353%                   |
| 7                    | 1,008             | 10                | 25             | 250                  | 0,4032               | 1,295%                   |
| 8                    | 1,036             | 10                | 25             | 250                  | 0,4144               | -                        |
| 9                    | 1,032             | 10                | 25             | 250                  | 0,4128               | -                        |
|                      |                   |                   |                |                      | Moyenne              | 2,847%                   |
|                      |                   |                   |                |                      | Ecart type           | 0,1064                   |
|                      |                   |                   |                |                      | Variance (%)         | 2,681                    |

Au final, la dégradation moyenne observée des fils de chaîne de carbone est de 2,8% en masse, ce qui est plus faible comparativement à ce que l'on peut observer dans la littérature pour le même type de structures et de matières [52-144-147]. Ces résultats révèlent l'impact positif des modifications apportées sur la machine à tisser CARBOMAT sur la réduction de la dégradation des fils de carbone lors du tissage.

## 2. Améliorations de la machine à tisser TTF

### 2.1 Problématiques rencontrées

La machine à tisser, présentée en Figure 157, a été conçue pour réaliser des structures tissées 3D interlocks chaines à partir de tout type de fils à l'exclusion des fils de carbone. Pour cela, cette machine a été équipée d'un cantre d'ensouples comportant 24 ensouples et alimentent individuellement les 24 cadres de la machine à tisser. Le système de sélection des cadres et la lecture électronique des dessins associés est du même type que celui utilisé pour la machine à tisser CARBOMAT. Cette machine est équipée d'un système d'insertion du fil de trame composé d'une lance et de trois vérins pouvant alimenter la lance avec trois fils différents de trame. Le système de tassage était initialement composé d'un peigne, d'un système d'arrimage du peigne et d'un vérin permettant la mise en mouvement du peigne.

Cette machine à tisser n'était initialement pas destinée au tissage de structures épaisses, ni au tissage de structures à partir de fils de gros diamètres. Il a donc été nécessaire de modifier cette machine afin de permettre le tissage de préformes épaisses telles que celles qui ont été développées dans le projet MAPICC 3D pour les applications des secteurs de l'automobile, des transports routier et ferroviaire.

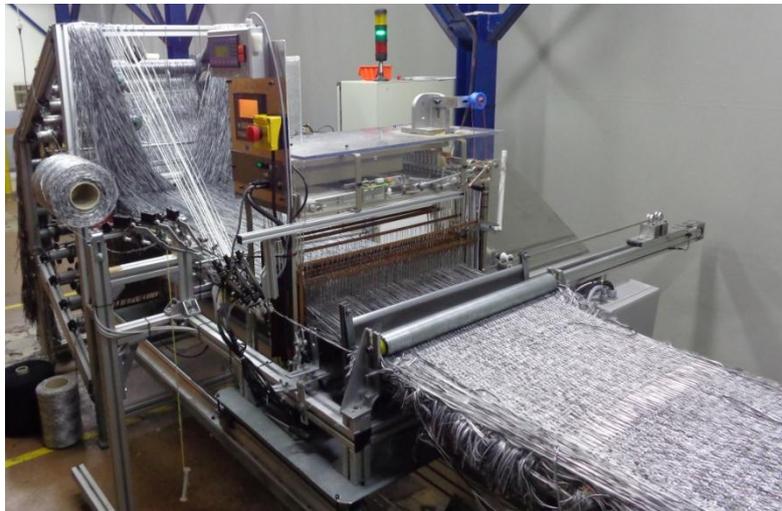


Figure 157 : Production sur la machine à tisser TTF

Le principal changement entre le tissage de structures fines et de structures épaisses réside dans l'effort de tassage qui doit être plus important du fait de la densité plus élevée de fils mais également de l'augmentation des frottements. La première modification à effectuer sur la machine à tisser TTF est donc le renforcement du système de tassage.

Afin de résoudre les problèmes liés aux fortes densités en fils de chaîne, les adaptations effectuées sur le système de sélection de la machine à tisser CARBOMAT ont été transposées sur la machine à tisser TTF.

Le positionnement du système d'alimentation de la lance en fils de trame était trop complexe à régler pour une laize atteignant 60cm, celui-ci a donc été modifié afin de pouvoir placer les vérins indépendamment les uns des autres. Le positionnement des ensouples sur le cantre était également complexe et imprécis, celui-ci a également été modifié afin de simplifier la mise en place des ensouples sur le cantre. Des opérations de maintenance de la machine ont été réalisées, de manière à changer les éléments usés ou abimés de la machine tels que les paliers à billes.

## 2.2 Modification du système de tassage

Le système de tassage existant n'était pas adapté au tissage de structures tissées 3D interlocks chaînes épaisses comme celles développées dans le projet MAPICC3D. En effet, le vérin utilisé pour le tassage n'exerçait pas assez d'effort sur le tissu pour atteindre les densités en fils de trame désirées et s'arrêtait donc avant la fin de sa course. Par conséquent nous avons dû diminuer les densités en fils de trame pour continuer à tisser. De plus, le fait d'avoir un seul vérin obligeait à avoir un positionnement de celui-ci au centre du peigne pour ne pas le bloquer par désaxage et également pour ne pas user prématurément les paliers à billes assurant la liaison glissière entre le peigne et le reste de la tête de travail.

Pour répondre à ces problématiques, le vérin central a été remplacé par deux vérins latéraux, identiques au premier, permettant ainsi un effort de tassage supérieur et plus équilibré. La Figure 158 donne un aperçu du montage réalisé avec les vérins avant et après modifications.

