

N° d'ordre : 42121



Thèse

**Contribution à l'élaboration de préformes textiles pour le renforcement de réservoirs souples.**

Présentée par :

**Boris DUCHAMP**

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

Discipline : Mécanique

Soutenue le 17/10/2016 devant la commission d'examen

**Jury :**

Mr Christophe BINETRUY	Professeur des Universités, Ecole Centrale, Nantes	Président du jury
Mme Laurence SCHACHER	Professeure des Universités, Université de Haute-Alsace, Mulhouse	Rapporteur
Mr Philippe BOISSE	Professeur des Universités, INSA, Lyon	Rapporteur
Mr Frédéric THIEBAUD	Professeur des Universités, Université de Franche-Comté, Besançon	Examineur
Mr Damien SOULAT	Professeur des Universités, ENSAIT, Roubaix	Directeur
Mr Xavier LEGRAND	Maître de conférences, HDR, ENSAIT, Roubaix	Co-directeur



## Remerciements

### Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier BPI France et la région Hauts de France qui ont permis le financement du projet FUI Balloo.

Je remercie Laurence Schacher ainsi que Phillipe Boisse pour avoir accepté de rapporter cette thèse. Merci également à Christophe Binetruy et Frédéric Thiebaud d'avoir accepté d'être examinateurs.

Je souhaite également remercier Xavier LEGRAND, Maître de conférences à l'ENSAIT, pour son accompagnement durant ces six dernières années.

J'aimerais à présent remercier Damien SOULAT, Professeur des Universités à l'ENSAIT, pour avoir encadrer cette thèse. J'en profite aussi pour lui adresser tous mes remerciements pour la qualité de son encadrement, la qualité de nos échanges, et la patience dont il a fait preuve durant ces trois années.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble du personnel de l'ENSAIT et du GEMTEX, en particulier à Guillaume, Frédéric, Nicolas et Sabine.

Je remercie les doctorants passés ou présents au GEMTEX pour la saine émulation qui régnait en MdS, les diverses discussions autour de la machine à café, et l'humeur joviale qui caractérisait cet endroit. Un grand merci à Ahmad et Adrienne pour avoir partagé mon bureau durant trois années. Merci aussi à Maxime, Jean-Vincent, Jonas, Nizar, Esma, Yesim, Chloé, Nicolas, Vanessa, Anaëlle, Constance, Eugène, Selven, Amandine, Jérôme pour les moments partagés au sein du GEMTEX, ou ailleurs.

Outre ces collègues, qui pour certains sont devenus des amis, je tenais à remercier Julien LECROQ et Laura HENOCQ, qui ont été présents quand il le fallait. Un grand merci aussi à tous mes amis proches qui m'ont accompagné durant ces trois années, et qui continueront à le faire après.

Enfin, je tiens à remercier mes proches pour leur soutien et leur affection sans faille. Je ne peux citer tout le monde, mais chacun sait ce que je lui dois.

## Table des matières

Table des matières .....	4
Introduction générale.....	8
Bibliographie.....	11
Chapitre 1 : Etat de l'art sur les renforts textiles .....	12
I. Introduction.....	14
II. Introduction aux différentes échelles .....	14
III. Structures textiles orientées .....	15
A. Renforts fibreux.....	15
B. Architectures utilisées pour la production de renfort textile .....	16
C. Echelle microscopique.....	16
D. Echelle mésoscopique .....	18
E. Echelle macroscopique : Classification.....	18
F. La nappe unidirectionnelle (UD).....	21
IV. Structures bidimensionnelles .....	22
A. Tissage 2D.....	22
B. Tricotage 2D .....	24
V. Assemblage de structures 2D en vue de la création de structures 3D .....	25
A. Structures stratifiées .....	25
B. Stratifiés renforcés .....	25
VI. Structures tridimensionnelles .....	29
A. Tricotage 3D .....	29
B. Noobing .....	30
C. Tissage 3D conventionnel.....	30
D. Tissage 3D « one-shot ».....	32
E. Procédé RAIDOUTILS .....	33
F. Tissage en croix (Procédé MAPICC) .....	33
VII. Le tressage.....	35
A. Historique et principe du tressage .....	35
B. Motifs de tressage .....	41
C. Classement des structures produites .....	41
D. Tressage 2D .....	42
E. Tressage 3D .....	46

## Table des matières

F.	Tressage axial 3D .....	49
G.	Tressage 3D multiaxial.....	51
H.	Tressage « n-step ».....	52
VIII.	Applications du tressage dans le domaine des composites/matériaux avancés .....	52
IX.	Caractéristiques et propriétés des renforts fibreux .....	56
A.	Fibre Aramide (Twaron) .....	56
B.	Fibre PEHD (Spectra) .....	56
C.	Fibre polymère à cristaux liquides (Vectran).....	57
X.	Conclusions.....	58
	Bibliographie du chapitre 1 .....	59
	Chapitre 2 : Elaboration et protocoles de caractérisation des structures tressées .....	71
I.	Introduction du chapitre .....	72
II.	Présentation des paramètres .....	72
III.	Présentation globale de la machine .....	73
A.	Analyse fonctionnelle de la tresseuse .....	74
IV.	Descriptif des paramètres du procédé et influence de ces paramètres sur l'angle de tressage .....	84
V.	Description des étapes de production .....	87
VI.	Réglages paramètres machine .....	89
VII.	Productions d'échantillons.....	91
A.	Nombre de fils .....	92
B.	Liste et Dénomination des échantillons .....	92
C.	Protocole de caractérisation des tresses sèches.....	95
VIII.	Conclusions du chapitre .....	107
	Bibliographie du chapitre 2 .....	108
	Chapitre 3 : Caractérisation et modélisation géométrique des tresses.....	111
I.	Introduction.....	112
II.	Caractérisation géométrique à l'échelle macroscopique.....	112
A.	Caractérisation de l'angle de tressage .....	113
B.	Caractérisation de la masse linéique.....	117
C.	Caractérisation de la trajectoire d'un fil et de l'embuvage.....	120
III.	Modèle d'évolution des masses linéiques .....	124
IV.	Résultats de caractérisation à échelle microscopique .....	131
A.	Mesures de sections des fils avant et après bobinage.....	131

## Table des matières

B.	Fil en sortie de fuseau .....	133
C.	Fils dans la structure finale.....	133
D.	Conclusion intermédiaire .....	139
V.	Modélisation géométrique à l'échelle macroscopique.....	139
VI.	Modèles géométriques d'une tresse.....	141
A.	Modèles géométriques pour fils et multi-filaments.....	141
B.	Modèles géométriques pour le chemin des multi-filaments dans des structures tresses.	144
VII.	Développement du modèle géométrique d'une tresse .....	147
A.	Hypothèses de modélisation sous SolidWorks.....	148
B.	Méthode de modélisation des éléments fibreux .....	148
C.	Définition d'un VER .....	151
VIII.	Résultats de la simulation, comparatif par rapport aux données expérimentales .....	153
IX.	Conclusions.....	158
	Bibliographie du chapitre 3 .....	159
	Chapitre 4 : Caractérisation mécanique en traction et modèles de comportement associés.....	161
I.	Introduction.....	162
II.	Résultats : Multi-filaments .....	162
III.	Cinématique de test .....	164
IV.	Comportement mécanique en traction des tresses biaxiales.....	165
A.	Déformation à la rupture .....	167
B.	Force maximale .....	169
C.	Pente .....	170
D.	Conclusions intermédiaires sur les tresses biaxiales.....	171
V.	Comportement mécanique en traction des tresses triaxiales .....	171
A.	Définition du double pic.....	172
B.	Définition de l'angle de tressage limite.....	173
C.	Classement des tresses triaxiales suivant leur comportement mécanique.....	176
D.	Evolution angulaire lors de l'essai de traction et notion d'angle de blocage .....	177
E.	Déformation .....	180
F.	Effort maximal .....	183
G.	Pente .....	184
VI.	Modélisation du comportement en traction .....	186
A.	Modélisation du comportement des fils droits.....	186
B.	Modélisation du comportement des fils de biais.....	188

## Table des matières

C.	Définition du modèle.....	189
D.	Comparaison avec les résultats expérimentaux.....	191
E.	Modèle énergétique.....	195
VII.	Analyse thermique des tresses lors de la traction uniaxiale.....	198
VIII.	Réponses des tresses au phénomène de charge-décharge.....	203
IX.	Résultats de la simulation, comparatif par rapport aux données expérimentales.....	205
X.	Retro-conception.....	207
A.	Tresses triaxiales de type 1.....	208
B.	Tresses triaxiales de type 2.....	209
C.	Tresses triaxiales de type 3.....	210
XI.	Conclusions.....	211
	Bibliographie du chapitre 4.....	213
	Chapitre 5 : Utilisation des tresses dans le cadre de l'allègement des réservoirs.....	216
I.	Introduction.....	217
II.	Contexte.....	217
III.	Bibliographie sur l'impact des hélicoptères et des tests à l'échelle du réservoir.....	218
IV.	Application au programme Balloo.....	222
A.	Programme Balloo.....	222
B.	Technologies d'exosquelette.....	223
C.	Réalisation de structures filets par technologie de tressage.....	223
D.	Application à l'exosquelette.....	224
V.	Essais de drop test.....	225
VI.	Conclusions.....	226
VII.	Bibliographie.....	228
	Conclusions générales et perspectives.....	229

## Introduction générale

Le secteur aéronautique investit depuis de nombreuses années afin de réduire la consommation de carburant quantifiée actuellement à la valeur de 3 litres/100 km par passager. Le coût sur ce poste carburant, en aéronautique civil, représente, aujourd’hui le double de celui associé au poste « amortissement – entretien » [1]. Les développements opérés sur la motorisation et la propulsion permettent, comme le montre la figure 1 [2], de diminuer la consommation des moteurs.

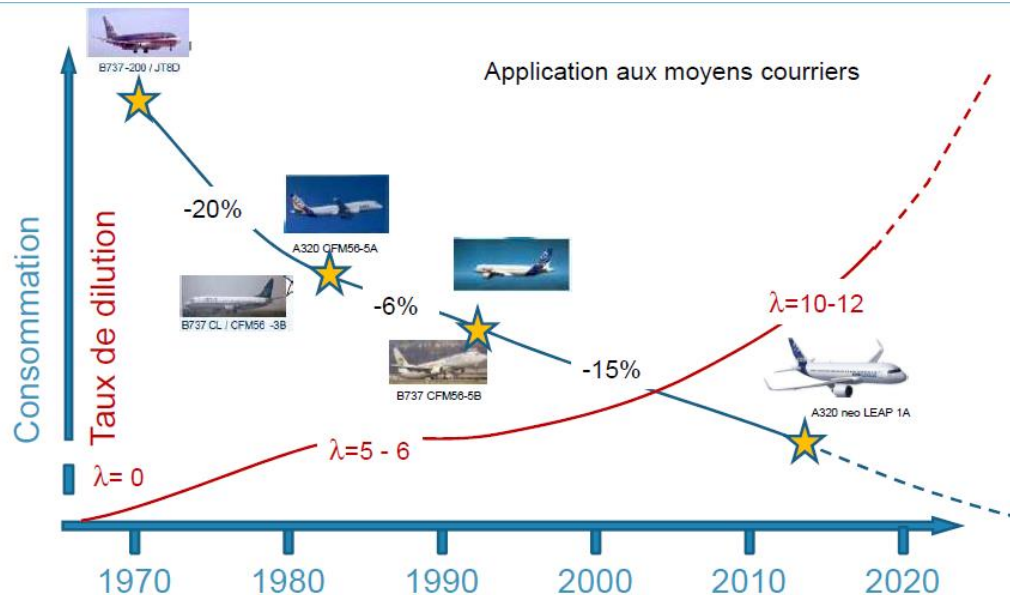


Figure 1. Evolution de la consommation des moteurs/taux de dilution [2]

Ces avancées s’inscrivent dans le cadre de la feuille de route établie par le CORAC (CONseil pour la Recherche Aéronautique Civile en France) afin de répondre aux conséquences sur l’impact environnemental de l’augmentation du trafic aérien (qui devrait doubler d’ici 20 ans) en termes de réduction de la consommation de carburant, d’émission de polluant (réduction respectivement de 75% et de 90% des émissions de dioxydes de carbone (CO<sub>2</sub>) et d’oxydes d’azotes (NO<sub>x</sub>), en 2050) et de bruit.

La démarche d’allègement s’est concrétisée également par l’introduction de matériaux composites structurels innovants dans la fabrication de différents éléments comme les carters ou les aubes de soufflantes, mais elle concerne l’ensemble des constituants des appareils, dont le réservoir qui représente une des composantes essentielles pour les véhicules aéronefs (hélicoptères, drones, avions sans pilote). Les objectifs sont de diminuer le poids du réservoir, ou de pouvoir augmenter les distances parcourues avec la même quantité d’énergie ou d’avoir la possibilité de transporter des passagers supplémentaires. Les besoins identifiés pour les réservoirs aéronefs sont : de mettre au point des réservoirs allégés à durée de vie augmentée (actuellement de 15 ans), multifonctionnels. La réduction du coût de production des réservoirs est aussi recherchée. De plus, les technologies utilisées pour la production de ce réservoir devront être maîtrisées par rapport à l’impact environnemental.

Le projet *Baloo*, projet FUI piloté par la société Pronal et supervisé par la DGA, est donc né de cette volonté de créer un réservoir innovant, tout en restant dans le cadre fixé par la norme MIL-DTL-27422E. Cette norme introduit plusieurs niveaux de performance du produit final. Mais toutes les certifications comportent au moins un « drop test » (largage du réservoir en chute libre) et un « gun



## Introduction générale

fire test » (sur la capacité d'auto-obturation). Beaucoup de réservoirs sont actuellement des poches d'élastomères protégées par une structure en métal. Ce dernier est chargé de protéger la poche en élastomère lors des différentes contraintes subies notamment lors des crashes. Afin d'absorber les déformations structurelles, la société PRONAL a une expertise dans le développement de réservoirs souples.

Le programme Balloo (Acronyme de « Réservoir aéronef allégé, anti-crash et résistant aux impacts balistiques ») regroupe 11 partenaires (3 grands groupes, 6 petites et moyennes entreprises, 2 partenaires académiques). Chacun des acteurs possède un domaine d'activité et des compétences représentant les différents requis de production d'un réservoir souple.



Figure 2. Partenaires du Programme Balloo

Les travaux de cette thèse, financée par ce programme, s'inscrivent dans le lot 2 du projet (Définition des solutions matériaux pour le démonstrateur de réservoir) portant sur le développement de préformes textiles. Ces tâches sont axées sur la définition des différents matériaux à utiliser pour répondre à la fois aux principaux tests de caractérisation élémentaires mais également à l'échelle du réservoir assemblé. L'analyse des résultats obtenus sur les matériaux développés serviront à

## Introduction générale

identifier les solutions répondant aux exigences de la norme mais également répondre aux sollicitations dynamiques lors de la phase de test à l'échelle du réservoir.

Ces travaux se sont effectués au sein du laboratoire GEMTEX (EA n°2461 – ENSAIT de Roubaix) sous la direction de Damien SOULAT et Xavier LEGRAND.

Le manuscrit est divisé en cinq chapitres principaux en plus de cette introduction et d'un chapitre de conclusions générales.

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique est proposée, permettant de situer et de comprendre la démarche propre aux travaux décrits dans ce manuscrit. Dans cette optique, nous introduirons les matériaux textiles. Un état de l'art complet des renforts, de leurs moyens de production, des matériaux utilisés sera ensuite présenté. Une attention particulière sera apportée aux renforts tressés (d'un point de vue historique et procédé) qui, parmi les types de préformes textiles, ont été retenus et qui constituent le cœur de ces développements.

Le deuxième chapitre est dédié à une présentation du procédé de tressage et des protocoles de caractérisation utilisés au cours de ces travaux. La présentation des différents paramètres du procédé intervenant dans la production des structures permettra d'introduire et de comprendre le procédé. Les échantillons élaborés sur la tresseuse de l'ENSAIT seront présentés. Les protocoles de caractérisations sont associés à la démarche expérimentale pour la mesure de paramètres géométriques et mécaniques des tresses.

Dans le troisième chapitre, les résultats de la caractérisation géométrique des tresses seront présentés. De ces derniers, un modèle d'évolution des masses linéiques des tresses en fonction des paramètres machine sera discuté. Une modélisation géométrique à échelle macroscopique des tresses sera proposée, outil permettant l'optimisation de nos renforts pour répondre au mieux au cahier des charges. Dans cette optique, un état de l'art de la modélisation géométrique des renforts est présenté. Puis deux modèles sous deux différents logiciels seront étudiés et comparés.

Le chapitre 4 est dédié à l'analyse des résultats de caractérisation mécanique des tresses. Ces résultats permettent la définition d'un modèle de comportement en traction des différents types de tresses. Une étude énergétique sur les tresses, issue des courbes de traction est proposée. Ces développements sont suivis par un comparatif entre ces modèles théoriques et les résultats expérimentaux. Un modèle de rétro-conception des tresses basé sur un test de traction sur fil permet aussi une discussion sur les différents résultats obtenus.

Enfin, le chapitre 5 permet de faire le lien entre cette étude sur les tresses sèches et le projet Balloo. Les tresses sont utilisées comme structures exosquelettes afin de dissiper l'énergie du test de crash mais aussi limiter la déformation du réservoir souple afin de garantir la non rupture de la vessie interne.

A noter que dans ce manuscrit, les références, figures, tableaux et équations sont référencés par chapitre.

## Bibliographie

[1] IESF - CAHIER N° 18 La construction aéronautique en France : une industrie performante à pérenniser. Novembre 2014.

[2] P. Gonidec (AIRCELLE/Safran) « Enjeux et perspectives des nacelles aéronautiques ». Aero'Nov Connection, Versailles, 30/01/2013.

## **Chapitre 1 : Etat de l'art sur les renforts textiles**

<b>Chapitre 1 : Etat de l'art sur les renforts textiles</b> .....	12
<b>I. Introduction</b> .....	14
<b>II. Introduction aux différentes échelles</b> .....	14
<b>III. Structures textiles orientées</b> .....	15
<b>A. Renforts fibreux</b> .....	15
<b>B. Architectures utilisées pour la production de renfort textile</b> .....	16
<b>C. Echelle microscopique</b> .....	16
<b>D. Echelle mésoscopique</b> .....	18
<b>E. Echelle macroscopique : Classification</b> .....	18
<b>F. La nappe unidirectionnelle (UD)</b> .....	21
<b>IV. Structures bidimensionnelles</b> .....	22
<b>A. Tissage 2D</b> .....	22
<b>B. Tricotage 2D</b> .....	24
<b>V. Assemblage de structures 2D en vue de la création de structures 3D</b> .....	25
<b>A. Structures stratifiées</b> .....	25
<b>B. Stratifiés renforcés</b> .....	25
<b>VI. Structures tridimensionnelles</b> .....	29
<b>A. Tricotage 3D</b> .....	29
<b>B. Noobing</b> .....	30
<b>C. Tissage 3D conventionnel</b> .....	30
<b>D. Tissage 3D « one-shot »</b> .....	32
<b>E. Procédé RAIDOUTILS</b> .....	33
<b>F. Tissage en croix (Procédé MAPICC)</b> .....	33
<b>VII. Le tressage</b> .....	35
<b>A. Historique et principe du tressage</b> .....	35
<b>B. Motifs de tressage</b> .....	41
<b>C. Classement des structures produites</b> .....	41
<b>D. Tressage 2D</b> .....	42
<b>E. Tressage 3D</b> .....	46
<b>F. Tressage axial 3D</b> .....	49

G.	<u>Tissage 3D multiaxial</u> .....	51
H.	<u>Tissage « n-step »</u> .....	52
VIII.	<u>Applications du tissage dans le domaine des composites/matériaux avancés</u> .....	52
IX.	<u>Caractéristiques et propriétés des renforts fibreux</u> .....	56
A.	<u>Fibre Aramide (Twaron)</u> .....	56
B.	<u>Fibre PEHD (Spectra)</u> .....	56
C.	<u>Fibre polymère à cristaux liquides (Vectran)</u> .....	57
X.	<u>Conclusions</u> .....	58
	<u>Bibliographie du chapitre 1</u> .....	59

## I. Introduction

Les renforts textiles sont caractérisés par un comportement complexe. Cette complexité est due à l'aspect multi-échelle des textiles, qui nécessite un suivi des directions matérielles et qui doit prendre en compte les caractéristiques dues aux différents procédés d'élaboration. Ce chapitre est par conséquent consacré à une revue bibliographique sur ces renforts, leurs classifications mais également aux technologies d'élaboration. Dans une seconde partie, les renforts de type tresse seront abordés plus spécifiquement, car ils constituent le cœur de l'étude de ce manuscrit.

## II. Introduction aux différentes échelles

La définition d'une structure textile d'une, de deux ou de trois dimensions n'est pas simple. Et d'ailleurs dans la littérature beaucoup de définitions, pas forcément toutes en accord, sont proposées. En effet, si l'on prend l'exemple de la tresse, et en se positionnant à l'échelle du renfort (échelle macroscopique) celle-ci peut être considérée comme un produit à une dimension, du fait de sa longueur qui est très supérieure aux deux autres dimensions.

Cependant, si l'on se place à une échelle mésoscopique, celle d'une cellule élémentaire (ou VER) composée de l'entrelacement de fils, la tresse, du fait des orientations, peut être considérée comme un produit bidimensionnel. La longueur et la largeur de la partie de tresse considérée étant de dimensions bien supérieures à l'épaisseur. Enfin, à l'échelle microscopique, soit celle des constituants du fil, la structure devient unidirectionnelle, suivant l'axe du fil. Cela montre l'importance de l'échelle (microscopique, mésoscopique ou macroscopique) qui va servir à décrire le produit (en termes de fibre, de fil ou de tresse), sa structure et ses propriétés.

La prise en compte de cet aspect multi-échelle doit donc être effective lorsque des structures textiles orientées sont considérées.

L'échelle microscopique va correspondre à la plus petite entité de notre structure finale, donc aux fibres ou filaments de plusieurs micromètres de diamètre.

L'ensemble de ces fibres ou filaments vont constituer le fil que l'on va retrouver à l'échelle mésoscopique. Cette dernière sera l'échelle où l'on retrouvera le Volume Elementaire Représentatif (ou VER). Ce VER est le modèle architectural qui sert à décrire la structure considérée. Et la répétition de ce VER va former le produit final. Dans ce VER, on va retrouver les matériaux fibreux de base et leurs orientations.

Enfin, l'échelle macroscopique est l'échelle de la préforme textile globale (cette association de VER).

Nous avons donc un renfort textile (échelle macroscopique), qui est une répétition de VER (échelle mésoscopique), eux-mêmes constitués par un ensemble de fibres ou de filaments (échelle microscopique), comme illustré en figure 1.

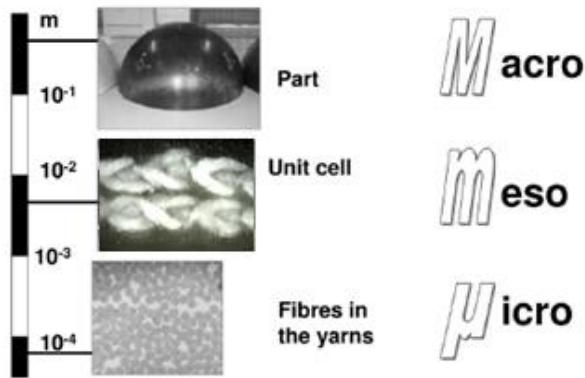


Figure 1: Illustration des différentes échelles et de leurs dimensions [1]

### III. Structures textiles orientées

Les échelles précédemment introduites, vont servir à décrire différentes structures textiles dites orientées. Ces dernières sont composées de renforts fibreux avec des orientations privilégiées, à l'inverse de mats ou non-tissés, qualifiés de renforts à orientations aléatoires, qui ne seront pas abordés dans ce manuscrit.

#### A. Renforts fibreux

Le renfort est constitué d'un matériau textile à base de fibres. En fonction de la nature de la matière utilisée, le matériau textile aura des propriétés mécaniques provenant de celles des fibres de base mais également de l'architecture issue du procédé. Pour des structures textiles mono-matériau, les caractéristiques mécaniques du renfort sont celles qui vont lui être allouées par les fibres. De fait, le choix de la fibre de base va être d'une importance primordiale en vue d'obtenir certaines propriétés dans la préforme finale.

En sus du choix du matériau effectué, le renfort fibreux est caractérisé par l'architecture du textile. Autrement dit, la façon dont sont agencées les fibres constitutives du renfort.

L'agencement de ces fibres est primordial, c'est par lui que le renfort pourra répondre aux différentes sollicitations [2]. En effet, un fil ou mèche est un élément unidirectionnel, qui présente de bons comportements en traction dans la direction des fibres. Cette direction devra donc être privilégiée pour répondre aux sollicitations. Il faudra donc l'orienter comme il faut à travers un choix judicieux d'architecture.

En plus du choix d'architecture, certains paramètres entrent en jeu dans la réponse aux sollicitations et notamment la densité de renfort. Celle-ci est à mettre en regard avec le taux volumique de fibres (noté  $V_f$ ) qui représente la proportion volumique de fibres dans la structure finale. De fait, plus le taux volumique de fibres sera élevé, meilleures en seront les performances mécaniques du renfort.

La continuité des renforts a également un rôle important dans les propriétés de la structure finale car elle permet la transmission à travers toute la structure des efforts imposés. Le phénomène d'ondulation issu de l'entrelacement des structures fibreuses, va permettre à la fois de garder compact l'assemblage que présente les structures fibreuses. Cependant, cette ondulation qui vient modifier la direction longitudinale du fil peut, dans certains cas, faire chuter les propriétés mécaniques des fils.

Pour résumer, la maîtrise des paramètres suivants est essentielle pour s'assurer une réponse cohérente du renfort aux sollicitations :

- Le choix du matériau,

- Le choix de l'architecture, avec toutes les propriétés qui en découlent: Taux volumique de fibres, orientation de ces dernières, ondulation des structures textiles, et maximiser si possible la continuité des fils de renfort.

A la suite de cette brève synthèse des différents paramètres qui définissent une préforme, les différentes architectures utilisées pour la production de renfort textile vont être présentées.

### B. Architectures utilisées pour la production de renfort textile

Pour produire des renforts textiles, plusieurs étapes d'élaboration ou de structuration des éléments fibreux sont nécessaires pour arriver à des structures finales. En d'autres termes, de la fibre, on va passer au fil (ou mèche, multifilament). L'assemblage de cette échelle, selon une, deux ou trois dimensions va définir le motif élémentaire, ou VER, dont la répétition constituera le renfort ou préforme finale (figure 2).

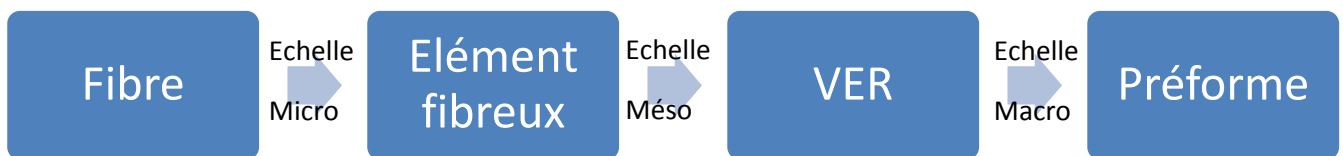


Figure 2 : Illustration des différentes échelles et matériaux textiles associés

Chacune de ces échelles fibreuses est définie par une complexité propre qui va être présentée par la suite.

### C. Echelle microscopique

Différents arrangements de fibres existent. Ces derniers vont se distinguer par des caractéristiques géométriques et mécaniques différentes. Les procédés textiles qui permettent les arrangements des fibres peuvent être séparés en deux. Un procédé va permettre la production de fibres de longueur infinie. Cette technologie est nommée filage[3], qui produit des fibres issues la plupart du temps de la pétrochimie.

Cependant, des fibres de longueur définie sont également mises en œuvre par filature dans la production de structures linéaires infinies (fils ou mèches). Cette étape consiste à assembler un ensemble de fibres d'une longueur finie pour en faire des structures plus complexes de longueur éventuellement infinie.

La fibre est définie par certaines caractéristiques intrinsèques à sa nature. La finesse, la flexibilité, la longueur, ou le ratio longueur/section, en font un matériau idéal pour sa mise en œuvre dans des procédés textiles. Ce sont ces propriétés constitutives de l'échelle microscopique, qui vont nous permettre de passer à une échelle supérieure à travers leur assemblage. Parmi la multitude de fibres disponibles, les paramètres suivants sont primordiaux à considérer : la nature des fibres, leur continuité, leur taille (fibre courte ou filament), et la torsion qui vient apporter de la cohésion à la structure fibreuse.



La torsion permet à la fois de venir resserrer les fibres ou filaments entre eux, mais également apporter de meilleures performances mécaniques à l'échelle du fil. Cette cohérence apportée par la torsion va augmenter la possibilité de transmission des efforts entre les fibres. Dans le cas des filaments, la transmission des efforts se réalise déjà sans besoin de torsion, du fait de la longueur infinie théorique de ces structures[4]–[6]. La torsion, pas obligatoire mais souvent nécessaire, va garantir à l'ensemble une cohérence plus grande et va éviter une dégradation précoce de cette structure due notamment aux frottements.

De fait, de l'échelle microscopique, et de l'assemblage de ces structures élémentaires, vont naître deux types de renforts, les mèches et les fils (figure 3).

Une mèche est une structure textile qui comprend quelques milliers de filaments continus, maintenus ou non. Le maintien de cette mèche va se faire par une faible torsion, ou une adhésion chimique. Au niveau de la mèche, et du fait de la non application d'une torsion, les seuls paramètres qui vont se retrouver à cette échelle, au niveau mécanique ou géométrique, vont être apportés par les propriétés propres des filaments constituant la mèche. L'orientation des structures élémentaires dans la structure mèche est selon cette direction longitudinale afin de répondre aux sollicitations appliquées.

Le fil est constitué d'un ensemble de fibres, comme illustré en figure 3. Morphologiquement, le fil présente une très grande longueur (dans le sens longitudinal) par rapport aux deux autres dimensions de la section du fil. De fait, un fil peut être constitué de fibres ou de filaments continus, dont la cohérence est maintenue par un effet de torsion. Cette cohérence entre les constituants du fil fait que ce dernier peut être considéré comme continu. Cependant, contrairement aux mèches, les caractéristiques finales du fil ne sont pas seulement apportées par les éléments le constituant mais également par le degré de torsion que l'on vient apporter au fil. Les propriétés des fibres utilisées et la torsion ajoutée vont donc conditionner le comportement mécanique du fil final. En plus de la cohésion, la torsion va modifier l'orientation des fibres relativement à l'axe longitudinal du fil et augmenter significativement les efforts de frottement inter-fibres.

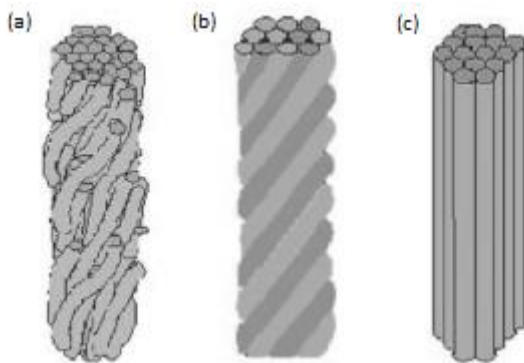


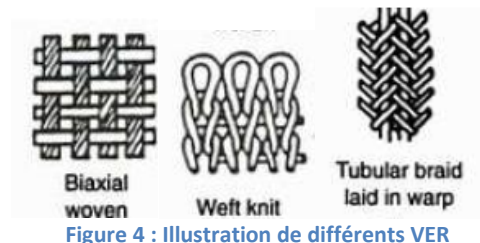
Figure 3 : Illustration d'un fil (a), d'une mèche (b) et d'un multifilament (c)

D'autres structures fibreuses existent également, retordues ou non, mais qui présentent un plus faible intérêt que les mèches ou les fils pour être décrites dans ce manuscrit. Par exemple, le roving qui est un assemblage de mèches ou de fils retordus ou non.

De ces éléments linéaires fibreux, les structures de renforts produites, à partir de ces fils ou mèches orientés spécifiquement, peuvent être introduites.

## D. Echelle mésoscopique

Les différents éléments issus de l'échelle microscopique vont être assemblés, orientés et positionnés afin de constituer un motif répétitif de base de la structure finale (figure 4). Ce motif définit l'échelle mésoscopique. Cette structuration découle des technologies textiles utilisées et qui vont faire l'objet d'une présentation plus détaillée dans ce chapitre



A cette échelle mésoscopique, les caractéristiques des VER se résument en des orientations, des entrelacements (issus des procédés), mais également des densités de renforts. La répétition de ce VER va nous amener à l'échelle de la préforme, soit l'échelle macroscopique.

## E. Echelle macroscopique : Classification

Dans un premier temps, un exposé succinct des différentes classifications existantes dans la littérature est proposé. L'opulence de ces dernières montre le caractère non trivial de classer les renforts à cette échelle, mais également les difficultés de positionner les technologies les unes par rapport aux autres.

Ensuite, les technologies permettant l'élaboration de ces structures seront développées. Certains développements permettent la production en « one-shot » des préformes textiles. Mais, un assemblage de préformes peut également conduire à la structure finale. Cet assemblage de préformes peut se réaliser de plusieurs façons, soit par l'ajout d'un élément fibreux, tiers, qui vient relier des préformes distinctes, soit par l'existence d'un élément fibreux qui va être commun aux différentes préformes, et qui viendra de fait, faire la liaison entre elles. Par conséquent, l'échelle macroscopique va dépendre de technologies qui vont orienter et positionner les éléments fibreux entre eux.

Par la suite un exposé sur les différentes structures existantes sera proposé. Ces dernières sont issues de technologies, que l'on essaiera de détailler en présentant les avantages et inconvénients.

Plusieurs critères peuvent être pris en compte pour établir une classification. Tout d'abord la dimension de la préforme finale, en effet, l'axialité d'une préforme 1D, la planéité d'une préforme 2D et le volume d'une préforme 3D peuvent permettre de les dissocier. Les directions de renforts présentes dans la préforme est également un critère permettant de classer les produits. Le type d'entrelacement, dépendant de la technologie utilisée, est un paramètre pour dissocier ces préformes.

Parmi toutes les classifications qui existent, nous allons essayer d'en proposer quelques-unes en se basant sur ces critères.

Ko [7] propose une classification qui se base sur les structures de renfort et la technologie associée pour la production de la préforme, (figure 5).

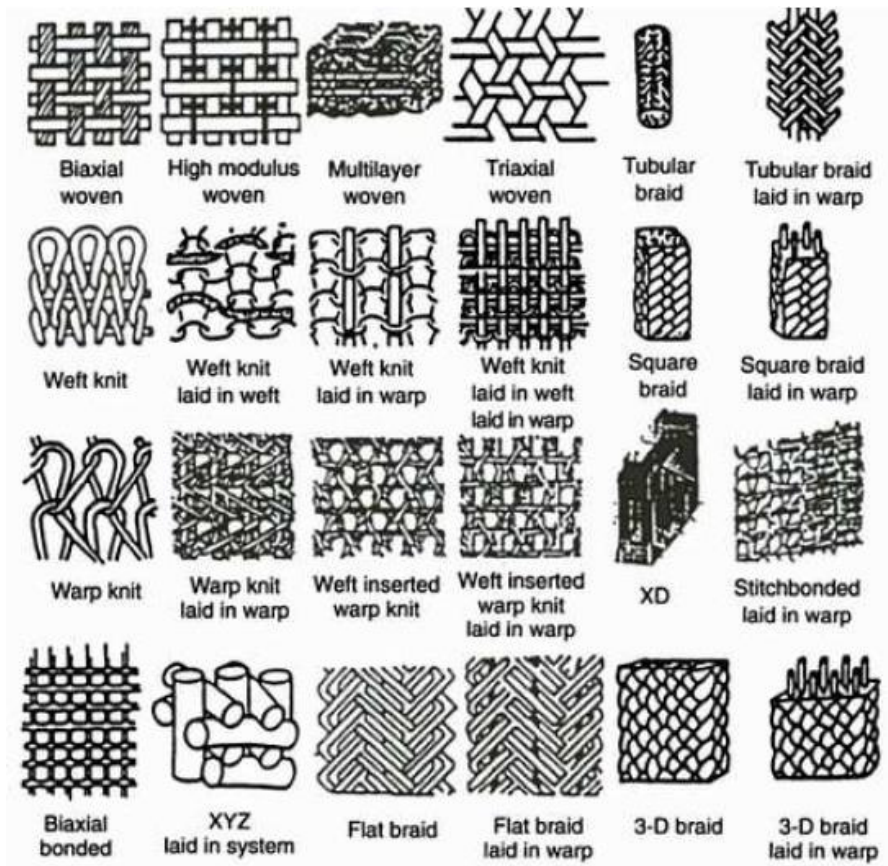


Figure 5 : Classification des structures textiles proposée par Ko

Dans cette continuité, mais en se focalisant sur les structures 3D, Kamiya [8], propose une classification des structures (figure 6).

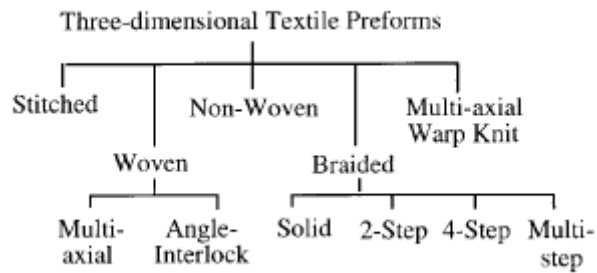


Figure 6 : Classification des structures 3D

Le nombre d'orientations différentes se pose aussi en critère de dissociation des renforts et est utilisé par Lee [9] pour proposer aussi sa classification (figure 7).

Type	Variations	Construction
Uniaxial (1D)	Uniaxial	Uniaxial tape Laminate
Biaxial (2D)	Biaxial 2D	Warp fibers stitched together Uniaxial filament winding Fabric with warp and fill interlock
Triaxial (3D)	Biaxial 3D Triaxial 3D	Biaxial 2D braiding Filament winding Fabric with layers of warp angle interlock Filament winding with layer angle interlock Triaxial 3D braiding
Multiaxial/ multidirectional	Cartesian 3D (orthogonal) Polar 3D Tetraxial 3D/4D Pentaxial 3D/5D Heptaxial 3D/7D Undecaxial 3D/11D	Fabric with layers of warp angle interlock with stuffers in warp direction x-, y-, z-axes orthogonal to each other Axes of fiber oriented in polar coordinates x and y fibers at 45° to each other along z-axis ± 45° in-plane reinforcement with respect to x-y along z-axis Additional face and diagonal fibers Additional face and diagonal fibers

Figure 7 : Classification des structures textiles proposée par Lee

Celle proposée par Fukuta et Aoki [10] s'appuie sur deux critères complémentaires, la dimension finale du renfort et le nombre d'orientations présent dans le renfort. Nemoz [11] propose une classification similaire (figure 8).

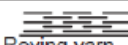
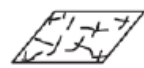


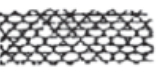
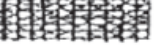
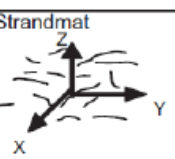

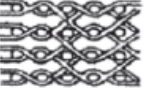



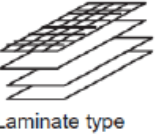
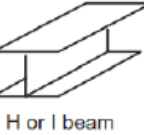
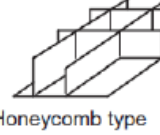
AXIS		Non-axial	Mono-axial	Biaxial	Triaxial	Multi-axial
Dimension						
1D			 Roving yarn			
2D		 Chopped	 Pre-impregnation sheet	 Plane weave	 Triaxial weave	 Multi-axial
3D	Linear element	 Strandmat	 3D braid	 Multi-ply WEAVE	 Triaxial 3D weave	 Multi-axial 3D weave
	Plane element	 Laminate type	 Laminate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

Figure 8 : Classification des structures textiles proposée par Fukuta et Aoki

Une classification spécifique des préformes 3D est également proposée par Khokar, mais plus spécifiquement orientée vers les tissus 3D[12].

Dans le cadre de ce manuscrit, nous nous servons du critère dimensionnel pour introduire les différentes structures textiles existantes, qui seront déclinées par technologies. Les structures tridimensionnelles se distinguent des structures bidimensionnelles par la prise en compte d'une dimension supplémentaire qui ne devient plus négligeable par rapport aux deux autres. Ainsi, les

structures bidimensionnelles seront constituées de structures qui pourraient être qualifiées de surfaciques, les structures tridimensionnelles de structures volumiques.

Dans cette introduction à la classification des structures textiles et procédés associés, les tresses et le procédé de tressage feront l'objet d'une section spécifique (paragraphe VII).

#### F. La nappe unidirectionnelle (UD)

La nappe UD se présente sous la forme d'un arrangement de mèches unidirectionnelles placées parallèlement sur une surface plane. L'orientation de ces mèches suit généralement la même direction. Pour obtenir ces nappes d'UD les technologies d'étalement sont utilisées[13]–[15], elles permettent d'obtenir des plis fins. Ces plis fins, sous formes de nappes d'UD ou renforcés entre eux par des technologies de couture pour réaliser des NCF, peuvent être utilisés comme tissus de peau pour améliorer les aspects de surface. Mais ils peuvent également être utilisés comme matériaux de structure, dont les propriétés ont été étudiées largement dans la littérature[16]–[19].

Ce matériau (UD) peut donc être considéré comme étant uniaxial, ne pouvant répondre à une sollicitation que dans la direction des renforts le constituant.

Plusieurs avantages sont notables à l'utilisation de cette technologie, comme un procédé de fabrication hautement répétable et donc automatisable. De bonnes propriétés dans le plan et dans la direction des fibres sont également à noter. Cependant, dans des directions autres que celles des renforts, les propriétés sont faibles.

Cette nappe peut dans un second temps être assemblée par exemple comme couture, comme représentée figure 9.