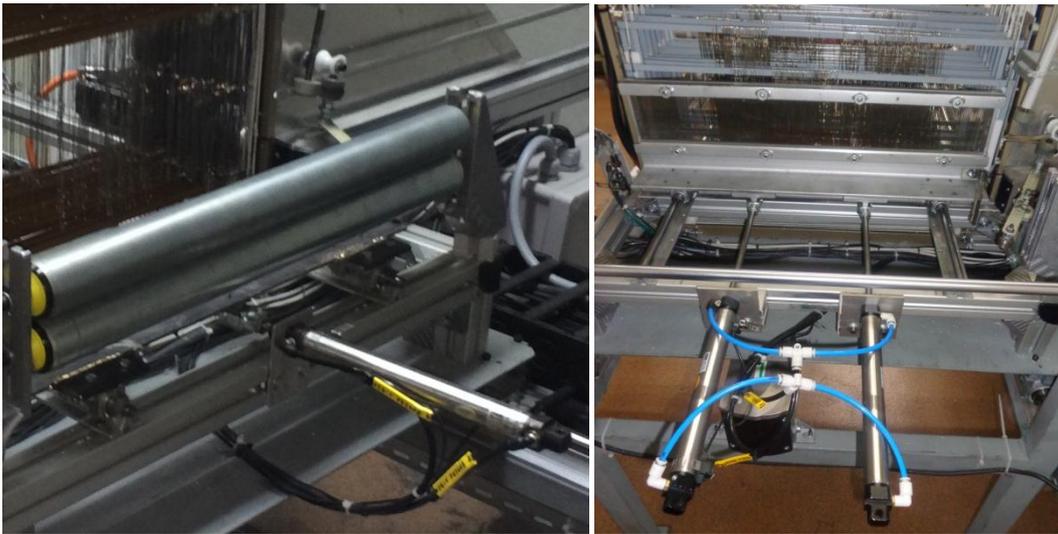


Figure 158 : Position des vérins de tassage : à gauche avant les modifications et à droite après les modifications.

Le système reliant le peigne au premier vérin était prévu pour un peigne de 50cm de largeur. Certaines préformes nécessitant une laize supérieure, un nouveau système a été conçu de manière à placer un peigne de 60 cm et de le relier aux deux nouveaux vérins.

L'ancien système de tassage représenté en Figure 159 était trop flexible. Le nouveau système représenté en Figure 160 a donc été conçu de manière à être plus rigide, d'autant plus que les efforts qui seront appliqués par les deux vérins latéraux seront supérieurs à ceux appliqués par l'ancien vérin central.



Figure 159 : Ancien système de tassage

La conception de ce système est basée sur un profilé en L sur lequel deux profilés en T ont été soudés pour réaliser la liaison avec les deux vérins. Le peigne est inséré entre deux profilés en U. Le profilé en U de dessous est soudé au profilé en L. Le profilé en U du dessus du peigne

est relié au profilé en L par l'intermédiaire de deux barres situées aux extrémités droite et gauche du peigne et d'une barre pour rigidifier le profilé en U et aligner les deux profilés. Enfin, pour rigidifier le profilé en L, deux raidisseurs ont été placés aux extrémités de ce même profilé.



Figure 160 : Représentation et photographie du nouveau système de tassage

### 2.3 Modification des cadres

L'une des principales causes de défaut de positionnement de cadres au niveau des tissus 3D interlocks chaînes produits est due à un accrochage avec un cadre voisin comme le montre la Figure 161 représentant les anciens cadres pendant le tissage.



Figure 161 : Problème de positionnement vertical des cadres lors du tissage

Afin de résoudre ce problème de séparation des cadres les uns des autres, un système de cales à positionner entre les cadres et semblable à celui conçu pour la machine à tisser CARBOMAT présenté en Figure 162, a été également ajouté. En complément de ce système de séparation des cadres, de nouveaux cadres ont également été conçus de manière à être plus rigides et à ne pas se déformer avec l'avancée de la machine à tisser. Le système mis en place ici est identique à celui réalisé pour la machine à tisser CARBOMAT, mis à part que les nouveaux cadres de la machine à tisser TTF ont une largeur de 60cm.



Figure 162 : Nouveaux cadres avec le système de séparation des cadres de la machine à tisser TTF

#### 2.4 Autres adaptations réalisées sur la machine à tisser TTF

La modification du système d'insertion des fils de trame a été revue afin de rendre indépendante la position des trois vérins d'alimentation en fils de trame de manière à simplifier le réglage de l'insertion trame. Malheureusement, par manque de temps, celle-ci n'a pas pu être mise en œuvre. La Figure 163 présente les vérins d'alimentation en fils de trame de la lance.



Figure 163 : Vérins d'alimentation en fils de trame de la « TTF »

#### 2.5 Production réalisée sur la machine à tisser TTF modifiée

Le renforcement du système d'arrimage du peigne et le placement de deux vérins latéraux ont permis d'augmenter la force de tassage et donc d'augmenter la densité trame maximale de 14 duites/cm à 20 duites/cm pour une densité chaîne de 36 fils/cm avec des fils comelés verre/polypropylène de titre 960 Tex. Malheureusement, cette augmentation de la densité n'était pas assez importante pour répondre au cahier des charges de l'application TRUCKMAPICC initiale qui était de 36 duites/cm.

De plus, par manque de temps, le nouveau système de cadres et de séparation des cadres n'a pu être réalisé qu'en toute fin du projet MAPICC3D [1]. Les préformes ont donc dû être produites sans ces systèmes, réduisant ainsi leur qualité.

### **3. Conclusion du chapitre**

Dans ce chapitre, les différents éléments de la conception de la machine à tisser CARBOMAT et de l'ourdissoir adapté à la manipulation des fils de carbone ont été décrits précisément. La première réalisation de la machine à tisser CARBOMAT a fait l'objet d'une mise au point lors du tissage d'un tissu 3D interlock chaîne. Au final, la qualité ainsi que la faible fréquence des défauts présents sur les tissus 3D interlocks chaînes produits sur cette machine se sont révélés être très satisfaisantes. De plus, une mesure de la dégradation moyenne des fils de chaîne de carbone de 2,8% a été mesurée sur les fils de chaîne avant et après tissage.

Les modifications effectuées sur la machine à tisser ont également été décrites dans le détail. Les modifications au niveau du système de tassage ont permis d'augmenter la densité en fils de trame par rapport à la machine à tisser initiale. Cependant les limites atteintes par ces modifications ne nous ont pas permis d'atteindre les valeurs préconisées par le cahier des charges des préformes de l'application TRUCK-MAPICC.

# Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce manuscrit sont issus de la collaboration entre les partenaires du projet MAPICC3D sans lesquels les applications AUTO-MAPICC, TRUCK-MAPICC, RAIL-MAPICC et AERO-MAPICC n'auraient pu être menées.

Les études présentées dans ce manuscrit ont pour objectif de mieux comprendre le comportement des structures tissées 3D interlocks chaines pour différentes applications.