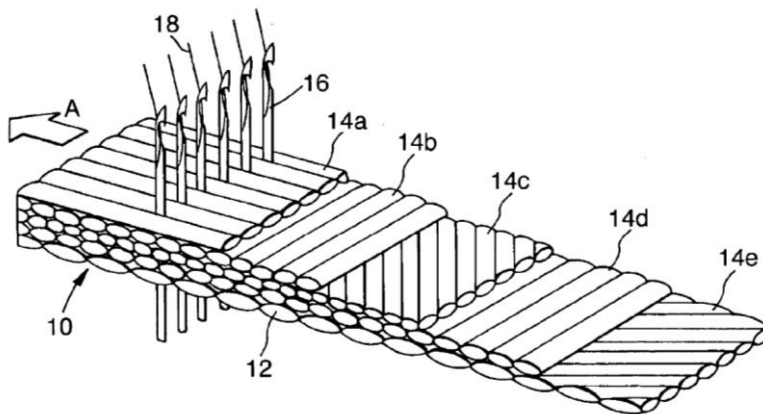


Figure 9 : Illustration d'UD liés[13]

Ces nappes d'UD, sous forme de rubans, ou de mèches plates peuvent être utilisées par les procédés d'enroulement filamenteux, ou de placement de fibres.

L'enroulement filamenteux, figure 10, est une technologie qui permet le passage d'une structure linéaire fibreuse (souvent des mèches plates) à une structure fibreuse volumique de type peau. En effet, le procédé consiste en l'enroulement d'un filament sur un mandrin rotatif. Plusieurs couches de cet élément fibreuse peuvent être déposées sur le mandrin. Le plus souvent, pour garantir le maintien en forme du textile, ce renfort est imprégné de résine. Dès lors et après mise en œuvre, une structure surfacique constituée de structures fibreuses orientées est obtenue. L'avantage de cette technologie est la possibilité d'orienter les renforts suivant une direction préférentielle.

Les limites de cette technologie d'obtention d'une structure 3D est l'absence de fibres à travers l'épaisseur. Ce qui lui accorde des propriétés hors plan faibles. Cependant, l'automatisation du procédé est facile à mettre en œuvre. Et cette technologie convient particulièrement à la création de coques pour les réservoirs sous haute pression interne, par exemple.

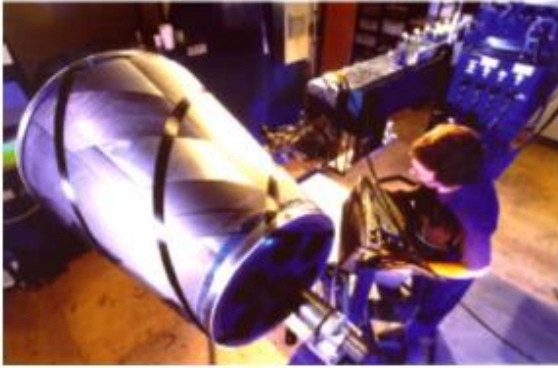


Figure 10 : Enroulement filamentaire [20]

Le placement de fibres permet la réalisation de structure 3D à formes complexes (figure 11). Le principe de cette technologie est de placer individuellement mais par un procédé automatisé (tête de placement de fibres) des mèches individuelles sur un mandrin (de manière similaire à l'enroulement filamentaire) ou sur une surface prédéfinie. En plus d'être un procédé très automatisé, donc mettant en jeu un contrôle précis du placement des mèches, la possibilité de draper ces dernières à l'intérieur d'un moule aux formes géométriques complexes accroît l'intérêt de cette technologie. La réduction du travail manuel, en plus du faible taux de perte en matières premières augmente encore cet intérêt. Mais, certains désavantages subsistent, comme l'absence de fibre dans la direction de l'épaisseur (impliquant de faibles propriétés hors plan) ou des possibilités d'écart géométrique entre le rendu final (après procédé de transformation en matériau composite) et la pièce souhaitée.



Figure 11 : Tête de placement (Coriolis : <http://www.coriolis-composites.com/>)

#### IV. Structures bidimensionnelles

##### A. Tissage 2D

Le tissage, figure 12, est une technologie textile qui permet la production d'une étoffe par l'entrecroisement de deux nappes de fils orientées perpendiculairement. Ces deux nappes de fils sont appelées chaîne pour celle qui suit la direction de production et trame pour la seconde. Les structures linéaires fibreuses (chaîne) sont disposées parallèlement les unes des autres. Cette nappe ainsi formée, est régulée en tension, garantissant ainsi un apport régulier en matière. Cette nappe pour former l'entrecroisement va s'ouvrir en deux, lors de l'étape de création de la foule. On sépare les éléments de la nappe « chaîne » (par rapport au plan du tissu final) par un mouvement de

montée et de descente de deux nappes de chaîne. L'espace créé par cette ouverture va permettre l'insertion de la trame qui peut être réalisée par différents systèmes. On dissocie une insertion par canette (réserve de fil qui est déplacée de part et d'autre du tissu), par lance (qui amène le fil à l'autre extrémité du tissu où il est maintenu jusqu'à l'étape de changement de foule, afin d'être inséré dans le tissu), par projectile (masse qui vient prendre le fil de trame et se trouve propulsé de l'autre côté du tissu), ou par jet d'air ou jet d'eau (jet qui est guidé suivant le chemin de foule et entraîne ainsi le fil de trame). L'entrecroisement ainsi créé permet de garantir à la préforme finale une bonne stabilité dimensionnelle ainsi que de bonnes propriétés mécaniques.

Deux technologies d'ouverture de foule sont utilisées. L'ouverture de la foule à base de cadres (plusieurs fils sont reliés au même cadre), qui imposent un même mouvement simultanément à plusieurs fils de chaîne. Et le tissage dit « Jacquard » qui à partir d'une sélection individuelle des fils de chaîne permet une plus grande variation de motifs de tissage comparativement au tissage par cadres. Pour le tissage effectué grâce à ces derniers, c'est le nombre de cadres qui va définir les possibilités d'armure. Beaucoup de publications scientifiques traitent des différentes technologies de tissage et de leurs applications, ainsi que des dégradations subies par les fils lors du procédé [21]–[28].

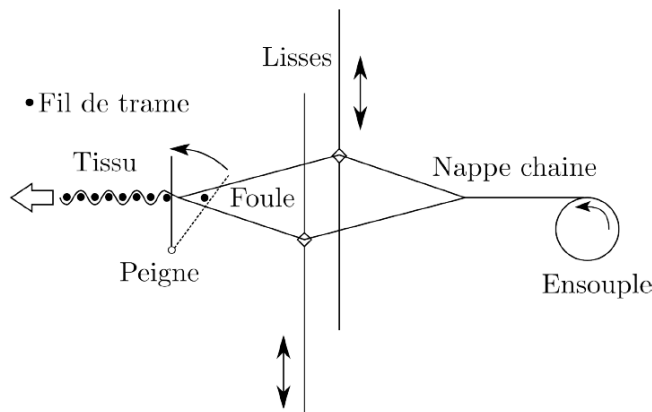


Figure 12 : Schéma de fonctionnement d'un métier à tisser [2]

L'armure représente la façon dont les éléments fibreux s'entrecroisent. Il en existe trois grandes familles (figure 13): les toiles ou taffetas, les sergés et les satins qui permettent d'obtenir des structures avec des propriétés mécaniques différentes. Cependant, un même phénomène se retrouve dans ces trois types de tissage, c'est l'ondulation[29] issue de l'entrecroisement des fils. Cette ondulation influe sur les performances de la structure.

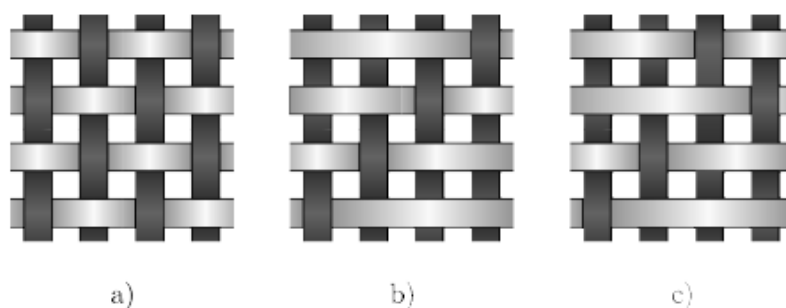


Figure 13 : Représentation des tissus 2D (a, toile ; b, sergé ; c, satin).

La toile est la structure qui présente la plus grande simplicité de réalisation. En effet, l'entrecroisement qui la caractérise est réalisé par le passage de la trame sur un fil de chaîne puis sous son voisin direct etc. Cela produit une structure dense, compacte et peu déformable.

Le sergé est un peu plus complexe mais se caractérise par un décalage constant à chaque colonne de fils sur ou sous le fil de trame. Cette structure est aussi dense mais plus souple que la toile.

Le satin est une structure beaucoup plus souple et drapable que les deux précédentes. Cela est dû à une densité d'entrecroisement beaucoup plus faible que dans le cas de la toile ou du sergé. Effectivement, le fil de chaîne dans cette structure n'est pris qu'une fois par colonne (dans la limite du VER) puis flotte.

Un tissu peut être caractérisé par son armure, ses densités en chaîne et en trame, qui influent sur sa géométrie finale. En fonction de ces paramètres, le phénomène d'ondulation va être plus ou moins marqué dans la structure et est quantifié par l'embuvage, qui représente la surconsommation de fil due à ces ondulations.

En résumé, le procédé de tissage 2D permet à travers l'entrelacement de deux nappes de fils coplanaires et orthogonales, de créer une structure 2D plane et biaxiale. De ce principe d'élaboration les propriétés sont prépondérantes dans le plan de production de ces tissus. Le procédé technologique présente l'avantage d'être rapide et automatisé. Les propriétés peuvent être dégradées à cause de l'ondulation des fils. Hors plan, les propriétés de la structure sont comparativement faibles. Concernant les limites du procédé de tissage, les pertes matières ainsi que les dégradations non négligeables subies par les structures textiles notamment par les frottements sont à considérer[21]–[23].

## B. Tricotage 2D

Le tricotage est une technologie textile qui va entrelacer un ou plusieurs fils pour produire une structure. Deux grandes technologies de tricotage existent : la maille cueillie et la maille jetée (figure 14). En ce qui concerne la maille cueillie, celle-ci est produite à partir d'un fil unique. Ce dernier est bouclé pour permettre à deux colonnes de mailles de s'imbriquer l'une dans l'autre. Ce tricot est donc démaillable. C'est-à-dire que si une rupture du fil intervient, en tirant sur ce dernier, la possibilité de démailler la totalité de la structure est effective.

La maille jetée est, à l'inverse, ce qu'on appelle un tricot indémaillable. Le principe de formation de boucles est le même que pour la maille cueillie sauf que dans le cadre de la maille jetée, chaque colonne de maille est constituée par un fil indépendant. Ces fils vont être échangés une fois à gauche puis à droite de leur colonne d'origine pour créer l'entrelacement et le lien entre toutes les colonnes de maille [30]–[32].

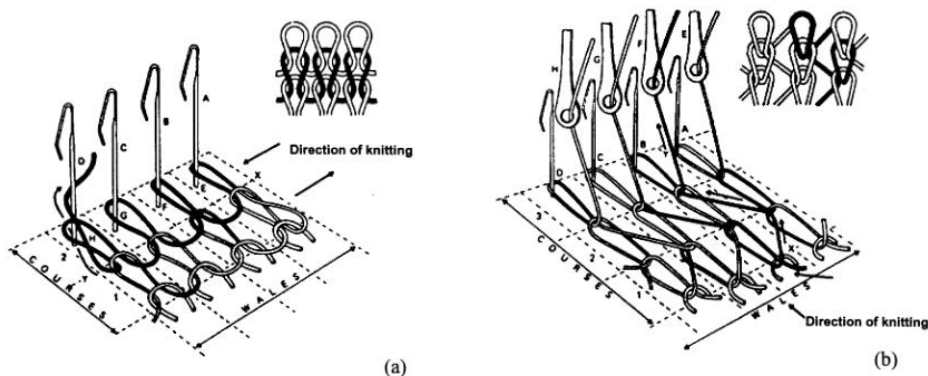


Figure 14 : Technologies de tricotage maille cueillie (a) maille jetée (b) [33]

Le procédé de tricotage a un inconvénient majeur, celui d'imposer aux fils lors du procédé des courbures assez extrêmes ( $180^\circ$  ou plus). Par contre, cela confère à l'ensemble final des orientations non conventionnelles des fibres. Ces deux phénomènes font que les propriétés mécaniques, en contraintes, dans le plan des tricots sont faibles par rapport à des structures comme la tresse ou le tissu. Par contre, de par la technologie et la réserve de fils, les tricots disposent d'une forte capacité



de déformation et par conséquent de bonnes propriétés de drapabilité. Cette capacité de déformation fait que l'absorption d'énergie avant rupture de cette structure est élevée.

## V. Assemblage de structures 2D en vue de la création de structures 3D

Comme précisé précédemment, les structures 2D peuvent être assemblées entre elles pour créer des structures 3D. Ces techniques d'assemblages de préformes 2D vont être présentées ici. L'avantage de ces structures 3D est que l'empilement de structures 2D va permettre des orientations différentes par rapport à celles des renforts initiaux. Ainsi un empilement d'UD par stratification va permettre des orientations différentes des renforts pour créer une structure multidirectionnelle.

Un empilement de structures 2D peut permettre d'obtenir une structure de préforme 3D, cependant, l'importance du liage entre les différentes couches va être fondamentale. Une structure 3D qui ne présente pas de liage entre ses couches va avoir des propriétés mécaniques bien inférieures à une structure 3D liée [34], [35].

### A. Structures stratifiées

Les structures stratifiées sont un empilement de structures 2D, que l'on appelle plis. Ces plis vont être empilés dans un ordre particulier en fonction des orientations angulaires souhaitées. Les orientations des renforts fibreux vont se retrouver dans le système de coordonnées de la préforme finale. Cependant, les règles à suivre sont les suivantes : le stratifié doit être symétrique donc équilibré par rapport à son plan de symétrie. Cette règle n'est pas immuable mais permet de garantir à la préforme finale un comportement mécanique équilibré.

Le matériau final aura un comportement qui sera influencé par la nature des fibres présentes dans sa structure ainsi que la séquence d'empilement des couches, illustré figure 15.

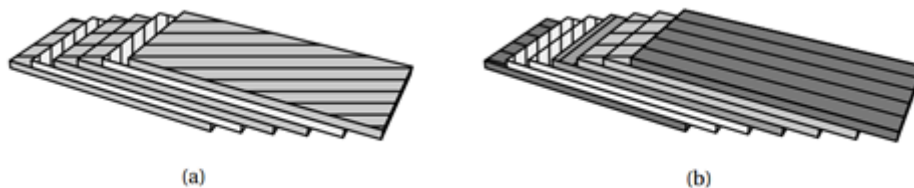


Figure 15 : Représentation de stratifiés a [-45/45/-45/45/-45] et b [0/45/90/-45/0] [36]

Le principal avantage de cette technologie est qu'elle est peu coûteuse. L'empilement automatisé permet la création de la structure finale sans trop de dégradation des structures 2D.

Dans le plan, la résistance du stratifié est très intéressante car dépendante de l'empilement et des orientations des renforts fibreux. La rigidité spécifique (rigidité ramenée à la masse) de ce type de matériau est également élevée. Le comportement de ce matériau va donc dépendre de l'orientation des couches. Cependant, la direction hors-plan, par l'absence de renfort entre les plis, dispose de faible résistance mécanique par rapport aux deux autres directions. L'absence de liage fait que le phénomène de délaminage est important. Cela est notamment vrai dans les applications à l'impact qui entraînent ce phénomène de délaminage entre les plis.

### B. Stratifiés renforcés

Les stratifiés précédemment cités peuvent par conséquent être renforcés dans la direction hors-plan et ce afin de limiter le cisaillement inter-laminaire entre les plis. Différentes technologies de renforcement dans l'épaisseur sont illustrées en figure 16 :

- La couture,
- Le piquage,
- Le Z-pin ou épinglage,
- Le renforcement par tissage (qui sera abordé dans la partie renforts 3D).

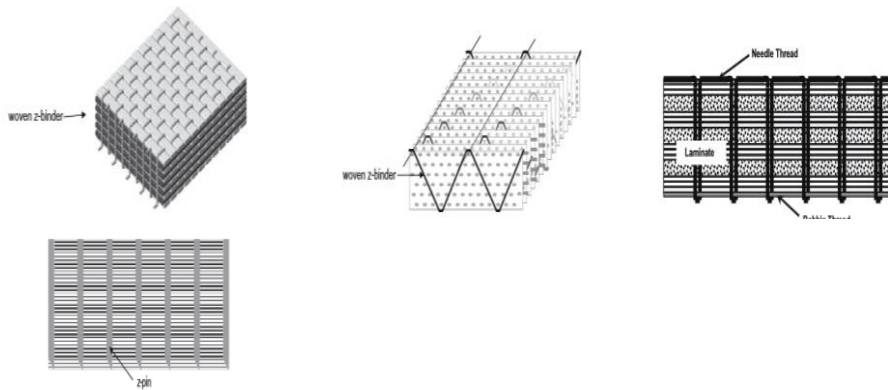


Figure 16 : Différents renforcements de stratifiés[37]

### 1. Renfort du stratifié par couture

La base du stratifié reste la même que précédemment exposé. A savoir, l'empilement de plis est la base de la structure 3D finale. Pour le renfort par couture, on vient mécaniquement et à travers l'épaisseur insérer un fil de renfort structurel qui forme un point de couture[38].

Les NCF (non crimp fabrics, figure 17) sont un empilement de structures 2D. Cet empilement de couches orientées dans le plan est bloqué par un fil fin inséré dans l'épaisseur[39], qui n'est pas forcément structurel. L'empilement des plis se fait dans un ordre particulier pour garantir au NCF un comportement mécanique défini. Les structures fibreuses de base dans ce procédé sont des UD afin de bénéficier des avantages de la non-ondulation. Outre une technologie de couture, figure 18, qui peut être utilisée pour lier les plis entre eux, la technologie de maille jetée peut aussi faire office de technologie de liage. Ce qui en fait des structures présentant des performances dans le plan supérieures à celle d'un tissu « équivalent »[40]. Par contre l'insertion d'aiguilles dans l'épaisseur, peut impliquer des endommagements des fibres.

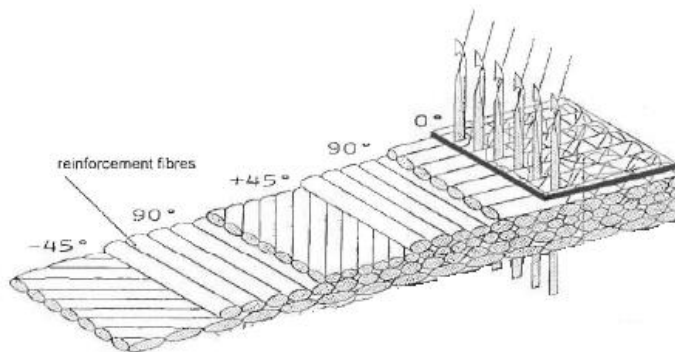


Figure 17 : Illustration d'un NCF lié



Figure 18 : Points de liage acceptés dans les NCF [40]

Le fil de couture, intégré dans la direction de l'épaisseur, n'est généralement pas de la même nature fibreuse que les renforts composant les plis. C'est le plus souvent un fil simple utilisé en couture. Il doit donc présenter des propriétés en cisaillement non négligeables à cause de la trajectoire du fil cousu, qui à l'instar de la technologie de maille va faire des boucles[38].

Cette action de couture vient donc ajouter de la matière dans le sens de l'épaisseur. Les propriétés mécaniques dans cette dimension se voient donc légèrement augmentées par rapport à la même structure non renforcée. Cela augmente donc la résistance à l'impact tout comme la résistance à la délamination.

Dans ces structures cousues, les principales orientations des renforts, en termes de densités, restent celles des fibres dans les plis. La couture, qui vient juste pour le maintien des couches entre elle, est définie par certains paramètres, tels que la densité de couture (nombre de points de couture par unité de longueur/ou de surface), le type de points de couture utilisé, les propriétés du fil de couture, les caractéristiques de l'aiguille (diamètre, forme, etc..), ou la profondeur.

Cependant, la couture, outre l'ajout d'un fil dans l'épaisseur a une influence sur les propriétés dans les plis. Dus à la géométrie de l'aiguille, des endommagements sont à prévoir sur les différents plis, le passage de l'aiguille vient en effet localement désorganiser les fibres et créer des poches de vide (lors de son retrait et à cause du diamètre supérieur de l'aiguille à celui du fil de couture). En plus de ces désorganisations, des ruptures de fil sont à prévoir lors de l'insertion de l'aiguille. Tout cela peut diminuer les propriétés mécaniques dans le plan[40], en plus des phénomènes suivants :

- Rupture des fibres dans le plan à cause de l'insertion de l'aiguille,
- Embuvage des fils de couture,
- Désalignement des fils dans le plan autour du point de couture,
- Distorsion du point de couture qui entraîne des créations de poches de vide dans la préforme,
- Dégradation des propriétés mécaniques des fils de couture due à la flexion et au frottement.

Cependant, les propriétés à l'impact sont augmentées par rapport à un stratifié non lié. L'absorption d'énergie lors de sollicitations de type impact, se voit accrue. Dans le plan, les propriétés sont bonnes et suivent les orientations des plis que l'on tentera d'équilibrer. La haute possibilité d'automatisation du procédé permet la production d'un matériau peu cher et adaptable au cahier des charges. Les fils de liaison dans l'épaisseur n'étant là que pour la stabilité dimensionnelle, les propriétés mécaniques hors plan sont faibles, mais on augmente la raideur du matériau et les propriétés de délaminage.

La littérature rapporte que l'effet de la couture sur, respectivement, le module d'Young dans le plan, la résistance à la compression et à la flexion est d'environ 20% (d'augmentation ou de diminution). Les propriétés mécaniques après impact sont plus élevées avec une densité importante de points de couture. La résistance au cisaillement inter laminaire peut également être augmentée d'environ 20% par l'apport de ces points de couture [40]. La couture empêche la propagation du délaminage. A l'inverse, les zones de premières ruptures peuvent se situer autour d'un point de couture. L'influence des paramètres de coutures sur les différents modes de rupture possibles d'un stratifié et du comportement à l'impact ont été étudiés par différents auteurs [41]–[43].

## **2. Renfort du stratifié par piquage**

Un point de couture n'est pas l'unique façon d'augmenter les performances mécaniques hors plan. Le point de couture permet de garder une stabilité dimensionnelle par le fait que le fil est bouclé sur

lui-même. Cependant, le fil peut être inséré par procédé de couture, mais le point n'est pas obligé d'être formé. On est dans ce cadre dans le cas du piquage, figure 19. Soit l'insertion d'un fil dans l'épaisseur mais sans le liage apporté par la couture[44]–[47].



Figure 19 : Illustration d'une tête de piquage [48]

### 3. Renfort du stratifié par épinglage

L'épinglage est un procédé qui vient insérer dans l'épaisseur des épingles, figures 20 et 21. Ces épingles ne sont pas en textile, elles sont le plus souvent en métal type carbone ou titane[49]. Le diamètre de ces épingles peut aller de 0.1 à 1 mm[50]. On retrouve là les problèmes inhérents à la couture avec des désorganisations et des casses de fibres. Au niveau du drapage de la préforme, on perd de la souplesse, les épingles viennent rigidifier la structure[51] mais elle permettent d'augmenter les propriétés en compression dans l'épaisseur[52].



Figure 20 : Stratifié renforcé par technologie de Z-pinn[53]



Figure 21 : Illustration du process Z-pinn [51]

Ce sont les orientations des plis de renfort qui vont conditionner le comportement mécanique de la préforme 3D[50], [53], [54]. Dans l'épaisseur, on peut dénoter une légère augmentation des propriétés mécaniques[49]. La fraction volumique de fibre a tendance à augmenter au niveau de l'insertion de ces épingles[37]. Mais à cause de l'insertion d'un renfort dans l'épaisseur, la désorganisation locale de la structure va affaiblir la structure. Des poches de vide vont en effet se former après l'insertion de l'aiguille. Cet endommagement de la microstructure, visible figure 22, entraîne une importante réduction de la résistance dans le plan, et de la résistance à la fatigue du

composite en comparaison au laminé équivalent. Cette réduction est d'autant plus importante que la taille des épingles est grande [49][51].

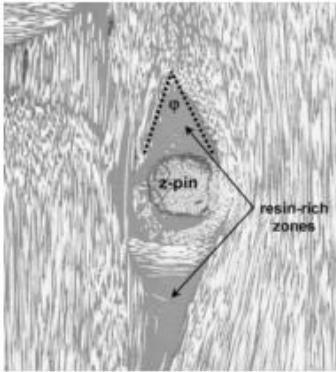


Figure 22 : Illustration de poches de résine [49]

## VI. Structures tridimensionnelles

Comparativement aux stratifiés renforcés, qui peuvent être considérés comme des structures 3D mais qui présentent dans une direction, des propriétés plus faibles que dans les deux autres (du fait d'un faible taux de renfort dans la direction de l'épaisseur) les structures 3D sont plus équilibrées. Cependant, les procédés d'élaboration sont souvent assez dégradants pour les structures fibreuses. L'apparition de déformations locales ou de casses de fibrilles sont fréquentes. De plus, les technologies permettant de passer de structures 2D à une structure 3D liée ou non, obligent à des étapes supplémentaires qui peuvent être coûteuses et d'une durée non négligeable. De fait, une nouvelle tendance à la production de préformes dites « one-shot » s'accroît.

Un énoncé des structures 3D conventionnelles sera suivi par une présentation de technologies permettant la production de préformes 3D type « one-shot ».

### A. Tricotage 3D

Une classification des tricots 3D est proposée par Mouritz[55]. Le tricot 3D peut également servir comme il a été dit précédemment comme technologie de liaison pour des empilements de structures 2D. L'orientation des mailles de tricot ne sont plus, dans ce cas, dans un plan mais dans l'espace. C'est ainsi que cette technologie s'inscrit dans ce paragraphe. La forme de tricot 3D est dite « net-shape », figure 23. Les moyens de mise en œuvre de cette technologie sont assez coûteux et rebutent encore les industriels. Mais des schémas de principe associés à quelques prototypes réalisés sont décrits dans la littérature [50], notamment pour la production de structures de dimension réduite pour applications médicales. En effet, les requis de ce marché sont des pièces souples que l'on peut draper aisément et qui présentent une élasticité conséquente. La technologie de tricotage est donc tout à fait adaptée à ces prérequis.

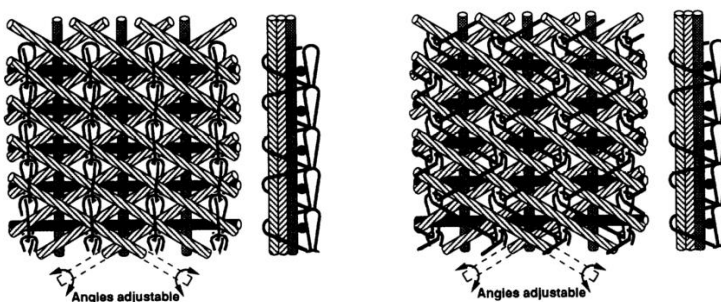


Figure 23 : Illustration tricot 3D chaîne et trame [56]

### B. Noobing

Noobing (ou « Non (interlacing) Orthogonally Orientation and binding ») est un terme inventé par Khokar [57] pour nommer les structures textiles 3D qui ne présentent aucun entrelacement de fils [12]. Le principe de ces préformes textiles est l'agrégation de trois géométries de renforts fibreux orthogonales entre elles, et restant stables géométriquement grâce aux frottements inter-fibres.

Le fait d'avoir, par les ensembles de fils, les trois orientations orthogonales représentées font que le renfort possède des propriétés mécaniques dans les trois directions de l'espace. L'absence de liage pose des problèmes quant à la tenue structurelle pour des pièces finales à géométrie complexe.

### C. Tissage 3D conventionnel

Les technologies de tissage 3D sont basées sur un principe similaire au tissage 2D. L'entrelacement des fils dans un plan qui sera celui de la préforme finale est toujours la base de la production. Cependant, cette technologie permet d'empiler plusieurs couches de tissu 2D qui vont être liées entre elles. Ces structures finales sont généralement appelées tissu interlock. L'empilement des structures de tissu 2D se fait directement sur le métier par la répartition des fils de chaîne et de trame à travers différentes couches. Le choix du nombre de couches et de par le fait, les orientations principales des éléments fibreux est précisé à cette étape de placement des fils sur la machine. Le fil de liage de toutes ces couches, va avoir une évolution particulière à travers les couches de tissu 2D. Ce rôle de liage est dévolu à certains fils de chaîne ou de trame, qui seront désignés par le qualificatif de chaîne liante ou trame liante. De fait, deux façons de lier la préforme tissée dans l'épaisseur existent, par l'intermédiaire d'un interlock chaîne (où seulement des fils de chaîne feront office de liants), ou l'interlock trame (où ce rôle sera dévolu à des fils de trame) [58].

Par conséquent, différentes familles existent et des classifications sont proposées dans la littérature. Certains sont devenues des références comme celle de Hu [59], celle d'Ansar [60], celle de Lomov [61] ou encore celle de Boussu [62].

La définition de trois grandes familles d'interlock, figure 24, est basée sur le trajet du fil de liage dans l'épaisseur.

- « angle interlock/through thickness bonding » (A/T) - interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur

Les fils de chaîne lient toute l'épaisseur de la structure dans une direction diagonale. Cette structure présente l'inconvénient d'avoir un trajet de fil très ondulant et de nombreux points de croisement au niveau des fils de chaîne et de trame et donc de provoquer une faiblesse du matériau dans ces zones.

- « angle interlock/layer to layer bonding » (A/L) - interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne couche à couche

Les fils de chaîne lient les couches entre elles en suivant une diagonale. Des croisements existent entre les fils de chaîne et de trame de la structure ce qui produit des zones de faiblesses mécaniques.

- « orthogonal interlock/through thickness bonding » (O/T) - interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur

Les fils de chaîne lient la structure selon deux directions. Certains fils vont lier les couches entre elles dans l'épaisseur de la structure en suivant cette direction. Les autres fils de chaîne sont insérés dans la direction de production et entre les couches de fils de trame. Le paramètre le plus important à maîtriser lors d'un tissage de cette structure est la tension des fils pour pouvoir garder un alignement correct et éviter le compactage de la structure.

- « 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. Les croisements entre fils de chaîne et de trame sont ainsi limités. Cette architecture demeure très flexible par rapport aux trois autres et donc est plus déformable.

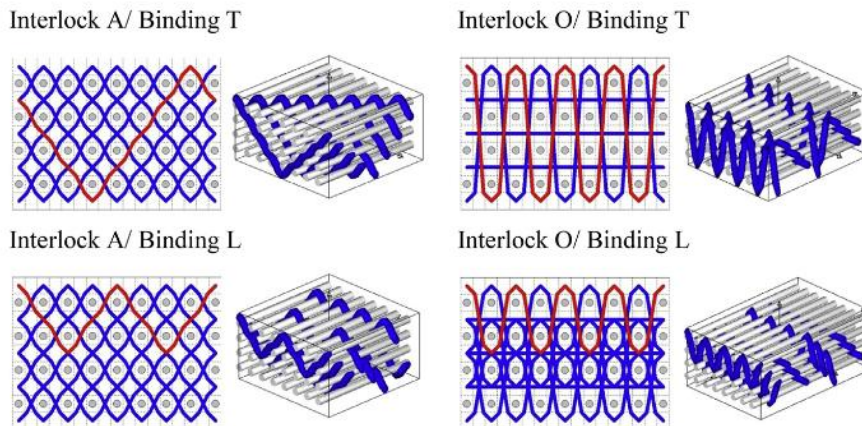


Figure 24 : Classification des tissus interlock par Hu [63]

Les tissus interlocks vont présenter des résistances supérieures au délaminage des couches comparativement à un empilement de tissus 2D [64], figure 25. Ce sont ces fils de liage qui vont garantir à la structure une cohésion et minimiser le glissement des couches. Les propriétés mécaniques de l'ensemble vont par conséquent être augmentées par ce liage inter-couches[65]. De fait, les tissus interlocks sont des matériaux très compacts, avec un taux de fibre important, une résistance mécanique, dans le plan mais également hors plan, importante. Les tissus 3D par rapport aux laminés équivalents [66] ont une résistance mécanique supérieure à la traction, à la compression et à la flexion [67], même pour un taux de fils de liage faible (moins de 5%). Le fait d'insérer des éléments fibreux dans l'épaisseur peut dégrader les propriétés dans le plan à cause du frottement qui résulte de leur mouvement relatif. Les différences de dégradations sont notables en fonction des matériaux et des armures utilisées [67], [68]. Ces pertes ont été quantifiées et peuvent atteindre jusqu'à 50% de diminution de la résistance en traction. Une diminution du module d'Young est également soulignée.

Ces inconvénients laissent place à un avantage non négligeable dans le procédé de fabrication de tissus 3D interlocks. En effet, ces derniers peuvent être produits sur des métiers à tisser classiques initialement prévus pour des structures 2D [55] [69] moyennant des modifications mineures à apporter à un métier 2D pour pouvoir produire ces structures [70]. Par rapport à un métier 2D traditionnel qui ne comprend qu'une ensouple (cylindre où l'on vient enrouler en côte à côte un nombre de fils défini pour créer une nappe qui va être régulée en tension), il va falloir prévoir l'ajout d'autres ensouples. En effet, les structures interlock, de par leur géométrie, imposent aux fils une consommation différente (dû aux différences d'embuvage). De fait, pour garantir à tout moment une tension constante dans les nappes de fils, il va falloir réguler un plus grand nombre de nappes et donc penser à l'ajout d'ensouples. La création de foules multiples nécessite quelques modifications. L'avantage des foules multiples est la possibilité d'insertion de plusieurs trames simultanément. La production s'en trouve donc accrue. Une étape unique venant se substituer à plusieurs étapes successives.

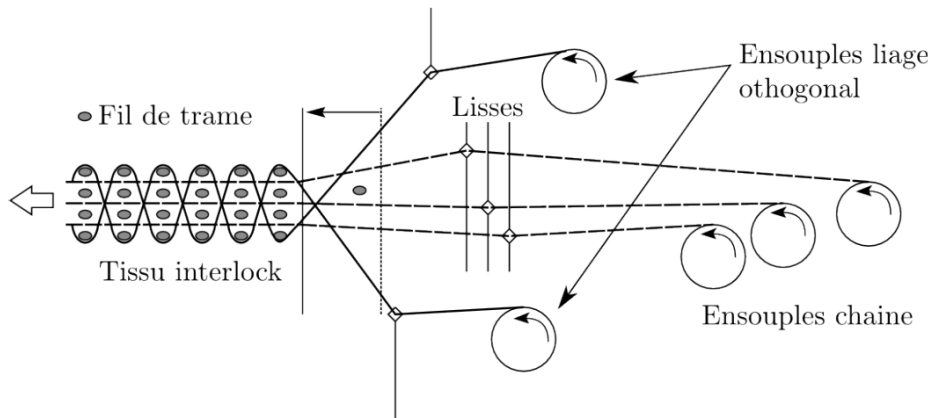


Figure 25 : Métier à tisser pour production interlock [2]

Le problème principal réside toujours, pour les matériaux fibreux, dans le frottement entre les fils et les éléments structurels des métiers, ainsi que le frottement entre les fils. En effet, plus ces frottements sont importants, plus la dégradation des fils augmentera, et entraînera par conséquent une diminution des propriétés de la préforme finale [68].

Des métiers créés spécifiquement pour la fabrication de textiles tissés 3D existent, mais s'ils permettent la production d'un plus grand nombre d'architectures complexes, leur productivité est moindre que les métiers 2D modifiés. L'avantage de la création d'un métier à tisser spécifique pour les préformes 3D est qu'une nouvelle conception permet de minimiser les principaux agents dégradants des structures fibreuses.

#### D. Tissage 3D « one-shot »

Une autre technologie de tissage permet la création de préformes 3D en one shot. Elle a été développée par Khokar[71], figure 26. Dans ce procédé, les fils que l'on pourrait qualifier de chaîne peuvent être en mouvement non plus seulement verticalement mais aussi horizontalement. Cela permet la création d'une foule verticale qui vient s'ajouter à la foule horizontale des métiers traditionnels. La possibilité d'insertion des fils dans le plan orthogonal à l'axe de production va permettre la production de structures à géométrie de sections constante, type profilés, mais également d'envisager des sections de formes variables. Les fils de chaînes devant être déplacés pas à pas horizontalement puis verticalement, la cadence de production d'un métier tel que celui-ci n'est absolument pas dans les standards actuels. Mais la faisabilité d'une telle technologie étant avérée, et ses géométries de production étant novateurs [72], en font un métier très intéressant dans le domaine du tissage 3D.



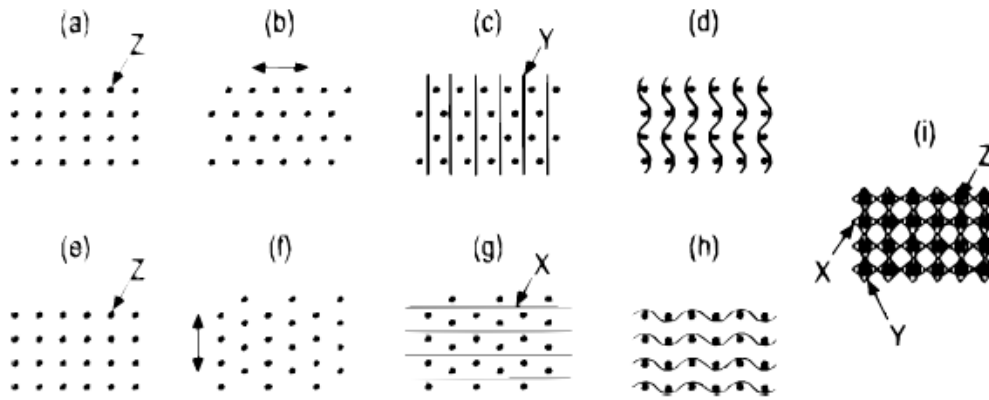


Figure 26 : Etapes du tissage double foule [58]

### E. Procédé RAIDOUTILS

Un autre procédé de formation de préformes 3D consiste en une hybridation de tissage 3D et du tressage 4 step, décrit ci-après dans la section associée au tressage. Un peu comme la technologie développée par Khokar, les fils de chaîne et de trame peuvent être déplacés dans les directions horizontales et verticales. Dans le procédé RAIDOUTILS[2], chacun des éléments fibreux est guidé par un œillet. Cet œillet est placé dans une matrice composée de guides-fils. Ces guides vont pouvoir translater entre eux verticalement et horizontalement, de façon à créer des arrangements particuliers entre les différentes lignes et colonnes. Le principe de cette technologie se base sur le caractère d'indépendance des déplacements des éléments fibreux. Et c'est ce déplacement qui va permettre de créer l'entrelacement des fils. Par ailleurs, le fait de faire passer les fils dans des guides va obliger à avoir entre les fils une distance non réductible, qui correspond à l'entraxe entre deux œillets. Cet écart, va permettre l'insertion de fils de trame, à l'instar de la foule dans la technologie de tissage. L'indépendance du mouvement de chacun des fils va permettre la réaction de certains profils de section évolutive, comme illustré en figure 27.

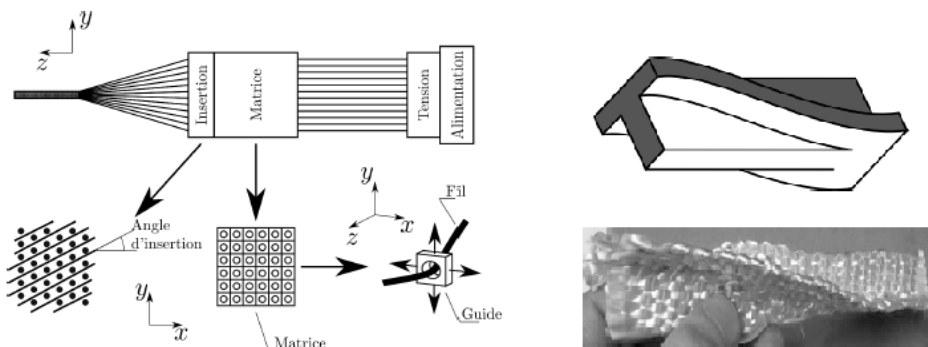


Figure 27 : Procédé RAIDOUTILS [2]

### F. Tissage en croix (Procédé MAPICC)

Dans le cadre du programme Européen MAPICC3D la réalisation d'une préforme textile ayant la forme d'un croisement de raidisseurs a été réalisée[73]. La préforme finale est composée de quatre branches ayant la particularité d'être constituées avec une continuité des éléments fibreux entre elles. Comme le montre la figure 28, les éléments fibreux (en rouge et vert) sont arrangés selon deux directions orthogonales représentant les deux directions du croisement de raidisseurs. Pour obtenir

une préforme 3D, ces éléments sont répartis en plusieurs couches. Une stratification est opérée en zone d'interface. Les zones dites branche sont structurées par l'insertion d'un élément fibreux suivant un motif particulier. Dans un esprit similaire au tissage, une foule peut être ouverte au niveau de chaque tête de maintien des fils, un fil est ensuite inséré, puis tassé en direction de la zone centrale par un peigne spécifique.

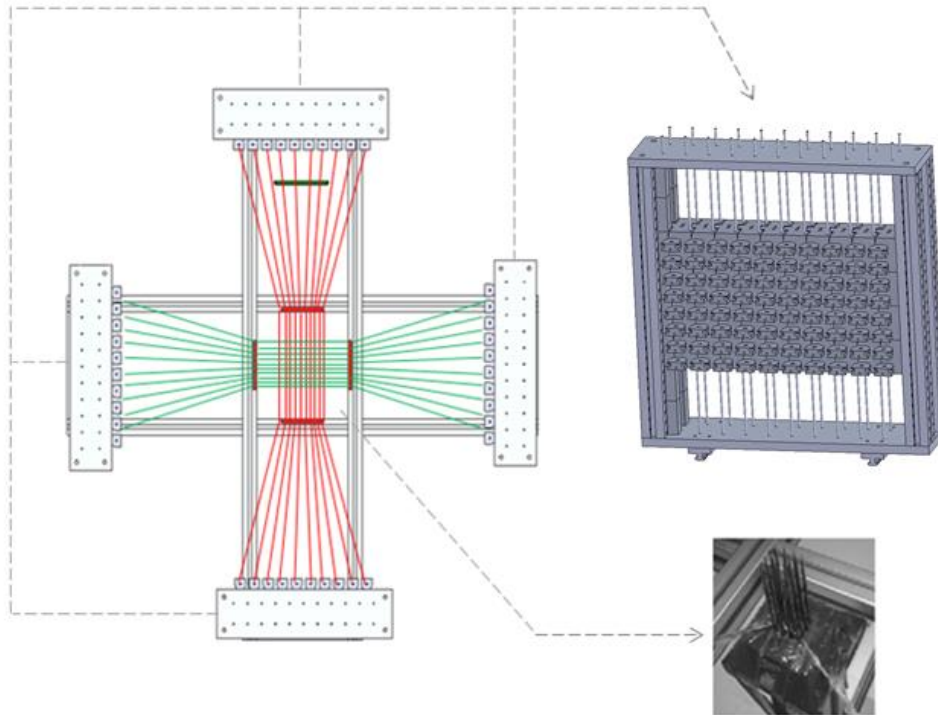


Figure 28 : Procédé MAPICC

Cette présentation de différents procédés de structuration textile 2D et 3D va permettre de positionner le tissage par rapport aux technologies précédemment évoquées. Après un bref historique du tissage, les notions élémentaires du tissage seront présentées. Puis, les technologies permettant l'obtention de structures tissées aussi bien en 2D qu'en 3D seront décrites.