Le comportement des tissus 3D interlocks chaines en déformation est relativement peu connu, et c'est probablement l'un des facteurs qui limite encore leur utilisation dans le domaine des composites. Cet aspect est combiné avec le fait que la fabrication de ce type de renforts doit être maîtrisée vis à vis d'une définition complexe de l'architecture finale. Tenant compte de la définition de ces renforts fibreux multi-couches, l'étape de stratification, comparativement à l'empilement utilisé pour les tissus 2D, en est simplifiée. En ce sens les structures tissées 3D interlocks chaines ont l'avantage de réduire les étapes entre la production des renforts et leur consolidation.

Les solutions tissées 3D interlocks chaines ont l'avantage de posséder des propriétés mécaniques variables en fonction de leur architecture, des densités et de la nature des fils utilisés. Ainsi, une structure tissée 3D interlock chaine peut être très rigide et dense comme le sont les interlocks orthogonaux, mais aussi relativement souple comme le sont les interlocks d'angle. Ces différences de propriétés peuvent être intéressantes pour certaines applications nécessitant une certaine rigidité ou une certaine souplesse tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques.

Les différentes solutions développées dans le cadre du projet MAPICC3D, pour répondre aux besoins exprimés par les partenaires du projet, se sont orientées vers des matériaux composites avec des choix de matières premières (renforts, résines), de procédés de fabrication des renforts textiles, de procédés de mise en forme et de consolidation en adéquation avec leurs besoins. Les différentes solutions ont été présentées pour chaque application support, telles que : le carter d'huile par emboutissage pour l'application AUTO-MAPICC, le support de siège avec une consolidation sous bâche à vide pour l'application TRUCK-MAPICC, le croisement de raidisseurs avec une consolidation complexe dans un moule adapté pour l'application RAIL-MAPICC ou encore la pièce en F avec une imprégnation par procédé RTM pour l'application AERO-MAPICC.

Dans l'application AERO-MAPICC, l'exigence de qualification des matériaux permet de justifier l'emploi de fils de carbone pour le renfort fibreux et de résine époxy à injecter par procédé de type RTM. L'architecture du renfort fibreux s'est orientée vers des tissus 3D interlocks chaines dont les procédés de fabrication et les différentes techniques de tissage apparaissent les plus adaptés à la réalisation de cette solution étant donné les besoins du partenaire concerné. L'utilisation de fibres de carbone au sein des structures 3D interlocks chaines a nécessité la conception d'une machine à tisser optimisée afin de réduire la dégradation subie par les fils lors du tissage et de réduire les défauts. Au final, la qualité ainsi que la faible fréquence des défauts sur les tissus 3D interlocks chaines conçus sur cette machine se sont révélés être très satisfaisantes.

Pour les autres applications, en fonction de l'exigence des coûts associée aux marchés, le choix s'est porté sur un fil comélé à base de multi-filaments de verre E et de filaments continus de polymère thermoplastique. Le procédé de fabrication textile s'est orienté sur le tissage 3D interlock chaine avec une variation dans les architectures afin d'adapter au mieux les préformes élaborées en termes d'homogénéité des dimensions des pièces mais également de leurs capacités à se déformer par drapage ou par pliage. Les modifications effectuées sur la machine à tisser TTF, utilisée pour ces applications, ont également été décrites dans le détail et ont permis d'apporter une solution à plusieurs problèmes rencontrés.

Dans l'application TRUCK-MAPICC, la principale problématique de fabrication est la forte densité de fil de chaîne et de trame. Les modifications au niveau du système de tissage ont permis d'augmenter la gestion de ces densités relativement aux capacités de la machine à tisser initiale. Cependant les limites atteintes par ces modifications ne nous ont pas permis d'atteindre les valeurs préconisées par le cahier des charges des préformes de l'application TRUCK-MAPICC.

Dans l'application RAIL-MAPICC, nous avons réussi à démontrer la faisabilité de la réalisation de croisements de tubes tissés 3D interlocks chaînes tout en conservant la continuité des fibres. Cependant, la machine à tisser de prototypage utilisée ne possédant pas suffisamment de cadres de sélection des fils de chaîne, les démonstrateurs réalisés ne sont pas assez épais pour répondre au cahier des charges en termes de tenue mécanique.

Enfin, dans l'application AUTO-MAPICC, une préforme permettant une mise en forme par emboutissage a été conçue et optimisée, par ses choix d'architectures, de manière à être la plus homogène possible, même au niveau des coins et des arrêtes de la pièce finale formée.

Des essais mécaniques et de crash, sur les pièces composites élaborées à partir de ces préformes, ont été réalisés par les partenaires afin d'une part, de quantifier les tenues mécaniques et d'autre part, de s'assurer du respect des cahiers des charges associés aux différentes applications. Les solutions composites à base de renforts fibreux de type tissu 3D interlock chaîne ont permis, en règle générale, de répondre aux différents besoins exprimés par les utilisateurs finaux. Les premiers prototypes obtenus ont permis d'atteindre des performances mécaniques ou des comportements nouveaux par rapport aux solutions existantes. Cependant, des améliorations peuvent être apportées sur ces solutions composites, notamment en optimisant les paramètres des tissus 3D interlocks chaînes utilisés.

Différentes problématiques de déformabilité des préformes conçues ont été étudiées telles que la mise en forme par emboutissage ou le pliage à 90° des structures tissées 3D interlocks chaînes.

Plusieurs architectures ont été considérées. Les différentes propriétés mécaniques de ces structures peuvent faciliter l'étape de mise en forme et permettre l'obtention d'une meilleure régularité après cette phase de préformage. Les travaux réalisés pour l'application AUTO-MAPICC ont démontré, lors des essais d'emboutissage que l'architecture des tissus 3D interlocks chaînes a une influence importante sur le comportement de la structure lors de la mise en forme par emboutissage. Par conséquent, ces structures tissées 3D interlocks chaînes peuvent être optimisées pour répondre au mieux à la drapabilité sur des formes données. Les études menées sur le pliage à 90° d'une structure tissée 3D interlock chaîne carbone ont également démontré les possibilités d'optimisations locales d'architecture afin de minimiser les irrégularités au niveau de l'angle de pliage.