## VII. Le tissage

### A. Historique et principe du tissage

La technologie de tissage remonte dans l'histoire à bien avant notre ère. Dès lors que l'on pense à une tresse, cette notion est souvent associée à la coiffure. Dès 22000 ans avant JC, sur la Venus de Willendorf (figure 29), nous pouvons retrouver les premières traces de tresses.



Figure 29 : Vénus de Willendorf [74]

L'histoire des tresses à application de coiffure s'est déclinée à travers les âges, comme dans l'empire romain, ou la Grèce antique [75].

La tresse fait également son apparition en art culinaire au début de notre ère. Sous forme de brioche tressée, ces pains sont rituellement utilisés lors de cérémonies religieuses du début des monothéismes.

Dans le domaine plus spécifique du textile, ce procédé de production textile a été utilisé par d'anciennes civilisations (Mayer Braidtexh GmbH, 2012). En effet des fils issus de fibres naturelles ont été tressés, dans un premier temps, dans le but d'obtenir des cordages rudimentaires. On peut considérer que les premières cordes en tresse datent d'il y a 17000ans [76]. On peut retrouver aussi des notions de tissage dans des documents de la Chine ancienne et du Japon antique datant de 4000av JC [77][78]. Ce début primitif du tissage revient à considérer l'entrelacement de trois fils ou plus [79]. Mais la première trace de machine de tissage nous vient de la révolution industrielle[80]. La sophistication des moyens de production opérée durant cette période historique a aussi touché le monde du tissage, par l'industrialisation. La première définition moderne d'une tresse est issue de cette période, donnée par une norme industrielle allemande comme étant « une préforme de deux ou trois dimensions avec une densité de fils élevée et une apparence de textile fermé dans lequel chaque fil tressé en croise un autre selon une direction diagonale »[81]. Les tresses peuvent dès lors être cylindriques, plates ou encore évolutives en section.

Les premières applications techniques concernant la technologie de tissage sont apparues avec l'essor de la marine à voile (18ème siècle), qui avait besoin de se doter de cordage. Par exemple, le cordage nommé « flatline » est par une technologie apparentée à la tresse, mais réalisée manuellement, permettant de produire des tresses creuses, à application de sur gainage.

Mais, c'est en 1748 qu'à Manchester, UK, Thomas Walford va réaliser la première machine à tresser (ou tresseuse). Les applications premières de cette machine vont être la production de lacets, en permettant, en pleine période d'industrialisation, l'automatisation du procédé de tressage et donc, la monopolisation d'une seule personne pour la production. On parle à l'époque d'une production quotidienne de 120 mètres environ. Cependant, c'est un français qui en 1783 va améliorer cette machine en incorporant déjà à l'époque, une alerte détectant les casses de fils. Mais c'est le célèbre Joseph de Montgolfier qui à l'aube du 19<sup>ème</sup> siècle, va faire tendre le tressage vers un procédé encore plus moderne, en le dotant d'un moteur à vapeur.

A la fin du 18<sup>ème</sup> siècle, des danses autour d'un mât, étaient assez prisées, figure 30. Chaque participant tenant un fil ou ruban qui est lié au sommet du mât. Les participants sont divisés en deux groupes égaux qui vont chacun tourner dans un sens (sens horaire ou anti-horaire). En plus de ce mouvement de rotation, les participants, à chaque fois qu'ils vont croiser un de leur camarade venant en sens inverse va le contourner une fois en allant vers le centre puis vers l'extérieur, puis à nouveau vers le centre etc. Ce mouvement sinusoïdal va permettre de créer l'entrelacement, qui permettra de former la tresse.

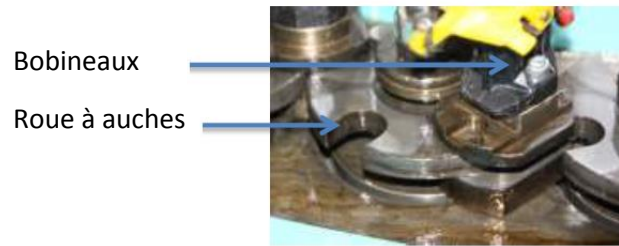


Figure 30 : Maypole dance, Lambeth (London), Paul Martin, 1893

Différents types de machines à tresser existent, des plus simples aux conceptions les plus complexes, et capables de produire différents types de produits tressés [12-13].

L'évolution du tressage peut se voir comme étant une superposition de modifications sur machines existantes. Les caractéristiques de la machine de tressage vont définir l'architecture finale du produit, élément essentiel pour le rendu des structures tressées[82] [83]. Les réglages de production d'une machine donnée vont définir les propriétés géométriques de la tresse finale[84].

En reprenant le principe du mât enrubanné, les machines produisant ce type de structures de surfaciques courbes (ou tresses à parois fines) sont cantonnées à la production de tresses 2D, par opposition aux tresses 3D qui vont présenter des fils de liage dans l'épaisseur. Les machines 2D de l'époque ont communément seize, ou plus, bobineaux et sont exclusivement utilisées pour la production de cordes ou lacets. Le chemin de came est généralement circulaire, constitué d'éléments particuliers appelées roues à aches, qui sont des roues à encoches[85] (figure 31).



Bobineaux

Roue à aches

Figure 31 : Illustration de bobineaux et roue à aches

Les supports de bobineaux se déplacent en deux groupes en sens horaire et anti-horaire, pour créer l'entrelacement qui va former la tresse, comme illustré figure 32.

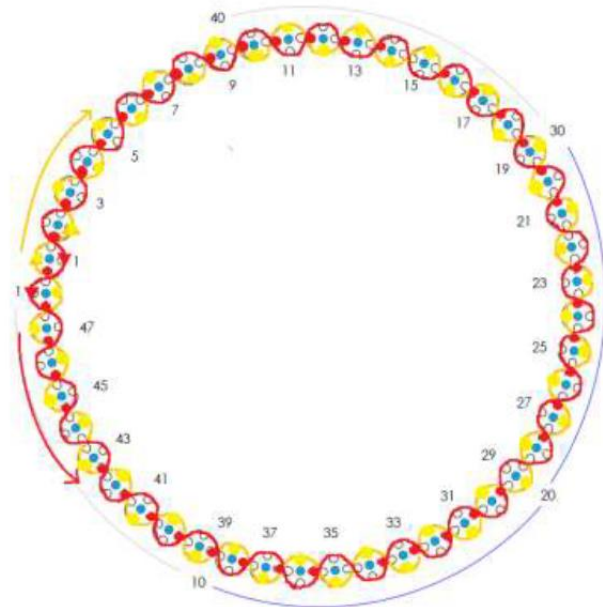


Figure 32 : Schéma de face d'une tresseuse et trajet des bobineaux

Le point de tressage est le point où les fils individuels se rassemblent pour former la tresse finale [86], comme montré figure 33. Les fentes des roues à aubes permettent aux bobineaux de se mouvoir le long du chemin de came en étant guidé par ce dernier. Les chemins de came sont apparentés à deux sinusoides sécantes (qui sont en opposition de phase). La vitesse de production de l'ensemble va être définie par la géométrie du chemin de came et par les roues à aubes. Les machines à tresser modernes de ce type comportent généralement de 3 à 144 bobineaux et peuvent ou non inclure l'insertion de fils droits par l'intermédiaire de bobines fixes [87], (figure 34).

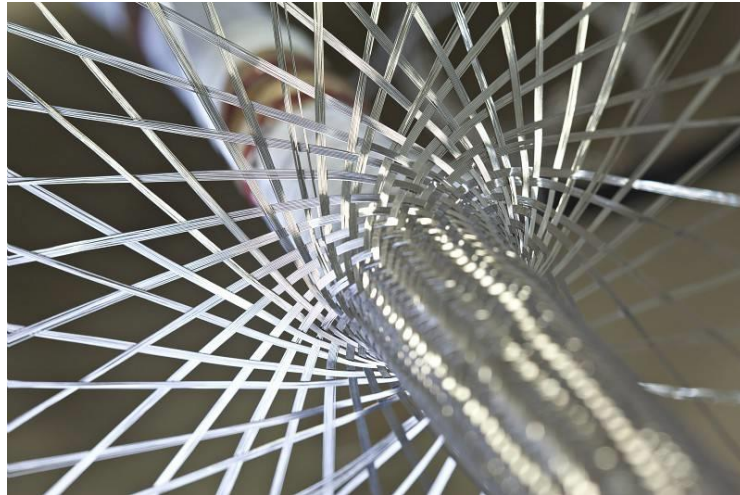


Figure 33 : Illustration du surtressage (Pierre Soissons / Safran)

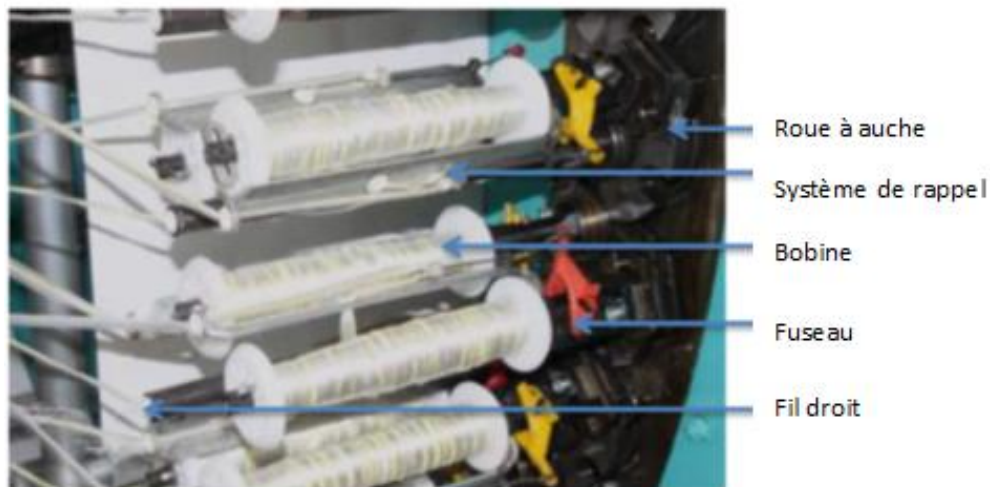


Figure 34 : Différents constituants du tressage

Ces machines à tresser 2D ont les chemins de came situés vers le périmètre extérieur de la machine. Plus le nombre de bobineaux va augmenter, plus la taille de la machine s'accroît, de même que le diamètre final du produit. L'augmentation de la taille de la machine a eu un impact très positif sur les capacités de production notamment pour permettre l'insertion d'un mandrin à travers le centre de la machine définissant ainsi l'apparition du surtressage [88].

Les fils de la tresse viennent s'entrelacer sur la surface du mandrin pour épouser sa forme. C'est une méthode de production prisée pour la fabrication de préformes pour composites. En effet, cette préforme à diamètre évolutif va servir de renfort structurel dans l'application finale [89]. Ainsi, des formes complexes 3D peuvent être tressées à partir d'une machine 2D et d'un mandrin 3D. La figure 35 montre des mandrins qui peuvent être supprimés étant solubles, ou gonflables [90].

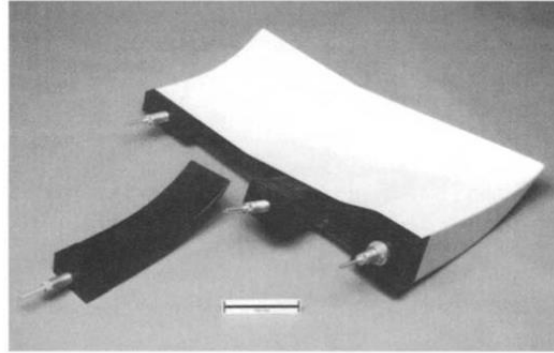


Figure 35 : Mandrin gonflable surtressable [90]

Dans la plupart des machines 2D, les bobineaux sont placés parallèlement à l'axe de tressage. De fait, lors du procédé de tressage un frottement inter-fil peut être plus ou moins important. Au cours du procédé, les fils doivent avoir un espace suffisant avec les fils adjacents pour empêcher superposition et dégradation des fils entre eux. De fait, géométriquement pour éviter ce phénomène, on force les fils à former un cône dont la pointe est le point de tressage (par l'introduction d'un anneau de tressage), figure 36.

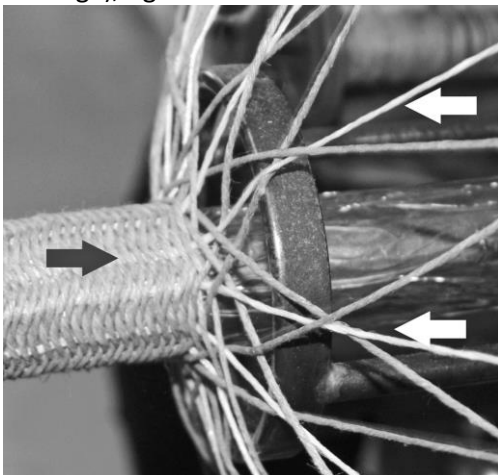


Figure 36 : Point de tressage (flèche noire); fils composant la tresse (flèche blanche)

Une simple modification d'une machine à tresser de type mât enrubanné permet l'insertion de fils fixes. Utilisant des roues à aubes à essieux creux, on permet à des fils d'être insérés dans la direction de tressage. Ces fils ont différents noms, mais ils sont globalement appelés fils droits ou fils à 0° [91]–[93]. Ces fils axiaux sont utilisés pour stabiliser la tresse, augmenter la résistance à la traction et de réduire l'allongement. Il est possible de produire ces tresses triaxiales avec les motifs précédemment mentionnés.

Une autre modification du tressage à mât enrubanné est utilisée dans la production de tresses plates. En empêchant les bobineaux d'effectuer un tour complet, des tresses plates sont produites. Cette géométrie peut être produite en modifiant les chemins de came ou en modifiant une roue à aubes. A l'emplacement de cette modification, les bobineaux vont faire demi-tour et ainsi former une tresse plate à bords continus. Cette modification a permis une certaine prise de conscience qu'une tresse n'a pas besoin d'un chemin de came fermé pour être produite. Dès lors, au cours des années 1800, un certain nombre de brevets ont été déposés pour un tressage à plat à formes diverses[94].

Un brevet américain publié en 1890 décrit une machine à tresser rotative (ou métier à valseuses) présentant certaines améliorations où les bobineaux décrivent un chemin circulaire et non

sinusoïdal, et seuls les fils suivent des trajectoires sinusoïdales[95]. Les tresseuses circulaires représentent une évolution de la tresseuse à mât enrubanné en mettant en œuvre des modifications significatives et en augmentant la vitesse de production [85]. Dans les machines à tresser rotatives, les bobineaux tournent en suivant un cercle parfait autour d'une sorte de cloche où les fils extérieurs viennent s'entrelacer autour des fils intérieurs. De cette façon, les fils, élément de faible masse et de faible inertie, viennent onduler à la place des bobineaux.

Wardwell Braiding Machine Company (<http://www.wardwell.com/>) fabrique des machines de ce type, qui tressent à une vitesse supérieure à celle du métier à tresser traditionnel. Ces machines à tresser rapides peuvent produire différents modèles de tresses biaxiales, mais généralement pas de tresses triaxiales. Bien que les vitesses de production de la machine soient plus élevées, ces machines ne sont pas bien adaptées pour les fils textiles classiques. Par conséquent, ils sont généralement utilisés pour tresser du fil pour le blindage électromagnétique et des monofilaments comme renfort pour les tubes sous pression par exemple.

La dentelle est un textile décoratif utilisé principalement dans le mobilier, l'habillement et la maison. Elle se caractérise par une architecture ouverte formée par divers points [96]. Les mouvements des bobineaux sont combinés pour former des mailles et de produire des schémas complexes[97]. La dentelle tressée emploie une topologie ouverte et complexe en raison du mouvement indépendant de fils [98]. Les machines à tresser qui produisent de la dentelle sont souvent désignés comme machines Jacquard ou machine de tressage Torchon, montré en figure 37.

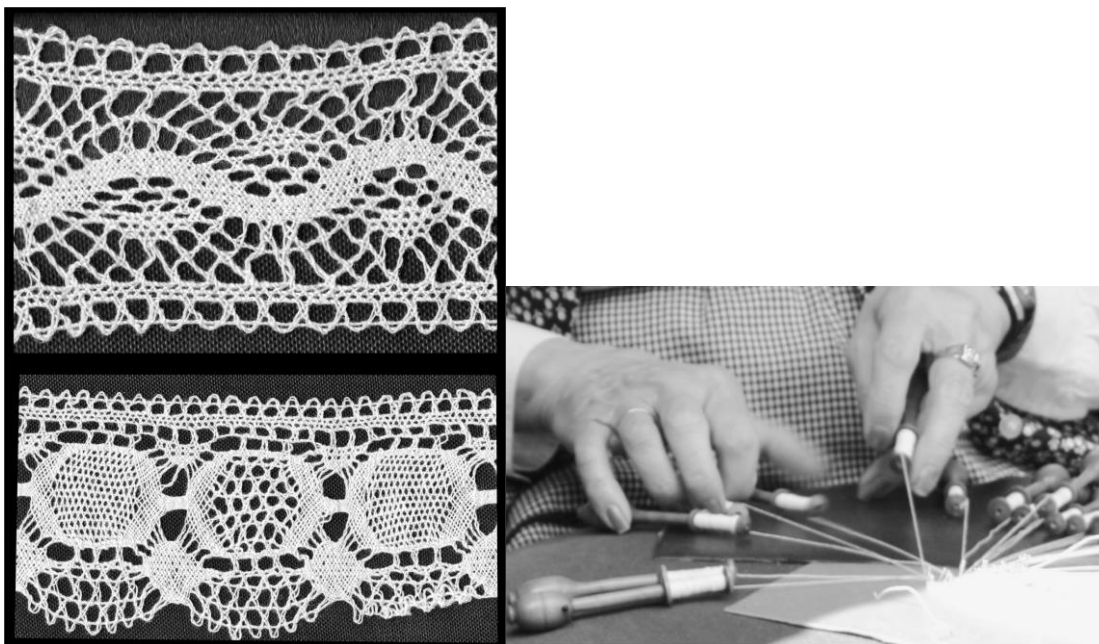


Figure 37 : Dentelles, machine à tresser la dentelle [99]

Les machines de tressage dentelle sont des machines à tresser 2-D couramment utilisées, spécialisées dans la production de tissus de fantaisie ou de dentelle.

La technologie des machines de tressage de dentelle remonte aux années 1800 en Europe et aux États-Unis. La machine de tressage de dentelle moderne est née en Allemagne au début des années 1900 et à l'exception de quelques améliorations techniques, les métiers récents sont semblables à



l'original [100]. Tout comme la machine à mât enrubanné, les bobines se déplacent dans un chemin de came.

Cependant, chaque roue à auge est contrôlée individuellement, permettant aux bobineaux d'inverser leur direction à chaque cycle de la machine, autorisant ainsi des possibilités de configuration pratiquement infinies.

Au cours des années 1960, industriels et universitaires ont mis l'accent sur le développement de machines à tresser 3D pour la production de préformes pour application composite. Par la suite, de nombreux brevets ont émergé de cette période jusqu'à nos jours. Des recherches pour déterminer les propriétés des tresses 3D et des composites qui en découlent continuent à ce jour. Il convient toutefois de noter que les machines de tressage 3D ont été utilisées depuis les années 1900, pour la production de tresses uniques, des renforts, et de quelques parures de vêtements [101], [102]. Les tresses 2D et 3D nécessitent un déplacement des supports de bobines et un dispositif de tirage synchronisés. Les possibilités de conception des machines à tresser 3D sont par nature plus compliquées que pour les tresses 2D. Certaines machines 3D ont été construites simplement en modifiant des métiers 2D, en ajoutant juste plusieurs chemins de came circulaires concentriques interconnectés pour permettre le passage de fils à travers l'épaisseur de la préforme [102], [103][104].

### B. Motifs de tressage

Les tresses peuvent être produites à partir d'un matériau unique que l'on a mis sur tous les bobineaux, ou à partir d'un mélange de nature de fibres. Cette possibilité de variabilité nous permet de tresser deux matériaux par exemple qui ont des propriétés mécaniques différentes. Cependant, la grande majorité des préformes tressées sont issues d'un matériau unique, ou à l'extrême d'une fibre de renfort, additionnée dans la structure finale, comme fil de support. Le tressage à l'instar d'autres technologies textiles comme le tissage, permet d'entrelacer des matériaux de plusieurs façons différentes. Ces différentes façons sont appelées motifs de tressage. Les trois motifs principaux (Regular, Diamond et Hercules) sont schématisés figure 38.

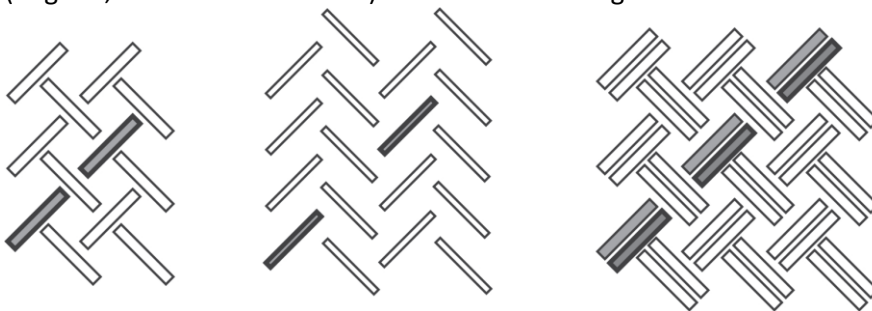


Figure 38 : Tresse diamond, regular et Hercule

La structure diamond consiste à ce que chaque fil orienté soit au-dessus d'un fil qu'il croise puis directement en dessous du suivant. La structure regular est sur le même principe sauf que chaque fil est au-dessus puis en dessous de 2 fils, le tout avec un décalage de 1, et la structure hercule, répète ce principe mais pour trois fils.

### C. Classement des structures produites

#### 4. Structures biaxiales

Une tresse formée par des fils suivant les deux chemins de came est appelée tresse biaxiale, en raison des deux directions distinctes (symétriques par rapport à la direction de tressage) que suivent les fils dits « fils de biais » dans la structure finale. On peut aussi considérer une tresse biaxiale par l'épaisseur maximale de sa peau, qui correspondrait à deux fois la hauteur d'un fil une fois tressé (en

tenant compte des évolutions de section au cours du procédé). L'embuvage d'un fil (le surplus de longueur d'un fil dans la structure pour une longueur donnée par rapport à cette même longueur de fil libre) va dépendre grandement de l'angle de tressage de la tresse, et de la capacité du fil à se déformer en section.

De fait, ces structures biaxiales (figure 39) peuvent présenter des désavantages, une plus grande compressibilité de la préforme dans la direction de l'épaisseur, des faibles performances en compression par rapport aux performances en traction, une inhomogénéité du taux de fibre, due à un taux de recouvrement inférieur à 100%, et un taux de fibre qui peine à dépasser les 70%.

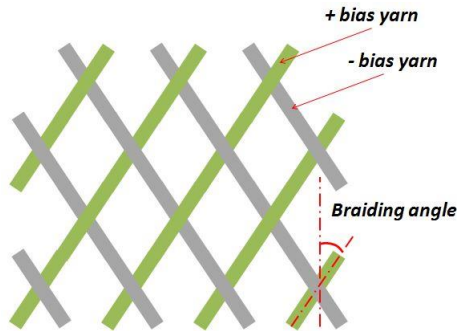


Figure 39 : Schéma de tresse biaxiale

## 5. Structures triaxiales

En sus des tresses biaxiales il est possible d'élaborer des tresses triaxiales (figure 40). En plus des fuseaux mobiles décrits précédemment, des fuseaux fixes sont présents au centre de chaque roue à encoches. Ces derniers permettent d'ajouter à une tresse biaxiale une troisième direction suivie par un fil (en plus de celles des deux nappes entrelacées). Les fils dits « fils droits » en raison de leur parallélisme par rapport à la direction de production, sont emprisonnés entre les deux nappes de fils de biais. Leur distribution peut se faire de façon homogène ou non, mais toujours suivant une direction parallèle au sens de production. Ces fils droits amènent à la structure finale un taux de recouvrement plus important, qui peut atteindre aisément les 100%. Ils permettent d'ajouter de la rigidité dans la direction longitudinale du produit fini, cependant, leur nombre est limité au nombre de roues à aubes de la machine, et ils ajoutent de façon non négligeable au textile final de l'ondulation pour les fibres et donc de l'embuvage.

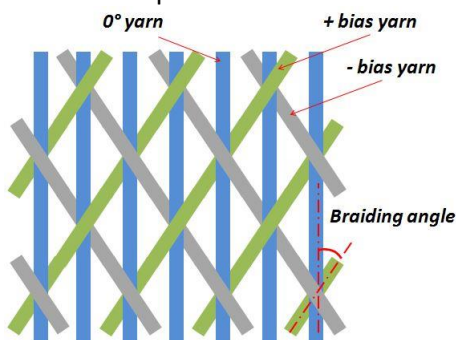


Figure 40 : Schéma de tresse triaxiale

### D. Tressage 2D

Le produit final a la particularité de n'avoir qu'une surface de fils (qu'elle soit plane ou surfacique). Le principe de la tresse 2D (ou tresse plate) est toujours basé sur le principe d'entrelacement de fils. Dans ce cas, les fils sont tous présentés dans le même plan et sont entrelacés par inversion des fils deux à deux. Par exemple, figure 41, pour une tresse à trois brins, la configuration initiale présente trois fils (1-2-3). La première étape est de faire passer le fil de gauche au milieu et celui du milieu à

gauche (2-1-3). La seconde étape est de faire passer le fil du milieu à droite et celui de droite au milieu (2-3-1).

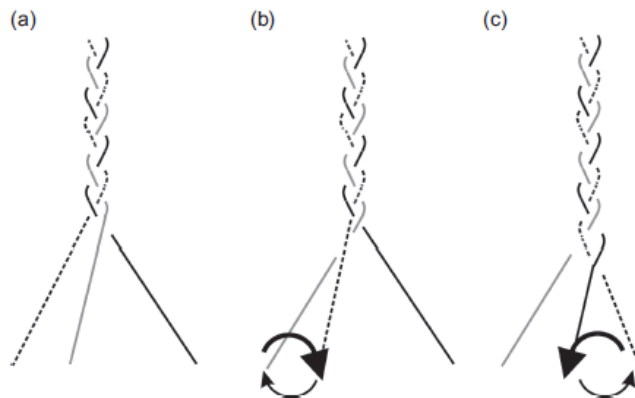


Figure 41 : Formation d'une tresse à 3 brins [99]

Certaines machines de tressage reprennent ce principe pour un nombre plus élevé de fils, illustré figure 42, et cela, au final, fournit un produit dont la section finale est plate, que l'on nomme tresse plate. La tresse 2D peut être produite à partir de fuseaux orientés seuls (tresse plate biaxiale) ou encore à partir de ces fuseaux orientés plus des fuseaux droits (on est alors dans le cadre d'une tresse plate triaxiale).

Pour faire un parallèle avec le principe de tissage, dans ce dernier, une nappe de chaîne ( $0^\circ$  par rapport à la direction de production) vient s'entrecroiser avec une nappe de trame ( $90^\circ$  par rapport à la direction de production). En tressage, les fils suivent un schéma de tressage que l'on pourrait comparer à un motif de tissage, bien que l'orientation des directions des fils dans la structure finale ne soit plus  $0/90$ , mais sont positionnés dans deux directions paramétrées par un angle  $\alpha$ , noté angle de tressage, dont le chemin sera une hélice autour de la structure tresse finale.

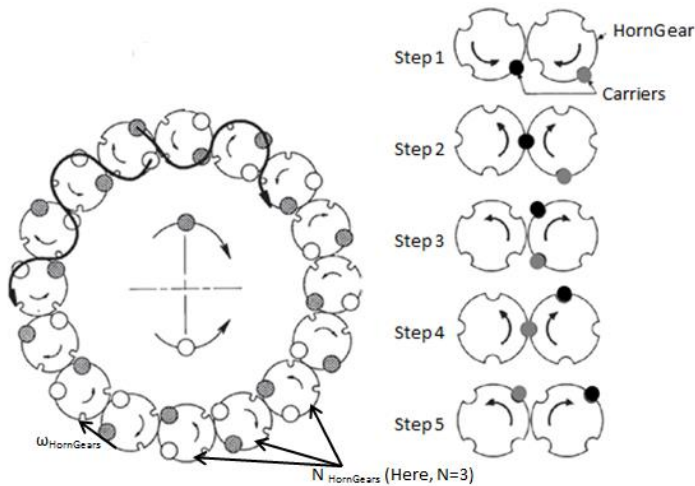


Figure 42 : Principe du tressage

De fait, le tressage est un procédé technique qui transforme des matières textiles de base (fil, multifilaments,...) en une structure plus complexe par entrelacement de ces derniers. Cet entrelacement est créé par une permutation de fuseaux portant des bobineaux. Bobineaux sur lesquels sont enroulés du fil et qui comportent un système de régulation de tension. Ces fuseaux sont divisés en deux groupes. Ceux qui vont suivre un chemin de came dans le sens horaire, et ceux qui vont suivre un chemin de came dans le sens antihoraire. Ces deux chemins de cames s'entrecroisent à intervalles réguliers, pour apporter l'entrelacement des fils, illustré figure 42. Pour mouvoir ces fuseaux, des

roues à encoches servent à mettre en mouvement ces fuseaux et les contraignent donc à une avancée en suivant un des deux chemins de came. Les fils qui sont donc dévidés par les fuseaux au cours du procédé de tressage, passent ou non, par un anneau de tressage qui permet de contrôler la position du point de tressage, figure 43, endroit où les fils viennent former la structure finale tresse.

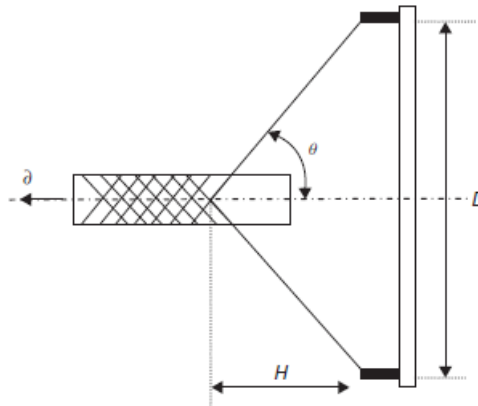


Figure 43 : Illustration du point de tressage [105]

Un système de tirage vient imprimer à la structure tresse une vitesse linéaire, qui a pour but de tirer plus ou moins vite les nappes de fils entrecroisées, et donc par conséquent imposer une variation sur l'angle de tressage  $\alpha$ .

Les différents éléments importants du procédé de tressage sont donc les fuseaux, les chemins de cames, les roues à encoches, l'anneau de tressage et le système de tirage, résumés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Récapitulatif des éléments constitutifs d'une tresseuse

Élément constitutif	Sert à	Agit sur
Fuseaux	Fournir du fil Réguler la tension du fil avant son entrée dans la structure finale	Tension Nombre de fils mis en jeu
Chemins de cames	Guider les fuseaux	Parcours du fil
Roues à encoches	Mouvoir les fuseaux Gérer les motifs de tressage	Frottement fil/fil Angle de tressage
Anneau de tressage	Créer le point de tressage	Tension de la nappe de fils Alignement des fils dans la structure finale
Système de tirage	Réguler la production	Angle de tressage

Les fuseaux sont des éléments où le fil subit le parcours le plus dégradant. En effet, le trajet qui lui est imposé est parsemé d'angles assez sévères (90 ou 180°), et pour limiter la dégradation du fil durant le processus de tressage, les fuseaux sont équipés d'œilletons, qui auront pour rôle de limiter le frottement du fil sur les organes agressifs du fuseau.

Une tresse, ou une structure tressée est définie par plusieurs paramètres, comme son armure, le nombre de fil la constituant, et l'orientation que l'on vient donner à ces fils par rapport à la direction de tressage. Ce dernier paramètre est nommé angle de tressage et noté  $\alpha$ .

L'armure choisie et l'angle de tressage vont donc avoir une influence directe sur la structure finale d'une tresse [106], [107]. L'angle de tressage est une composante directe du rapport entre la vitesse

de traction de la tresse (ou vitesse de production) et la vitesse de rotation des roues à aubes. Un petit angle de tressage est dû à une grande vitesse de tirage, et inversement, un grand angle sera le résultat d'une vitesse de tirage faible.

L'élément le plus important à maîtriser dans le procédé de tressage est l'angle de tressage [108]. En effet, ce dernier influe directement sur plusieurs caractéristiques géométriques du produit fini. Il va agir sur le taux de recouvrement (taux surfacique de fibres). Il va également conditionner l'orientation des fils dans la structure qui influe sur les propriétés mécaniques finales de la tresse [109]. La diminution de cet angle de tressage conduit la structure à avoir une orientation longitudinale des fils et par conséquent dans cette direction des propriétés plus importantes. Cependant, dans cette configuration, le comportement dans le sens transverse de la direction de production se trouve affecté.

Pour obtenir une structure bien équilibrée, l'angle de tressage à choisir est de  $45^\circ$ , qui permet un équilibre optimal dans les directions longitudinales et transverses de la tresse. On obtient dans cette configuration une résistance à la torsion et au cisaillement optimale. Au niveau de la stabilité dimensionnelle on se trouve dans le cas le plus favorable.

Cela est vrai pour une tresse biaxiale mais également pour une tresse triaxiale. L'ajout dans la préforme finale de renforts fibreux dans la direction de production va permettre d'augmenter les propriétés de la tresse et garantir une stabilité dimensionnelle accrue [110]. Par ailleurs ces fils droits vont mécaniquement augmenter la résistance à la traction dans le sens longitudinal de la tresse et notamment en résistance à la torsion [111].

A l'instar du tissage, les frottements des éléments fibreux sur les éléments mécaniques de la machine dégradent les éléments fibreux.

Le tressage 2D présente la caractéristique de la production en continu d'une structure textile orientée [48]. En effet, la structure finale est produite par un procédé maîtrisé et hautement reproductible, en plus de permettre une production à grande échelle. Nous obtenons donc un produit fin, en section transverse par rapport à la direction de production, d'une largeur modulable (à travers la maîtrise de l'angle de tressage  $\alpha$ ), et résistant (combinaison de la résistance intrinsèque du fil et de celle allouée par la structure) [112]. La gamme angulaire possible pour une tresse 2D peut s'étendre de  $5$  à  $89^\circ$  théoriquement. Même si dans la pratique, on se limite généralement à rester dans la gamme  $40$ - $60^\circ$ . Le produit final présente aussi une bonne drapabilité ainsi que des propriétés dans le plan des renforts textiles plutôt bonnes ou en tout cas équilibrées. La bonne drapabilité que présentent les tresses plates les autorise à être bien adaptées pour le drapage de formes complexes courbes. Une faible résistance à l'impact à cause de l'ondulation et de la faible force de délamination dû au manque de fils dans la direction de l'épaisseur a été montrée [113]. Cependant, la tresse exhibe des propriétés mécaniques supérieures à des structures 2D comparables [114] [115].

Les limites d'un tel procédé de production vont surtout dépendre des limites des bobines que l'on vient insérer dans la tresseuse. Les caractéristiques du fil vont aussi jouer et par la même borner les capacités productives [116]. La quantité de fil embarquée par les bobines, ainsi que le nombre maximal de bobines chargeables sur la machine viennent conditionner et limiter les possibilités de production. La stabilité dimensionnelle finale de la préforme va fortement dépendre de l'angle de tressage. Plus l'angle sera grand, meilleure sera la stabilité géométrique de l'ensemble.

Cette technologie d'élaboration d'une préforme 2D textile propose une mise en œuvre technologique très intéressante : le surtressage, dont un exemple est présenté en figure 44. Il s'agit là de tresser sur un mandrin en forme, de telle façon que la structure de la tresse va venir épouser les contours du matériau de cœur qu'elle entoure. La combinaison des propriétés mécaniques du matériau d'âme et de la tresse permettent des réponses mécaniques singulières et recherchées [29].



Figure 44 : Surtressage (Herzog)

Dans le cadre de la tresse biaxiale, plusieurs technologies, autres que celle dite du « maypole » (mât enrubanné), ont été développées, et c'est notamment le cas de celle de Akiyama [117] qui propose un tressage pour la formation de profilés en I, montré en figure 45. Pour ce faire, le chemin de came des bobineaux vient dessiner un 8 aplati au centre. Head [118] propose une technologie qui s'apparente à celle du tressage 2D sans en être vraiment un. En effet, les fils de renfort n'ondulent pas entre eux. Nous avons ici, deux couches orientées (+/- $\alpha$ ) qui sont superposées et qui sont liées par un fil non structural qui assure le maintien géométrique des deux couches entre elles.

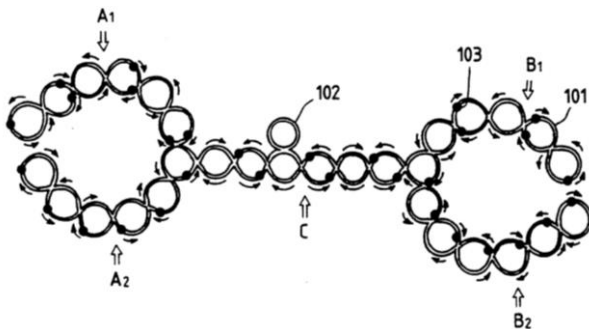


Figure 45 : Chemin de came de machine pour tressage en I (Akiyama [117])

### E. Tressage 3D

Le tressage 3D, à l'instar du tissage 3D, est nommé tressage interlock. Les tresses interlock sont donc des structures tressées, épaisses, mais surtout multicouches possédant un renfort dans l'épaisseur. Des métiers à tresser spécifiques ont été développés pour produire des couches et les lier dans l'épaisseur [119]. Le liage dans différentes technologies est créé par des fuseaux pouvant parcourir les différentes couches du produit final. A la différence du tressage 2D, où il y a deux chemins de came distincts, il y a à peu près deux fois plus de chemins de comes que de couches voulues. Comme dans le cadre du tissage 3D, les fuseaux peuvent traverser toute la structure pour avoir un liage direct entre les deux peaux extrêmes, ou avoir seulement un liage entre deux ou plusieurs couches (mais pas la totalité)[120][121]. Ces liages vont modifier le chemin des fils dans la structure

finale[108]. Un certain nombre de modèle géométriques sont apparus dans la littérature pour prédire ces orientations et donc l'augmentation relative des propriétés mécaniques que cela apporte[91][122]–[124]. La figure 46 illustre cette technologie.

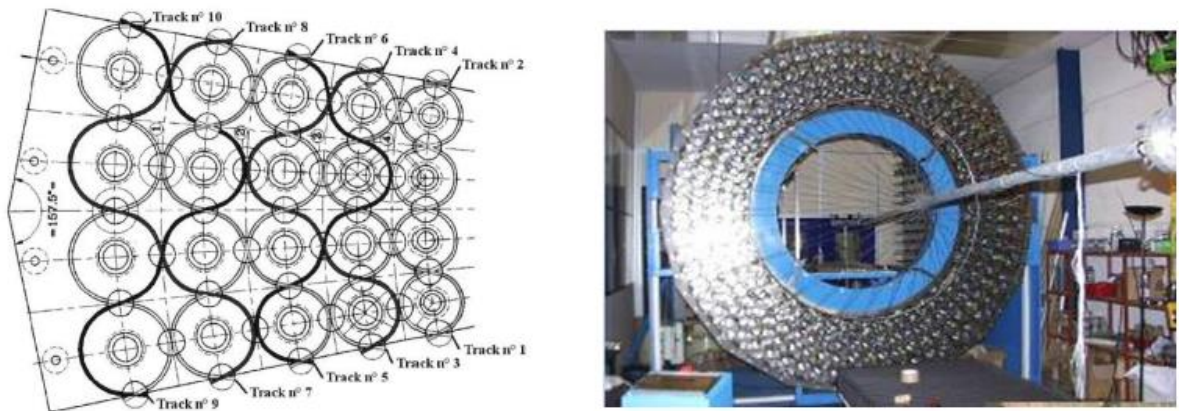


Figure 46 : Tresseuse interlock, schéma de principe et illustration [119]

### 1. Méthode de tressage « 4 étapes »

Le tressage dit « quatre étapes » présente un ensemble de fils longitudinaux que l'on vient arranger de façon horizontale et verticale dans une matrice pour leur donner une section particulière, figure 47. Les fils sont entremêlés entre eux par quatre mouvements distincts des éléments constituant la tresseuse à chaque cycle de la machine. Les bobineaux se déplacent simultanément en suivant le chemin des fils pour former la structure tressée[125]. C'est en 1982 qu'un premier brevet est déposé pour cette technologie par Florentine [126]. Dans le cadre de sa machine, les fils sont passés dans une matrice bidimensionnelle, où l'on peut faire translater les lignes et les colonnes. Ce mouvement de lignes et de colonnes (en quatre étapes distinctes) permet d'entremêler les fils pour produire une tresse. L'angle de tressage généralement obtenu avec cette technologie est de 10 à 70°. En 1986, Brown et Ratliff [127], présentent à leur tour un brevet pour un tressage quatre étapes. Seulement, ils incorporent cette technologie sous la forme d'une machine à tresser circulaire. Les bobineaux sont tous montés sur une surface circulaire à travers différents anneaux concentriques. Ces différents anneaux (dont le nombre définit l'épaisseur finale de la préforme) viennent tourner selon un chemin prédéterminé. Puis, les bobineaux sont déplacés suivant la direction axiale. Ces cycles n'excédant pas quatre étapes sont alors répétés pour former la préforme. La structure finale présente des orientations différentes des fils de biais dans l'épaisseur de la préforme par rapport à celles visibles en surface. Les différents chemins des fils dans la structure auront une importance primordiale dans les caractéristiques mécaniques finales de la préforme, et cela a fait l'objet de plusieurs propositions d'analyse géométrique[128].

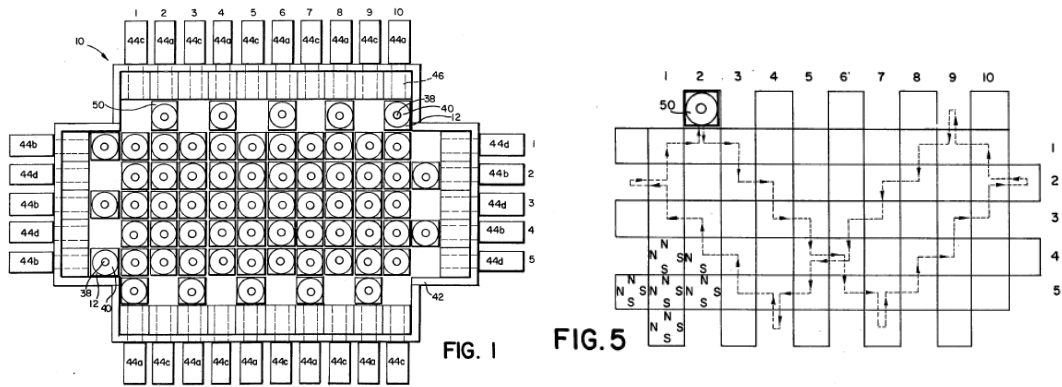


Figure 47 : Illustration tissage 4 étapes

## 2. Tissage rotatif

Le tissage 3D rotatif est un dérivé du tissage circulaire classique. Les bobineaux sont tous placés dans un plan et peuvent être en mouvement indépendamment. Les roues à aubes qui entraînent ces bobineaux sont donc toutes coplanaires et sont actionnables individuellement. Certains arrangements de roues à aubes peuvent être selon une matrice en ligne-colonne [129]. Les fils sont donc déplacés diagonalement ou selon les deux directions du plan, et viennent s'enrouler autour d'un profil prédéfini. Le surtissage est aussi possible avec cette technologie, qui permet par le retrait judicieux de certains bobineaux, la formation de profils en I, T, TT, H[130][131], figure 48.

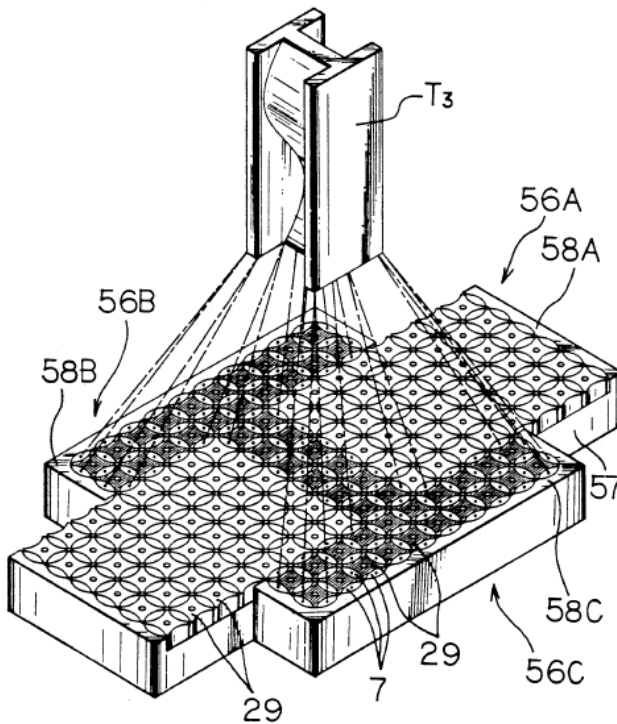


Figure 48 : Illustration tissage rotatif



## F. Tressage axial 3D

### 1. Méthode de tressage dite « mat enrubanné »

Une préforme 3D et tressée peut être réalisée par un tressage 3D dit « mat enrubanné ». Cela consiste en deux nappes de fils (les droits et les orientés), que l'on vient entrelacer. Les fils de biais viennent s'enrouler autour des fils droits en passant radialement devant et derrière eux, tout en suivant les chemins de cames circumférentiels. En 1995 Uozumi [132] propose un métier à tresser sur ce principe. Le procédé est assez simple, il reprend les principes de la technologie de tressage triaxiale circulaire 2D, figure 49. La différence notable est que les différents chemins de cames radiaux sont reliés, afin de permettre aux bobineaux d'être contrôlés radialement dans leur déplacement. L'épaisseur finale de la préforme va dépendre du nombre de chemins de came parcourus. Dans les années 1990, Brookstein [133], [134] développe un moyen d'obtenir une préforme tubulaire triaxiale. Les fils de biais s'entremêlent autour de chaque fil droit pour ainsi bloquer leur position dans la structure finale. On obtient à travers cette technologie une structure de type liage couche à couche. Pour ce faire, les fils de biais sont en mouvement par un mécanisme de roues à aubes pour que ces derniers suivent un chemin prédéfini [135]. Cette technologie est très pratique pour produire des structures tubulaires épaisses, et permet dans le même temps de répondre à des formes nécessitant l'usage d'un mandrin.

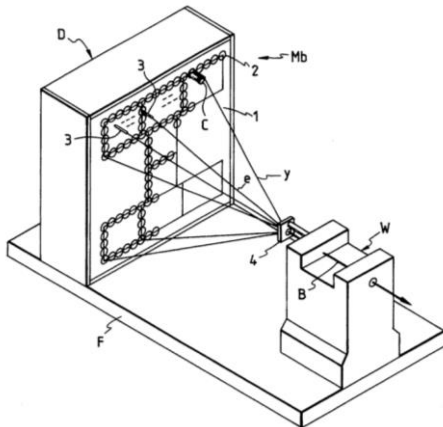


Figure 49 : Tressage axial 3D [132]

### 2. Méthode de tressage « 2 étapes »

Une matrice sous forme de tableau fait office de base pour le tressage « 2 étapes ». Les fils axiaux sont arrangés sur ce tableau (croisement de lignes et colonnes), qui va reprendre la base de la géométrie finale de la préforme. Les fils de biais vont venir se déplacer autour des fils axiaux pour créer l'entrelacement. C'est cet entrelacement contrôlé qui viendra définir la position et l'orientation des renforts fibreux dans la structure finale. Ce type de tressage implique deux mouvements distincts pour le trajet de chaque bobineau [136]. Sur cette base fixe, composée par les fils droits, les profils les plus couramment réalisés sont ceux en T, H ou TT. Une machine de tissage 3D « deux étapes » a été conçue par McConnell [137] où les bobineaux de biais suivent un chemin composé de déplacements en lignes et colonnes (déplacement cartésien) pour venir s'entremêler autour des fils droits [128][138], figure 50.

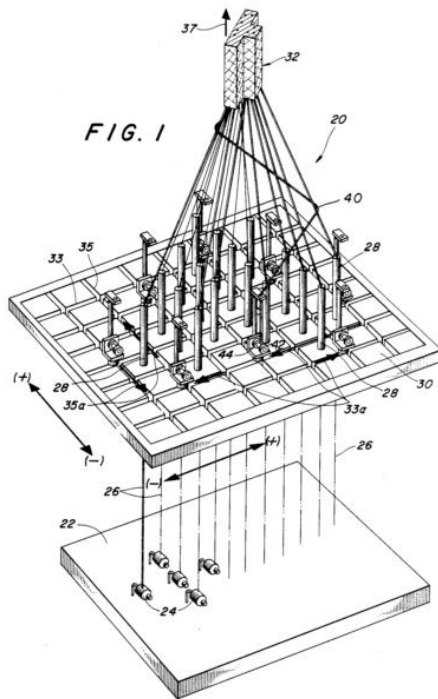


Figure 50 : Illustration tressage 2-step [137]

### 3. Méthode de tressage « 4 étapes » 3D

La méthode de tressage « 4 étapes » permet la formation de tresses 3D de schéma de tressage diamant. Là encore, les bobineaux sont rangés en lignes et en colonnes. C'est le déplacement séquentiel qui permet la formation de la préforme. Dans un premier temps, les bobineaux ont un mouvement dans la direction des colonnes ensuite, ils sont déplacés selon les lignes. Et les deux derniers temps sont les inverses des deux premiers pour revenir à l'état initial. Le mécanisme décrit par Bilisik, [139] permet de former une préforme dont la longueur dépend du nombre de cycles effectués. Les dimensions finales de la préformes dépendent du fil utilisé et de l'arrangement initial des bobineaux[72][128][125][140]–[142].

### 4. Tressage rotatif 3D

Le tressage rotatif 3D [143] est une technologie assez similaire à celle de Tsuzuki. Cependant, [144] et [145] ont amené un système présentant des améliorations notables. Chaque roue à aube est contrôlée individuellement et est équipée d'un système permettant de contrôler la rotation de chaque guide de fil axial et de chaque bobineau. De cette façon, la production de préformes tressées est totalement contrôlée par CAD, quelle que soit la section voulue de la préforme. Mungalov [146][147], figure 51, a apporté une amélioration supplémentaire au système existant en augmentant la vitesse de transfert des bobineaux entre les roues à aubes, toujours selon le schéma de tressage préprogrammé.

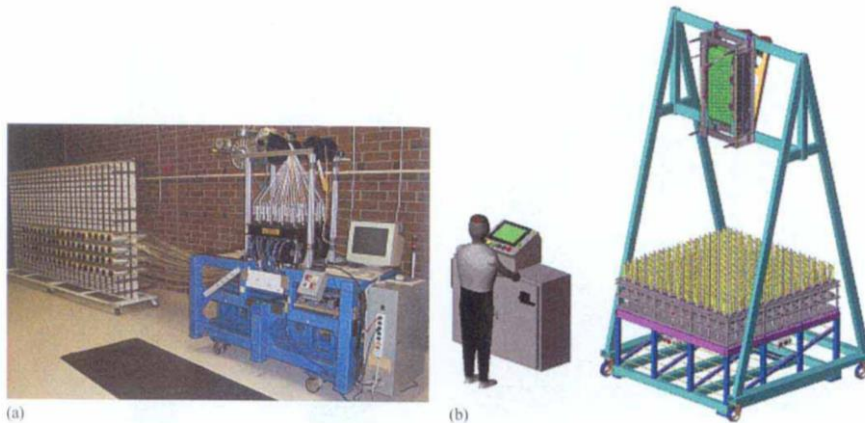


Figure 51 : Vue d'un métier à tresser 3D rotatif et illustration CAO [146]

## G. Tressage 3D multiaxial

### 1. Méthode de tressage « 6 étapes »

La tresse produite par le tressage multiaxial « six étapes » comprend plusieurs types de renfort fibreux, des fils de biais, des fils droits, des fils de renfort et des fils orientés selon l'épaisseur radiale. Là encore, les fils de biais vont venir s'entrelacer autour des fils axiaux pour former la tresse. Cependant, par rapport à d'autres technologies de tressage, celle-ci voit ses propriétés mécaniques dans la direction transverse augmenter. Les six étapes de ce procédé sont toutes distinctes. Les étapes 1 et 2 sont similaires à la méthode « quatre étapes » où les fils de biais viennent s'entrelacer autour des fils droits. L'étape 3 correspond à l'insertion des fils de renfort dans la direction transverse. Les étapes 4 et 5 correspondent à un nouvel entrelacement des fils de biais. Et l'étape 6 vient conclure le cycle de tressage par l'insertion des fils dans la direction de l'épaisseur. Les propriétés de la structure tressée 3D par la méthode « six étapes » permet d'augmenter la résistance mécanique de l'ensemble dans la direction transverse mais aussi d'homogénéiser le coefficient de Poisson dans la structure[148].

### 2. Méthode de tressage « multi étapes »

La méthode de tressage dite « multi étapes » est à l'image des méthodes séquencées, un nombre d'étapes correspondant à des déplacements de bobineaux à respecter pour former une préforme tressée. Kostar et Chou [66][149] ont développé cette technologie (figure 52) à travers un algorithme numérique. Les fils ont un comportement plus libre que dans les précédentes méthodes. De fait, les préformes produites de cette façon sont plus complexes, mais aussi plus automatisées que les précédentes.

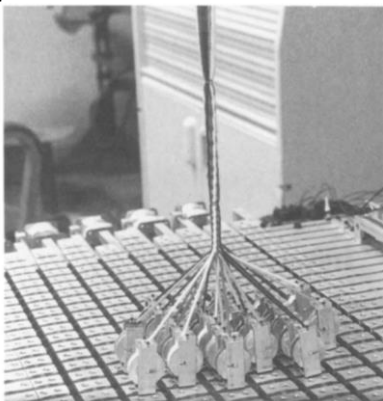


Figure 52 : Pototype de machine de tressage multi-étapes [66]

### H. Tressage « n-step »

Un dérivé du tressage interlock existe, que l'on appelle tressage profilé ou tressage « n-step ». Les fuseaux qui suivent un chemin de came à peu près circulaire, dans la technologie du tressage 3D, vont ici suivre un chemin de type rectangulaire. Les structures finales ont pour morphologie diverses sections issus de profilés [150].

Les tresses 3D, forment des structures 3D tri ou quadriaxiales. Même si le procédé de fabrication des préforme peut s'avérer lent, et que la taille de la préforme est définie par les capacités de la machine, de gros avantages sont inhérents à cette technologie. Il y a par exemple, une bonne résistance à la délamination et une meilleure résistance à des dommages subis lors d'impacts, ou encore une certaine homogénéité entre les propriétés mécaniques hors plan mais aussi dans le plan. Enfin, la possibilité de produire des préformes complexes permet l'utilisation de cette technologie pour la réalisation de renforts pour pièces finales de géométries spéciales.

## VIII. Applications du tressage dans le domaine des composites/matériaux avancés

Concernant la production de préformes fibreuses pour composites, le tressage fait partie des technologies présentant un ratio coût/rentabilité les plus avantageux, ainsi qu'une capacité accrue à s'adapter à de grandes variations de paramètres. Cette gamme étendue de possibilités de paramétrisation du procédé permet d'accéder à un type de textile, les tresses, avec des caractéristiques différentes et très variées, et une possibilité de produire des formes très différentes. D'un point de vue économique, la faible perte matière mise en jeu lors du procédé de tressage, sa vitesse de production, (plusieurs centaines de mètres à l'heure au maximum), en font une technologie appréciable dans le domaine des composites surtout quand des fibres à haute valeur ajoutée sont utilisées[151][152].

Les tresses sont performantes en termes de possibilité de drapage, d'intégrité structurelle des fils, de résistance aux dommages, et de bas coût de production[153].

La cinématique du tressage et ses différentes capacités productives a été étudiée depuis une soixantaine d'années pour satisfaire une forte demande industrielle [154]–[156].

Le principal facteur de variation entre les préformes, à savoir l'angle de tressage a un impact direct en terme de résistance mécanique [157]. Les préconisations les plus souvent suivies sont celles qui proposent l'obtention d'une structure équilibrée, la plus facilement intégrable dans des applications industrielles et par conséquent la production d'une tresse à angle de tressage de 45°[158]. Cet angle particulier est prisé par les industriels et présente des avantages évidents en terme de répartitions de contraintes [159].

Historiquement, la volonté d'incorporer des fils droits dans une tresse biaxiale traditionnelle est née de la volonté de Boeing [160]. En effet l'adjonction de fils droits va permettre pour la production de structures sur-tressées de garantir une certaine stabilité dimensionnelle à l'ensemble lors de manipulations postérieures. Daimler AG a développé sur ce principe du sur-tressage. Pour ce faire, ils ont relié cinématiquement une machine de tressage 2D circulaire de grande dimension et un bras robotisé [161]. Ce bras va permettre le surtressage de mandrins de formes complexes à sections évolutives. Pour l'obtention de la tresse triaxiale, les bobineaux vont parcourir un chemin de came qui va passer autour des tubes portant les fils droits. Un système de tirage vient sortir la structure hors de la zone de production. Si la géométrie à obtenir est complexe, rien n'empêche de venir couper la tresse produite et de la draper sur la forme complexe, comme celle de la figure 53.

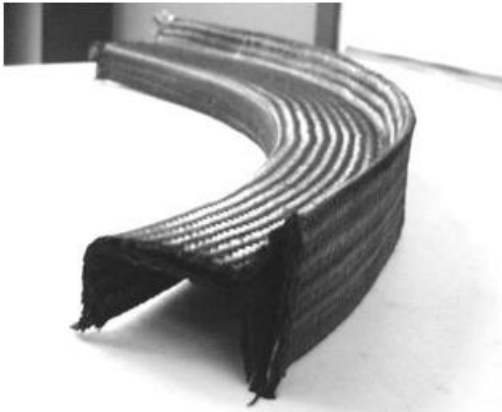


Figure 53 : Surtressage et mise en forme de tresses [160]

Dans le but d'obtenir des préformes encore plus complexes, le procédé de tressage peut être combiné à d'autres technologies. C'est le cas du système proposé par Uozumi [162], qui couple un procédé de tressage puis chauffage pour produire en continu des composites à base de renforts tressés. C'est un peu le principe de la pultrusion qui est appliqué ici, où l'on vient après production d'une tresse 2D triaxiale, la faire passer dans un négatif qui lui fait prendre la forme désirée et dans un bain de résine pour l'imprégner. Une cuisson est faite en continu pour obtenir la pièce finale. La réalisation en « one-shot » d'une pièce composite permet d'allier aux capacités productives d'un métier à tresser, un procédé en continu qui permet d'augmenter significativement les cadences de production, en supprimant des étapes qu'il fallait préalablement faire à la main par un opérateur.

Toujours pour l'industrie aéronautique, une technologie a été développée qui permet après tressage, une déformation jusqu'au profil souhaité de la préforme. Un renfort par piquage est ajouté pour augmenter la résistance inter laminaire. Des matériaux d'âme (type mousse, nid d'abeille,...) peuvent être insérés pour obtenir des sections particulières. Le grand avantage de cette technologie est l'insertion de matière dans une direction non privilégiée dans le procédé standard. L'augmentation du taux de fibres en est une résultante directe, qui va de pair avec un accroissement des propriétés mécaniques de la préforme finale.

Pour des applications plus particulières, où certains requis géométriques sont imposés, beaucoup de brevets ont été déposés depuis les années 1980. Par exemple, une technologie produisant des tresses triaxiales sans ondulations entre les nappes de fils de biais est proposée par Klein [163], figure 54. Une préforme tressée triaxiale 2D présentant une non ondulation des fils axiaux est aussi possible avec cette technologie. Un des avantages de cette technologie est de minimiser les efforts de cisaillement dans la tresse en supprimant cette ondulation des fils les uns par rapport aux autres.

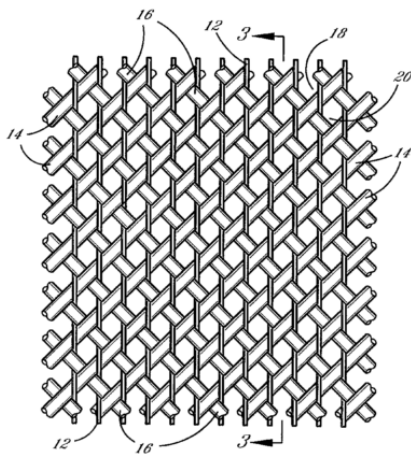


Figure 54 : Brevet déposé par Klein [163]

Comme nous venons de le voir, un des domaines les plus consommateurs de préformes tressées est celui des composites. Cependant, une large gamme d'autres applications est décrite dans la littérature : de sutures chirurgicales, à la production de lacets ou de câbles, cordages.

Tous ces produits industriellement utilisables présentent un angle de tressage compris entre 40 et 60° par rapport à l'axe de production. Les industries préférant s'orienter vers des produits plus « équilibrés » présentant des orientations (0,90 et 45°) [164].

En architecture, les tresses que l'on retrouve sont surtout des tresses métalliques. Elles servent le plus souvent à remplacer des barres de soutien métallique. Par exemple, dans les structures modernes, on voit fleurir des câbles en acier tressé pour garantir une résistance aux sollicitations de tractions. Le nid d'oiseau (piscine olympique de Pékin) est sur ce modèle recouverte par une sorte de bâche en polymère translucide qui est recouverte d'un entremêlement de tresses qui permettent une stabilité de l'ensemble. Le stade de football du Bayern de Munich est basé sur la même technologie. Cela donne une structure ajourée pour un gain de masse permettant la reprise des efforts mécaniques subis par la structure[165].

Dans le domaine des sports, une des applications majeures relève du domaine des cordages à usage du nautisme ou pour la protection individuelle (alpinisme ou escalade). Pour ce dernier domaine spécifique, les cordes sont en fait une âme d'un matériau élastique pour l'absorption des chocs en dynamique, recouverte d'une tresse surtressée qui vient garantir à l'ensemble une intégrité, une résistance à l'abrasion et une capacité de déformation non négligeable.

Citons également des innovations [166] pour des applications de cordage pour raquette. Mais aussi comme réel élément de reprise des efforts mécaniques, comme avec les manches de raquettes de badminton.

Le domaine de l'automobile est aussi un domaine où l'on peut rencontrer des tresses. Mais ces dernières sont utilisées pour des sollicitations très particulières. Il s'agit des absorbeurs de chocs, où l'on cherche une dégradation progressive du matériau en vue de l'absorption d'un maximum d'énergie[167] [168], figure 55. Ces structures dites alors « sacrificielles » autorisent pour une masse relativement faible à avoir une raideur contrôlée dans plusieurs directions de l'espace. [169]



Figure 55 : Structure sacrificielle en tresse [167]

Le domaine de la câblerie [76] à applications techniques est aussi demandeur de tresses. En effet, la grande gamme de production possible et la variété de matériaux utilisables dans la confection de ces câbles permettent à la tresse d'être une technologie intéressante[170]. Par ailleurs certaines innovations technologiques ont permis de gommer certains défauts que les tresses pouvaient avoir. Par exemple, Hamada a proposé une nouvelle technique pour produire des produits tresses tubulaires plus résistante à la délamination[171].

Dans le domaine aéronautique, la tresse a fait son apparition et est de plus en plus utilisée. Que ce soit comme pièces de renforts structurels ou encore de gaines de protection pour les câblages [172]–[174].

Les tresses de par leur possibilité de section évolutive trouvent aussi comme champ d'application le domaine du spatial. Effectivement, des pièces comme des tuyères de propulsion, de forme d'ogive, présentent une géométrie particulière qu'il est assez compliqué à faire par des systèmes de production de préformes de type tissage. Le surtressage se pose donc en alternative technologique qui répond parfaitement au besoin. Plusieurs passages de surtressage dans ce cas sont nécessaires, pour apporter à la fois le volume désiré mais aussi la résistance thermique et mécanique de la préforme par l'empilement de couches de tresses de matériaux à haute valeur ajoutée (carbone, et/ou céramique) [20], [175].

Les tresses peuvent donc servir de matrice dans les matériaux composites classiques, mais aussi comme matériau de renforcement du béton. On trouve en effet, un certain nombre de bétons utilisés pour des applications de BTP bien particulières, où l'ajout de fibres textiles ne suffit pas à obtenir la résistance mécanique voulue. Pour atteindre ce niveau d'exigence, il faut directement intégrer dans le béton des préformes textiles [176]. Et pour répondre à certaines contraintes bien spécifiques, la tresse est utilisée.

Les tresses peuvent donc être utilisées comme préformes de grandes dimensions. Mais on peut aussi les retrouver dans des domaines microscopiques. Les tresses sont utilisées dans le domaine du biomédical [177], avec comme applications particulières, les sutures[112], [178]. Ce sont des domaines sensibles, qui en plus de la taille réduite des ouvrages demande des spécifications très pointues. La résistance en traction, la possibilité de courbure ou encore l'élasticité du produit final doit être compatible avec un matériel particulier, la peau humaine. De fait, les requis très drastiques peuvent être remplis par les tresses. Toujours dans le domaine du médical, un autre composant du corps humain peut se voir remplacé par les tresses, les ligaments. La production de ligaments artificiels en tresse est de nos jours quelque chose de courant[179], [180], figure 56.

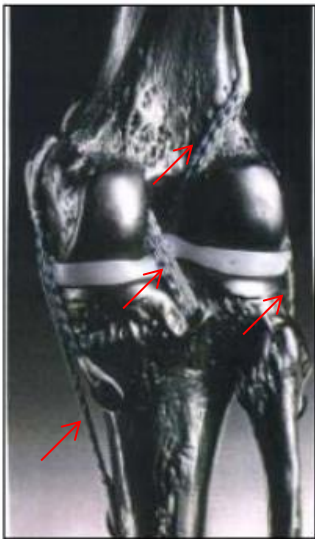


Figure 56 : Genou et emplacement des tresses [180]

Le médical est un domaine porteur pour les tresses, car la très grande variabilité de formes et de sections productibles va permettre de répondre à de multiples demandes. Les réseaux artériels peuvent par exemple être remplacés par des tresses [181].

La possibilité de produire une structure avec des renforts fibreux positionnés suivant la réponse aux sollicitations variées que l'on veut lui donner nous est autorisée par ces technologies qui viennent d'être présentées. Outre les paramètres propres à la structure (angle de tressage, nombre de fils), la matière utilisée pour la production des tresses va aussi beaucoup influencer sur les propriétés mécaniques des tresses. Dans le cadre de ce travail, trois matières ont été principalement utilisées :

- Une fibre aramide,
- Une fibre polyéthylène haute densité, et,

- Une fibre polymère à cristaux liquides.

Dont les caractéristiques et propriétés vont être introduites dans le paragraphe suivant.

## IX. Caractéristiques et propriétés des renforts fibreux

### A. Fibre Aramide (Twaron)

Les fibres de type aramides sont issues de la polymérisation entre diamines aromatiques et dichlorures d'acides aromatiques. Le résultat de cette polymérisation est l'obtention de groupements amides à 85%. Le placement de ces groupements à l'intérieur de la chaîne moléculaire permet de diviser les fibres aramides en deux catégories : les méta et les para-aramides, dont les caractéristiques sont référencées dans le tableau 2. On retrouve le plus souvent ces matières sous la forme de multi-filaments, mais de l'aramide en pulpe ou en fibres coupées existent aussi.

Tableau 2 : Propriétés mécaniques des fibres para-aramides [182].

Caractéristiques	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149	Twaron	Technora
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1440	1450	1470	1440	1390
Module de Young $E_f$ (GPa)	60	120	160	60	90
Contrainte à la rupture $\sigma$ (MPa)	3000	3000	2400	2600	2800
Allongement à la rupture (%)	3.6	1.9	1.5	3	4

Derrière le nom général d'aramide, ces fibres sont plus connues sous des noms tels que Kevlar ou Nomex, qui sont des noms commerciaux déposés par la société Dupont de Nemours[183].

Les fibres méta-aramide sont des fibres qui présentent principalement des propriétés thermiques. En effet, sous atmosphère normale, les méta-aramides sont presque ininflammables. Les fibres para-aramide ont pour propriétés principales une ténacité et une rigidité élevée. Le Nomex est une fibre méta-aramide possédant ainsi principalement des propriétés thermiques : elle est quasiment ininflammable sous des taux usuels de dioxygène. Le kevlar quant à lui, est une fibre para-aramide très tenace et rigide. Dans notre application, les fibres aramides utilisées seront des fibres para-aramide de type Twaron.

Les principaux avantages notables de cette matière sont une masse volumique assez faible pour des fibres hautes performances, le tout avec des performances en traction dans le sens des fibres performantes (de l'ordre de celle du carbone). Cependant, dans le plan perpendiculaire au faisceau de fibres, on peut noter une décroissance nette des performances en terme de cisaillement, de flexion ou encore de compression[184]. Ces propriétés des fibres aramides en font un très bon candidat dans toutes les applications balistiques ou de résistance à l'impact.

### B. Fibre PEHD (Spectra)

La fibre PEHD (polyéthylène haute densité) se caractérise par une masse molaire très élevée qui implique que ce polymère montre un faible indice de fluidité, et qui peut poser problème pour sa mise en œuvre. Effectivement, sa mise en œuvre, par étirage principalement, est quelque peu difficile à cause de la forte viscosité du polymère. Mais, quand cela est possible, le procédé de mise en œuvre permet l'obtention de fibres de module très élevé.

Structurellement, les chaînes macromoléculaires du PEHD sont très longues, et c'est ce qui va permettre les transferts de charges à la chaîne principale du polymère de façon efficace et répartie. De fait, le matériau final est très résistant. En dehors de ces affinités avec certains produits chimiques, son taux de reprise légale est très faible, de même que son coefficient de frottement,



ainsi que sa résistance à l'abrasion. Au niveau du coefficient de frottement, nous sommes dans des gammes comparables à celui des polymères fluorés ou au Teflon. Un autre de ces atouts est sa masse volumique qui présente une valeur inférieure à 1. Ce qui en fait un matériau qui flotte, propriété remarquable.

Cependant, sa configuration macromoléculaire en fait un polymère assez sensible aux effets thermiques. Son point de fusion est atteint pour une température d'environ 130°C. Mais une certaine dégradation de ses propriétés mécaniques est notable dès 90°C.

Deux principales fibres de PEHD sont connues sur le marché actuel, ce sont le Spectra et le Dyneema. Le Spectra est un produit américain lancé en 1983 par AlliedSignal. Et le Dyneema a été développé aux Pays-Bas par DSM au début des années 1990.

Au niveau applicatif, les fibres de PEHD sont principalement utilisées dans des domaines assez spécifiques, comme la corderie (où leur densité faible et leur faible coefficient de frottement permettent une facilité de mise en œuvre, une réduction des dépenses énergétiques), dans le domaine des filets, où le rapport poids/résistance en font des candidats non négligeables ; en équipement de protection, que ce soit dans le domaine de la résistance à la coupure ou en protection balistique, où leur résistance à l'abrasion et leur durabilité leur offre une place de choix. Le domaine des sports est aussi un gros consommateur de PEHD, notamment l'escalade sous forme de sangles, les protections d'escrime, la voile, et dans différentes cordes où légèreté, résistance à l'abrasion et aux UV doivent être alliés.

Les principales caractéristiques de fibres de Spectra sont référencées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Différentes caractéristiques de Spectra

Caractéristiques	Spectra HT	Spectra S-900	Spectra S-1000
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	970	970	970
Module de Young $E_f$ (GPa)	110	90	100
Contrainte à la rupture $\sigma$ (MPa)	3250	2180	3150
Allongement à la rupture (%)	3,2	3,7	3,1

### C. Fibre polymère à cristaux liquides (Vectran)

Le Vectran est une marque commerciale d'un filament haute performance issu d'un polymère à cristaux liquides. Le Vectran a pour caractéristique une très grande résistance, comparable à cinq fois celle de l'acier et plus de dix fois celle de l'aluminium. Le Vectran peut donc être reconnu comme une fibre présentant un haut module, une grande résistance à l'abrasion, des capacités remarquables en flexion, une résistance aux bases et aux acides, une résistance au cisaillement hors-plan.

Historiquement, le Vectran a été découvert par Celanese Acetate LLC, mais est maintenant produit par Kuraray. Chimiquement, c'est un polymère aromatique résultant de la polycondensation d'un acide 4-hydroxybenzoïque et d'un acide 6-hydroxynaphthalène-2-carboxylique.

Les fibres de Vectran sont utilisées pour la production de câbles, cordes, et comme structures fibreuses pour applications composites. Par exemple, le Vectran a été utilisé dans des structures intégrées aux combinaisons spatiales des astronautes. Ou encore dans les amortisseurs de chocs à l'atterrissage des robots d'exploration en mission sur Mars.

Les applications spatiales sont très consommatrices de Vectran, notamment grâce à ses hautes capacités de résistance thermique, où il entre comme composant privilégié pour tout ce qui est bouclier thermique lors des phases de passage dans l'atmosphère. D'autres applications plus insolites sont à mettre au crédit de cette fibre comme des bouchons pour obstruer les tunnels de métro de

New York en prévision d'inondations. Le monde du sport utilise aussi un peu le Vectran comme Yonex qui produit certaines raquettes ou cordages en cette matière.

Tableau 4 : Différentes configurations et propriétés de Vectran

Caractéristiques	Vectran NT	Vectran HT	Vectran UM
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1400	1400	1400
Module de Young $E_r$ (GPa)	85	88	82
Contrainte à la rupture $\sigma$ (MPa)	3200	3150	3000
Allongement à la rupture (%)	3,8	3,2	2,8

## X. Conclusions

Les structures 2D ou les structures 3D, qu'elles soient produites en « one-shot » ou qu'elles soient un assemblage de structures 2D, présentent des propriétés mécaniques et géométriques très diverses. Celles-ci nous permettent donc d'avoir une sorte de catalogue dans lequel on peut venir avec un cahier des charges défini, choisir la technologie la plus à même d'y répondre. Une présentation des différentes technologies permettant de mettre en forme ces structures a été proposée. La présentation de ces différents procédés a laissé place à une exposition plus complète de la tresse, puis des différentes matières utilisées pour produire ces structures. Dans le chapitre 2, le procédé de tressage sera exposé à travers une analyse fonctionnelle. Puis les différents paramètres influant sur les propriétés des tresses seront discutés. Et enfin, la caractérisation de ces différents paramètres fera l'objet d'une présentation à travers les différents protocoles qui seront utilisés pour parvenir à cette caractérisation.

## Bibliographie du chapitre 1

- [1] M. Chatain, "Matériaux composites : présentation générale Matériaux composites : présentation générale," vol. 33, no. 0, 2016.
- [2] J.-V. Riscato, "Optimisation de l'architecture des fils dans une structure textile 3D pour le renforcement de pièces composites," , Mémoire de thèse, Université de Lille 1, 2012.
- [3] R. Alagirusamy, R. Fanguero, V. Ogale, and N. Padaki, "Hybrid yarns and textile preforming for thermoplastic composites". *Indian Journal of fiber and textile research*, 2010.
- [4] I. Maatouk, S. Msahli, M. Zidi, and F. Sakli, "Study of yarn twist angle using numerical simulation," *J. Text. Inst.*, vol. 105, no. 8, pp. 814–820, 2014.
- [5] H. Gu and M. Miao, "Optimising fibre alignment in twisted yarns for natural fibre composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 48, no. 24, pp. 2993–3002, 2013.
- [6] S. A. Grishanov, S. V Lomov, T. Cassidy, and R. J. Harwood, "The Simulation of the Geometry of a Two-component Yarn Part II : Fibre Distribution in the Yarn Cross-section," *J. Text. Inst.*, vol. 4, no. 4, pp. 352–372, 1997.
- [7] F. K. Ko and G. W. Du, "Textile Preforming," *Handb. Compos.*, pp. 397–424, 1998.
- [8] R. Kamiya, B. A. Cheeseman, P. Popper, and T.-W. Chou, "Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: a review," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 33–47, Jan. 2000.
- [9] S. Lee and J. Lee, *Handbook of composite reinforcements*. Wiley, John&Sons, Incorporated, 1992.
- [10] K. Fukuta, E. Aoki, and Y. Nagatsuka, "3D fabrics for structural composites," in *15th textile Res. Symp.*, 1984.
- [11] G. Nemoz, "Textures textiles tridimensionnelles," *Tech. l'ingenieur*, vol. am5122, 2003.
- [12] N. Khokar, "Noobing: A Nonwoven 3D Fabric-forming Process Explained," *J. Text. Inst.*, vol. 93, no. 1, pp. 52–74, 2002.
- [13] M. Healey and R. Johnsen, "Non-crimp fabrics," Brevet N°US2004/0113317 A1, 2004.
- [14] B. Heath, W. George, and A. Ann, "Non-crimp fabrics," Brevet N°WO2002/057527, 2001.
- [15] R. Wockatz, "Stitched multiaxial non-crimp fabrics," Brevet N°US8613257 B2, 2013.
- [16] M. S. Amabile, V. Eckers, and T. Gries, "Draping of non-crimp fabrics for fibre reinforced composites," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 3, no. SUPPL. 1, pp. 647–650, 2010.
- [17] G. A. Bibo, P. J. Hogg, and M. Kemp, "Mechanical characterisation of glass- and carbon-fibre-reinforced composites made with non-crimp fabrics," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 9–10, pp. 1221–1241, 1997.

- [18] N. M. Barkoula, B. Alcock, N. O. Cabrera, and T. Peijs, "Fatigue properties of highly oriented polypropylene tapes and all-polypropylene composites," *Polym. Compos.*, vol. 16, no. 2, pp. 101–113, 2008.
- [19] H. Kong, A. P. Mouritz, and R. Paton, "Tensile extension properties and deformation mechanisms of multiaxial non-crimp fabrics," *Compos. Struct.*, vol. 66, no. 1–4, pp. 249–259, 2004.
- [20] S. Schmidt, S. Beyer, H. Knabe, H. Immich, R. Meistring, and a. Gessler, "Advanced ceramic matrix composite materials for current and future propulsion technology applications," *Acta Astronaut.*, vol. 55, no. 3–9, pp. 409–420, 2004.
- [21] M. Decrette, M. Sabri, J.-F. Osselin, and J.-Y. Drean, "Jacquard UNIVAL 100 parameters study for high-density weaving optimization," *J. Ind. Text.*, vol. 45, no. 6, pp. 1603–1618, 2016.
- [22] M. Lefebvre, F. Boussu, and D. Coutellier, "Influence of high-performance yarns degradation inside three-dimensional warp interlock fabric," *J. Ind. Text.*, vol. 42, no. 4, pp. 475–488, 2012.
- [23] F. Boussu, "The use of warp interlock fabric inside textile composite protection against ballistic impact," *Text. Res. J.*, vol. 81, no. 4, pp. 344–354, 2011.
- [24] M. Decrette, "Tissage Jacquard : étude de paramètres et optimisation du tissage 3D haute densité," 2014.
- [25] M. Lefebvre, F. Boussu, D. Coutellier, and D. Vallée, "Influence of the geometrical structures and resin rate inside composites structures on the ballistic behaviour under high velocity impact," *Mech. nano, micro macro Compos. Struct.*, 2012.
- [26] N. Trifigny, "Mesure in-situ et connaissance des phénomènes mécaniques au sein d'une structure tissée multicouches," Mémoire de thèse, Université Lille 1, 2013.
- [27] B. Provost, "Etude et évaluation d'une solution composite à renfort tissé interlock pour la protection balistique de véhicule," Mémoire de thèse, Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS, 2013.
- [28] J. Vilfayeau, "Modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux pour matériaux composites," Mémoire de thèse, Université de Lyon, 2014.
- [29] A. Rawal, H. Saraswat, and R. Kumar, "Tensile response of tubular braids with an elastic core," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 47, no. 1, pp. 150–155, 2013.
- [30] S. C. Ray, *Fundamentals and Advances in Knitting Technology*. Woodhead publishing, 2012.
- [31] D. Spencer, *Knitting technology*. Woodhead Publishing, 2001.
- [32] L. Caramaro, *Textiles à usage technique*. Techniques de l'ingénieur, 2006.
- [33] K. H. Leong, S. Ramakrishna, Z. M. Huang, and G. a. Bibo, "Potential of knitting for engineering composites - a review," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 31, no. 3, pp. 197–220, 2000.

- [34] A. Rawal, H. Saraswat, and A. Sibal, "Tensile response of braided structures: a review," *Text. Res. J.*, vol. 85, no. 19, pp. 2083–2096, 2015.
- [35] H. Saraswat, A. Rawal, and R. Singh, *Tensile behaviour of multi-layered braided structures*, vol. 49, no. 18. Elsevier Ltd, 2014.
- [36] L. Gornet, "Généralités sur les matériaux composites," 2011.
- [37] A. P. Mouritz and B. N. Cox, "A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 6, pp. 709–728, 2010.
- [38] L. Tong, a. P. Mouritz, and M. Bannister, "3D Woven Composites," *3D Fibre Reinf. Polym. Compos.*, pp. 107–136, 2002.
- [39] P. B. Stickler, M. Ramulu, and P. S. Johnson, "Experimental and numerical analysis of transverse stitched T-joints in bending," *Compos. Struct.*, vol. 50, no. 1, pp. 17–27, 2000.
- [40] A. P. Mouritz and B. N. Cox, "A mechanistic approach to the properties of stitched laminates," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–27, 2000.
- [41] M. Koziol, "Effect of thread tension on mechanical performance of stitched glass fibre-reinforced polymer laminates - experimental study," *J. Compos. Mater.*, vol. 47, no. 16, pp. 1919–1930, 2012.
- [42] M. Koziol, "Experimental study on the effect of stitch arrangement on mechanical performance of GFRP laminates manufactured on a basis of stitched preforms," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 9, pp. 1067–1078, 2012.
- [43] K. Vallons, G. Adolphs, P. Lucas, S. V. Lomov, and I. Verpoest, "The influence of the stitching pattern on the internal geometry, quasi-static and fatigue mechanical properties of glass fibre non-crimp fabric composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 56, pp. 272–279, 2014.
- [44] A. Henao, M. Carrera, A. Miravete, and L. Castejon, "Mechanical performance of through-thickness tufted sandwich structures," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 9, pp. 2052–2059, 2010.
- [45] G. Dell'Anno, D. D. Cartié, I. K. Partridge, and A. Rezai, "Exploring mechanical property balance in tufted carbon fabric/epoxy composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 11, pp. 2366–2373, 2007.
- [46] D. D. R. Cartié, G. Dell'Anno, E. Poulin, and I. K. Partridge, "3D reinforcement of stiffener-to-skin T-joints by Z-pinning and tufting," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 73, no. 16, pp. 2532–2540, 2006.
- [47] L. Liu, T. Zhang, P. Wang, X. Legrand, and D. Soulat, "Influence of the tufting yarns on formability of tufted 3-Dimensional composite reinforcement," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 78, pp. 403–411, 2015.
- [48] D. Jetavat, K. Jan, S. S. Roy, and B. S. Sugun, "Development of 2D / 3D Braiding Techniques for Multi-axial Preforming," *Manuscrit de thèse, Univ. Manchester*, 2015.