L'originalité des travaux présentés dans ce manuscrit réside dans le fait que l'on ne se limite pas à comprendre les déformations des tissus 3D interlocks chaînes. Nous avons également cherché à optimiser les structures au niveau local et global dans le but de répondre aux différentes problématiques de mise en forme rencontrées.

Les essais d'intégration d'éléments métalliques au sein de la préforme, afin de répondre aux problématiques de jonctions composite-métal, ici par soudure, ont mis en évidence les potentialités de cette démarche. Même si relativement à l'application, ces premiers essais n'ont pas permis d'aboutir, mettant ainsi en évidence la complexité de la problématique de la jonction composite-métal. Ces solutions d'intégration, à l'échelle de la conception de la préforme, de fonctionnalités autres que mécaniques (assemblage) permettront d'ouvrir de nouvelles voies.

La consolidation des préformes thermoplastiques a également été étudiée afin d'optimiser l'imprégnation de la résine au sein des renforts fibreux multi-couches. La qualité, des pièces composites réalisées, a été atteinte, soit avec une consolidation sous bâche à vide dans une étuve, soit avec une consolidation sous presse chauffante.

Nous avons également exposé les limites techniques de fabrication des structures tissées 3D interlocks chaines. Le caractère innovant de notre démarche nous a permis de dépasser ces limites en modifiant l'ensemble de la chaîne de production, afin de contrôler et d'optimiser toute la chaîne de production dans le but d'obtenir des pièces composites de la meilleure qualité possible.

Ces travaux, en sus des perspectives citées, pourront être complétés par des études portant sur le comportement d'architectures plus complexes. Il serait également intéressant d'analyser l'influence des autres paramètres définissant un tissu 3D interlock chaîne, telle que la profondeur de liage sur la qualité de mise en forme.

# Bibliographie

- [1] European Commission, "One-shot Manufacturing on large scale of 3D up graded panels and stiffeners for lightweight thermoplastic textile composite structure," Brussels, MAPICC 3D number 263159-1, 2009.
- [2] J.-M. Berthelot, *Matériaux composites - Comportement mécanique et analyse des structures.*, 1999.
- [3] Auteurs et Experts ETI. (2014) Matériaux à propriétés mécaniques. [Online]. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/materiaux-a-proprietes-mecaniques-42535210/>
- [4] D. Gay, *Matériaux composites.*, 1997.
- [5] B. Lee, K. H. Leong, and I. Herszberg, "Effect of Weaving on the Tensile Properties of Carbon Fibre Tows and Woven Composites," *Journal of Reinforced Plastic Composites*, vol. 20, no. 8, pp. 652-670, 2001.
- [6] Les éditions de l'industrie textile, "Caractéristiques des fibres chimiques à usages techniques," Editions de l'industrie textile - Spirale SA, Paris, France, Classification et définition des fibres ISBN 2 907151 05 3, 1987.
- [7] Les éditions de l'industrie textile, "Caractéristiques des fibres pour l'habillement et l'ameublement," Edition de l'industrie textile - Spirale SA, Paris, France, Classification et définition des fibres ISBN 2 907151 06 1, 1987.
- [8] S Nunna, PR Chandra, S Shrivastava, and AK Jalan, "A review on mechanical behavior of natural fiber based hybrid composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, no. 31, pp. 759-769, 2012.
- [9] MM Kabir, H Wang, KT Lau, and F Cardona, "Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview," *Composites Part B*, no. 43, pp. 2883-2892, 2012.
- [10] D. B. Dittenber and H. V. S. GangaRao, "Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, no. 8, pp. 1419-1429, 2012.
- [11] MU Wahit, NI Akos, and WA Laftah, "Influence of Natural Fibers on the Mechanical Properties and Biodegradation of Poly(lactic acid) and Poly( $\epsilon$ -caprolactone) Composites: A Review," *Polymer Composites*, no. 33, pp. 1045–1053, 2012.
- [12] G. Koronis, A. Silva, and M. Fontul, "Green composites: A review of adequate materials for automotive applications," *Composites Part B: Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 120-127, 2013.
- [13] A Shalwan and BF Yousif, "In state of art: mechanical and tribologicalbehaviour of polymeric composites based on natural fibres.,", *Materials & Design*, no. 48, pp. 14-24, 2013.
- [14] DA Shah, "Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review," *Journal of Materials Science*, no. 48, pp. 6083-6107, 2013.
- [15] P. Ouagne, D. Soulat, J. Moothoo, E. Capelle, and S. Gueret, "Complex shape forming of a flax woven fabric; analysis of the tow buckling and misalignement defect," *Composites: Part A*, no. 51, pp. 1-10, 2013.
- [16] J. Moothoo, S. Allaoui, P. Ouagne, and D. Soulat, "A study of the tensile behaviour of flax tows and their potential for composite processing," *Materials & Design*, vol. 55,

pp. 764-772, 2014.