- [49] P. Chang, a. P. Mouritz, and B. N. Cox, "Flexural properties of z-pinned laminates," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 2, pp. 244–251, 2007.
- [50] T. Koh, M. Isa, P. Chang, and a. Mouritz, "Improving the structural properties and damage tolerance of bonded composite joints using z-pins," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 26, pp. 3255–3265, 2012.
- [51] P. Chang, a. P. Mouritz, and B. N. Cox, "Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 10, pp. 1501–1513, 2006.
- [52] A. P. Mouritz, "Compression properties of z-pinned composite laminates," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 15–16, pp. 3110–3120, 2007.
- [53] D. D. R. Cartié, M. Troulis, and I. K. Partridge, "Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 6, pp. 855–861, 2006.
- [54] A. Nanayakkara, S. Feih, and A. P. Mouritz, "Experimental impact damage study of a z-pinned foam core sandwich composite," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 14, no. 4, pp. 469–486, 2012.
- [55] A. P. Mouritz, B. M., F. P.J, and L. K.H, "Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites," *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 30, no. 12, pp. 1445–1461, Dec. 1999.
- [56] G. Du and F. Ko, "Analysis of Multiaxial Warp-Knit Preforms Composite Reinforcement for," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 56, pp. 253–260, 1996.
- [57] N. Khokar and E. Peterson, "An Experimental Uniaxial Noobing Device: Construction, Method of Operation, and Related Aspects," *J. Text. Inst.*, vol. 90, no. 2, pp. 225–242, 1999.
- [58] N. Khokar, "3D-Weaving: Theory and Practice," *J. Text. Inst.*, vol. 92, no. 2, pp. 193–207, 2001.
- [59] J. Hu, "1 - Introduction to three-dimensional fibrous assemblies," in *3-D Fibrous Assemblies*, J. Hu, Ed. Woodhead Publishing, 2008, pp. 1–32.
- [60] M. Ansar, W. Xinwei, and Z. Chouwei, "Modeling strategies of 3D woven composites: A review," *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 8, pp. 1947–1963, Jul. 2011.
- [61] S. Lomov, I. Verpoest, and F. Robitaille, "1 - Manufacturing and internal geometry of textiles," in *Design and Manufacture of Textile Composites*, A. C. Long, Ed. Woodhead Publishing, 2005, pp. 1–61.
- [62] F. Boussu, I. Cristian, and S. Nauman, "General definition of 3D warp interlock fabric architecture," *Compos. Part B Eng.*, vol. 81, pp. 171–188, 2015.
- [63] J. Hu, *3D fibrous assemblies*. Woodhead Publishing, 2008.
- [64] F. Ko and D. Hartman, "Impact behaviour of 2D and 3D glass-epoxy composites," *Sampe Journal*, pp. 26–30, 1986.

- [65] B. N. Cox, M. S. Dadkhah, and W. L. Morris, "On the tensile failure of 3D woven composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 27, no. 6, pp. 447–458, 1996.
- [66] T. D. Kostar and T. W. Chou, "Process simulation and fabrication of advanced multi-step three-dimensional braided preforms," *J. Mater. Sci.*, vol. 29, no. 8, pp. 2159–2167, 1994.
- [67] B. N. Cox, M. S. Dadkhah, W. L. Morris, and J. G. Flintoff, "Failure mechanisms of 3D woven composites in tension, compression, and bending," *Acta Metall. Mater.*, vol. 42, no. 12, pp. 3967–3984, 1994.
- [68] S. Rudov-Clark, a. P. Mouritz, L. Lee, and M. K. Bannister, "Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 10, pp. 963–970, 2003.
- [69] Xiaogang Chen, L. W. Taylor, and L.-J. Tsai, "An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites," *Text. Res. J.*, vol. 81, pp. 932–944, 2011.
- [70] L. Tong, A. P. Mouritz, and M. K. Bannister, *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*. Elsevier, 2002.
- [71] N. Khokar, "A method and means for textile manufacture," Brevet N°WO2001066840 A3, 2002.
- [72] R. Florentine, "Magnaweave process-From fundamentals to applications," *Text. Res. J.*, no. October, pp. 1–16, 1983.
- [73] M. Kowalski, "Développement de croisements de raidisseurs composites : Technologie , modélisation et optimisation .," Université de Lille 1, 2015.
- [74] "Statue tressée." [Online]. Available: <https://www.wien.info/fr/sightseeing/museums-exhibitions/top/museum-natural-history>.
- [75] S. Lee, *Handbook of composite reinforcements*. 1993.
- [76] H. A. McKenna, J. W. S. Hearle, and N. O'Hear, "Introduction to fibre ropes," *Handb. Fibre Rope Technol.*, pp. 1–34, 2004.
- [77] M. Elizabeth, "Analytical methods and prehistoric textiles," *Soc. Am. Archaeol.*, vol. 43, no. 1, pp. 89–96, 1978.
- [78] F. K. Ko, C. M. Pastore, and A. A. Head, *Atkins & Pearce Handbook of Industrial Braiding*. Atkins & Pearce, 1989.
- [79] I. Emery, *The Primary Structures of Fabrics: An Illustrated Classification*. Thames & Hudson, 2009.
- [80] T. S. Ashton, *The industrial revolution 1760-1830*. Oxford Univ Pr, 1962.
- [81] DIN 60000, "Textiles, basic terms and definitions." 1969.

- [82] S. Adanur and T. Liao, "3D modeling of textile composite preforms," *Compos. Part B Eng.*, vol. 29, pp. 787–793, 1998.
- [83] Y. Jiang and X. Chen, "Geometric and algebraic algorithms for modelling yarn in woven fabrics," *J. Text. Inst.*, vol. 96, no. 4, pp. 237–245, 2005.
- [84] T. Liao and S. Adanur, "3D structural simulation of tubular braided fabrics for net-shape composites," *Text. Res. J.*, vol. 70, no. 4, pp. 297–303, 2000.
- [85] W. . Douglass, *Braiding and braiding machinery*. Eindhoven : N.V. Uitgevesmaatschappij Centrex, 1964.
- [86] US Department of Defense, "Composite Materials Handbook Volume 1: Polymer Matrix Composites - Guidelines for Characterisation of Structural Materials," *Compos. Mater. Handb. Ser.*, vol. 1, no. June, pp. 1–586, 2002.
- [87] D. J. Branscomb, R. M. Broughton, and P. Schwartz, "A machine vision and sensing system for braid defect detection, diagnosis and prevention during manufacture," , Manuscrit de thèse, Université d'Auburn, 2007.
- [88] W. Krenkel, "Cermic matrix composites : Fiber reinforced ceramics and their applications," 2008.
- [89] B. Strong, *Fundamentals of composites manufacturing : materials methods, and applications, second edition*. SME, 2008.
- [90] A. A. Baker, S. Dutton, and D. Kelly, *Composite materials for aircraft structures*. Livre, seconde édition, 2004.
- [91] P. Potluri, A. Rawal, M. Rivaldi, and I. Porat, "Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3D preforms," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 6, pp. 481–492, Jun. 2003.
- [92] M. Sakaguchi, A. Nakai, H. Hamada, and N. Takeda, "The mechanical properties of unidirectional thermoplastic composites manufactured by a micro-braiding technique," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 5, pp. 717–722, 2000.
- [93] D. Brunnschweiler, "Braids and Braiding," *J. Text. Inst. Proc.*, vol. 44, no. 9, pp. P666–P686, 1953.
- [94] N. Jenkins, "Braiding machine," Brevet N°254822, 1882.
- [95] N. Lombard, "Braiding machine," Brevet N°429136, 1890.
- [96] P. Hudson, D. Kness, and A. Clapp, *Joseph's introductory textile science*, vol. 1. 1993.
- [97] Kliot, *The stitches of bobbin lace : structure and classification*. 1973.
- [98] S. Adanur, *Handbook of industrial textiles*. Wellington Sears, 1995.
- [99] Y. Kyosev, *Braiding Technology for Textiles*. Woodhead Publishing, 2015.



- [100] G. Krenzler, "LACE MAKING MACHINE," Brevet N°979770, 1910.
- [101] H. Cobb, "Braided fabric for hose," Brevet N°1104777, 1914.
- [102] A. Crossley, "Braiding machine," Brevet N°2788700, 1957.
- [103] G. Némoz, L. Dréano, and D. Bigaud, "3D braided preforms for shaped composite material," *Eur. Conf. Spacecr. Struct.*, vol. 1, 2005.
- [104] R. Rahm, "Braiding machine," Brevet N°933339, 1909.
- [105] P. Potluri, "Braiding," in *Wiley encyclopedia of composites*, 2012, pp. 1–15.
- [106] K. Birkefeld, M. Röder, T. von Reden, M. Bulat, and K. Drechsler, "Characterization of Biaxial and Triaxial Braids: Fiber Architecture and Mechanical Properties," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 19, no. 3–4, pp. 259–273, Feb. 2011.
- [107] H. Nishimoto, A. Ohtani, A. Nakai, and H. Hamada, "Prediction Method for Temporal Change in Fiber Orientation on Cylindrical Braided Preforms," *Text. Res. J.*, vol. 80, no. 9, pp. 814–821, 2009.
- [108] G. Guyader, A. Gabor, and P. Hamelin, "Analysis of 2D and 3D circular braiding processes : Modeling the interaction between the process parameters and the pre-form architecture," *MAMT*, vol. 69, pp. 90–104, 2013.
- [109] C. Ayranci and J. P. Carey, "Predicting the longitudinal elastic modulus of braided tubular composites using a curved unit-cell geometry," *Compos. Part B Eng.*, vol. 41, no. 3, pp. 229–235, Apr. 2010.
- [110] B. Dauda, S. O. Oyadiji, and P. Potluri, "Characterising mechanical properties of braided and woven textile composite beams," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 16, no. 1, pp. 15–31, 2009.
- [111] P. Potluri, A. Manan, M. Francke, and R. J. Day, "Flexural and torsional behaviour of biaxial and triaxial braided composite structures," *Compos. Struct.*, vol. 75, no. 1–4, pp. 377–386, Sep. 2006.
- [112] A. Rawal, A. Sibal, H. Saraswat, and V. Kumar, "Geometrically controlled tensile response of braided sutures," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 48, pp. 453–456, 2015.
- [113] T.-W. Chou, *Microstructural Design of Fiber Composites*. Cambridge University Press, 1992.
- [114] P. J. Falzod and I. Herszberg, "Mechanical Performance of 2-D Braided Carbon / Epoxy Composites \*," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 3538, no. 97, pp. 253–265, 1998.
- [115] A. Fujita, Z. Maekawa, H. Hamada, and A. Yokoyama, "Mechanical Behavior and Fracture Mechanism in Flat Braided Composites. Part 1: Braided Flat Bar," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 11, no. 6, pp. 600–617, 1992.
- [116] T. Ito, A. Ohtani, A. Nakai, and H. Hamada, "Mechanical Properties of Carbon Fiber Braided Composites with CNT," vol. 1.

- [117] Y. Akiyama, Z. Maekaa, and H. Hamada, "Braid and Braiding mehod," Brevet N°5385077, 1995.
- [118] A. Head, "High coverage area braiding material for braided structures," Brevet N°6112634, 2000.
- [119] D. Bigaud, L. Dréano, and P. Hamelin, "Models of interactions between process, microstructure and mechanical properties of composite materials—a study of the interlock layer-to-layer braiding technique," *Compos. Struct.*, vol. 67, no. 1, pp. 99–114, Jan. 2005.
- [120] A. Bogdanovich, D. Mungalov, M. Drive, and N. Carolina, "Recent Advancements in Manufacturing 3-D Braided Preforms and Composites," *Sampe*, no. July 2002, pp. 61–72, 2003.
- [121] Y. Q. Wang and A. S. D. Wang, "On the topological yarn structure of 3D rectangular and tubular braided preforms," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 51, pp. 575–586, 1994.
- [122] G.-W. Du and F. K. Ko, "Unit cell geometry of 3-D braided structures," *Journal of reinforced plastics and composites*, no. July 1993, pp. 752–768, 1993.
- [123] A. Rawal, "Geometrical Modeling of the Yarn Paths in Three-dimensional Braided Structures," *J. Ind. Text.*, vol. 35, no. 2, pp. 115–135, 2005.
- [124] A. Rawal, S. Gupta, H. Saraswat, and A. Sibal, "Geometrical modeling of near-net shape braided preforms," *Text. Res. J.*, vol. 85, no. 10, pp. 1055–1064, 2014.
- [125] R. M. Bluck, "High speed bias weaving and braiding," Brevet N°3426804, 1969.
- [126] R. Florentine, "Apparatus for Weaving a Three-Dimensional Article," Brevet N°4312261, 1982.
- [127] R. Brown, "Method of sequenced braider motion for multi-ply braiding apparatus," Brevet N°4621560, 1986.
- [128] T.-W. Chou and J.-H. Byun, "Process-Microstructure Relationships of 2-Step and 4-Step Braided Composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 3538, no. 95, pp. 235–251, 1996.
- [129] M. Tsuzuki, M. Kimbara, K. Fukuta, and A. Machii, "Three-dimensional fabric woven by interlacing threads with rotor driven carriers (5067525)," 5067525, 1991.
- [130] S. Temple, "Woven tubular structure (83307321.6)," Brevet N°0113196/A1, 1984.
- [131] W. Zhang, X. Ding, and Y. Li, "Microstructure of 3D Braided Preform for Composites with Complex Rectangular Cross-section," *J. Compos. Mater.*, vol. 41, no. 25, pp. 2975–2983, 2007.
- [132] T. Uozumi, "Braid structure body," Brevet N°5438904, 1995.
- [133] D. Brookstein, "Solid braid structure," Brevet N°5357839, 1994.
- [134] D. Brookstein, "Apparatus for making a braid structure," Brevet N°5501133, 1996.

- [135] T. Chou and G.-W. Du, "Analysis of 3D textile preforms for multidirectional reinforcement of composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 26, pp. 3438–3448, 1991.
- [136] R. Spain, "Method for making 3D fiber reinforced metal/glass matrix composite article," Brevet N°4916997, 1990.
- [137] McConnell and P. Popper, "Complex shaped braided structures," Brevet N°4719837, 1988.
- [138] W. S. Kuo and H. I. Chen, "Fabrication and microgeometry of two-step braided composites incorporating pultruded rods," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 11, pp. 1457–1467, 1997.
- [139] K. Bilisik, "Three-dimensional axial braided preforms: experimental determination of effects of structure-process parameters on unit cell," *Text. Res. J.*, vol. 81, no. 20, pp. 2095–2116, 2011.
- [140] D. Wu, "Three-Cell Model and 5D Braided Composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 56, pp. 225–233, 1996.
- [141] L. Chen, X. M. Tao, and C. L. Choy, "On the microstructure of three-dimensional braided preforms," *Composites science and technology*, vol. 59, no. June 1997, 1999.
- [142] D. Mungalov and A. Bogdanovich, "Automated 3D braiding machine and method," Brevet N° US6439096/B1, 2002.
- [143] C. Culp, S. Hastings, and R. Brown, "Braiding apparatus," Brevet N°4934240, 1990.
- [144] H. Langer, "Computer controlled automated manufacture of 3D braids for composite," in *Euromat symposium*, 2000.
- [145] M. Schneider, A. K. Pickett, and B. Wulfhorst, "A new rotary braiding machine and CAE procedures to produce efficient 3D braided textiles for composites.," in *SAMPE Symposium*, 2000.
- [146] A. Bogdanovich and D. Mungalov, "Complex Shape 3D Braided composite preforms," *3Tex/Sampe*, 2004.
- [147] D. Mungalov, P. Duke, and A. Bogdanovich, "High performance 3D braided fiber preforms : design and manufacturing advancements for complex composite structures," in *Sampe Journal*, 2007, pp. 53–60.
- [148] J. L. Chen, "Construction and geometry of 6 step braided preforms for composites.," in *SAMPE Symposium*, 1994.
- [149] T. D. Kostar, T.-W. Chou, and P. Popper, "Characterization and comparative study of three-dimensional braided hybrid composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 2175–2183, 2000.
- [150] K. Bilisik and N. Sahbaz, "Structure-unit cell-based approach on three-dimensional representative braided preforms from four-step braiding: Experimental determination of effects of structure-process parameters on predetermined yarn path," *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 3, pp. 220–241, 2012.

- [151] T. Hause, "Advanced functionally graded plate-type structures impacted by blast loading," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38, no. 5, pp. 314–321, May 2011.
- [152] B. Arold, A. Gessler, C. Metzner, and K. Birkefeld, "1 - Braiding processes for composites manufacture," in *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*, P. Boisse, Ed. Woodhead Publishing, 2015, pp. 3–26.
- [153] Munjal, "Test methods for determining design allowables for fiber reinforced composites," in *Sampe*, 1990.
- [154] D. Brunnschweiler, "5—the Structure and Tensile Properties of Braids," *J. Text. Inst. Trans.*, vol. 45, no. 1, pp. T55–T77, 1954.
- [155] G. W. Du and P. Popper, "Analysis of a Circular Braiding Process for Complex Shapes," *J. Text. Inst.*, vol. 85, no. 3, pp. 316–337, 1994.
- [156] Q. Zhang, D. Beale, S. Adanur, R. M. Broughton, and R. P. Walker, "Structural Analysis of a Two-dimensional Braided Fabric," *J. Text. Inst.*, vol. 88, no. 1, pp. 41–52, Jan. 1997.
- [157] S. L. Phoenix, "Mechanical Response of a Tubular Braided Cable with an Elastic Core," *Text. Res. J.*, vol. 48, no. 2, pp. 81–91, 1978.
- [158] C. Croon, "Braided fabrics properties and applications," in *Sampe*, 1984.
- [159] J.-H. Byun and T.-W. Chou, "Modelling and characterization of textile structural composites: A review," *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 24, no. 4, pp. 253–262, 1989.
- [160] K. S. Wilden, C. G. Harris, B. W. Flynn, M. G. Gessel, D. B. Scholz, S. Stawski, and V. Winston, "Advanced Technology Composite Fuselage - Manufacturing," *Nasa-Cr-4735*. p. 189, 1997.
- [161] J. Brandt, K. Drechsler, and J. Filsinger, "Advanced Textile Technologies for the Cost Effective Manufacturing of High Performance Composites," *Res. Technol. Organ. Meet. Proc.*, vol. 069, no. May, p. (SM1) 20–1, 2001.
- [162] M. Tada, T. Uozumi, A. Nakai, and H. Hamada, "Structure and machine braiding procedure of coupled square braids with various cross sections," *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 32, no. 10, pp. 1485–1489, 2001.
- [163] J. Klein, R. M. Broughton, and D. Beale, "Braided fabric and method of forming," Brevet N°5899134, 1999.
- [164] C. Ayranci and J. Carey, "2D braided composites: A review for stiffness critical applications," *Compos. Struct.*, vol. 85, no. 1, pp. 43–58, Sep. 2008.
- [165] X. Barral, *Histoire de l'art*, Que sais-j. PUF, 2013.
- [166] N. Casale, D. Bristow, and C. M. Pastore, "Design and fabrication of a braided composite monocoque bicycle frame," *High-Tech fibrous Mater. ACS Symp. Ser. 457*, pp. 90–101, 1991.
- [167] H. Hamada, K. Kameo, M. Sakaguchi, H. Saito, and M. Iwamoto, "Energy-absorption properties of braided composite rods," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 5, pp. 723–729, Apr. 2000.

- [168] V. M. Karbhari, J. E. Haller, P. K. Falzon, and I. Herszberg, "Post-impact crush of hybrid braided composite tubes," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 419–433, 1999.
- [169] J. Bottome, "The energy absorption of damaged braided and non-crimp fibre composite material structures .," *PhD thesis, Nottingham*, 2006.
- [170] D. S. Brookstein, "Comparison of multilayer interlock braided composites with other 3D braided composites.," in *SAMPE Symposium*, 1991.
- [171] A. Nakai, H. Hamada, and S. V Hoa, *Influence of braiding structure on torsional properties of braided composite tube*. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY (United States), 1996.
- [172] M. White, "A tubular braid composite main rotor blade spar," *J. Am. helicopter Soc.*, p. 45-48, 1982.
- [173] M. B. Dow and H. B. Dexter, "Development of Stitched , Braided and Woven Composite Structures in the ACT Program and at Langley Research Center Summary and Bibliography," no. November, 1997.
- [174] H. B. Dexter, "Development of Textile Reinforced Composites for Aircraft Structures," *4th Int. Symp. Text. Compos.*, pp. 1–8, 1998.
- [175] D. Neogi, C. Douglas, and D. R. Smith, "Experimental Development of Self-Deployable Structures," *Int. J. Sp. Struct.*, vol. 13, no. 3, pp. 157–169, 1998.
- [176] A. Nanni and M. S. Norris, "FRP jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression," *Constr. Build. Mater.*, vol. 9, no. 5, pp. 273–281, 1995.
- [177] R. G. Hudgins and J. Muzzy, "Assessment of compressive strength of flexible composite materials for spinal implantation," *J. Compos. Mater.*, vol. 34, 2000.
- [178] A. Rawal, R. Kumar, and H. Saraswat, "Tensile mechanics of braided sutures," *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 16, pp. 1703–1710, 2012.
- [179] F. Moutos and B. Gupta, "Development of biomimetical composite prosthetic ligaments using mechanically dissimilar materials," *BMES/EMBS Conf.*, p. 7803, 1999.
- [180] P. Potluri, W. Cooke, A. Lamia, and E. Ortega, "Designing the Carbon-Polyester Braids for Ligaments," *Tx.Ncsu.Edu*, vol. 3, no. 2, 2003.
- [181] J. Carey, A. Fahim, and M. Munro, "Design of braided composite cardiovascular catheters based on required axial, flexural, and torsional rigidities.," *J. Biomed. Mater. Res. B. Appl. Biomater.*, vol. 70, no. 1, pp. 73–81, 2004.
- [182] J.-M. Berthelot, *Matériaux composites (5° ed.)*. Lavoisier, 2005.
- [183] "Dupont de Nemours." [Online]. Available: <http://www.dupontdenemours.fr/>.

- [184] S. Rudov-Clark, A. P. Mouritz, L. Lee, and M. K. Bannister, "Fibre damage in the manufacture of advanced three-dimensional woven composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 10, pp. 963–970, 2003.

## Chapitre 2 : Elaboration et protocoles de caractérisation des structures tressées

<u>Chapitre 2 : Elaboration et protocoles de caractérisation des structures tressées</u> .....	71
<u>I. Introduction du chapitre</u> .....	72
<u>II. Présentation des paramètres</u> .....	72
<u>III. Présentation globale de la machine</u> .....	73
<u>A. Analyse fonctionnelle de la tresseuse</u> .....	74
<u>IV. Descriptif des paramètres du procédé et influence de ces paramètres sur l'angle de tressage</u> .....	84
<u>V. Description des étapes de production</u> .....	87
<u>VI. Réglages paramètres machine</u> .....	89
<u>VII. Productions d'échantillons</u> .....	91
<u>A. Nombre de fils</u> .....	92
<u>B. Liste et Dénomination des échantillons</u> .....	92
<u>C. Protocole de caractérisation des tresses sèches</u> .....	95
<u>VIII. Conclusions du chapitre</u> .....	107
<u>Bibliographie du chapitre 2</u> .....	108

## I. Introduction du chapitre

Ce chapitre est dédié d'une part à l'élaboration des tresses grâce au métier à tresser disponible au GEMTEX mais également aux protocoles de caractérisations de ces structures tressées. La phase d'élaboration nécessite une présentation des paramètres et des réglages procédés associés au tressage et leurs influences sur les produits réalisés.

Suite au premier chapitre à visée bibliographique permettant de proposer une présentation technologique et technique des moyens de structuration de matériaux fibreux, ce deuxième chapitre est dédié plus spécifiquement au tressage. Cette présentation passe dans un premier temps par une analyse fonctionnelle du procédé de tressage. Dans un deuxième temps, les influences théoriques des différents paramètres machine sur les caractéristiques géométriques de la préforme produite seront explorées. L'ensemble des tresses élaborées, dépendantes des paramètres liés au procédé ou au matériau sera ensuite présenté. Enfin, pour l'analyse tant géométrique que mécanique des tresses produites, un ensemble de protocoles de mesures expérimentales sera introduit. Ces derniers serviront pour l'obtention des résultats détaillés dans les chapitres 3 et 4.

## II. Présentation des paramètres

D'une manière similaire aux différentes échelles relatives à une structure textile, les paramètres permettant de décrire géométriquement une tresse sont répartis en trois groupes :

- Les paramètres relatifs aux entrées-matière,
- Les paramètres relatifs au procédé, et,
- Les paramètres relatifs aux tresses.

Les paramètres relatifs aux entrées matière sont associés à la matière textile (fils, mèches) qui va servir à produire les tresses. La caractérisation de cette dernière va nous apporter des quantifications de notions intrinsèques comme le titrage ou encore la torsion. D'autres notions comme la force et l'allongement à rupture, ou le module du matériau textile de base sont aussi quantifiables. Dans ce chapitre, nous nous limiterons aux premières notions citées. Le titrage correspond au grammage de la structure linéaire considérée pour une longueur d'un kilomètre. Dans notre cas, le titre (T) sera de 160g/km. La torsion du fil est donnée à titre indicatif comme étant égale à 50 tours par mètre. Cette dernière permet de donner aux multi-filaments utilisés une certaine cohésion.

Les paramètres relatifs au procédé sont au nombre de deux. La vitesse de production, ainsi que la vitesse des roues à aches, sont des réglages machine, qui seront détaillés dans ce chapitre. Ils vont pour une certaine part conditionner la géométrie de la structure tresse finale. Dans la suite du chapitre, la vitesse de rotation des roues à aches sera notée  $\omega_r$  et est exprimée en tours par minute. La vitesse de production, ou vitesse de tirage prendra la forme de la notation  $V_T$  et aura comme unité mètre par heure.

La dernière famille de paramètres concerne ceux relatifs aux tresses, et décrits au chapitre 1. Ces paramètres regroupent à l'échelle macroscopique les éléments suivants :

- le type de tresse produit (biaxiale, triaxiale),



- le nombre de fils ( $N_{\text{droit}}$  et  $N_{\text{biais}}$ , respectivement pour le nombre de fils droits et celui de fils de biais) utilisés pour former la structure finale,
- l'angle de tressage  $\alpha$  exprimé en degrés,
- la masse linéique de la tresse notée  $M_{\text{lin}}$  et exprimée en grammes par mètre,
- le diamètre  $D$  de la tresse,
- l'embuvage des fils au sein de cette structure respectivement  $E_{\text{droit}}$  et  $E_{\text{biais}}$  pour l'embuvage des fils droits et celui des fils de biais, et,
- un taux de fibre  $T_{\text{fibre}}$ , exprimé en %,
- Un volume de matière  $V_{\text{fibre}}$ .

Un des paramètres les plus influents dans la géométrie finale d'une tresse est l'angle de tressage. Plusieurs façons sont admises pour définir un angle de tressage [1], [2]. On peut considérer qu'il correspond à l'angle formé par deux fils de biais, ou encore par celui formé entre un fil de biais et la direction de production. Une troisième possibilité s'offre à nous mais est moins usitée, elle fait correspondre à l'angle de tressage la différence angulaire entre un fil de biais et l'axe transverse à la direction de production.

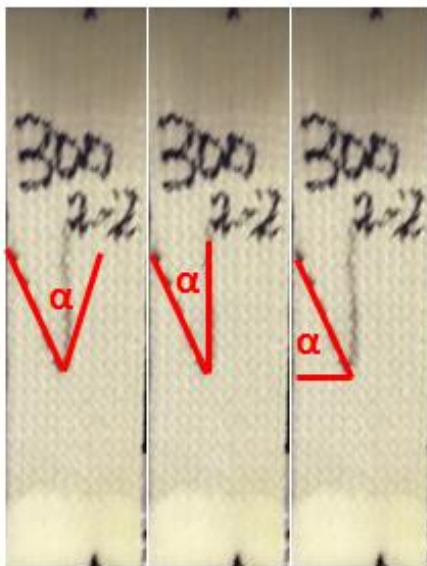


Figure 1 a, b, c : Différentes définitions de l'angle de tressage

Dans la suite de cette étude, l'angle de tressage considéré est celui entre un fil de biais et la direction de production (figure 1b). Cet angle de tressage va avoir une influence directe sur les propriétés géométriques des tresses[3]–[21] .

### III. Présentation globale de la machine

Le procédé de tressage comme présenté dans le chapitre 1 peut être décomposé en deux phases. Une phase de préparation de la machine où les matériaux fibreux sont arrangés. Et une phase de structuration où l'arrangement de ces matériaux fibreux est ordonné spécifiquement pour former une préforme tressée.

Ces deux fonctions principales se succèdent pour former à partir d'éléments fibreux une structure maîtrisée.

La première étape consiste en un arrangement des éléments fibreux selon une direction (celle de la production). Ces éléments fibreux sont répartis de façon homogène sur un cercle et perpendiculairement à l'axe de tressage.

La seconde étape consiste à ordonner les éléments fibreux en fonction de la géométrie finale voulue.

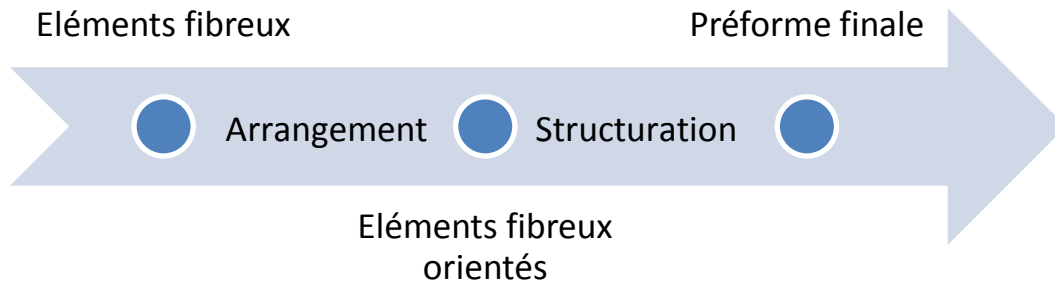
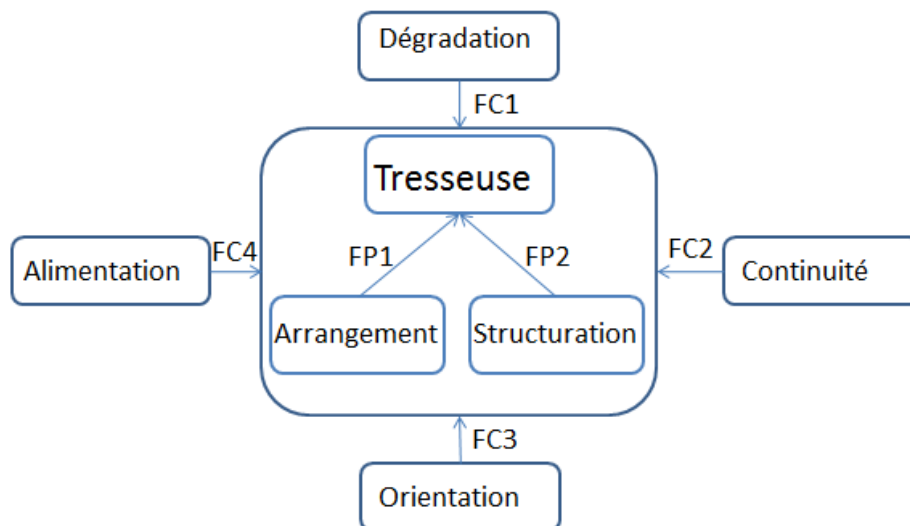


Figure 2 : Principe du procédé de tressage

#### A. Analyse fonctionnelle de la tresseuse

La tresseuse associée au principe précédemment décrit est soumise à un ensemble de contraintes, qu'il convient de maîtriser pour garantir une préforme finale « saine ». Celles-ci sont présentées à la figure 3.



- FP1 : Arranger les éléments fibreux  
 FP2 : Ordonner les éléments fibreux  
 FC1 : Limiter la dégradation des éléments fibreux durant le process  
 FC2 : Assurer la continuité des fibres au sein de la structure  
 FC3 : Maîtriser l'orientation des éléments fibreux  
 FC4 : Assurer la fourniture de matériaux fibreux au cours du process

Figure 3 : Analyse fonctionnelle de la tresseuse

La machine de tressage doit donc répondre à deux fonctions principales (arrangement de fibres et structuration). Des contraintes supplémentaires viennent s'ajouter à ces fonctions premières. La méthode FAST (acronyme de Functional Analysis System Technique) traduit chacune des fonctions de service en fonction(s) technique(s), puis matériellement en solution(s) constructive(s). Cela permet d'informer sur les différents moyens de répondre le plus efficacement aux contraintes.

### 1. FP1 : Arrangement

L'arrangement des éléments fibreux peut-être décomposé en plusieurs sous fonctions (figure 4) : Respecter la géométrie, Réguler la tension et Maintenir les éléments fibreux.

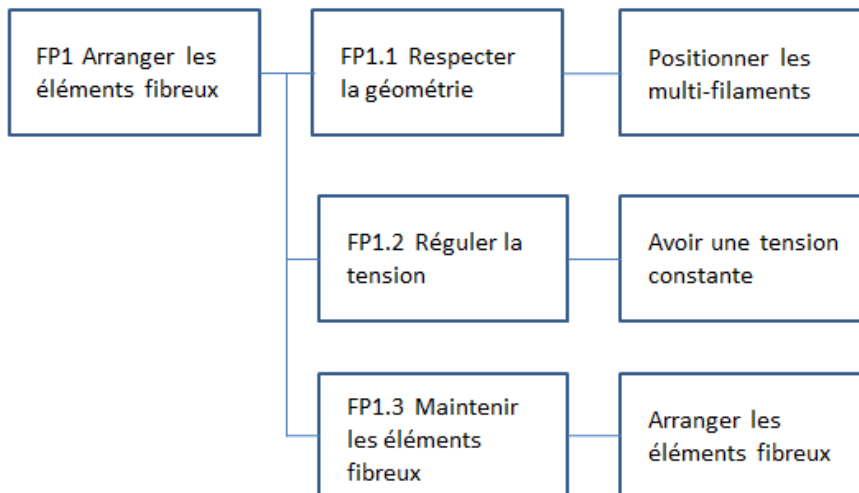


Figure 4 : Diagramme FAST de la fonction arranger les éléments fibreux

Dans la partie suivante, les solutions technologiques pour répondre à chaque sous fonction sont présentées. Une description de ces solutions technologiques est aussi proposée.

#### a) Respecter la géométrie.

Les éléments fibreux se doivent d'être positionnés selon les orientations voulues par le procédé. Ils doivent également être positionnés de façon à respecter la géométrie de la pièce.

La géométrie de la préforme finale est définie entre autre par le nombre de multi-filaments mis en jeu dans le tressage. Le remplissage de la machine de tressage, illustré figure 5, dépend donc des spécifications que l'on veut apporter à la préforme finale. La tresseuse ici présentée peut contenir 144 fuseaux (48 fournissant des fils droits à la structure et 96 fournissant des fils de biais à la structure). La géométrie de la tresse peut aussi être apportée par un mandrin, dans le cas du surtressage.



Figure 5 : Vue de côté de face et de derrière de la tresseuse

### b) Réguler la tension.

De par la complexité de l'architecture, les éléments fibreux, vont onduler de manière différente dans la structure, provoquant des consommations de matière différentes. En tout point de la tresseuse, et à n'importe quel moment du procédé, la tension des éléments fibreux doit être constante et maîtrisée.

Cette fonction de régulation est prise en charge par les fuseaux (ou porte-bobineaux). Des fonctions de base doivent être remplies par les porte-bobineaux et sans lesquelles le procédé de tressage n'est pas possible. Le respect de ces fonctions permet d'obtenir une tresse plus régulière, plus nette en minimisant les possibilités de dégradations du matériau textile.

Simplement, les porte-bobineaux doivent être choisis en fonction du fil utilisé et adaptés au procédé de tressage. Comme leur nom l'indique, les porte-bobineaux sont chargés de supporter les bobineaux sur lesquels la matière est stockée. Les porte-bobineaux, en plus de porter la bobine, doivent être capables de remplir plusieurs autres tâches complémentaires. La figure 6 illustre le fait qu'en fonction de la position du porte-bobineaux au cours du procédé, la distance qui le sépare du point de tressage évolue [22].

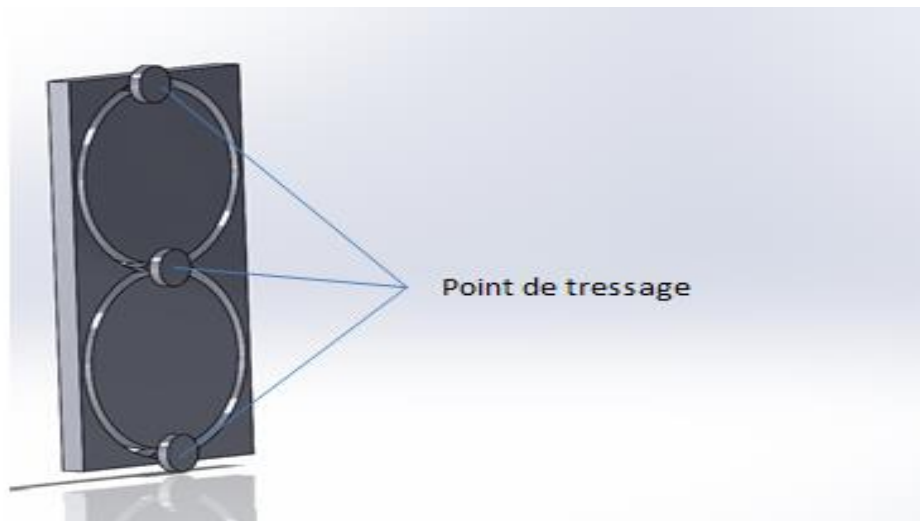


Figure6: Différence de longueur entre le bobineau et le point de tressage en fonction de sa position au cours du tressage

Un système de rappel de fil est donc nécessaire pour assurer à tout moment une tension constante à ce dernier. Cette distance entre le porte-bobineau et le point de tressage va changer périodiquement au cours du procédé de tressage, tout en dépendant de la configuration du chemin de came, de la position du point de tressage et du schéma de tressage. Toutes ces possibles variations au cours de la production vont faire varier la longueur de fil entre chaque bobine et le point de tressage. Pour garantir un procédé de tressage le plus stable et régulier possible, la tension de chaque fil constituant la tresse doit rester la plus constante possible. Et pour ce faire, le porte-bobineaux doit être capable de compenser ces variations de tension de fil. Chaque porte-bobineaux doit à tout instant être capable de fournir plus de fil si la tension est trop grande et au contraire doit être capable de rappeler du fil si la tension est trop faible. En plus de cela, le porte-bobineau doit « émettre ou faire savoir » au système de contrôle lorsque le fil qu'il porte vient à rompre.[23] propose une énumération des quatre fonctions principales d'un porte-bobineau :

- Porter une bobine remplie de matériau textile,
- Compenser les différences de longueur qui apparaissent au cours du tressage,

- Délivrer la quantité requise de fil,
- Délivrer une alerte lors de la casse ou le dé-bobinage intempestif d'un fil.

En plus de ces quatre fonctions évidentes, d'autres peuvent être ajoutées pour un fonctionnement optimal du procédé de tressage :

- Une facilité de remplacement des bobines, en effet, la quantité de fil embarquée étant limitée, pour réduire le temps d'immobilisation de la machine pour changer les bobineaux,
- Etre aussi compacte que possible, les vitesses mises en jeu lors du procédé de tressage font que les effets d'inertie sont décuplés,
- Contenir autant de fil que possible.

Les porte-bobineaux utilisés dans le cadre de ces travaux de thèse sont nommés porte-bobineaux avec levier de régulation [22]. Ces porte-bobineaux (figure 7) utilisent un levier pour transmettre la force du ressort au fil. La force émise par le ressort est indépendante de l'orientation du porte-bobineau, ce qui permet de nous affranchir de toute notion de gravité que l'on retrouve dans les systèmes classiques de rappel de tension par masse rapportée. Le ressort est monté dans le porte-bobineau de telle façon qu'à tout moment il exerce une force de rappel sur le levier. L'action du ressort sur le levier va le faire tourner autour de son axe et donc va indirectement tirer sur le fil. Si la réserve de fil est utilisée, le levier va se lever et dégager le système permettant la rotation du bobineau sur le porte-bobineau, et donc délivrer du fil. Quand une quantité suffisante de fil est délivrée, le levier revient à sa position de repos et bloque le système permettant la rotation du bobineau. Ce type de porte-bobineau est très utilisé dans le domaine du textile pour des forces de rappel assez faibles. Leur avantage principal est de pouvoir être utilisé dans toutes les directions de l'espace, sans être soumis à un impératif de suivre la direction gravitationnelle. La valeur de force de rappel du ressort peut être modifiée en changeant de ressort. Différents types de ressort existent, et couvrent une gamme de 3 cN à 2 N.

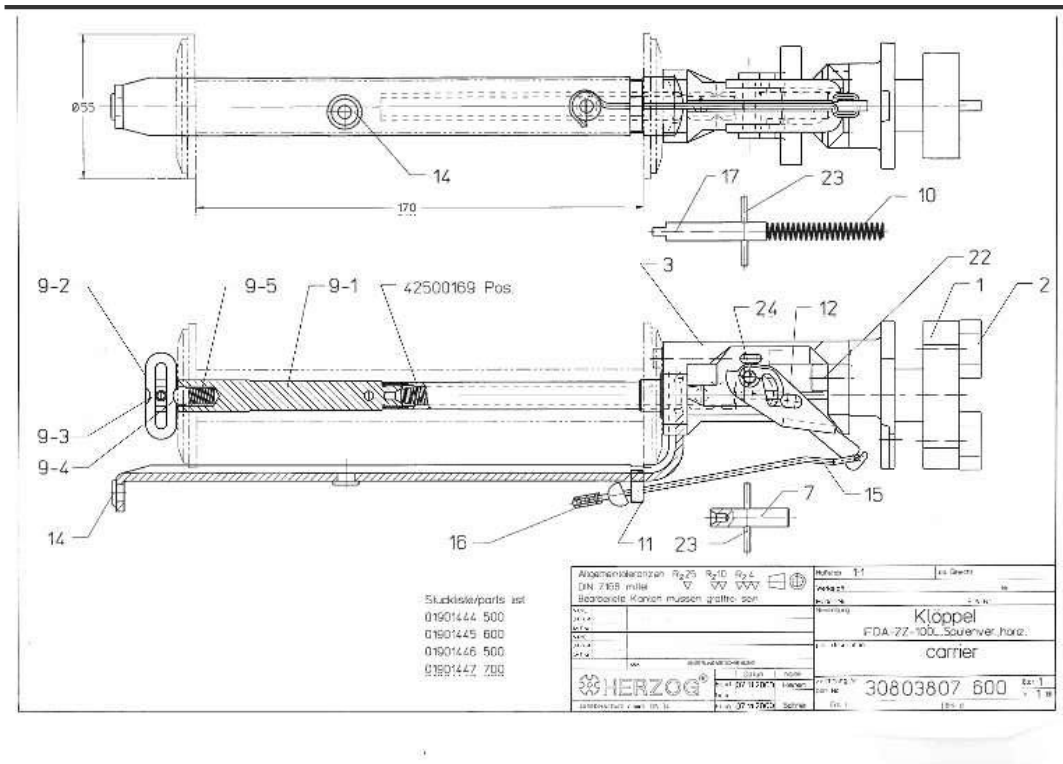


Figure 7: Mise en plan d'un porte-bobineau (ou aussi appelé fuseau)

### c) Maintenir les éléments fibreux.

Les éléments fibreux, une fois orientés, se doivent d'être maintenus en position durant leur parcours dans le système de régulation de tension présenté précédemment. La solution retenue pour la tresseuse utilisée est l'utilisation d'œillet (figure 8) dans lequel l'élément fibreux passe. Le principal avantage de l'œillet réside dans le fait que l'on limite la dégradation puisque l'on peut choisir géométrie et matériau de l'œillet. Les œillets utilisés sont en céramique.