- [17] E. Capelle, P. Ouagne, D. Soulat, and D. Duriatti, "Complex shape forming of flax woven fabrics: Design of specific blank-holder shapes to prevent defects," *Composites Part B: Engineering*, vol. 62, pp. 29-36, 2014.
- [18] L. Tong, A. P. Mouritz, and M. K. Bannister, *3D fibre reinforced polymer composites.*: Elsevier, 2002.
- [19] J. HU, *3D fibrous assemblies, properties applications and modelling of three dimensional textile structures.*, 2008.
- [20] S. Goutianos, T. Peijs, B. Nystrom, and M. Skrifvars, "Development of Flax Fibre based Textile Reinforcements for Composite Applications," *Applied Composite Material*, vol. 13, no. 4, pp. 199-215, 2006.
- [21] CD Rudd and AC Long, *Liquid molding technologies.*: Woodhead Publishing Limited, 1997.
- [22] A. H. Miller, N. Dodds, J. M. Hale, and A. G. Gibson, "High speed pultrusion of thermoplastic matrix composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 29, no. 7, pp. 773–782, 1998.
- [23] M. Hou, L. Ye, and Y.-W. Mai, "Advances in Processing of Continuous Fibre Reinforced Composites With Thermoplastic Matrix," *Plastics Rubber and Composites Processing and Applications*, vol. 23, pp. 279–293, 1995.
- [24] G. Lebrun, M.N. Bureau, and J. Denault, "Evaluation of Bias-Extension and Picture-Frame Test Methods for the Measurement of Intraply Shear Properties of PP/Glass Commingled Fabrics," *Composite Structures*, vol. 61, pp. 341– 352, 2003.
- [25] F Zaixia, Zhangyu, C Yanmo, and L. Hairu, "Investigation on the Tensile Properties of Knitted Fabric Reinforced Composites made from GF-PP Commingled Yarn Preforms with Different Loop Densities," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 19, pp. 113–126, 2006.
- [26] A. C. Long, C. E. Wilks, and C. D. Rudd, "Experimental characterisation of the consolidation of a commingled glass/polypropylene composite," *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 11, pp. 1591–1603, 2001.
- [27] R. Alagirusamy and V. Ogale, "Commingled and Air Jet-Textured Hybrid Yarns for Thermoplastic Composites," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 33, pp. 223–243, 2004.
- [28] R. Alagirusamy, R. Fanguero, V. Ogale, and N. Padaki, "Hybrid Yarns and Textile Preforming for Thermoplastic Composites," *Textile Progress*, pp. 1–71, 2006.
- [29] N. Svensson, R. Shishoo, and M. Gilchrist, "Manufacturing of Thermoplastic Composites from Commingled Yarns-A Review," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 11, pp. 22–56, 1998.
- [30] E. Mäder, J. Rausch, and N. Schmidt, "Commingled yarns – Processing aspects and tailored surfaces of polypropylene/glass composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, no. 4, pp. 612-623, 2008.
- [31] L. Ye, K. Friedrich, and J. Kästel, "Consolidation of GF/PP Commingled Yarn Composites," *Applied Composite Material*, vol. 1, pp. 415–429, 1994.
- [32] N. Bernet, V. Michaud, P.-E. Bourban, and J.-A. Manson, "Commingled yarn composites for rapid processing of complex shapes," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 11, pp. 1613–1626, 2001.
- [33] J. Fitoussi, M. Bocquet, and F. Meraghni, "Effect of the matrix behavior on the damage of ethylene–propylene glass fiber reinforced composite subjected to high strain rate tension," *Composites Part B: Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 1181-1191, 2013.
- [34] R. Alagirusamy, "Development and Characterization of GF/PET, GF/Nylon, and GF/PP

- Commingled Yarns for Thermoplastic Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 18, no. 3, pp. 269-285, 2005.
- [35] A. Fujita, Z. Maekawa, H. Hamada, M. Matsuda, and T. Matsuo, "Mechanical behavior and fracture mechanism of thermoplastic composites with commingled yarn," *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 12, no. 2, pp. 156-172, 1993.
- [36] B. Zhu, T. X. Yu, H. Zhang, and X. M. Tao, "Experimental investigation of formability of commingled woven composite," 2010.
- [37] K. L. Pickering and C. J. R. Verbeek, "Recent Developments in Polymer Consolidated Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 26, no. 16, pp. 1607-1624, 2007.
- [38] F. K. Ko and G. W. Du, "Textile Preforming," in *Handbook of Composites.*, 1998, pp. 397-424.
- [39] K. Fukuta, E. Aoki, and Y. Nagatsuka, "3-D fabrics for structural composites," in *15th Textile Research Symposium*, 1986.
- [40] A. P. Mouritz, K. H. Leong, and I. Herszberg, "A review of the effect of stitching on the in plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites," *Composite Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 28, no. 12, pp. 979-991, 1997.
- [41] P. Boisse and K. Buet-Gautier, "Experimental analysis and modeling of biaxial mechanical behavior of woven composite reinforcements," *Exp. Mech.*, vol. 41, no. 3, pp. 260-269, 2001.
- [42] K. Buet, "Analyse et simulation du comportement mecanique des renforts composites tisses," Université d'Orléans, Thèse de doctorat 1998.
- [43] M. H. Mohamed and K. Bilisik, "Multiaxis Three-dimensional Flat Woven Preform (Tube Rapiet Weaving) and Circular Woven Preform (Radial Crossing Weaving)," *Textile Research Journal*, vol. 79, no. 12, pp. 1067-1084, 2009.
- [44] M. Duhovic and D. Bhattacharyya, "Simulating the deformation mechanisms of knitted fabric composites," *Composite Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no. 11, pp. 1897-1915, 2006.
- [45] M. Duhovic, "Deformation characteristics of knitted fabric composites," The University of Auckland, 2004.
- [46] B. Hagege, "Simulation du comportement mécanique des milieux fibreux en grandes transformations : Application aux renforts tricotés," ENSAM, Thèse de doctorat 2004.
- [47] O. A. Khondker, I. Herszberg, and K. H. Leong, "An Investigation of the Structure-Property Relationship of Knitted Composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 35, no. 6, pp. 489-508, 2001.
- [48] O. Stolyarov, T. Quadflieg, and T. Gries, "Effects of fabric structures on the tensile properties of warp-knitted fabrics used as concrete reinforcements," *Textile Research Journal*, 2015.
- [49] K. Bilisik, "Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review," *Textile Research Journal*, vol. 82, no. 7, pp. 725-743, 2012.
- [50] J.V. Risicato et al., "A Complex Shaped Reinforced Thermoplastic Composite Part Made of Commingled Yarns With Integrated Sensor," *Applied Composite Material*, vol. 22, no. 1, pp. 81-98, 2015.
- [51] M. Kowalsky, "Développement et analyse de préformes textiles pour raidisseur composite 3D volumique," Thèse de l'Université de Lille 1 soutenue le 03 Décembre 2015.
- [52] B. Provost, "Etude et réalisation d'une solution composite à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule," Université de Valenciennes, Thèse de doctorat

2013.