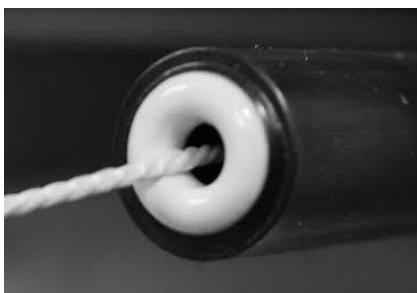


Figure 8 : Illustration d'un œillet

## 2. FP2 : Structuration

La structuration peut-être décomposée en plusieurs sous-fonctions (figure 9) : Faire s'entrelacer les éléments fibreux et sortir le produit fini.

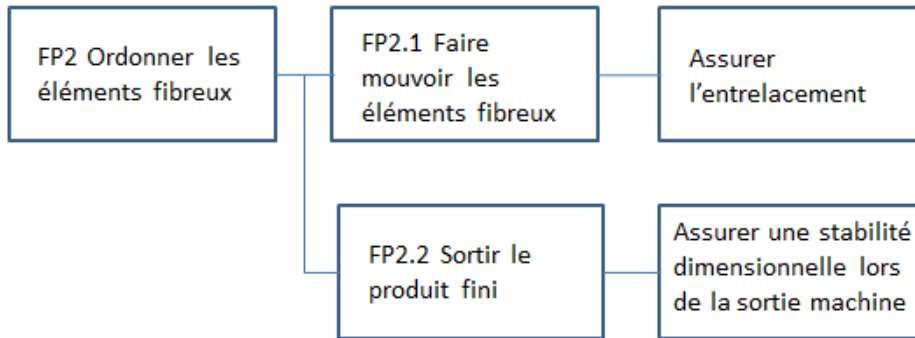


Figure9 : Diagramme FAST de la fonction ordonnancement

Chaque sous-fonction est décrite, puis les solutions technologiques pour la réaliser sont présentées.

#### d) Faire mouvoir les éléments fibreux.

Les différents éléments constitutifs de ce système de mise en mouvement des bobineaux (porteurs des éléments fibreux) doivent répondre à des fonctions propres et bien définies, qui sont de :

- Suivre le chemin de came,
- Aller à la vitesse imposée par l'utilisateur,
- Porter les fils qui constituent la tresse.

Le chemin de came de la machine de tressage présente à l'ENSAIT est fixe. Il est constitué de deux chemins distincts prenant la forme de sinusoïdes qui s'entrecroisent, pour permettre l'entremêlement des fils. Les supports de bobineaux, suivent le chemin de came, qui est une sorte de canal formé dans le bâti de la machine de tressage. Ce bâti et les roues à aubes forment les éléments de base pour la mise en mouvement des transporteurs. Deux technologies de mise en mouvement des transporteurs existent, mais la seule qui sera développée ici est celle des transporteurs portés, technologie de la machine de tressage utilisée[2], [22], [24], [25].

Les transporteurs portés viennent s'emboîter dans les rues à aubes grâce à des plaques, placées de part et d'autre de la roue à aubes (figure 10). Ces transporteurs sont mis en mouvement par la rotation des roues à aubes liées par une liaison pivot au bâti. Le chemin de came est là uniquement pour donner la direction à suivre pour les transporteurs (et n'ont pas pour fonction de supporter ces derniers). Le transporteur n'est pas porté par le bâti, mais vient se lier à la roue à aubes qui lui sert de support.



Figure 10 : Illustration de roue à aubes et transporteur



Les roues à aches sont liées cinématiquement au bâti par des liaisons pivot. Elles sont composées d'un certain nombre de fentes. Ce sont ces dernières qui viennent accueillir le pied du transporteur lors de son déplacement. Les machines de tressage les plus communément utilisées présentent des roues à aches composées de quatre fentes. Théoriquement, le rayon des roues à aches est égal au rayon de courbure des arcs composant le chemin de came autour des roues à aches. La profondeur de coupe dans les fentes des roues à aches permet une surface de contact pour guider le transporteur, et garantit aussi que l'application de la force motrice est dans la même direction que la vitesse du transporteur. Un point de contact tangentiel entre deux diamètres primitifs de roues à aches voisines, garantit une meilleure dynamique du procédé (figure 11). Mais cela peut aussi causer des problèmes concernant le mouvement du pied du transporteur. Ce dernier peut effectivement emprunter la mauvaise voie du chemin de came. Aux points de transfert, où les transporteurs changent de direction entre deux roues à aches, la direction des forces de contact changent et la charge sur la zone de contact de la section du pied du transporteur augmente. L'usure de ces zones de contact augmente également avec l'augmentation de la vitesse de rotation des roues à aches.

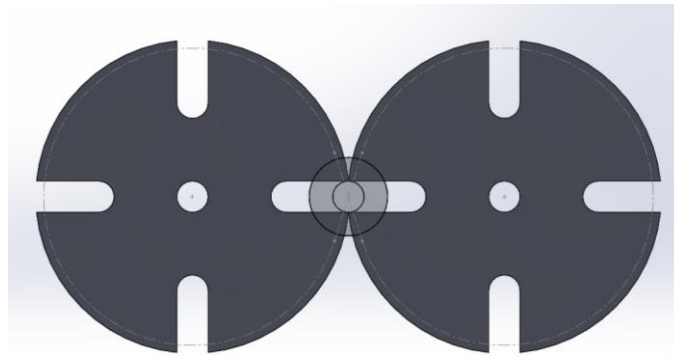


Figure 11 : Illustration de deux roues à aches et d'un transporteur avec ses deux possibilités de trajectoires

Le pied des transporteurs permet au fil de suivre un chemin sinusoïdal et ainsi détermine le déplacement et le chemin des bobineaux. Sans ce pied, les transporteurs ne pourraient pas se déplacer d'une roue à aches à une autre. Il permet cela en suivant le chemin de came à travers des contacts avec une ou les deux parois de ce dernier. Afin de réaliser cette fonction, la géométrie la forme et les dimensions de ce pied doivent être bien étudiées. Des éléments de section circulaire ne seraient pas capables de suivre le chemin voulu. Le pied du transporteur doit donc être suffisamment long pour que, quand il quitte la première roue à aches afin d'entrer dans la seconde, il donne l'orientation correcte (figure 12). La longueur minimale du pied du transporteur dépend donc du rayon de courbure du chemin de came. Il doit être plus long que la longueur du chemin de came commun aux deux roues à aches, pour être sûr d'entrer dans la courbe opposée à celle d'où il vient.

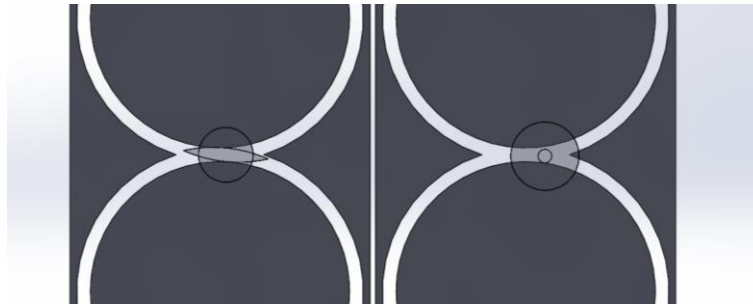


Figure 12 : Différence de guide du transporteur/suivi du chemin prévu

Une machine à tresser classique, comme celle utilisée pour la production des échantillons, est composée de deux chemins de came. Une attention particulière doit être apportée à ces derniers. Effectivement, au point où les deux chemins se croisent, les charges sur les parois de ce chemin de came sont plus importantes, à cause des forces centrifuges des transporteurs qui changent de direction.

La vitesse de rotation des roues à aubes est un paramètre réglable de la machine à tresser. La valeur numérique entrée dans la tresseuse est en tour par minute. Généralement, plus les roues à aubes ont une vitesse de rotation élevée, plus l'angle de tressage sera important pour une vitesse de production constante. A contrario, moins la vitesse de rotation est grande, pour une vitesse de production constante, plus l'angle de tressage sera petit.

#### e) Sortir le produit fini.

La préforme une fois tressée doit pouvoir être exploitable, et donc être sortie de la zone de production. Le système de tirage de la tresseuse occupe cette fonction. Dans un système de tressage classique, ce dernier permet d'orienter le produit tressé de la zone de tressage dans une seule et unique direction tout en conservant une vitesse constante. Un critère supplémentaire pour le système de tirage est la forme du produit fini. Si le produit est linéaire et éventuellement courbé (comme dans le cas des cordes ou des lacets), un simple système avec un entraînement par friction autour de cylindres est suffisant. Pour des produits continus avec une section constante, le système de tirage peut être un dispositif avec des chenilles pour garantir une sortie sans flexion. Le système actuellement en place sur la machine de tressage utilisée est un système de tirage unidirectionnel. Pour avoir une vitesse de tirage la plus constante possible, il faut que le contact entre les éléments du système de tirage et la tresse soit le plus parfait possible. Dans notre cas, un système de cylindres multiples dans lequel la tresse passe, et est tirée, est utilisé. Un système combinant pression sur la tresse et rotation pour donner une vitesse d'avance assure l'efficacité de ce système de tirage. L'avantage de faire passer la tresse à travers une multitude de cylindres est que l'on vient par ce procédé diminuer la force de traction nécessaire pour tirer la tresse. En fonction du nombre de cylindres, de l'angle du cylindre en contact avec la tresse, du coefficient de frottement tresse/cylindre et de la force initiale à appliquer pour faire avancer la tresse, nous pouvons déterminer la force à appliquer par le cylindre dit « tireur », grâce à l'équation d'Euler-Eytelwein [26]. Pour augmenter la force de contact entre la roue de tirage et la tresse, cette roue est le plus souvent recouverte par un matériau en caoutchouc avec un haut coefficient de frottement, une roue de pression additionnelle pouvant être également utilisée.



Figure 13 : Visualisation du point de tressage

Le système de tirage retire de la zone de tressage la tresse élaborée (figure 14). Pour les produits réalisés dans le cadre de ces travaux de thèse, la zone de tressage est assez petite, pour être considérée comme un point de tressage. Le point de tressage représente le point où l'entrelacement des fils est effectif (figure 13). Habituellement dans la zone du point de tressage, un système d'anneau est utilisé pour contrôler les fils ou pour changer la géométrie de la zone d'entrelacement. Ce système est appelé anneau de tressage. La sélection d'une forme spécifique, d'une taille et d'une position particulière de cet anneau de tressage est très importante dans le procédé de tressage. La position de cet anneau de tressage doit être ajustée spatialement. L'anneau de tressage doit être suffisamment petit pour prévenir les mouvements dans le plan orthogonal à la direction de tirage. Mais il doit aussi être suffisamment large pour que le frottement avec les fils composant la tresse ne vienne pas affecter la structure finale. Dans notre cas, pour la production de tresses circulaires, l'anneau de tressage a une section transversale circulaire.



Figure 14 : Système de tirage et rouleau presseur

La vitesse de tirage, ou vitesse de production est le deuxième paramètre contrôlable depuis le pupitre de commande de la machine à tresser. La gamme de vitesse de production s'étale de 12.8 mètres par heure à 144 mètres par heure (dans notre configuration de tressage sans mandrin).

#### IV. Descriptif des paramètres du procédé et influence de ces paramètres sur l'angle de tressage

Sur le métier à tresser, plusieurs paramètres sont programmables en vue de la production des tresses. Les paramètres les plus influents sur les caractéristiques géométriques des tresses sont :

- La régulation de tension des fils sur les bobineaux,
- La cinématique des supports de bobineaux,
- Le nombre de roue à aches, noté  $N_{\text{roue à aches}}$
- La régulation de la vitesse de rotation des bobineaux, notée  $\omega_r$ ,
- Le contrôle de la vitesse de tirage de la tresse produite, notée  $V_t$ .

L'angle de tressage va être fortement dépendant de ces paramètres [1], [2], [16], [27]–[30]. En fonction de ce dernier, la longueur des fils de biais dans la structure va varier.

L'angle de tressage est en relation directe avec la vitesse de tirage de la tresseuse [1], [27], [28], [31], [32]. Cette relation est étudiée dans plusieurs travaux [33].

Prenons l'exemple d'une tresse tubulaire, en figure 15, le chemin d'un fil particulier correspond à une circonvolution, notée par le segment AC, l'angle de tressage est  $\alpha$ . La circonférence de la tresse est représentée par le segment BC. Dès lors que ces paramètres sont fixés, nous avons la relation suivante [22], [24], [32], [34]:

$$\tan \alpha = \frac{\pi \cdot D}{L_{\text{circonvolution}}} = \frac{\pi \cdot D}{V_T \cdot T_{\text{circonvolution}}} \quad (\text{Eq 2.1})$$

Où,  $V_T$  est la vitesse de tirage et  $T_{\text{circonvolution}}$  le temps de production pour une répétition.

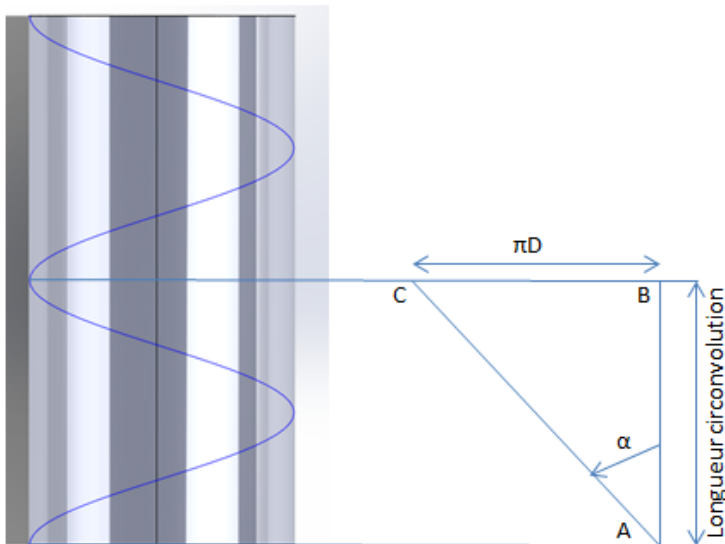


Figure 15 : Représentation de l'angle de tressage et du diamètre d'une tresse circulaire

De ces formules, en fonction des relations entre les différents paramètres, il est possible d'exprimer l'angle de tressage en fonction de la vitesse de rotation des roues à aches, de leur nombre, de la vitesse de production et du diamètre de la tresse produite.

$$\tan \alpha = \frac{\omega_r \cdot D}{N_{roue \text{ à } auches} \cdot V_T} \quad (\text{Eq 2.2})$$

Une autre équation est usitée, elle permet de déterminer l'angle de tressage à partir du rayon de la tresse R, de la vitesse angulaire d'un fil  $\omega_{fil}$ , et de la vitesse de production :

$$\tan \alpha = \frac{\omega_{fil} \cdot R}{V_T} \quad (\text{Eq 2.3})$$

L'équation (Eq 2.3) est une autre façon de formuler une proposition de prédiction angulaire formulée par Potluri [35] ou encore Rawal[36].

Appelons  $L_{repetition}$  la longueur d'une circonvolution de tresse, illustré figure 16. La moitié du chemin du fil dans cette circonvolution est orientée par rapport à la direction de production suivant l'angle  $\alpha$ , et l'autre moitié suivant l'angle  $-\alpha$ . On peut considérer cette seconde partie comme un prolongement de la première, pour former la longueur totale AC. On considère AB comme une longueur de répétition du motif de tressage. La relation entre la longueur de fil (sans embuvage)  $L_{fil}$  et la longueur de la répétition devient :

$$\cos \alpha = \frac{L_{repetition}}{L_{fil}} \quad (\text{Eq 2.4})$$

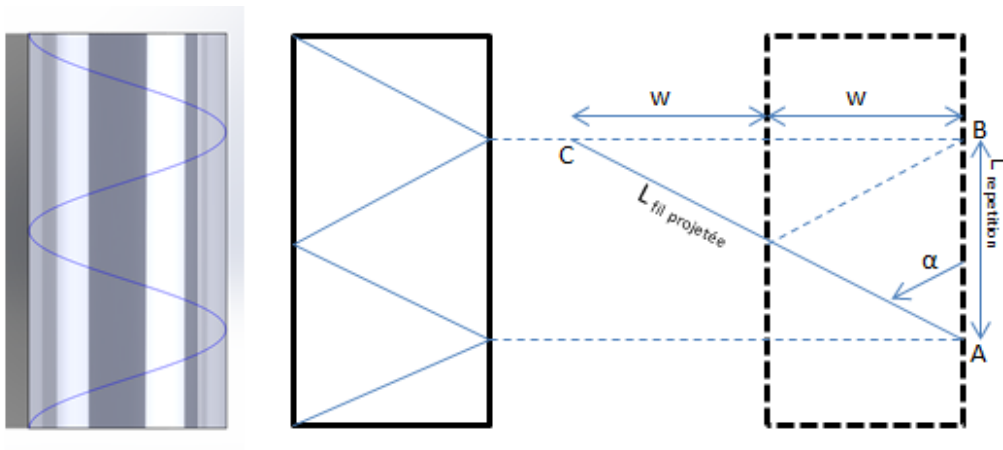


Figure 16 : Illustration de la longueur d'un fil de biais dans une cellule élémentaire

En se basant sur une longueur unitaire de tresse (par simplification), nous obtenons :

$$L_{fil} = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (\text{Eq 2.5})$$

La figure 17 donne un aperçu de l'évolution de la longueur de fil absorbée par la structure en fonction de l'angle de tressage pour un mètre de tresse linéaire. La longueur de répétition est inversement proportionnelle à l'augmentation de l'angle de tressage. Elle correspond aussi à la sur-longueur de fil qui caractérise le fil de biais par rapport au fil droit dans une tresse triaxiale.

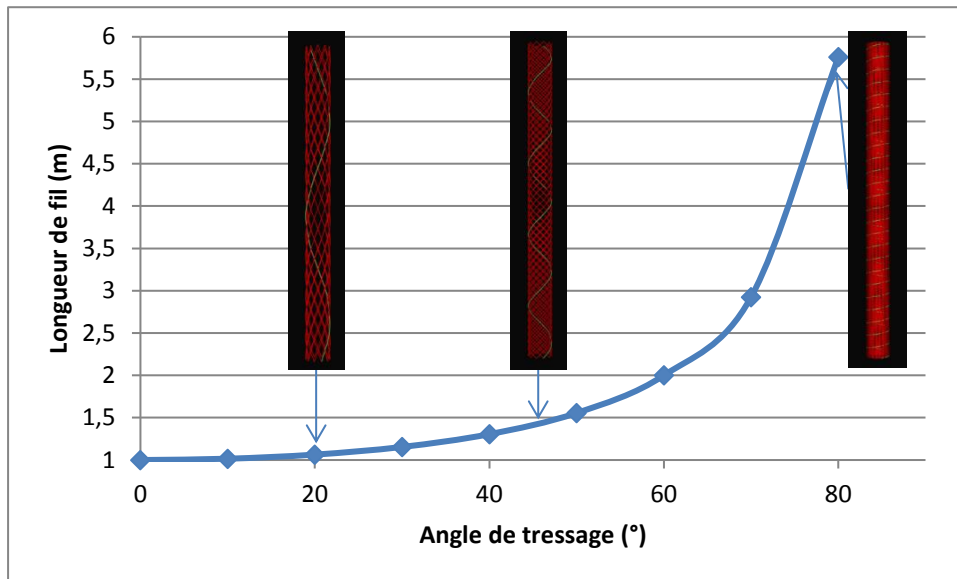


Figure 17 : Relations géométriques pour une répétition du motif de tressage et visualisation de la trajectoire d'un fil

Cette notion de longueur de fil de biais dans une cellule élémentaire peut être reliée à la notion de « cover factor », ou facteur de couverture (ou taux surfacique). Une configuration de tresse qui donne un cover factor de 1 est une tresse dite fermée, c'est-à-dire qu'il n'y a aucun espace interfilamentaire. Une tresse ouverte est obtenue pour un cover factor inférieur à 1. D'après [37], l'angle de tressage est la caractéristique géométrique principale d'une structure tressée et va déterminer les propriétés géométriques du produit, dont le cover factor. Ce cover factor  $C_f$  s'exprime ainsi :

$$C_f = 1 - \left( 1 - \frac{N_c \cdot \omega_{fil}}{2\pi D \cos \alpha} \right) \quad (\text{Eq 2.6})$$

Où,  $N_c$  est le nombre de bobineaux de biais utilisés pour le tressage.

Dans notre cas, les tresses circulaires que nous allons utiliser seront aplaties, pour former une sorte de tresse plate à deux surfaces mais comportant des bords continus. C'est-à-dire où la continuité des fils composant la tresse est conservée. Dans ce cas, appelons  $l_t$  la largeur de la tresse. En plus de cette largeur, la connaissance de la longueur de la répétition peut nous permettre de calculer l'angle de tressage, par la formule :

$$\tan \alpha = \frac{2 \cdot l_t}{L_{repetition}} \quad (\text{Eq 2.7})$$

Dans le cadre des tresses circulaires, si l'on garde les notions géométriques de base, la formule devient :

$$\tan \alpha = \frac{\pi \cdot D}{L_{repetition}} \quad (\text{Eq 2.8})$$

De ces formules, et en considérant que la longueur de fil dépend de deux paramètres qui ne sont pas indépendants, il devient compliqué de formuler un moyen simple pour calculer la longueur d'un fil de biais dans une structure tresse. De fait, en se permettant une simplification géométrique, qui consiste à considérer que la largeur de la tresse ne change pas significativement par rapport à la longueur du motif de répétition, nous obtenons une longueur de fil dépendant de deux paramètres, la largeur de la tresse et l'angle de tressage, et d'après (Eq 2.5), par :

$$L_{fil} = \frac{D \cdot \pi}{\sin \alpha} \quad (\text{Eq 2.9})$$

En se basant sur cette formule, l'établissement de la longueur d'un motif de répétition en fonction de l'angle de tressage peut être visualisé sur la figure 18 (en se basant sur un diamètre de tresse de 40mm) :

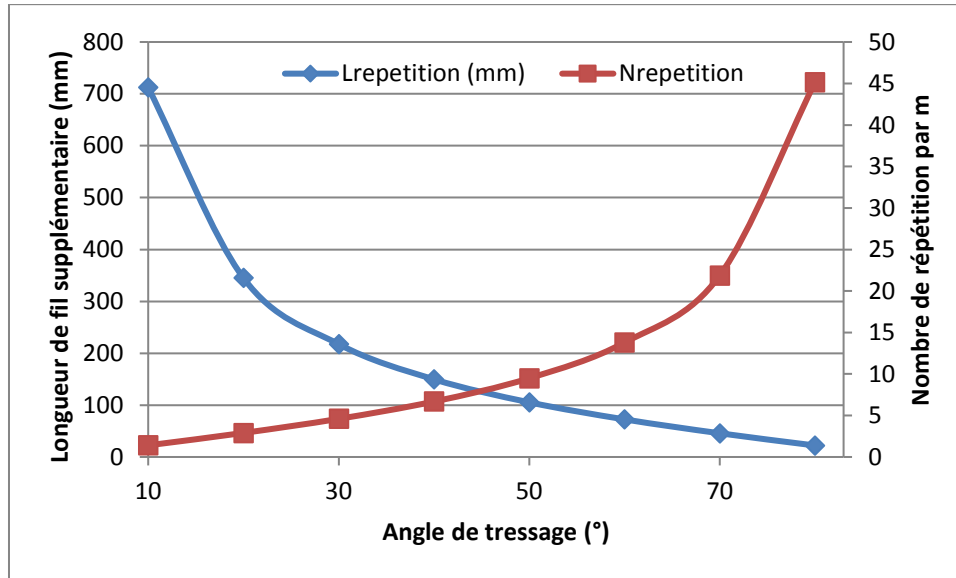


Figure 18 : Longueur de fil par répétition et nombre de répétition par mètre

La première remarque qui peut être émise est que plus l'angle de tressage est petit, plus le fil de biais est aligné avec l'axe de production, et donc, plus la longueur de la répétition va être longue. A contrario, plus l'angle de tressage est grand, plus la longueur du motif de répétition est petite. Cependant, le nombre de répétition dans un mètre de tresse produite peut être calculé en fonction de l'angle de tressage. Le nombre de répétition ( $N_{repetition}$ ) dans 1m de tresse étant défini par :

$$N_{repetition} = \frac{1}{L_{repetition}} \quad (\text{Eq 2.10})$$

A la suite de ces calculs de longueur, la masse linéique par mètre d'une tresse peut être calculée théoriquement. Cette masse requière la connaissance de la densité du matériau utilisé. Dans les applications textiles, le système de masse linéique le plus couramment utilisé est nommé tex, qui correspond au titre du fil ( $T_{fil}$ ). Où un tex est égal à un gramme par km de fil.

L'équation (Eq 2.10) est basée sur l'analyse géométrique et des paramètres simplifiés. Or plusieurs paramètres, comme la déformation longitudinale des fils (sous l'action de la tension des ressorts des porte-bobineaux), la déformation latérale des fils issue des contacts entre les fils ou encore l'allongement du fil dû aux forces de tirage de la tresseuse, vont influencer sur cette longueur théorique.

Ces différents paramètres influent sur l'angle de tressage, et donc sur la géométrie finale de la tresse. Les réglages machine mais également des modifications structurelles dues aux différentes étapes de production vont être l'objet de la suite de ce chapitre.

## V. Description des étapes de production

Quand une production de structures tressées est planifiée, une série d'étapes préliminaires est nécessaire à réaliser avant la production effective.

En premier lieu, le remplissage des bobineaux est préalable pour avoir de la matière à tresser. Cette étape est appelée bobinage. L'enroulement des fils sur les bobines est une partie essentielle de la préparation au tressage. Des réglages incorrects lors de cette étape peuvent amener lors du tressage à des irrégularités visibles, des problèmes de tension sur les bobineaux, des casses de filaments qui peuvent conduire à une rupture de fils, ou des casses de pièces mécaniques de la tresseuse. Les structures textiles servant à tresser sont généralement stockées sur de grosses bobines et doivent être transférées sur les bobineaux. La première étape est le dé-bobinage du fil de la bobine initiale qui va conditionner la qualité d'enroulement sur le bobineau. L'instabilité de l'étape de débobinage peut amener à des tensions fluctuantes sur le bobineau ou encore à des casses de fils. Si cela n'est pas maîtrisé dès cette étape, ces problèmes vont se retrouver dans la tresse sous forme de sur ou de sous tension, impliquant des irrégularités dans la tresse. Plusieurs techniques sont donc utilisées pour garantir une tension régulière. Dans notre cas, le fil vient passer par une série de rouleaux en céramiques qui assurent une tension constante et un respect de l'intégrité du fil. Les paramètres du bobinage vont déterminer la densité et la qualité des bobineaux utilisés dans la tresseuse et vont impacter directement la qualité du produit final.

Le débobinage utilisé dans notre cas est un débobinage axial, ce qui veut dire que le fil est dévidé dans une direction perpendiculaire aux spires formées par le bobinage. Les bobines de départ sont produites de façon à simplifier à la fois la logistique de distribution mais aussi le stockage. Des masses de plusieurs kilos à plusieurs dizaines de kilos de matière sont donc présentes initialement. De telles masses ne peuvent être directement montées sur la machine de tressage, le fil est donc ré-embobiné sur des bobineaux spécialement étudiés pour les tresseuses. Ces derniers optimisent le compromis entre la quantité de matière embarquée relativement au poids mis en œuvre qui va limiter la vitesse de production à cause des efforts mis en jeu. Les bobines initiales peuvent se présenter sous diverses formes, mais sont généralement de formes coniques ou cylindriques. Lors du débobinage, et à cause de la cinétique d'enroulement du fil sur la bobine, un phénomène spécifique apparaît sous la forme d'un ballon de fil. Entre le premier guide-fil de la bobineuse et la bobine initiale, il convient de laisser une distance suffisante pour que ce ballon reste stable et que le fil ne se prenne pas dans un organe parasite. La bobineuse doit également répondre à la fonction de détection de casse de fil par le biais d'un guide en porcelaine, monté sur une pièce à ressort. Aussi longtemps que le fil passe à travers le guide, la tension du fil oblige le guide à rester dans une position définie. Dès que le fil casse, cette tension disparaît et le ressort fait son effet en ramenant le guide dans une position qui permet d'alerter l'utilisateur. Le fil passe ensuite dans une sorte de régulation active qui consiste à faire parcourir à ce fil un chemin au travers de systèmes de régulation de la tension. Dans le cas de la bobineuse de l'ENSAIT (figure 19), ce système est un couple de lamelles en céramique qui viennent prendre le fil en sandwich et dont la force de pression est régulée par un ressort. En fonction de la matière à bobiner, la tension doit être adaptée, nécessitant, si besoin est, un changement de ressort.





Figure 19 : Bobineuse utilisée

Une fois cette étape de bobinage réalisée, il faut monter les bobineaux dans les porte-bobineaux, puis passer le fil dans le système de régulation de tension. Tous les fils une fois réunis doivent être apportés jusqu'au système de tirage. Dès lors que la nappe de fils, constituant la tresse, arrive sur le rouleau presseur, qui, par friction va la faire avancer à la vitesse souhaitée, la tresseuse est considérée comme opérationnelle.

Une phase de réglage des paramètres machine est nécessaire pour produire la structure paramétrée (figure 20). Les deux paramètres sur lesquels on peut agir sont le pas et la vitesse des roues à aubes.

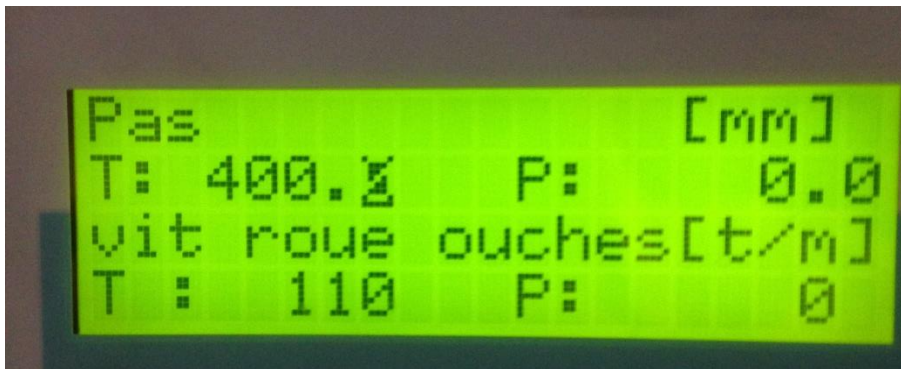


Figure 20 : Illustration de l'écran de réglage de la tresseuse

Dans une partie précédente, le rapport entre ces paramètres et les mesures physiques sur produit fini a été explicité (Eq 2.2). Dès lors que les paramètres sont choisis et fixés, la production peut débuter.

## VI. Réglages paramètres machine

Au préalable de toute caractérisation géométrique sur échantillons, il a fallu appréhender les relations entre les données entrées dans la tresseuse (Figure 20) et les grandeurs associées à la

vitesse de production et la vitesse angulaire des roues à aubes. Une campagne d'essais préliminaires a permis d'établir ces relations (figure 21 et 22).

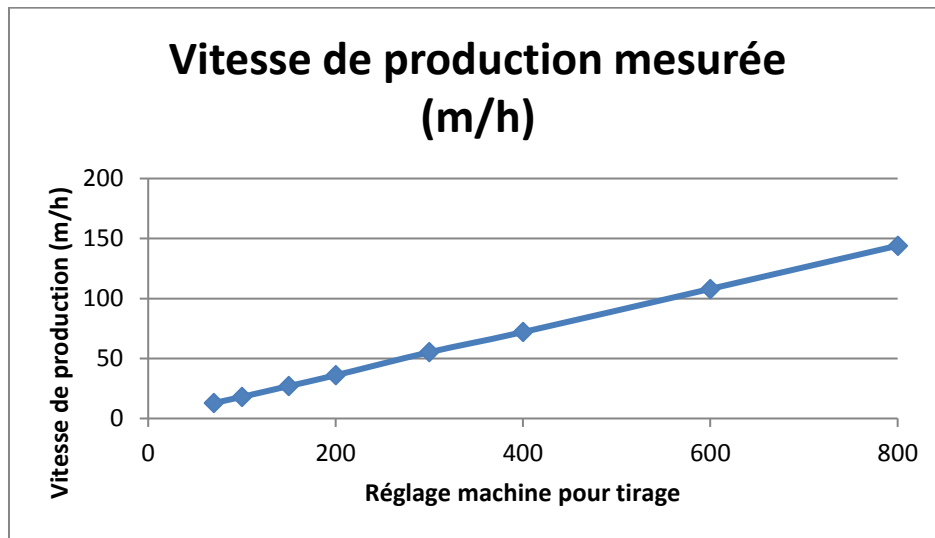


Figure 21 : Vitesse de production réelle/réglage machine

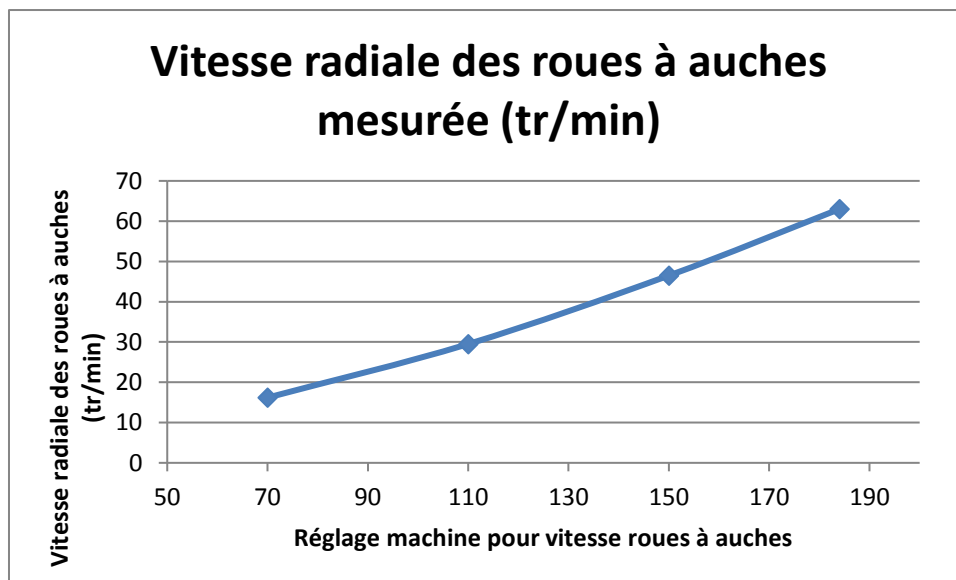


Figure 22 : Vitesse radiale des roues à aubes/réglage machine

Grâce aux formules théoriques (2.2 et 2.3) une approximation de l'angle de tressage peut être obtenue. La limite de ces formules est qu'elles ne prennent pas en compte les caractéristiques intrinsèques de la matière textile utilisée pour le tressage. De fait, l'angle que l'on obtient par ces formules n'est qu'un angle approché. La figure 23 présente pour une tresse en Vectran d'un diamètre de 40mm l'évolution angulaire attendue en fonction des paramètres de production (Eq 2.2).

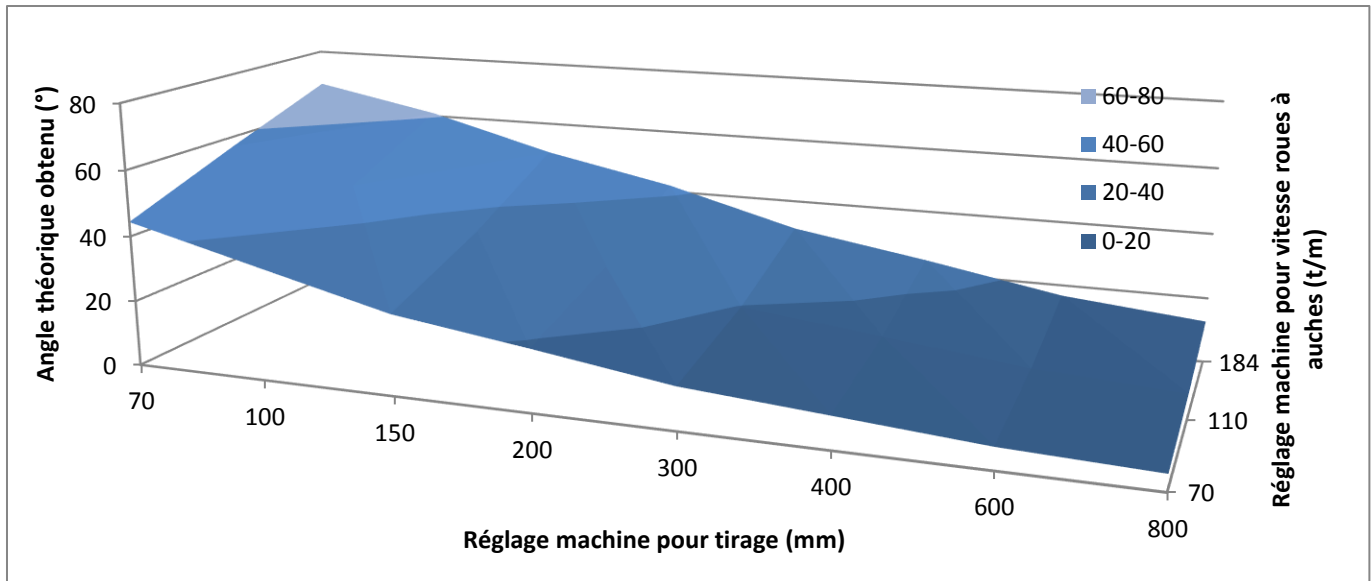


Figure 23 : Angle obtenu théoriquement en fonction des paramètres machine (pour une tresse de diamètre 40mm)

Les résultats mesurés de l'angle de tressage (figure 24) lors d'une production montrent une certaine différence avec l'approximation théorique.

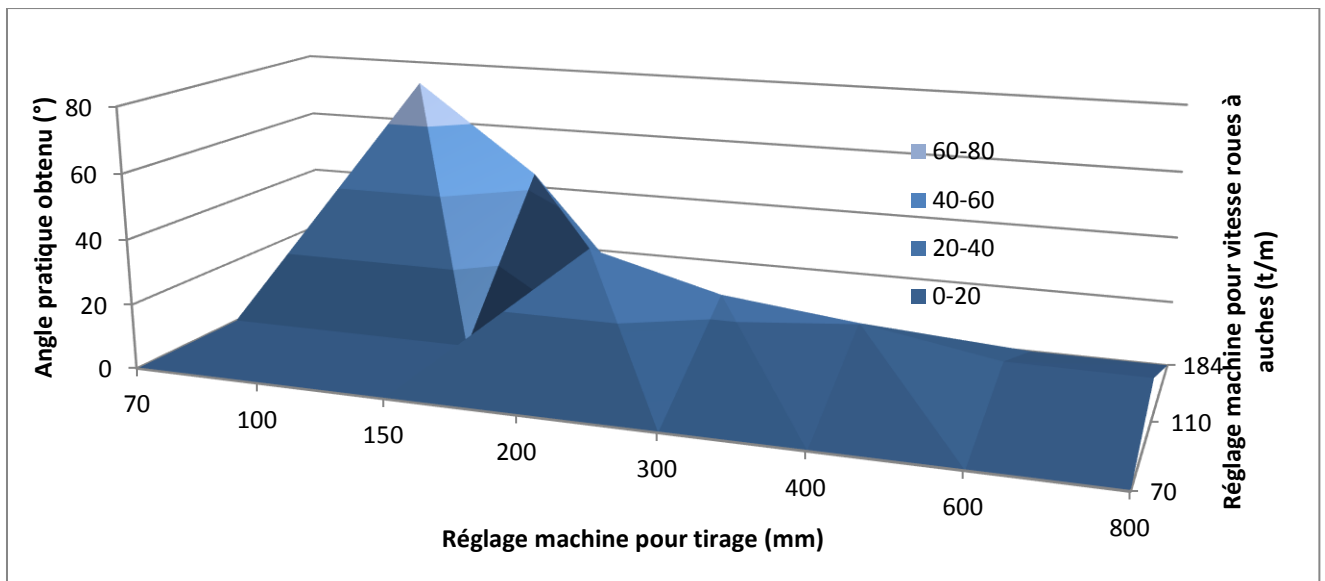


Figure 24 : Angle mesuré obtenu en fonction des paramètres machine (pour une tresse de diamètre 40mm)

## VII. Productions d'échantillons

La production d'échantillons reprend les étapes précédemment citées. Nous allons nous focaliser sur la dénomination et produire une liste exhaustive des échantillons réalisés dans le cadre de travail de thèse.

La dénomination des tresses produites prendra la forme suivante « X-Y-V<sub>T</sub>-ω<sub>R</sub> » où :

X : désigne le nombre de fils par bobineaux fournissant un fil de biais

Y : désigne le nombre de fils par bobineaux fournissant un fil axial

$V_t$  : désigne la vitesse de production

$\omega_R$  : désigne la vitesse radiale des roues à auches.

Trois matières ont été utilisées pour produire les différents échantillons destinés à la caractérisation. Le Vectran, le Spectra et le Twaron sont les éléments fibreux présentés au chapitre 1 et qui ont servi, à l'élaboration des échantillons. La figure 25 répertorie toutes les configurations qui ont été produites. Tous les échantillons ont été réalisés en configuration biaxiale et triaxiale (c'est-à-dire sans et avec fils droits dans la structure).

### A. Nombre de fils

Le nombre de fils utilisé pour la production de tresses est un paramètre essentiel pour la caractérisation géométrique de la préforme finale[38]. La tresseuse de l'ENSAIT peut être équipée de 48 bobineaux droits et de 96 bobineaux axiaux. La possibilité de faire fonctionner la tresseuse avec un nombre réduit de bobineaux est possible. En bobinant sur chaque bobineaux deux voire trois structures textiles, la tresse finale sera constituée par un plus grand nombre de fil. Dans le cadre d'une tresse biaxiale, les fils droits n'interviennent pas, leur nombre sera de fait égal à 0. Les différentes configurations pour obtenir une tresse équilibrée sont les suivantes (Tableau 1).