- [53] C. EL HAGE, "Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel," 2006.
- [54] T.W. Chou, "Three-dimensional textile Structural Composites," in *Microstructural Design of Fiber Composites*:: Cambridge University Press, 1992.
- [55] M. Ansar, W. Xinwei, and Z. Chouwei, "Modeling strategies of 3D woven composites: A review," *Composite structures*, vol. 93, no. 8, pp. 1947 - 1963, 2011.
- [56] C. Ha-Minh, "Comportement mécanique des matériaux tissés soumis à un impact balistique : approches expérimentale, numérique et analytique," Université de Lille 1, Lille, France, Thèse de doctorat 2011.
- [57] S.Z. Sheng and S.V. Hoa, "Modelling of 3D Angle Interlock Woven Fabric Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 16, no. 1, pp. 45-59, 2003.
- [58] H. Gu and Z. Zhili, "Tensile Behaviour of 3D Woven Composites by using Different fabric Structures," *Materials and Design*, vol. 23, pp. 671-674, 2002.
- [59] S. Nauman, "Modélisation Géométrique de tissu 3D Interlock," Laboratoire GEMTEX, Roubaix, France, 2008.
- [60] X. Ding and H.L. Yi, "Parametric Representation of 3D Woven Structure," in *6th Asian Textile Conference (CD Version)*, Hong Kong, China, 2001.
- [61] H. L. Yi, "Conventional Approach on Manufacturing 3D Woven Preforms Used for Composites," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 34, no. 1, pp. 39-50, 2004.
- [62] F. Boussu, I. Cristian, and S. Nauman, "General definition of 3D warp interlock fabric architecture," *Composites Part B*, 2015.
- [63] Y. Tanzawa, N. Watanabe, and T. Ishikawa, "Interlaminar fracture toughness of 3-D orthogonal interlocked fabric composites," *Composite Science and Technology*, vol. 59, no. 8, pp. 1261-1270, 1999.
- [64] N. K. Naik, S. N. M. Azad, P. D. P. And, and B. J. Thuruthimattam, "Stress and Failure Analysis of 3D Orthogonal Interlock Woven Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 20, no. 17, pp. 1485-1523, 2001.
- [65] X. Chen, W.-Y. Lo, A. E. Tayyar, and R. J. Day, "Mouldability of Angle-Interlock Woven Fabrics for Technical Applications," *Textile Research Journal*, 2002.
- [66] N. K. Naik, S. N. Azad, and P. D. Prasad, "Stress and failure analysis of 3D angle interlock woven composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 36, no. 1, pp. 93-123, 2002.
- [67] P. Lapeyronnie, P. Le Grogneq, C. Binétruy, and F. Boussu, "Homogenization of the elastic behavior of a layer-to-layer angle-interlock composite," *Composite Structures*, vol. 93, no. 11, pp. 2795-2807, 2011.
- [68] F. Boussu, F. Veyet, and N. Dumont, "Développement d'une machine prototype de tissage pour la réalisation d'échantillons textile 2,5D," Lille, France, A0807017N, 2008 - 2009.
- [69] A. O. Sageman-Furnas, P. Goswami, G. Menon, and S. J. Russell, "The Sphereprint: An approach to quantifying the conformability of flexible materials," *Textile Research Journal*, vol. 84, no. 8, pp. 793-807, 2014.
- [70] S. Allaoui, A. V. Duong, G. Hivet, J. Launay, and V. Valle, "La mesure des déformations pour l'étude du comportement et la mise en forme des renforts de composites," in *18ème Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, 2007.
- [71] G. Goncharova, M. Deleglise, S. Comas-Cardona, and C. Binetruy, "Model development and verification of the vacuum infusion process for composite

- manufacturing," in *11th International Conference on Flow Processing in Composite Materials (FPCM 11)*, 2012.
- [72] R. Fournier, "optimisation et modelisation du procede r.t.m.," Mines de Paris, Thèse de doctorat 2003.
- [73] P. Lucas and G. Zanella, "Mise en œuvre des composites TP-Compounds à fibres continues," in *Techniques de l'ingénieur.*, 2007.
- [74] C. Dufour, P. Wang, F. Boussu, and D. Soulat, "Experimental investigation about stamping behaviour of 3D warp interlock composite preforms," *Applied Composite Materials*, vol. 21, no. 5, pp. 725-738, 2014.
- [75] L Liu, T. Zhang, P. Wang, and D. Soulat, "Influence of the tufting yarns on formability of tufted 3-Dimensional composite reinforcement," *Composites: part A*, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.07.014>.
- [76] P.B. Jacquot, P. Wang, D. Soulat, and X. Legrand, "Analysis of the preforming behaviour of the braided and woven flax/polyamide fabrics," *Journal of Industrial Textiles*, 2015.
- [77] C. Tephany, D. Soulat, J. Gillibert, and P. Ouagne, "Influence of the non-linearity of fabric tensile behavior for preforming modeling of a woven flax fabric," *Textile Research Journal*, 2015.
- [78] P. Wang, X. Legrand, P. Boisse, N. Hamila, and D. Soulat, "Experimental and numerical analyses of manufacturing process of a composite square box part: Comparison between textile reinforcement forming and surface 3D weaving," *Composites Part B*, vol. 78, pp. 26-34, 2015.
- [79] S. Allaoui et al., "Experimental and numerical analyses of textile reinforcement forming of a tetrahedral shape," *Composite A 42*, pp. 612-622, 2011.
- [80] S. Allaoui et al., "Experimental preforming of highly double curved shapes with a case corner using an interlock reinforcement," *International Journal of Material Forming*.
- [81] E. De Luycker, F. Morestin, P. Boisse, and D. Marsal, "Numerical analysis of 3D interlock composite preforming," *International Journal of Material Forming*, vol. 1, pp. 843-846, 2008.
- [82] E de Luycker, "Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks," INSA, Lyon, Thèse de doctorat 2009.
- [83] S. Allaoui, C. Cellard, and G. Hivet, "Effect of inter-ply sliding on the quality of multilayer interlock dry fabric preforms," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 68, pp. 336-345, 2015.
- [84] M. Hübner et al., "Simulation-based investigations on the drape behavior of 3D woven fabrics made of commingled yarns," *International Journal of Material Forming*, 2015.
- [85] P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Sallé, and F. Dumont, "Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 5, pp. 683-692, 2011.
- [86] S. Gatouillat, A. Bareggi, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse, "Meso modelling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 54, pp. 135-144, 2013.
- [87] T. Gereke, O. Döbrich, M. Hübner, and C. Cherif, "Experimental and Computational Composite Textile Reinforcement Forming: A Review," *Composites: Part A*, 2012.
- [88] X. Peng, Z. Guo, T. Du, and W.-R. Yu, "A simple anisotropic hyperelastic constitutive model for textile fabrics with application to forming simulation," *Composites Part B: Engineering*, vol. 52, pp. 275-281, 2013.
- [89] P Boisse, Y Aimène, and A Dogui, "Hypoelastic, hyperelastic, discrete and semi-