Tableau 1 : Configurations de fils pour la production de tresses

Nombre de fils de biais	Nombre de fils droits	Dénomination
96	0	1-0
96	48	1-1
192	48	2-1
96	96	1-2
192	96	2-2
288	48	3-1
	96	3-2
	144	3-3

### B. Liste et Dénomination des échantillons

Tableau 2 : Production en Twaron

	Réglage machine pour tirage	Rotation roues à auches (tr/min)	Nb de fils de biais	Nb de fils droits	Dénomination
Twaron	200	70	96	48	1-1-200-70
	200	110	96	48	1-1-200-110
	200	150	96	48	1-1-200-150
	300	70	96	48	1-1-300-70
	300	110	96	48	1-1-300-110

	300	150	96	48	1-1-300-150
	400	70	96	48	1-1-400-70
	400	110	96	48	1-1-400-110
	400	150	96	48	1-1-400-150

Tableau 3 : Production en Vectran

	Réglage machine pour tirage	Rotation roues à aanches (tr/min)	Nb de fils de biais	Nb de fils droits	Dénomination
Vectran	70	184	192	96	2-2-70-184
	150	184	192	96	2-2-150-184
	200	110	192	96	2-2-200-110
	300	110	192	96	2-2-300-110
	400	110	192	96	2-2-400-110
	70	184	96	48	1-1-70-184
	100	184	96	48	1-1-100-184
	150	184	96	48	1-1-150-184
	200	110	96	48	1-1-200-110
	300	110	96	48	1-1-300-110
	400	110	96	48	1-1-400-110
	70	184	96	0	1-0-70-184
	100	184	96	0	1-0-100-184
	150	184	96	0	1-0-150-184
	200	110	96	0	1-0-200-110
	300	110	96	0	1-0-300-110
	400	110	96	0	1-0-400-110

Tableau4 : Production en Spectra

	Réglage machine pour tirage	Rotation roues à aanches (tr/min)	Nb de fils de biais	Nb de fils droits	Dénomination
Spectra	200	70	96	48	1-1-200-70
	300	70	96	48	1-1-300-70
	400	70	96	48	1-1-400-70
	200	110	96	48	1-1-200-110
	300	110	96	48	1-1-300-110
	400	110	96	48	1-1-400-110
	200	150	96	48	1-1-200-150
	300	150	96	48	1-1-300-150
	400	150	96	48	1-1-400-150
	70	184	96	48	1-1-70-184
	100	184	96	48	1-1-100-184
	150	184	96	48	1-1-150-184

200	110	96	48	1-1-200-110
300	110	96	48	1-1-300-110
400	110	96	48	1-1-400-110
70	184	192	48	2-1-70-184
150	184	192	48	2-1-150-184
200	110	192	48	2-1-200-110
300	110	192	48	2-1-300-110
400	110	192	48	2-1-400-110
600	110	192	48	2-1-600-110
100	150	192	96	2-2-100-150
100	184	192	96	2-2-100-184
150	150	192	96	2-2-150-150
150	184	192	96	2-2-150-184
200	110	192	96	2-2-200-110
300	110	192	96	2-2-300-110
400	110	192	96	2-2-400-110
600	110	192	96	2-2-600-110
800	110	192	96	2-2-800-110
70	184	288	48	3-1-70-184
150	184	288	48	3-1-150-184
200	110	288	48	3-1-200-110
300	110	288	48	3-1-300-110
400	110	288	48	3-1-400-110
600	110	288	48	3-1-600-110
100	150	288	96	3-2-100-150
100	184	288	96	3-2-100-184
150	150	288	96	3-2-150-150
150	184	288	96	3-2-150-184
200	110	288	96	3-2-200-110
300	110	288	96	3-2-300-110
400	110	288	96	3-2-400-110
600	110	288	96	3-2-600-110
800	110	288	96	3-2-800-110
150	150	288	144	3-3-150-150
200	110	288	144	3-3-200-110
300	110	288	144	3-3-300-110
400	110	288	144	3-3-400-110
800	110	288	144	3-3-800-110

Comme indiqué dans le tableau 3, seul pour le vectran des tresses biaxiales et triaxiales ont été réalisées et caractérisées.

Les lignes grisées dans le tableau concernant le Spectra (Tableau 4) correspond à un changement de lot de matière première.

Chaque configuration de tresse a été produite pour une longueur de six mètres minimum. Trois mètres sont dédiés à la caractérisation mécanique. La longueur restante est utilisée pour la caractérisation géométrique, tant au niveau angulaire, qu'au niveau masse linéique ou encore pour la mesure de l'embuvage.

### C. Protocole de caractérisation des tresses sèches

Tous les échantillons utilisés dans les protocoles suivants sont d'une longueur dans le sens de la production de 300 millimètres.

Suite à l'étape de production de préformes tressées puis à une étape d'échantillonnage, on obtient des longueurs de tresses manipulables. Ce paragraphe constitue une analyse des structures tresse produites à différentes échelles. Durant l'ensemble de ces travaux de thèse, la priorité a été d'appréhender le comportement mécanique et géométrique du renfort dans l'optique d'analyser l'influence des paramètres (sur ce comportement) mais également d'établir des modèles. Ainsi, cette analyse se focalisera sur une étude multi-échelle de la préforme tressée.

#### 1. Objectifs.

L'analyse après la phase de production des préformes tressées produites a plusieurs objectifs :

- Déterminer l'influence des paramètres « procédés » et/ou « matériaux » sur les propriétés de la tresse.
- Déterminer les paramètres (matériaux et/ou procédés) optimaux permettant d'obtenir la tresse qui serait en conformité avec le cahier des charges qui sera présenté au chapitre 5.
- Obtenir des données expérimentales pour constituer une base pour les futures étapes de modélisation

Dans le cadre des pièces de renfort fibreux, cette analyse après la phase de production est généralement appelée phase de caractérisation.

#### 2. Paramètres de caractérisation.

La caractérisation a pour objectif principal, comme exposé ci-dessus, l'identification de paramètres, pouvant servir à alimenter des étapes de modélisation. Dans le chapitre 1, l'aspect multi-échelle des renforts a été exposé, et l'importance de l'échelle considérée sur les différentes propriétés de la préforme a été exposée. La caractérisation des tresses produites devra donc suivre cet aspect multi-échelle. Une caractérisation à différentes échelles est donc envisagée, et va être exposée ci-dessous.

La caractérisation à l'échelle mésoscopique va se focaliser sur des paramètres d'architecture locaux de la préforme. L'intérêt est d'obtenir des informations sur les éléments fibreux qui constituent la tresse. Son chemin, ses orientations, sa longueur et son angle au sein de la structure seront recherchés. D'autres informations comme la densité d'éléments fibreux par rapport au volume global de la tresse seront investiguées.

L'échelle microscopique, celle représentant l'élément fibreux, paraît la plus compliquée à appréhender. Les informations à obtenir dans ce cadre-là porteront sur les géométries locales, ou encore les dimensions des sections des différents éléments fibreux constituant la tresse.

Tableau 5 : Paramètres de caractérisation

Echelle	Paramètre	Description	Unité
Macroscopique	<b>D</b>	Diamètre de la tresse	mm
	<b>l<sub>t</sub></b>	Largeur de la tresse	mm
	<b>E<sub>t</sub></b>	Epaisseur de la tresse	mm
	<b>L<sub>t</sub></b>	Longueur de la tresse	mm
	<b>α</b>	Angle de tressage	°
	<b>M<sub>lin</sub></b>	Masse linéique de la tresse	g/m
	<b>V<sub>fibre</sub></b>	Volume de fibre dans la tresse	mm <sup>3</sup>
	<b>V<sub>tresse</sub></b>	Volume de la tresse	mm <sup>3</sup>
	<b>T<sub>fibre</sub></b>	Taux de fibres dans la tresse	%
	<b>N<sub>droit</sub></b>	Nombre de fils droits	Fils
	<b>N<sub>biais</sub></b>	Nombre de fils de biais	Fils
	<b>E<sub>droit</sub></b>	Embuvaage des fils droits	%
	<b>E<sub>biais</sub></b>	Embuvaage des fils de biais	%
	<b>L<sub>fil</sub></b>	Longueur de fil	mm
Mésoscopique	<b>O</b>	Orientation du fil (ij) dans la section	°
Microscopique	<b>a<sub>droit</sub></b>	Largeur de la section du fil droit	mm
	<b>b<sub>droit</sub></b>	Epaisseur de la section du fil droit	mm
	<b>S<sub>droit</sub></b>	Surface de la section du fil droit	mm <sup>2</sup>
	<b>a<sub>biais</sub></b>	Largeur de la section du fil biais	mm
	<b>B<sub>biais</sub></b>	Epaisseur de la section du fil biais	mm
	<b>S<sub>biais</sub></b>	Surface de la section du fil biais	mm <sup>2</sup>

La méthode de caractérisation choisie est une méthode optique. Cette méthode permet d'obtenir différentes vues en coupe des échantillons, qui autorise une acquisition des données recherchées. L'analyse des différentes vues en coupe permettra de décrire toutes les informations recherchées, et synthétisées dans le tableau 5.

### 3. Protocole de caractérisation de l'angle de tressage

Les angles de tressage sont mesurés pendant le procédé de tressage mais également quand les tresses sont retirées de la tresseuse. Ces mesures sont réalisées par techniques d'analyses d'images. Les images des tresses sont prises par appareil photo et ces photos sont analysées avec le logiciel Image J, un logiciel libre d'analyse d'images[39]. Dix mesures angulaires sont effectuées à différents



endroits de la largeur et de la longueur de l'échantillon (figure 26). Une moyenne de ces valeurs est calculée pour obtenir l'angle de tressage. Une précision de l'ordre de  $0.55^\circ$  est obtenue.

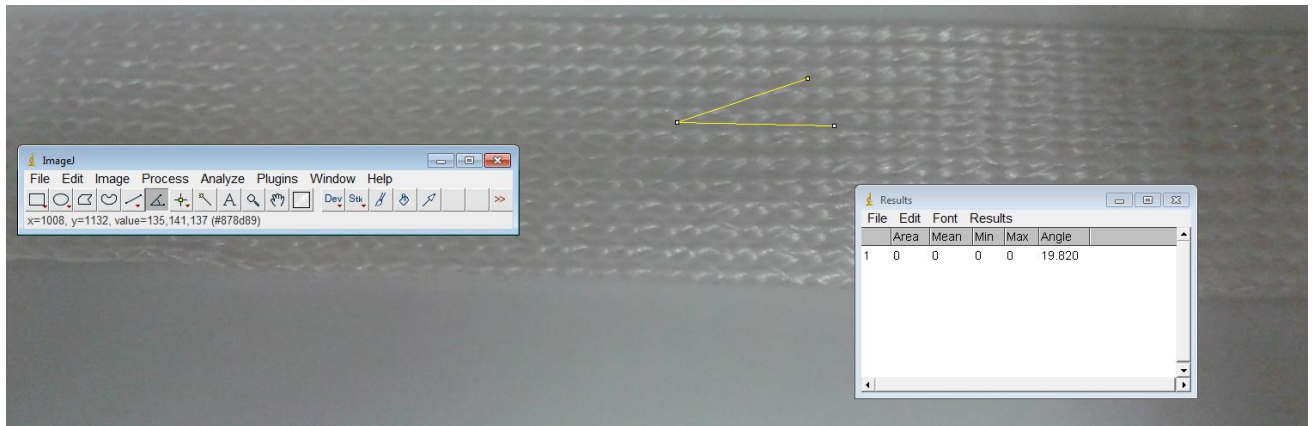


Figure 26 : Analyse angulaire sur le logiciel Image J

Deux campagnes de mesure au niveau angulaire ont été menées. Une campagne de mesure sur des tresses encore sur métier, donc encore soumises à une très faible de traction de la part des ressorts de rappel et du système de tirage. La seconde campagne de mesure est réalisée sur tresses découpées pour en faire des échantillons, c'est-à-dire libres de tout effort. Dans la suite de ce manuscrit, les angles considérés seront les angles issus de la seconde campagne de mesure.

#### 4. Protocole de caractérisation de l'embuvage

L'embuvage d'un fil dépend de beaucoup de paramètres[21]. La façon dont deux fils qui s'entrecroisent[40] va influencer directement sur les modifications locales de leur axe d'orientation [41][42]. Les paramètres mis en jeu sont relatifs à l'angle de tressage, aux propriétés du fil (sa section transverse, l'organisation de ses constituants), et au type de tresse. Dans notre cas, fils retordus, on peut estimer la section transverse de ces fils comme étant initialement circulaire. Par conséquent la longueur de fil entre deux points d'entrelacement peut être estimée comme la somme de deux arcs de cercle et d'une ligne les connectant (figure 27).

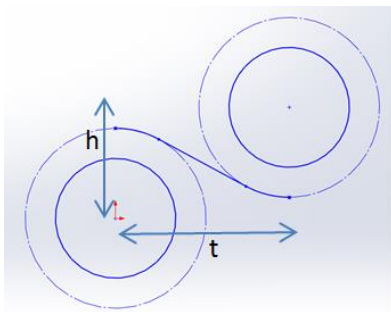


Figure 27 : Fils axiaux en coupe et trajectoire d'un fil de biais dans une structure tresse

La longueur totale de la trajectoire du fil de biais introduite figure 27, peut s'exprimer par l'Eq.2.11 :

$$L = \sqrt{t^2 + h^2} \text{ (Eq 2.11)}$$

Par cellule unitaire, cette longueur est bien sûr doublée. La formule précédente est valable pour une structure sans flottés. Il y faudra adjoindre une longueur supplémentaire en fonction du nombre de flottés ( $F$  pour le nombre de fils sautés) si l'on se trouve dans une structure complexe qui correspondrait à l'équation 2.12:

$$L = 2 \cdot (F - 1) \cdot t + 2 \cdot \sqrt{t^2 + h^2} \text{ (Eq 2.12)}$$

Le facteur d'embuvage  $E$  qui correspond à la longueur totale du fil suivant l'axe déformé en fonction de la longueur projetée et non perturbée par la géométrie imposée, correspond donc à l'équation suivante :

$$E = \frac{2 \cdot (F - 1) \cdot t + 2 \cdot \sqrt{t^2 + h^2}}{F \cdot t} \text{ (Eq 2.13)}$$

La longueur de fil de biais dans une tresse en prenant en compte l'embuvage peut donc être résumée par la formule, issue de l'Eq 2.5 :

$$L_{fil.E} = E \cdot \frac{1}{\cos \alpha} * L \text{ (Eq 2.14)}$$

De même que la longueur de fil de biais dans la structure dépend de l'angle de tressage, l'embuvage aussi est fortement dépendant de l'angle de tressage[3]. Si la tresse contient des fils droits dans sa structure, l'équation reste valide avec un angle de tressage de  $0^\circ$ , et un facteur d'embuvage beaucoup plus faible que pour les fils de biais, presque négligeable dans certains cas[43].

La longueur d'un produit textile fini, dont les tresses, est toujours inférieure à la longueur de fil introduite dans cette structure. En effet, à chaque croisement de fil, la trajectoire d'un fil est déviée et donc prend une longueur plus importante que la trajectoire initiale. La différence est nommée embuvage et s'exprime en pourcentage. Si  $L_{fil}$  est la longueur de fil dans la structure,  $L_0$  la longueur de la structure produite, l'embuvage  $E_{fil}$  est :

$$E_{fil} = \frac{L_{fil} - L_0}{L_0} * 100 \text{ (Eq 2.15)}$$

La mesure de la longueur de fil dans la structure se réalise en retirant des fils de biais et des fils droits de la structure produite. Dix fils de biais sont retirés de la structure (suivant les deux orientations angulaires  $+\alpha$  et  $-\alpha$ ), ainsi que dix fils droits. La mesure de la longueur de structure produite est mesurée à la règle par une moyenne de dix mesures. Ensuite, les vingt fils retirés de la structure sont mesurés, et une moyenne est effectuée pour avoir deux longueurs de fils. L'embuvage est ensuite mesuré grâce à la formule 2.15. Il est obtenu deux embuvages, celui pour les fils droits et celui pour les fils de biais. A la vue des trajectoires des fils dans la structure tresse finale, l'embuvage des fils droits est plus faible que celui des fils de biais.

## 5. Protocole de caractérisation de la masse linéique

La notion de masse linéique dans nos tresses est très liée à celle d'embuvage. En effet, l'embuvage peut être compris comme une sur-longueur créée par une ondulation supplémentaire. La caractérisation de la masse linéique va nous apprendre quelle est la longueur de fil totale dans la structure tresse, au travers de la densité volumique de la matière et de son titre. Le volume de fibres

dans la tresse pourra ainsi être déterminé. La masse linéique pondérée par la densité volumique de la matière utilisée représentera un volume de fibres.

Les masses linéaires en termes de masse des tresses sont mesurées sur dix échantillons. La moyenne de ces mesures est considérée comme étant la valeur retenue. Ces densités linéaires montrent une évolution en fonction des paramètres du procédé choisis, et par conséquence en fonction de l'angle de tressage. La pesée s'effectue sur une balance d'une précision de 0.001g. Les dix échantillons pesés par configuration de tresses produites sont placés sur le plateau peseur, qui est isolé de toute perturbation extérieure par un caisson en plexiglas. La tare est faite au début de toute pesée.

## 6. Protocole de mesure de longueur du fil

La longueur des fils est mesurée grâce à une règle. Les fils droits ou de biais sont extraits de la tresse produite et mesurés par ce protocole. Cette valeur sert notamment pour la mesure de l'embuage.

## 7. Protocole de caractérisation des largeurs, épaisseurs et surfaces des fils avant tressage

Les fils changent de section au cours du procédé de tressage. Pour assurer les mesures des formes de section, des vues en coupe à différents moments du procédé de tressage sont réalisées. Dans ce paragraphe, les fils considérés sont des fils sortis de bobine, avant l'étape de bobinage.

Pour les vues en coupe orthogonale, les fils (ou multi-filaments) doivent être figés pour pouvoir prendre des mesures précises sur ces derniers. Pour ce faire, et assurer ce maintien en position, les fils sont noyés dans de la résine époxy (de type 8200 de chez Sicomin). Le tout est coulé dans un tube en plastique, tout en maintenant le fil droit par un ajout de masse qui l'aligne avec la direction de la pesanteur. La coupe du tube suivant la section transverse est suivie par un polissage pour s'assurer de la planéité de la surface visible (figure 28 a et b). Plusieurs coupes sont réalisées pour obtenir jusqu'à vingt mesures de section. Une fois les sections mesurées grâce au logiciel Image J une moyenne est réalisée pour obtenir un diamètre relatif moyen des fils.

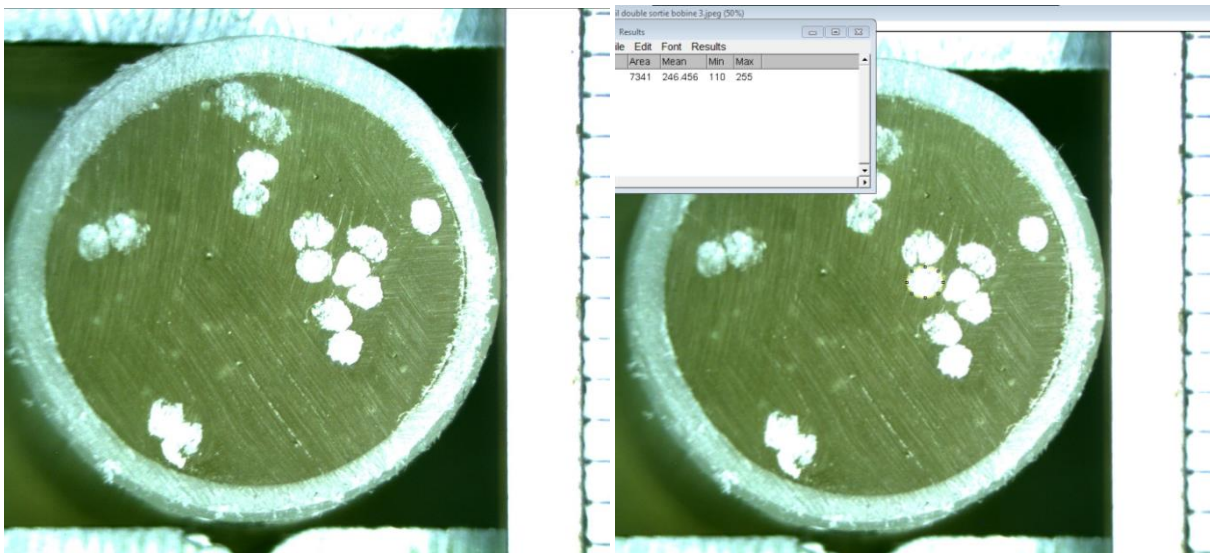


Figure 28 a et b : Vue en coupe des sections transverses des fils/ Illustration d'une mesure

Cette mesure est pondérée par la mesure réelle rapportée à la règle située à droite de l'image. De fait, un diamètre en millimètres est obtenu et va servir, notamment pour le calcul de l'embuage,

ainsi que pour la morphologie des sections transverses (pour la simulation géométrique des tresses). Une illustration des vues en coupe est proposée en figure 29.

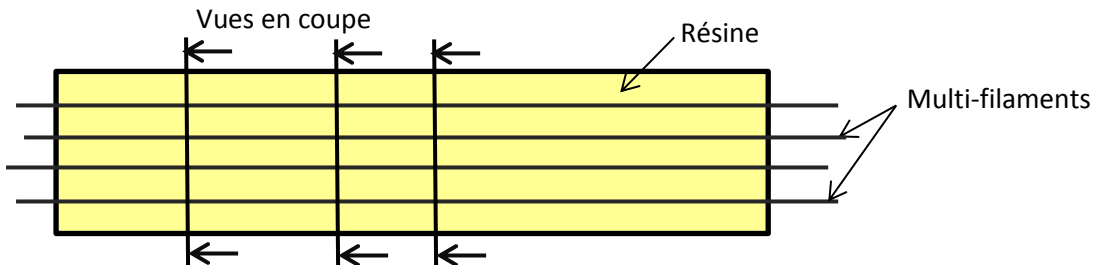


Figure 29 : Vue schématique du procédé de vues en coupe pour les sections de multi-filaments

## 8. Protocole d'acquisition des coupes de fils dans un échantillon tresse

Dans ce paragraphe, les fils considérés sont dans la tresse finale. Des différences morphologiques, par rapport au fil en sortie de bobineaux, seront ainsi estimées à l'aide des vues en coupe. Pour obtenir les informations qui correspondent respectivement aux largeurs, épaisseurs et sections des fils dans la tresse, les échantillons de tresses vont être observés selon différentes coupes associées aux chemins des différents multi-filaments constitutifs de la tresse.

Pour cela, les multi-filaments sont figés pour que l'on puisse réaliser des coupes propres. La tresse est donc résinée et découpée selon des plans de coupe particuliers (figure 30).

Deux plans de découpe sont privilégiés. La vue en coupe sens transverse apportera des informations sur les sections des fils droits dans la tresse, mais aussi sur les trajectoires des fils de biais. Les informations sur les orientations et les trajectoires des fils droits seront obtenues à l'aide de coupes dans le sens production.

Les sections, pour les caractéristiques géométriques des multi-filaments dans la structure, seront nommées  $x_i$ ,  $y_i$  et  $z_i$  en fonction de leurs positions sur les axes  $x, y$  ou  $z$ ,  $i$  désignant le numéro de coupe dans chacune des directions. Pour les sections suivant  $z$ , étant donnée la géométrie des tresses, une seule coupe sera possible, celle passant à travers l'axe de révolution des fils droits. Sur la figure 30, l'axe  $z$  désigne l'épaisseur de la tresse. Pour les autres orientations de plan de coupe, trois coupes seront réalisées pour chaque configuration de tresse.

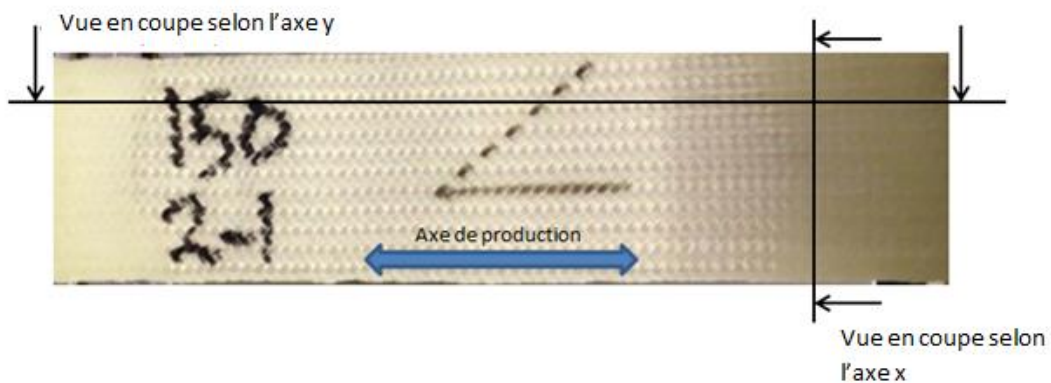


Figure 30 : Illustration des sections utilisées pour la caractérisation.

### 9. Protocole d'acquisition de clichés numériques.

Les découpes des échantillons selon les plans de coupe considérés ayant été réalisées, l'obtention d'une image numérique des coupes est nécessaire comme préalable à toute mesure. L'équipement utilisé pour cette capture d'image est détaillé en figure 31.

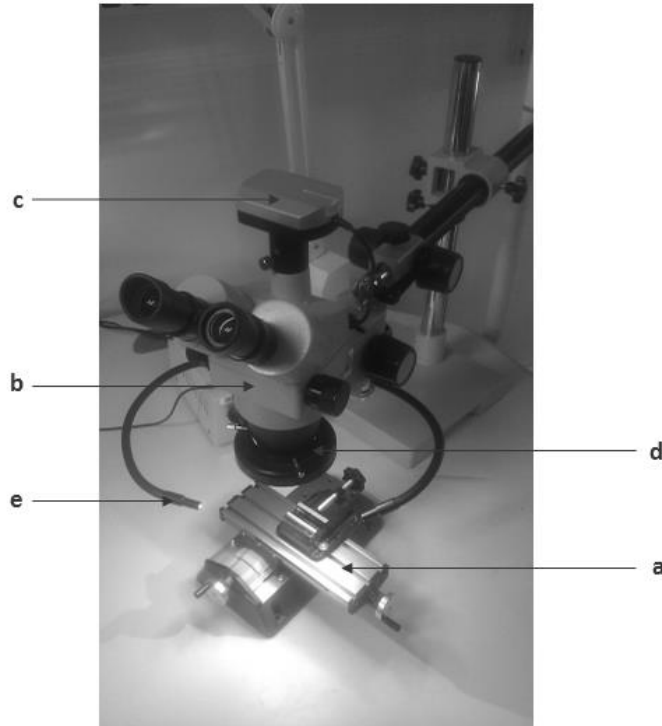


Figure 31 – Caméra pour acquisition numérique.

L'échantillon découpé est fixé dans un étau (figure 31-a) que l'on peut faire translater dans les directions, en vue de l'obtention d'une position optimale pour une photo nette par rapport à la loupe binoculaire (figure 31-b). La loupe binoculaire NOVEX PM 99259 est reliée à un capteur numérique (figure 31-c). Ce dernier permet la capture des clichés et le transfert vers un ordinateur. Deux systèmes d'éclairage sont disponibles : le premier est incorporé à l'objectif (figure 31-d), le second est une source externe ajustable en position et en intensité.

Durant les différentes acquisitions, les paramètres de réglage de l'objectif suivants ont été utilisés :

- Capteur de 3 mégapixels
- Résolution 2048x1536
- Focus : 38
- Iso : 200
- Temps de pose : 120ms
- Gain RGB (1,17 ; 1,00 ; 1,86).

De ces paramètres de prise d'image, le lien entre l'échelle réelle et l'échelle numérique des acquisitions est de 160 pixels.mm<sup>-1</sup>.

De ce protocole sont issus des clichés numériques, un exemple est présenté en figure 32.



Figure 32 : Image capturée d'une tresse produite

Un traitement numérique est ensuite apporté aux images acquises via le logiciel « BEL Analyser » qui permet de détourer les surfaces, permettant ainsi de dissocier et d'identifier les différents éléments fibreux et zones de résine de l'image. Grâce à ce traitement, la prise de mesures des dimensions (sections, largeur des multi-filaments, variations de direction) ou d'orientations des fils dans les différentes coupes devient possible. Les résultats doivent encore être analysés. Ils le sont dans la suite de ce chapitre.

### 10. Grille de caractérisation et paramètres.

Une grille de caractérisation va permettre une meilleure visualisation des mesures. Cela va aussi permettre de définir les différentes positions des multi-filaments dans la tresse. Cette grille de caractérisation va être dépendante de la section considérée. Une vue en coupe sens transverse présentera une grille de caractérisation qui nous donnera des informations sur les sections des fils droits. Une vue en coupe sens production servira à caractériser les sections des fils de biais à une échelle produit fini. Enfin, une coupe dans l'épaisseur nous donnera les directions des fils droits dans la préforme ainsi qu'une information sur les sections transverses des fils de biais.

Une proposition de grille de caractérisation est faite en figure 33. La coupe suit un plan sens transverse de la tresse. Les autres grilles suivant les autres plans de coupe ont un fonctionnement similaire.

La grille est ici structurée en deux axes  $i$  et  $j$  :  $i$  représentant l'abscisse et  $j$  l'ordonnée. Chaque multi-filament présent correspond à un couple de coordonnées  $(i,j)$ . Un exemple, le fil droit de la colonne du milieu et présent dans la couche supérieure sera dénoté  $(2,1)$ .

Plusieurs coupes sont réalisées dans un même échantillon. De fait, dans la notation adoptée, le fil sera repéré par son couple de coordonnées  $(i,j)$ , mais aussi par le numéro de la coupe dont l'image est issue. Cependant, la géométrie de la tresse est équilibrée et répétable, de fait, la position de la vue en coupe le long de l'axe de production n'a pas une influence flagrante sur les résultats. Par conséquent la position de la mesure sera omise dans la suite du chapitre.

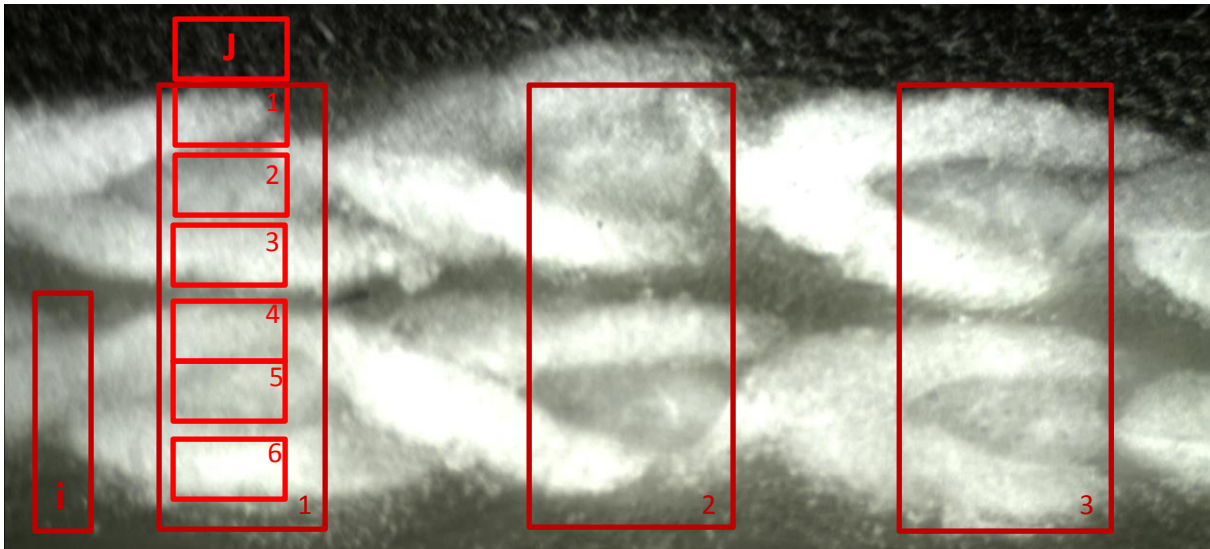


Figure 33 : Grille de caractérisation des multi-filaments pour une coupe en sens transverse

Cette grille de caractérisation, ou matrice de position de l'élément fibreux, permet d'accoler au paramètre mesuré un couple de position en indice pour bien repérer l'élément considéré. Cela va servir à construire un nouveau tableau de paramètres de caractérisation.

La valeur représentera la moyenne issue de 5 mesures pour chaque paramètre. Chaque multi-filament sera ainsi caractérisé selon les paramètres que la coupe considérée nous autorise à mesurer.

Les résultats qui seront exposés dans le chapitre 3 ne seront pas présentés en totalité dans un souci de clarté. Ils représentent une manne d'information permettant d'appréhender avec une finesse accrue la structure tresse produite, mais aussi les différentes relations entre les valeurs issues des caractérisations géométriques et les paramètres procédé utilisés pour la production de l'échantillon considéré.

### 11. Protocole de traction uniaxiale sur fils

La caractérisation mécanique en traction a tout d'abord été conduite sur les fils simples. Les tests de traction uniaxiale ont été réalisés sur une machine de traction de marque MTS équipée d'un capteur de 500N. Les résultats sont obtenus de l'analyse de vingt échantillons de fils. Les tests de traction ont été réalisés sur des multi-filaments de 160 tex et suivant la norme NF IN ISO 2062. L'espace considéré entre les mors est de 200mm.

La longueur utile pour cet essai de multi-filament est de 200mm entre les mors. Deux configurations de mors ont été testées :

- Des mors en cor de chasse, et
- Des mors plats et présentant un relief composé de petits picots.

Pour ce dernier type de mors, des talons ont été ajoutés aux échantillons de multi-filament pour empêcher tout glissement dans les mors. Les résultats obtenus grâce à ces deux configurations de tests ont été discriminants. Avec les mors en cor de chasse, un glissement important est notable durant le test, ce qui le rend non exploitable. De fait, la caractérisation des multi-filaments s'est faite

à travers un test de traction réalisé avec des mors plats à picots et des talons pour s'assurer d'un non-glissement dans les mors.

### 12. Protocole de traction uniaxiale sur tresses

La caractérisation mécanique des tresses sèches biaxiales et triaxiales a été réalisée sur une machine Instron équipée d'un capteur de 250 kN (figure 34). Les résultats sont obtenus à partir de l'analyse de 10 échantillons de tresse pour chaque configuration. Pour ces essais, la norme considérée est la NF ISO 13934, avec une vitesse de test égale à 50mm/min.

La vitesse de test qui a été choisie sera discutée en introduction du chapitre 4, avec une présentation des résultats de traction pour une configuration de tresse selon différentes vitesses (5, 10, 50, 100 et 200 mm/min). Tous les tests de traction sont réalisés dans la direction axiale (la direction de production des tresses).



Figure 34: Machine de traction Instron

Lors des différentes manipulations des tresses, l'angle de tressage subit des changements. De même, lors de l'essai de traction, une précharge de 50N est appliquée à l'échantillon avant le début effectif de l'enregistrement de l'essai.

### 13. Protocole d'ajout de talons

La caractérisation des tresses, sèches, nécessite la réalisation de talons élaborés à partir d'un mélange de résine époxy SR8200 et de durcisseur SD7203 dans des proportions de 100g de résine pour 37g de durcisseur.

Deux rectangles de fibre de verre sont disposés sur une feuille de téflon afin que le composite n'accroche pas au support. Ces deux rectangles sont espacés de 200mm, soit la longueur de tresse qui va être soumise au test en traction (Etape 1 sur figure 35). Un ajout de résine sur chacun des deux rectangles de fibre de verre est réalisé (Etape 2). L'échantillon de tresse à résiner est déposé sur les rectangles enduits de résine (Etape 3) et de la résine est ajoutée sur les extrémités de la tresse qui sont en contact avec le mat de verre (Etape 4). Deux nouveaux rectangles de fibre de verre sont ensuite déposés sur les extrémités de la tresse en exerçant une pression pour faire remonter la résine en excès et pouvoir ainsi la répartir sur la couche supérieure de mat de verre (Etape 5). Le tout



est recouvert d'une feuille de téflon puis d'une plaque de métal afin d'exercer une pression sur le composite.

Enfin une durée de 72h à température ambiante est nécessaire afin que la résine polymérise, avant de réaliser les tests en traction

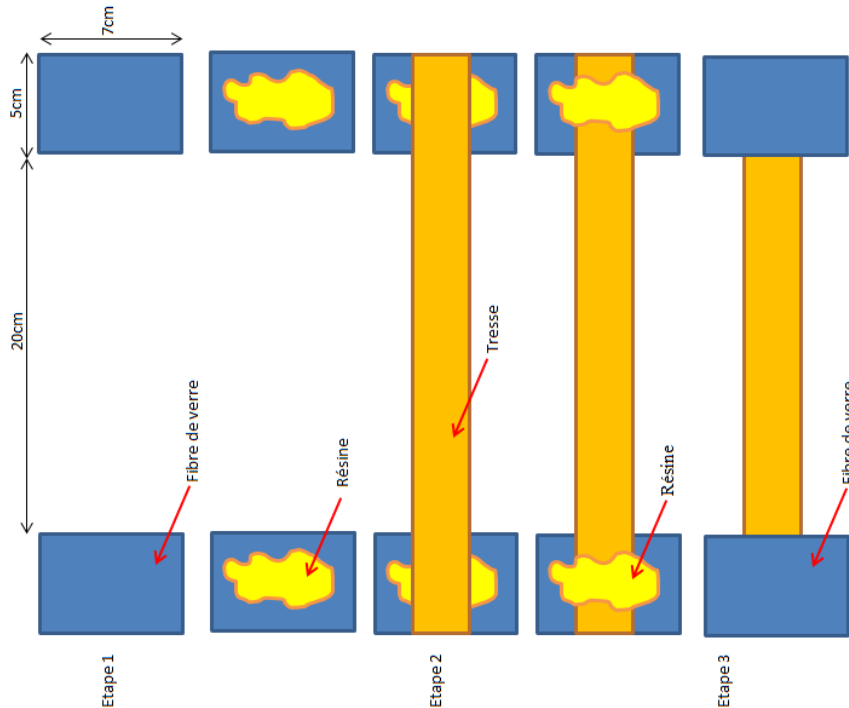


Figure35: Protocole de formation de talons

#### 14. Protocole de mesure du suivi angulaire

L'essai de traction uniaxiale est filmé par une caméra GoPro Hero 4 filmé en 4K avec une résolution de 3840 x 2160. De ce film, un logiciel vient extraire une image toutes les secondes. Ces images nous permettent de suivre l'évolution de l'angle de tressage lors de l'essai de traction. Une fois ces angles obtenus, une courbe de l'évolution de l'angle en fonction du temps de l'essai est obtenue. Cette dernière est recalée par rapport à la déformation, pour obtenir une courbe « angle de tressage - déformation de l'échantillon ». Dès lors, une superposition de la courbe de traction et de la courbe de suivi angulaire est possible. L'exploitation de ces courbes sera présentée dans le chapitre 4.

#### 15. Protocole de mesure de l'évolution thermique de la tresse au cours du test de traction uniaxiale

La prise d'images thermiques a été réalisée avec une caméra Flir C2. La température est mesurée par un capteur avec une précision supérieure à 0.1°C. La gamme de mesure de l'objectif et du capteur est étendue de -10°C à 150°C. L'échelle de température est modifiée par paramétrage automatique pour obtenir une meilleure précision de la mesure. Un logiciel est proposé pour analyser les photos prises. Avec ce dernier, la possibilité de localiser le point le plus chaud de l'image est possible (figure 36).

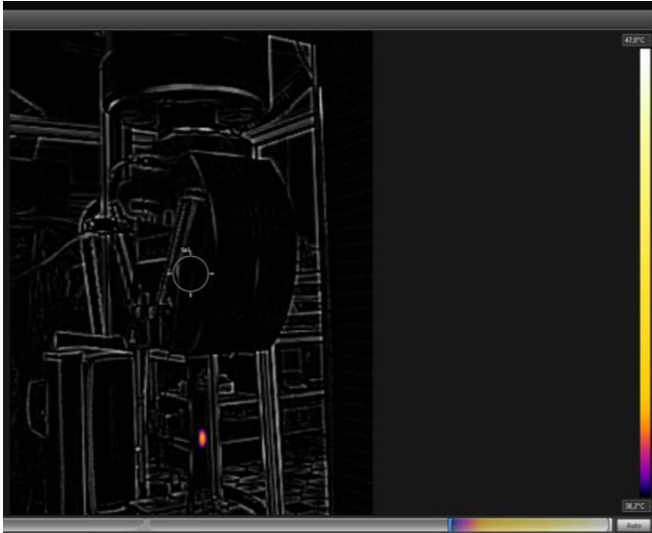


Figure 36 : Analyse thermique d'une image prise durant le test de traction

Chaque photo est prise à un moment bien précis qui est corrélé à l'effort appliqué lors de l'essai de traction. Avec cette information, un recalage de la température par rapport à la déformation au cours de l'essai est fait.

Une superposition des courbes de traction et d'évolution thermique de la tresse au cours de l'essai de traction est ainsi obtenue.

## VIII. Conclusions du chapitre

Suite à un premier chapitre à visée introductive et bibliographique, une étude plus axée sur une machine de tressage a été menée. Une analyse fonctionnelle du procédé de tressage, et de ses effets a été proposée. Cette étude a permis de mettre en évidence les paramètres influant sur la géométrie finale de la préforme, et ce en fonction de l'échelle considérée.

Les différents paramètres identifiés ont été listés. Pour essayer de quantifier les modifications qu'induirait ces paramètres sur la tresse, une analyse géométrique théorique de la structure tresse dépendant de ces paramètres a été proposée. Les différents critères importants pour la différenciation des structures produites ont été mis en avant. L'importance de la maîtrise des paramètres du procédé vis-à-vis des résultats sur tresse produite s'avère comme étant primordiale. Un certain nombre de choix d'études a donc dû être fait. Dans la plupart des cas, pour chaque paramètre identifié, les mêmes hypothèses de modélisation ont été faites. Ces dernières permettent de proposer un modèle simple mais cependant exploitable dans la suite du manuscrit.

Une présentation de la dénomination et des échantillons produits a suivie. Ainsi, que les différents protocoles de caractérisation, qui serviront à obtenir des résultats expérimentaux à exploiter aux chapitres 3 et 4. Ces protocoles de caractérisation concernent aussi bien des caractéristiques géométriques que mécaniques ou thermiques, et permettent d'apporter un maximum d'informations lors du test de traction uniaxiale.