- discrete approaches for textile composite reinforcement forming.," *Int J Mater Forming*, pp. 1229-1240, 2010.
- [90] M.A. Khan, T. Mabrouki, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse, "Numerical and experimental analyses of woven composite reinforcement forming using a hypoelastic behaviour. Application to the double dome benchmark," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 2, pp. 378-388, 2010.
- [91] Y Aimène, E Vidal-Salle, and B Hagege, "A hyperelastic approach for composite reinforcement large deformation analysis," *J Compos Mater*, no. 44, pp. 5-26, 2010.
- [92] A Charmetant, E Vidal-Sallé, and P. Boisse, "Hyperelastic modelling for mesoscopic analyses of composite reinforcements," *Compos Sci Technol*, pp. 1623-1631, 2011.
- [93] A. Charmetant, J. G. Orliac, E. Vidal-Sallé, and P. Boisse, "Hyperelastic model for large deformation analyses of 3D interlock composite preforms," *Composites Science and Technology*, vol. 72, no. 12, pp. 1352-1360, 2012.
- [94] P. Ouagne, D. Soulat, G. Hivet, S. Allaoui, and D. Duriatti, "Analysis of defects during the performing of a woven flax," *Advanced Composites Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 105-108, 2011.
- [95] C. Cochrane, M. Lewandowski, and V. Koncar, "A flexible strain sensor based on a conductive polymer composite for in situ measurement of parachute canopy deformation," *Sensors*, vol. 9, pp. 8291-8308, 2010.
- [96] C. Cochrane, V. Koncar, M. Levandowski, and C. Dufour, "Design and development of a flexible strain sensor for textile structures based on a conductive polymer composite," *Sensors*, vol. 7, pp. 473-492, 2007.
- [97] S. Nauman, P. Lapeyronnie, I. Cristian, F. Boussu, and V. Koncar, "On line measurement of structural deformations in composites," *IEEE Sens*, vol. 6, pp. 1329-1336, 2011.
- [98] N. Trifigny et al., "PEDOT:PSS-based piezo-resistive sensors applied to reinforcement glass fibres for in situ measurement during the composite material weaving process.," *Sensors*, vol. 13, no. 8, pp. 10749-10764, 2013.
- [99] N. Trifigny, "Mesure in-situ et connaissance des phénomènes mécaniques au sein d'une structure tissée multicouches," Roubaix, France, 2013.
- [100] C. Cochrane, "Développement d'un système de mesure d'allongement pour voileure de parachute," Université des sciences et technologies de Lille, Thèse de doctorat 2007.
- [101] J.G. Orliac, A. Charmetant, F. Morestin, P. Boisse, and S. Otin, "3D interlock composite preforming simulation," *Key Engineering Materials*, vol. 504-506, pp. 261-266, 2012.
- [102] A. Delommez and E. Popelier, *Atlas d'armures textiles*. Roubaix, France: Etablissement Duporge, 1951.
- [103] A. Yousefpour, M. Hojjati, and J.-P. Immarigeon, "Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 17, no. 4, pp. 303-341, 2004.
- [104] P. Molnar, P. Mitschang, and D. Felhos, "Improvement in Bonding of Functional Elements with the Fiber Reinforced Polymer Structure by Means of Tailoring Technology," *Journal of Composite Materials*, vol. 41, no. 21, pp. 2569-2583, 2007.
- [105] P. Cognard, "Assemblage des composites - Les points forts du collage," *Techniques de l'ingénieur*, Juillet 2003.
- [106] M. Mariatti, M. Nasir, H. Ismail, and J. Backlund, "Effect of Hole Drilling Techniques on Tensile Properties of Continuous Fiber Impregnated Thermoplastic (COFIT) Plain Weave Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 23, no. 11, pp. 1173-1186, 2004.

- [107] A. Kayran and M. Gunel, "Non-linear progressive failure analysis of open-hole composite laminates under combined loading," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 15, no. 3, pp. 309-339, 2013.
- [108] F. OkumuS, "Elasto-plastic Stress Analysis in a Thermoplastic Composite Laminated Plate with Open Circular Hole Loaded Transversely," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 23, no. 15, pp. 1651-1662, Octobre 2004.
- [109] Rivet - Selection Factors. [Online].  
<http://www.stanleyengineeredfastening.com/brands/pop/rivets/selection-factors>
- [110] <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Soudage&action=history>. (2015, Septembre) Soudage - Wikipedia. [Online].  
<http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Soudage&oldid=118314812>
- [111] C. Ageorges and L. Ye, "Resistance Welding of Metal/Thermoplastic Composite Joints," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 14, no. 6, pp. 449-475, Novembre 2001.
- [112] Mallick P. K. and Jandali G., "Vibration Welding of Continuous-Fiber Thermoplastic Matrix Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 17, no. 4, pp. 343-358, 2004.
- [113] X. R. Xiao, S. V. Hoa, and K. N. Street, "Processing and modelling of resistance welding of APC-2 composite," *Journal of composite materials*, vol. 26, no. 7, pp. 1031-1049, 1992.
- [114] X. Wang, "FEM Investigation of the Temperature Field of Energy Director During Ultrasonic Welding of PEEK Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 19, no. 5, pp. 593-607, Septembre 2006.
- [115] H. Durmus and C. Meric, "Weldability of AL99--SiC Composites by CO2 Laser Welding," *Journal of Composite Materials*, vol. 43, no. 13, pp. 1435-1450, 2009.
- [116] M. Kowalski, X. Legrand, and D. Soulat, "Development and analysis of crossing of 3D voluminous Stiffeners," *12th World Textile Conference AUTEX*, 2012.
- [117] M. Kowalski, X. Legrand, and D. Soulat, "Modélisation, caractérisation et comparaison de croisement de raidisseurs 3D volumiques," in *Comptes Rendus des JNC 18*, 2013.
- [118] X. Legrand et al., "MAPICC3D: 3D textile Technologies for auto-Stiff Panels," in *TexComp-11 conference*, 2013.
- [119] M. Kowalski, X. Legrand, and D. Soulat, "Development and characterization of 3D preform for complex geometry stiffeners," *13th AUTEX World Textile Conference*, 2013.
- [120] L. Russcher, E. Lamers, M. Kowalski, X. Legrand, and D. Soulat, "Development and Simulations of 3D textile processing of cross-stiffeners," in *9th Aachen-Dresden International textile conference*, 2015.
- [121] J.V. Risicato, D. Soulat, and X. Legrand, "Investigation of Material characterization for Braiding Stiffeners," in *TexComp-11 conference*, 2013.
- [122] J.V. Risicato, D. Soulat, and X. Legrand, "Process parameters investigation for overbraided preforms of commingled yarns," in *4th ITMC International Conference*, 2013.
- [123] F. Gassara, R. Hambli, T. Bouraoui, F.E. Halouani, and D. Soulat, "Optimization of spring back in L-bending process using a coupled Abaqus/Python algorithm," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, no. 1-2, pp. 61-67, September 2009.
- [124] E Archer, S Buchanan, AT McIlhagger, JP Quinn, and M Morgan, "An investigation on the effect of 3D weaving on carbon fiber tows, fabrics and composites," *Advani*,

- Gillepsie*, vol. Recent advances in textile composites, pp. 371 - 9, 2008.
- [125] R. Haghani, M. Al-Emrani, and R. Kliger, "Effect of Laminate Tapering on Strain Distribution in Adhesive Joints: Experimental Investigation," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 29, no. 7, pp. 972–985, 2010.
- [126] K. Bilisik, N. Sahbaz Karaduman, N. E. Bilisik, and H. E. Bilisik, "Three-dimensional fully interlaced woven preforms for composites," *Textile Research Journal*, 2013.
- [127] Kadir Bilisik, "Multiaxis Three Dimensional (3D) Woven Fabric," *Advances in Modern Woven Fabrics Technology*, pp. 79-106, 2011.
- [128] Kadir Bilisik, "New Method of Weaving Multiaxis Three Dimensional Flat Woven Fabric: Feasibility of Prototype Tube Carrier Weaving," *Fibre Text East Eur*, vol. 17, no. 677, pp. 63-69, 2009.
- [129] A. E. Bogdanovich, "Advancements in manufacturing and applications of 3D woven preforms and composites," in *16th international conference on composites materials*, 2007.
- [130] Alexander Bogdanovich, "Solid three-dimensional woven textiles," in *Advances in 3D Textiles*, Elsevier, Ed., 2015, pp. 21-52.
- [131] C.-H. Chiu and C.-C. Cheng, "Weaving Method of 3D Woven Preforms for Advanced Composite Materials," *Textile Research Journal*, vol. 73, no. 1, pp. 37-41, Jan. 2003.
- [132] Chen Xiaogang, L. W. Taylor, and L.-J. Tsai, "An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites," *Textile Research Journal*, vol. 81, no. 9, pp. 932-944, 2011.
- [133] A. Buesgen, "Shell three-dimensional woven textiles," in *Shell three-dimensional woven textiles*, Elsevier, Ed., 2015, pp. 79-98.
- [134] Said Sobhey Badawi, "Development of the weaving machine and 3D woven spacer fabric structures for lightweight composites materials," 2007.
- [135] A. Durie, R. Grifith, and A. Tomlinson, "Multiaxial Compound Weave Method for Preforms".
- [136] S. Adanur and C. A. Tam, "On-machine interlocking of 3D laminate structures for composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 28, no. 5, pp. 497-506, 1997.
- [137] J.A. Soden and B.J. Hill, "Conventional Weaving of shaped preforms for engineering composites," *Composites part A*, vol. 29, no. 7, pp. 757–762, 1998.
- [138] S. Chou and H.E. Chen, "The weaving methods of three-dimensional fabrics of advanced composite materials," *Composite structures*, vol. 33, no. 3, pp. 159-172, 1995.
- [139] François Boussu, C Dufour, Frédérick Veyet, and Marie Lefebvre, "Weaving processes for composites manufacture," in *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*, Elsevier, Ed., 2015, pp. 55-78.
- [140] J. Soden, G. Stewart, D. Campbell, and A. McIlhagger, "Manufacture and Testing of 3D Woven Natural Fibre Composites," 2009.
- [141] Shrkant Sharma, Isaac Porat, Prasad Polturi, and John Atkinson, "Manufacturing of Doubly Curved Tubular Composite Structures: Mapping and Weave Modifications," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 15, no. 3, pp. 209-225, May 2002.
- [142] Sazid Rahman. Lecture Notes on Weaving Technology. [Online]. <http://sazidrahman.blogspot.fr/2009/02/lecture-notes-on-weaving-technology.html>
- [143] Y.-S. Gloy, F. Sandjaja, and T. Gries, "Model based self-optimization of the weaving process," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 9, pp. 88-96, May 2015.
- [144] Michel Tournalias and Marie-Ange Bueno, "Experimental simulation of friction and wear of carbon yarns during the weaving process," *Composites Part A: Applied Science*

- and Manufacturing*, vol. 80, pp. 228-236, Jan. 2016.
- [145] Urs I. Thomanny and Paolo Ermanni, "The Influence of Yarn Structure and Processing Conditions on the Laminate Quality of Stampformed Carbon and Thermoplastic Polymer Fiber Commingled Yarns," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 17, no. 3, pp. 259-283, 2004.
- [146] F. M. Kelly, C. Cochrane, F. Boussu, D. Soulat, and V. Koncar N. Trifigny, "In-situ measurements of strain and stress of e-glass warp yarn during the weaving of 3d warp interlock fabric using innovative sensors," in *Texcomp-11 Conferences*, 2013, pp. 3-11.
- [147] Marie Lefebvre, François Boussu, and Daniel Coutelier, "Influence of high-performance yarns degradation inside three-dimensional warp interlock fabric," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 42, no. 4, pp. 475-488, Apr. 2012.
- [148] Adrienne Leca, "Contribution à l'étude de la santé-matière de préformes carbone," Université du Havre, 2015.
- [149] N. Gokarneshan and R. Alagirusamy, "Weaving of 3D fabrics : A critical appreciation of the developments," *Text. Prog.*, vol. 41, no. 1, pp. 1-58, 2009.
- [150] R McIlhagger, B. J. Hill, D. Brown, and L. Limmer, "Construction and analysis of three-dimensional woven composite materials," *Composites Engineering*, vol. 5, no. 9, pp. 1187–1197, 1995.