Dans le chapitre suivant seront détaillés les résultats géométriques expérimentaux obtenus. Une modélisation expérimentale dépendant des paramètres identifiés comme étant les plus influents sera proposée. Et cette modélisation sera comparée à une modélisation théorique qui découlera des observations effectuées dans ce chapitre.

## Bibliographie du chapitre 2

- [1] P. Potluri, A. Rawal, M. Rivaldi, and I. Porat, "Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3D preforms," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 6, pp. 481–492, Jun. 2003.
- [2] P. Potluri, "Braiding," in *Wiley encyclopedia of composites*, 2012, pp. 1–15.
- [3] P. Potluri and A. Manan, "Mechanics of non-orthogonally interlaced textile composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 4, pp. 1216–1226, Apr. 2007.
- [4] C. Ayranci and J. Carey, "2D braided composites: A review for stiffness critical applications," *Compos. Struct.*, vol. 85, no. 1, pp. 43–58, Sep. 2008.
- [5] C. Ayranci and J. P. Carey, "Predicting the longitudinal elastic modulus of braided tubular composites using a curved unit-cell geometry," *Compos. Part B Eng.*, vol. 41, no. 3, pp. 229–235, Apr. 2010.
- [6] P. J. Falzod and I. Herszberg, "Mechanical Performance of 2-D Braided Carbon / Epoxy Composites \*," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 3538, no. 97, pp. 253–265, 1998.
- [7] W. Kuo, T. Kob, and H. Chena, "Elastic moduli and damage mechanisms 3D braided composites incorporating pultruded rods in," *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, no. 97, 1998.
- [8] Z. X. Tang and R. Postle, "Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials ± part I : fabric structure and fibre volume fraction," *Compos. Struct.*, vol. 49, pp. 451–459, 2000.
- [9] L. Castejón, A. Miravete, and J. Cuartero, "Mechanics of Composite Materials and Structures of ( 0 ° , ± α ° ) Braided Composites and Its Application In Crashworthiness Simulations," no. February 2012, pp. 37–41, 2010.
- [10] A. Aggarwal, S. Ramakrishna, and V. K. Ganesh, "Predicting the strength of diamond braided composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 36, no. 05, pp. 625–643, 2002.
- [11] S. C. Quek, A. M. Waas, K. W. Shahwan, and V. Agaram, "Analysis of 2D triaxial flat braided textile composites," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 45, no. 6–7, pp. 1077–1096, Jun. 2003.
- [12] A. K. Pickett and M. R. C. Fouinneteau, "Material characterisation and calibration of a meso-mechanical damage model for braid reinforced composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 2, pp. 368–377, 2006.
- [13] A. K. Pickett, J. Sirtautas, and A. Erber, "Braiding simulation and prediction of mechanical properties," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 16, no. 6, pp. 345–364, 2009.
- [14] F. Schmidt, M. Rheinfurth, P. Horst, and G. Busse, "Effects of local fibre waviness on damage mechanisms and fatigue behaviour of biaxially loaded tube specimens," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 72, no. 10, pp. 1075–1082, 2012.

- [15] G. Fang and J. Liang, "A review of numerical modeling of three-dimensional braided textile composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 45, no. 23, pp. 2415–2436, 2011.
- [16] D. Li, D. Fang, N. Jiang, and Y. Xuefeng, "Finite element modeling of mechanical properties of 3D five-directional rectangular braided composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 6, pp. 1373–1385, Sep. 2011.
- [17] P. Qu, X. Guan, Y. Jia, S. Lou, and J. Nie, "Effective elastic properties and stress distribution of 2D biaxial nonorthogonally braided composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 8, pp. 997–1008, 2012.
- [18] C.-L. Hwan, K.-H. Tsai, W.-L. Chen, and S. Sun, "Predicting the elastic moduli of three-dimensional (four-step) braided tubes using a spatial spring model," *J. Compos. Mater.*, vol. 47, no. 8, pp. 991–1000, 2012.
- [19] J. A. Schultz and M. Garnich, "Meso-scale and multicontinuum modeling of a triaxial braided textile composite," *J. Compos. Mater.*, no. March 2012, 2012.
- [20] X. Ji, A. M. Khatri, E. S. Chia, R. K. Cha, B. T. Yeo, S. C. Joshi, and Z. Chen, "Multi-scale simulation and finite-element-assisted computation of elastic properties of braided textile reinforced composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 48, no. 8, pp. 931–949, 2014.
- [21] Z. T. Kier, A. Salvi, G. Theis, A. M. Waas, and K. Shahwan, "Estimating mechanical properties of 2D triaxially braided textile composites based on microstructure properties," *Compos. Part B Eng.*, vol. 68, pp. 288–299, 2015.
- [22] D. Branscomb, D. Beale, and R. Broughton, "New Directions in Braiding," *J. Eng. Fibres Fabr.*, vol. 8, no. 2, pp. 11–24, 2013.
- [23] W. . Douglass, *Braiding and braiding machinery*. Eindhoven : N.V. Uitgevesmaatschappij Centrex, 1964.
- [24] T. D. Kostar and T. W. Chou, "A methodology for Cartesian braiding of three-dimensional shapes and special structures," *J. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 13, pp. 2811–2824, 2002.
- [25] M. Munro and A. Fahim, "A Comparison of Helical Filament Winding and 2D Braiding of Fiber Reinforced Polymeric Components," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 10, no. 1, pp. 37–46, 1995.
- [26] S. W. Attaway, "The Mechanics of Friction in Rope Rescue," *Int. Tech. Rescue Symp.*, no. Itrs 99, pp. 1–16, 1999.
- [27] Q. Zhang, D. Beale, S. Adanur, R. M. Broughton, and R. P. Walker, "Structural Analysis of a Two-dimensional Braided Fabric," *J. Text. Inst.*, vol. 88, no. 1, pp. 41–52, Jan. 1997.
- [28] J. F. A. Kessels and R. Akkerman, "Prediction of the yarn trajectories on complex braided preforms," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 8, pp. 1073–1081, Aug. 2002.
- [29] J. H. Van Ravenhorst and R. Akkerman, "Circular braiding take-up speed generation using inverse kinematics," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 64, no. April, pp. 147–158, 2014.

- [30] J. Lyons and C. M. Pastore, "Effect of braid structure on yarn cross-sectional shape," *Fibers Polym.*, vol. 5, no. 3, pp. 182–186, 2004.
- [31] D. Brunnschweiler, "Braids and Braiding," *J. Text. Inst. Proc.*, vol. 44, no. 9, pp. P666–P686, 1953.
- [32] G. W. Du and P. Popper, "Analysis of a Circular Braiding Process for Complex Shapes," *J. Text. Inst.*, vol. 85, no. 3, pp. 316–337, 1994.
- [33] A. Rawal, "Geometrical Modeling of the Yarn Paths in Three-dimensional Braided Structures," *J. Ind. Text.*, vol. 35, no. 2, pp. 115–135, 2005.
- [34] A. C. Long, "Process modelling for liquid moulding of braided preforms," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 32, no. 7, pp. 941–953, Jul. 2001.
- [35] B. Dauda, S. O. Oyadiji, and P. Potluri, "Characterising mechanical properties of braided and woven textile composite beams," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 16, no. 1, pp. 15–31, 2009.
- [36] A. Rawal, S. Gupta, H. Saraswat, and A. Sibal, "Geometrical modeling of near-net shape braided preforms," *Text. Res. J.*, vol. 85, no. 10, pp. 1055–1064, 2014.
- [37] Y. Kyosev, *Braiding Technology for Textiles*. Woodhead Publishing, 2015.
- [38] S. Del Rosso, L. Iannucci, and P. T. Curtis, "Experimental investigation of the mechanical properties of dry microbraids and microbraid reinforced polymer composites," *Compos. Struct.*, vol. 125, pp. 509–519, 2015.
- [39] B. Duchamp, X. Legrand, and D. Soulat, "The tensile behaviour of biaxial and triaxial braided fabrics," *J. Ind. Text.*, vol. 0, no. 00, pp. 1–21, 2016.
- [40] J.-H. Byun, "The analytical characterization of 2-D braided textile composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 5, pp. 705–716, Apr. 2000.
- [41] T. Ishikawa and T. Chou, "Stiffness and strength behaviour of woven fabric composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 17, no. 11, pp. 3211–3220, 1982.
- [42] D. Goyal, "Analysis of Stress Concentrations in 2 2 Braided Composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 40, no. 6, pp. 533–546, 2005.
- [43] A. Endruweit and A. C. Long, "A model for the in-plane permeability of triaxially braided reinforcements," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 2, pp. 165–172, Feb. 2011.

## Chapitre 3 : Caractérisation et modélisation géométrique des tresses

<u>Chapitre 3 : Caractérisation et modélisation géométrique des tresses</u> .....	111
I. <u>Introduction</u> .....	112
II. <u>Caractérisation géométrique à l'échelle macroscopique</u> .....	112
A. <u>Caractérisation de l'angle de tressage</u> .....	113
B. <u>Caractérisation de la masse linéique</u> .....	117
C. <u>Caractérisation de la trajectoire d'un fil et de l'embuvage</u> .....	120
III. <u>Modèle d'évolution des masses linéiques</u> .....	124
IV. <u>Résultats de caractérisation à échelle microscopique</u> .....	131
A. <u>Mesures de sections des fils avant et après bobinage</u> .....	131
B. <u>Fil en sortie de fuseau</u> .....	133
C. <u>Fils dans la structure finale</u> .....	133
D. <u>Conclusion intermédiaire</u> .....	139
V. <u>Modélisation géométrique à l'échelle macroscopique</u> .....	139
VI. <u>Modèles géométriques d'une tresse</u> .....	141
A. <u>Modèles géométriques pour fils et multi-filaments</u> .....	141
B. <u>Modèles géométriques pour le chemin des multi-filaments dans des structures tresses</u> . 144	
VII. <u>Développement du modèle géométrique d'une tresse</u> .....	147
A. <u>Hypothèses de modélisation sous SolidWorks</u> .....	148
B. <u>Méthode de modélisation des éléments fibreux</u> .....	148
C. <u>Définition d'un VER</u> .....	151
VIII. <u>Résultats de la simulation, comparatif par rapport aux données expérimentales</u> .....	153
IX. <u>Conclusions</u> .....	158
<u>Bibliographie du chapitre 3</u> .....	159

La répétition n'est pas la généralité. Il n'y a de science que de ce qui se répète. [1]

## I. Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif est la caractérisation géométrique des tresses biaxiales et triaxiales introduites dans le chapitre 2 et élaborées à l'aide de la tresseuse. Les paramètres qualifiés de géométriques regroupent les propriétés qui caractérisent une structure textile de type tresse, et présentées dans le chapitre 1 bibliographique. On dissocie ces paramètres textiles des caractérisations mécaniques qui seront détaillées dans le chapitre 4. Pour ce faire, une analyse expérimentale des paramètres de la tresse à différentes échelles (fil, tresse) va permettre d'identifier des propriétés en fonction des paramètres d'élaboration, introduits dans le chapitre précédent. Cette démarche expérimentale s'appuie sur les protocoles également introduits dans le chapitre 2. Cette approche expérimentale sera complétée par des modèles reliant ces paramètres et permettant de prédire les propriétés mais également d'optimiser la modélisation géométrique, notamment de la trajectoire des fils dans la structure.

Les résultats issus de cette analyse serviront d'une part à construire une base de données expérimentale mais également par la suite, comme données pour établir et corrélérer des modèles analytiques ou numériques comme pour la simulation géométrique des tresses.

Dans un premier temps les caractérisations et modèles analytiques à l'échelle macroscopique (de la tresse) seront présentées. Dans un second temps, à l'échelle du fil (dans la tresse), différentes mesures de sections seront réalisées et analysées. Enfin la dernière partie de ce chapitre sera consacrée aux outils de modélisations géométriques de la tresse dont l'objectif est de reproduire la trajectoire des fils dans cette structure textile.

## II. Caractérisation géométrique à l'échelle macroscopique

Les caractérisations à l'échelle macroscopique, permettent d'obtenir des informations sur la géométrie globale de la préforme. Ces caractéristiques recherchées sont la longueur, la largeur, l'épaisseur mais également l'angle de tressage et la masse des tresses. Associés à ces paramètres à l'échelle de la tresse, dans ce processus de caractérisation, sont ajoutés d'une part des mesures d'embuvage des fils mais également des orientations. L'ensemble de ces différents paramètres sont listés dans le tableau 1.

Tableau1 : Paramètres caractérisés

Echelle	Paramètre	Description	Unité
Macroscopique	<b>D</b>	Diamètre de la tresse	mm



	<b><math>I_t</math></b>	Largeur de la tresse	mm
	<b><math>E_t</math></b>	Épaisseur de la tresse	mm
	<b><math>L_t</math></b>	Longueur de la tresse	mm
	<b><math>\alpha</math></b>	Angle de tressage	°
	<b><math>M_{lin}</math></b>	Masse linéique de la tresse	g/m
	<b><math>V_{fibre}</math></b>	Volume de fibre dans la tresse	mm <sup>3</sup>
	<b><math>V_{tresse}</math></b>	Volume de la tresse	mm <sup>3</sup>
	<b><math>T_{fibre}</math></b>	Taux de fibres dans la tresse	%
	<b><math>N_{droit}</math></b>	Nombre de fils droits	Fils
	<b><math>N_{biais}</math></b>	Nombre de fils de biais	Fils
	<b><math>E_{droit}</math></b>	Embuvage des fils droits	%
	<b><math>E_{biais}</math></b>	Embuvage des fils de biais	%
	<b><math>O</math></b>	Orientation du fil (ij) dans la section	°

### A. Caractérisation de l'angle de tressage

Dans le chapitre 2, il a été montré que l'angle de tressage est un paramètre essentiel de la structure tresse. Dans la littérature, la gamme d'angle de tressage va le plus souvent de 10 à 80°. Dans des applications composites, la gamme d'angle couverte est de 30 à 60° afin d'obtenir des matériaux plus symétriques entre les directions de production et transverse. Les tresses élaborées dans cette étude couvrent une gamme angulaire la plus large possible.

La mesure de l'angle s'appuie sur une méthode sans contact par analyse d'images, dont le protocole a été décrit dans le chapitre 2 par contre entre les mesures effectuées au cours du procédé de tressage et celles sur les tresses sorties du métier on peut noter une certaine variation. Ces différences vont être exposées, et une configuration dans laquelle l'angle de tressage sera mesuré pour la suite de l'étude va être définie.

Seuls les résultats provenant de la matière Spectra ou Vectran (matières présentées au chapitre 1) seront analysés. Ils couvrent en effet la plus grande plage et la plus grande variation de paramètres procédés étudiés.

Les résultats de mesures angulaires sur chacune des tresses sont exprimés en fonction des paramètres procédés considérés lors du tressage et définis dans le chapitre 2. En fonction de la dénomination utilisée (Tableaux 1-3, chapitre 2) ces angles s'exprimeront, pour chaque type de tresses (biaxiale, triaxiale) en fonction des couples de valeurs (vitesse de tirage (ou de production), vitesse de rotation des roues à aches) appliquées lors du procédé.

On reporte sur la figure 1, les angles mesurés, sur la tresseuse pour 3 couples de valeurs de vitesse de tirage (200, 300 et 400 mm) et de vitesse de rotation des roues à aches (70, 110, 150 tr/min.) et

ce pour les tresses en Vectran biaxiale (96 fils de biais) et triaxiale (144 fils : 96 de biais et 48 fils droits).

En fonction du type de tresse, biaxiale ou triaxiale, les remarques suivantes peuvent être établies :

- Les fils droits permettent à la tresse triaxiale d'être plus stable (d'avoir une meilleure tenue à la manipulation) quelle que soit la vitesse de rotation des roues à aubes.
- Les différences entre deux angles d'une structure triaxiale produite avec une même vitesse de tirage est négligeable, si l'on prend en compte la variation des mesures.
- Les tresses biaxiales montrent pour un même paramètre de tirage une variation angulaire bien supérieure à celle des tresses triaxiales.
- Les angles de tressage mesurés sur machine des tresses triaxiales sont plus élevés que ceux des tresses biaxiales. Les fils droits viennent en effet densifier la structure et empêchent une réorganisation des fils de biais dans la tresse finale. Dans une tresse biaxiale, aucune gêne n'est présente pour que les fils de biais s'arrangent dans une position stable et donc viennent fermer la structure tresse.

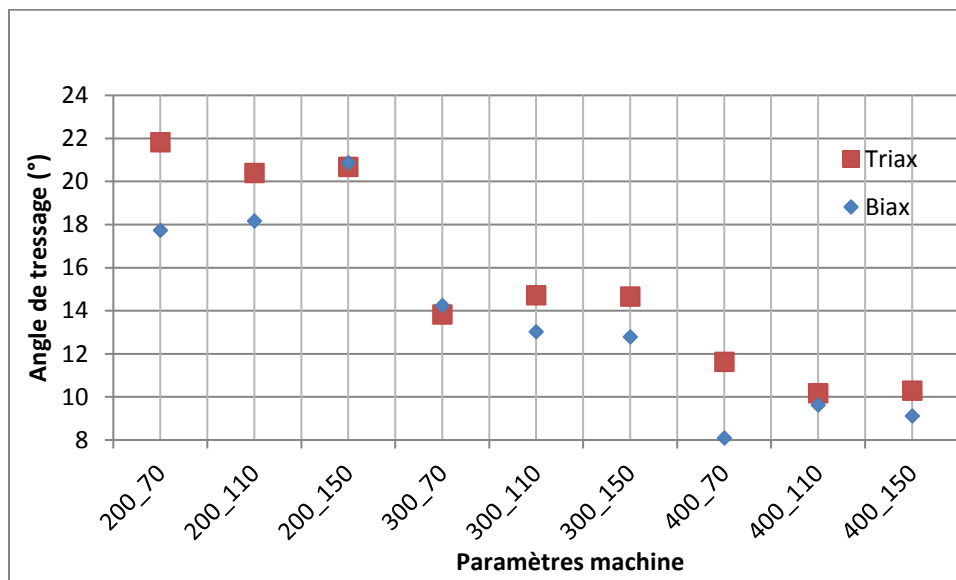


Figure 1 : Mesures angulaires des tresses en Vectran (96 et 144 fils) sur machine

Associées à ces mesures sur la tresseuse, les valeurs d'angle ont été caractérisées sur ces mêmes tresses tombées du métier (i.e sorties de la machine) et sont reportées sur la figure 2. Par comparaison avec la figure 2, on constate que le relâchement des structures se caractérise par une augmentation des valeurs de l'angle de tressage. Cela est dû au fait que sur la tresseuse, la structure tresse, entre le système de tirage et la tension apportée aux fils par le système de tension des bobineaux, est assujettie à une tension non négligeable. Alors que quand les échantillons une fois tressés sont extraits de la tresseuse, cette tension disparaît et les fils de biais se relâchent dans la structure. Ce phénomène est encore plus notable dans le cas d'une tresse biaxiale, où les fils droits ne sont pas présents pour garantir une certaine stabilité structurelle. Les angles de tressage des tresses biaxiales qui sur métier étaient inférieurs à ceux des tresses triaxiales deviennent supérieurs à ces derniers.

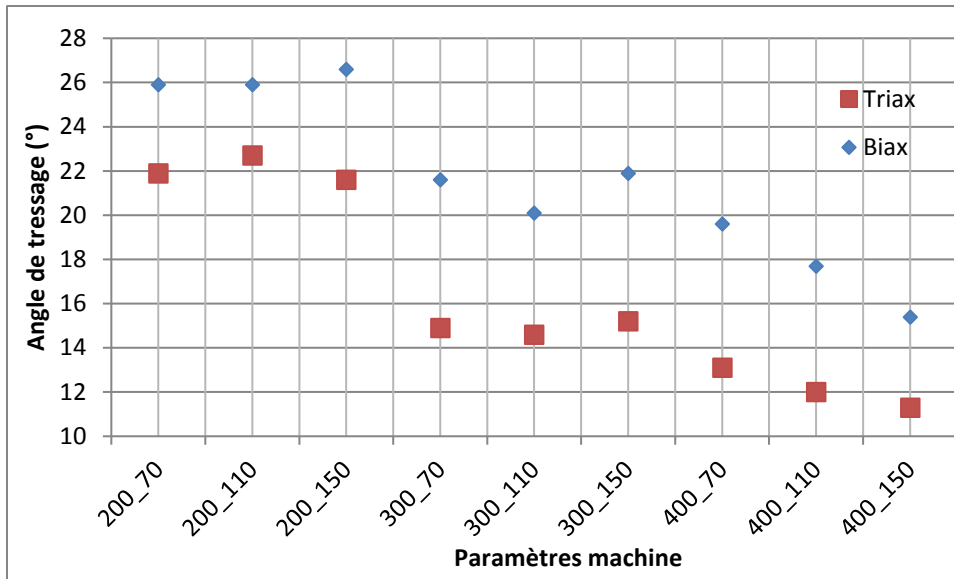


Figure 2 : Mesures angulaires des tresses en Vectran (96 et 144 fils) tombées de tresseuse

Dans la suite du manuscrit, l'angle de tressage sera considéré comme l'angle mesuré sur les échantillons tombés de métier. Une des raisons de ce choix, outre la commodité de manipulation, est que c'est dans cette configuration que se déroulent tous les autres tests de caractérisation, sans tension préalable sur les bords de l'échantillon. Cette position au repos, non perturbée par des efforts (ressort et système de tirage) nécessaires durant la phase de production, sera donc notre référence dans la suite de notre développement.

Ces premières mesures angulaires ont été réalisées avec un nombre constant de fils (par bobineaux) en section. Relativement à la dénomination des échantillons introduite au chapitre 2 (Tableaux 1-3, chapitre 2), pour une production de tresses triaxiales en Spectra et ayant fait varier le nombre de fils sur les bobineaux, on reporte sur la figure 3 le relevé des angles mesurés en fonction des paramètres de tressage.

On rappelle que la dénomination utilisée (1\_1, 2\_2 et 3\_3) est associée respectivement aux nombres de fils de biais (1<sup>er</sup> chiffre) et de fils droits (2<sup>nd</sup> chiffre). La configuration 1\_1 correspond à 96 fils de biais/48 fils droits ; 2\_2 à 192 fils de biais/96 fils droits ; 3\_3 à 288 fils de biais/192 fils droits.

Les valeurs angulaires, de la figure 3, sont bornées par les paramètres machine mais également par le nombre de fils contenus dans la tresse. Cependant, pour les configurations identiques de paramètres procédés, on voit clairement que le nombre de fils en section dans la tresse influe sur la valeur de l'angle de tressage. Plus le nombre de fils est élevé, plus l'angle de tressage, pour une même configuration de paramètres de production, augmente.

L'encombrement produit par l'ajout de fils supplémentaires fait que l'organisation des structures textiles dans la tresse va différer. Ce volume de matière ajouté va empêcher le réalignement des fils de biais suivant l'axe de production et donc générer des angles de tressage plus grands.

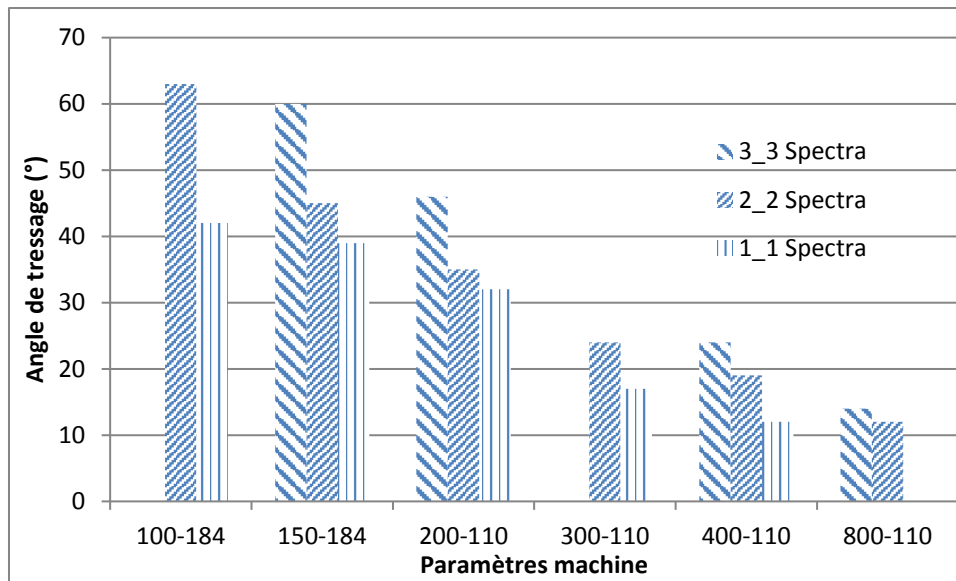


Figure 3 : Mesures angulaires de tresses triaxiales en Spectra en fonction du nombre de fils

Après un comparatif des angles en fonction des réglages machine et des différentes configurations de fils en section pour une matière donnée, on reporte figure 4, un comparatif de ces évolutions angulaires pour des tresses triaxiales de deux matières différentes avec respectivement 96 fils de biais/48 fils droits (1\_1) et 192 fils de biais/96 fils droits (2\_2). La compilation sur un même graphe des différentes configurations de tresses produites en Spectra et en Vectran permet de confirmer les analyses précédentes sur l’influence d’une part de la vitesse de tirage, mais également du nombre de fils sur l’angle de tressage.

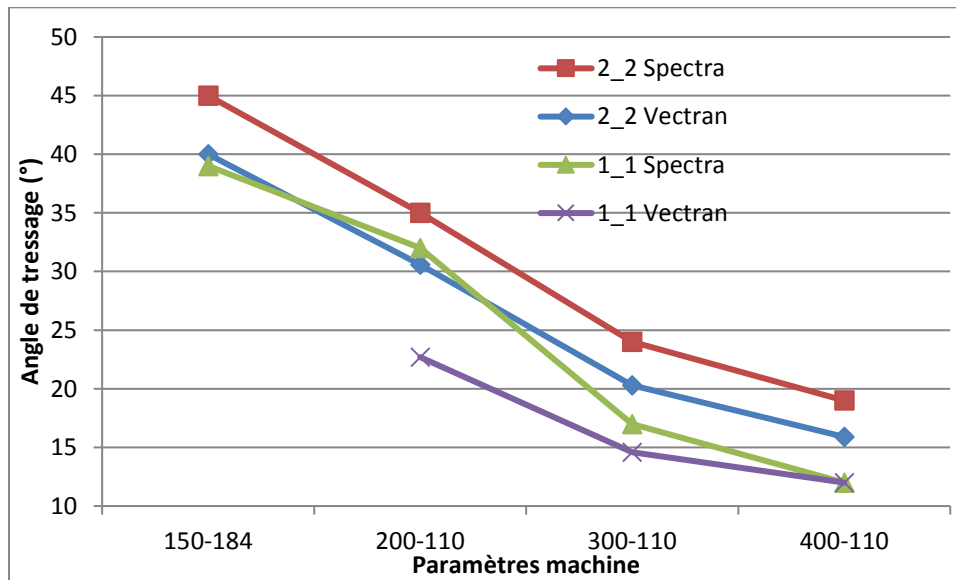


Figure 4 : Mesures angulaires de tresses triaxiales en Spectra et Vectran

La figure 4 nous donne également une indication sur l’influence de la matière considérée sur l’angle de tressage. En effet, le Vectran est plus dense que le Spectra (cf le tableau de présentation des matières au chapitre 1). Or, le tirage des fils des deux matières considérées est identique, on constate par conséquent que le choix de la matière influe sur la valeur de l’angle de tressage. Cette dernière est d’autant plus élevée, qu’à tirage égal, la matière présente une densité plus faible.

Les analyses précédentes ont montré que plus le nombre de fils est important plus l'angle de tressage est élevé, par contre ces conclusions font suite à des études à un ratio de nombre de fils (de biais et de fils droits) similaire. L'influence du nombre de fils dans chacune de ces directions (de biais ou droits) sur l'augmentation de l'angle de tressage reste à démontrer. Ainsi dans le cadre de tresses triaxiales en Spectra, on reporte sur la figure 5, l'évolution des angles, pour des configurations constantes de nombres de fils de biais (188 fils) et une variation du nombre de fils droits (respectivement 48, 96, 188 pour 3\_1, 3\_2, 3\_3).

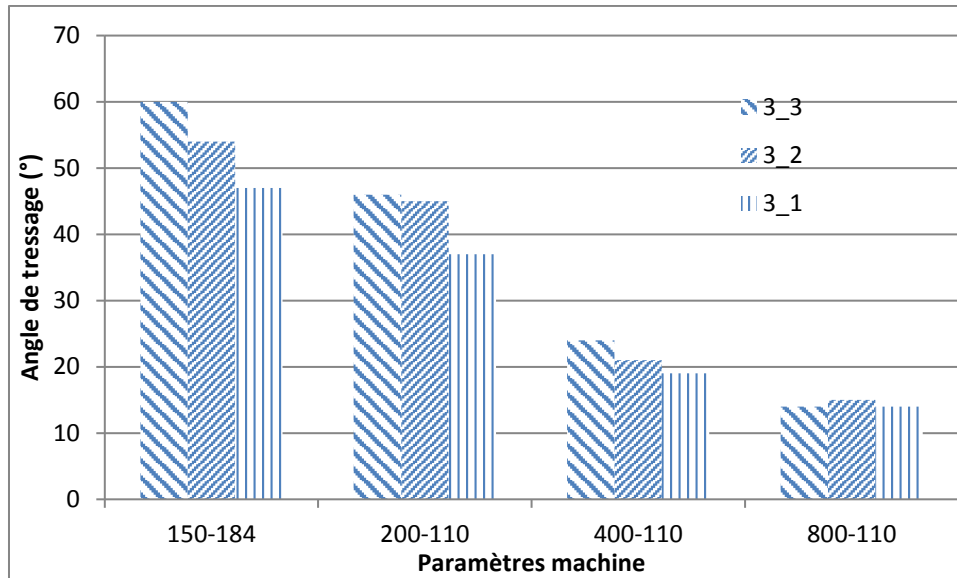


Figure 5: Evolution angulaire de tresses triaxiales en Spectra avec modification du nombre de fils droits

On constate que moins le nombre de fils droits en section est élevé, plus l'espace disponible pour une réorganisation des fils dans la structure est important et donc plus l'angle de tressage va être faible. Par contre la figure 5 nous montre que pour des vitesses de tirage élevées, et par conséquent des angles faibles, cette réorganisation dans la structure tresse n'évolue plus, quel que soit le nombre de fils droits.

L'évolution de l'angle de tressage en fonction des paramètres machine et du nombre de fils en section a été montrée (figure 3, 4 et 5).

Dans le chapitre 2, une étude théorique autour de l'angle de tressage a montré que ce dernier avait des impacts sur d'autres paramètres tels que la largeur de la tresse (ou diamètre, eq.2.1) ou la masse surfacique (Cover factor, eq. 2.6).

Le paragraphe suivant, consacré à l'analyse des masses linéiques des tresses produites, s'efforcera de mettre en évidence le lien entre angle de tressage et masse linéique.

## B. Caractérisation de la masse linéique

Comme précisé dans le chapitre 2, de nombreuses études[2]–[10] sur les tresses tendent à caractériser le facteur de couverture (ou cover Factor), dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés à la masse linéique. La masse linéique d'une tresse représente la masse d'un mètre de tresse produite et tombée de métier. Le protocole de mesure de cette masse linéique a été présenté au chapitre 2. Les différences entre une configuration de tresse biaxiale et triaxiale vont

être investiguées. Puis comme pour l'angle de tressage, les résultats en fonction du nombre de fils en section seront exposés.

Sur la figure 6, on reporte l'évolution de la masse linéique de tresses biaxiales et triaxiales en Vectran avec un fil par bobineaux, (soit au respectivement 96 fils (pour les biaxiales) ou 144 fils (pour les triaxiales : 96 fils de biais + 48 fils droits)) en fonction des différents paramètres procédés. Notons que pour ces évolutions de paramètres procédés, la figure 2 avait montré une diminution de l'angle de tressage.

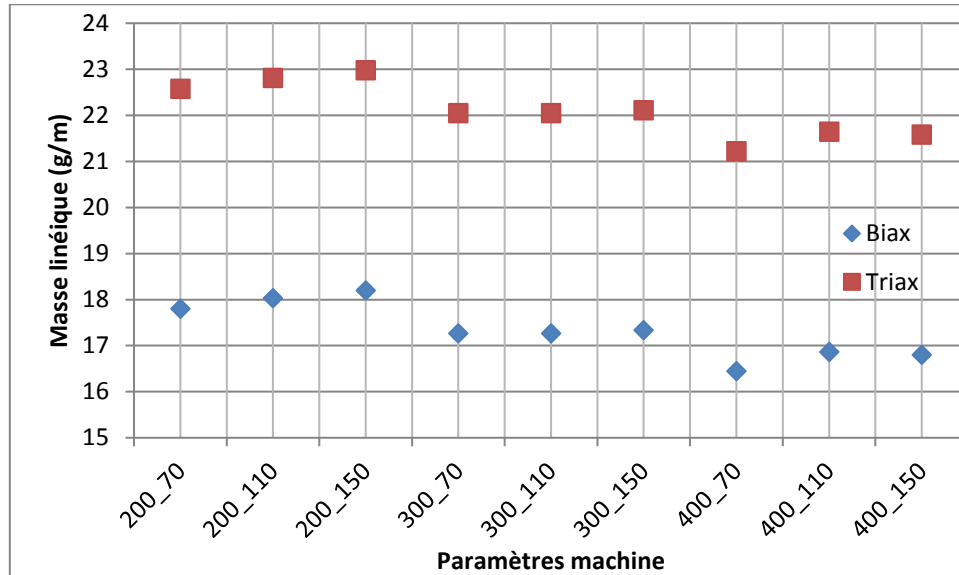


Figure 6 : Masse linéique des tresses en Vectran (96 et 144 fils)

La différence de masse entre les deux types de tresses (biaxiale et triaxiale) visualisée figure 6, réside en l'apport de matière des fils droits. L'écart entre les masses linéiques triaxiales et biaxiales est constant, ce qui dénote bien un apport constant de surplus de matière à travers les fils droits.

La figure 6 indique que les tresses qui présentent un angle de tressage plus élevé ont également une masse linéique plus importante. Plus l'angle est grand, plus le nombre de circonvolution par fil pour parcourir un mètre linéaire, (et par conséquent la masse des fils de biais) est important, plus la masse linéique des tresses est élevée, tout en notant que ces différences restent quantitativement faibles.

En suivant la même démarche que pour l'angle de tressage, nous allons étudier l'évolution des masses linéiques en fonction de la variation du nombre de fils.

On représente figure 7 un comparatif des masses linéiques de tresses triaxiales en Vectran avec 144 fils (1\_1) en section et l'autre 288 (2\_2) en fonction des paramètres de tressage.

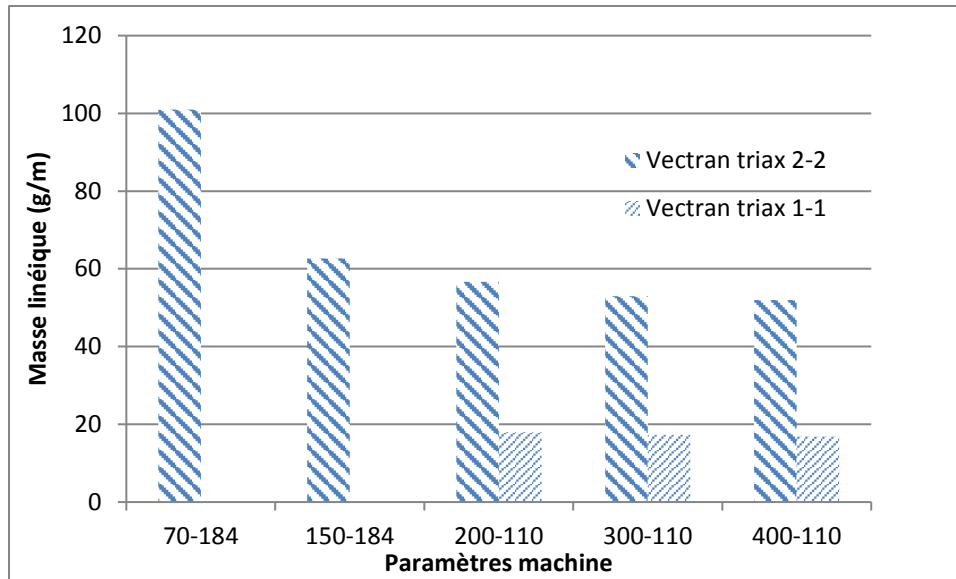


Figure 7 : Masse linéique de tresses triaxiales en Vectran en fonction du nombre de fils

On constate que plus le nombre de fils est important plus la masse augmente. Pour un nombre de fils donné on constate une évolution décroissante puis asymptotique de la masse linéique en fonction des paramètres procédés, et notamment de la vitesse de tirage, de manière similaire à l'évolution de l'angle (figure 5).

Une autre remarque issue de la figure 7 consiste à s'apercevoir que la masse linéique d'une tresse de configuration donnée 2-2 n'est pas deux fois la masse d'une tresse 1-1, alors que le nombre de fils en section est dans ce rapport. Cela ne nous permet pas d'avoir une relation massique linéaire entre des tresses produites avec les mêmes paramètres de tressage mais des nombres de fils par fuseaux différents. Après ces remarques sur des tresses différentes mais mono-matière, des tresses produites suivant les mêmes paramètres machine mais avec des matières différentes sont étudiées.

La figure 8 compare l'évolution des masses linéiques de tresses triaxiales en Vectran et en Spectra avec respectivement en 144 (1\_1) ou 288 (2\_2) fils en section en fonction des paramètres procédés.

Les différences de masses linéiques obtenues s'expliquent par la différence de densité, le titre des fils des deux matières utilisées étant le même soit 160 Tex (g/km). La masse volumique du Spectra est inférieure à celle de Vectran, donc pour un même titre, il y a plus de matière en Spectra (cela transparaît par une section plus importante).

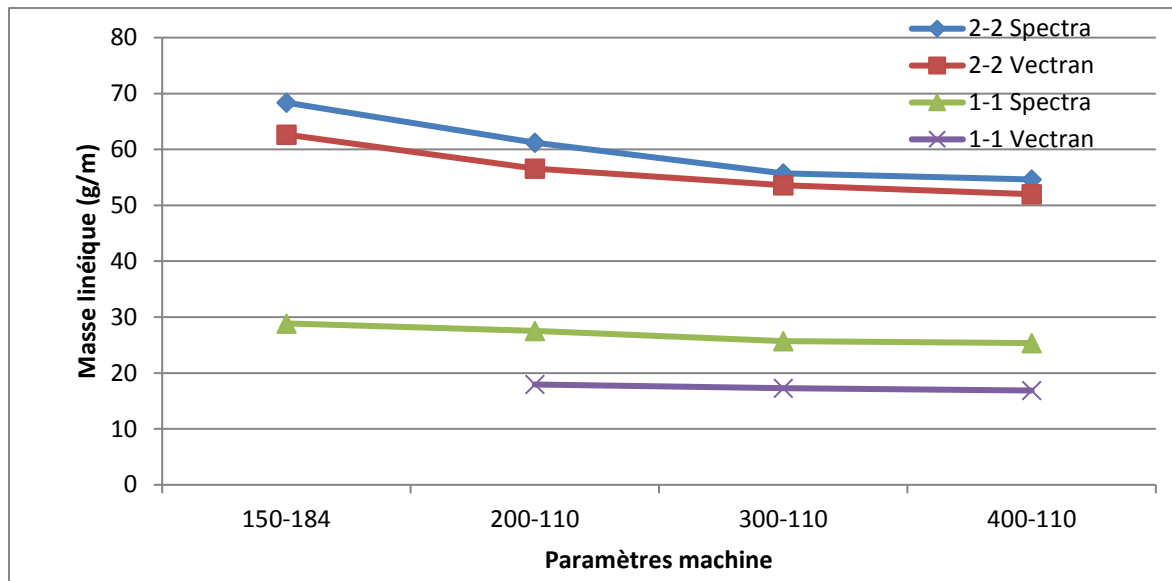


Figure 8 : Masses linéiques de tresses triaxiales en Spectra et Vectran

En conclusion de cette étude expérimentale conduite sur l'évolution de la masse linéique des tresses, on peut déduire que cette évolution dépend de paramètres tels que :

- Le nombre de fils en section,
- L'angle de tressage,
- Les propriétés de la matière utilisée.

Cependant, pour deux matières différentes, la masse linéique de la tresse va aussi dépendre de l'encombrement du fil. Ce dernier va modifier l'angle de tressage mais aussi la trajectoire du fil dans la structure tresse. Par conséquent l'embuvage sera plus important, ce qui aura une influence sur la masse linéique finale.

Cette évolution de masses est donc de manière sous-jacente influencée par l'embuvage dont les mesures vont faire l'objet du paragraphe suivant.

### C. Caractérisation de la trajectoire d'un fil et de l'embuvage.

Les orientations des multi-filaments dans la préforme ainsi que la longueur de fil dans la section considérée sont les paramètres à identifier. Le paramètre « orientation » servira surtout pour les fils droits, pour vérifier que leur trajectoire reste bien rectiligne dans la préforme. Par contre, la longueur de fil dans la section apportera une information sur l'embuvage. En effet, le protocole, décrit au chapitre 2, permettant par analyse des images de sections résinées, d'obtenir le rapport entre le nombre de pixels représentant la longueur de fil dans la section et le nombre de pixels constituant l'image permet de quantifier l'embuvage du fil.

Le tableau 2 renseigne pour différentes tresses en Spectra, avec des nombres différents de fils en section, les mesures d'orientation et d'embuvage.

Tableau 2: Valeurs moyennes de l'embuvage et des différences d'orientation des fils (Tresses de Spectra 200-110)

Paramètre	Fils droits 1-1	Fils droits 2-1	Fils droits	Fils de biais	Fils de biais	Fils de biais



			2-2	1-1	2-1	2-2
Différence moyenne d'orientation $DO_{moy}$	0.5°	1°	1°	1°	1°	1.5°
Embuvage moyen $EM_{moy}$	3%	3%	4%	7%	10%	16%

Les différences moyennes d'orientation correspondent à une désorientation locale d'un fil au sein de la structure. L'angle mesuré correspond à la différence d'orientation entre un fil dans la structure par rapport à la trajectoire « idéale » du fil. Dans notre étude, cette valeur reste faible, ce qui veut dire que les tresses n'ont pas de défauts de désorientation. Cette différence d'orientation aurait pu être créée par un manque de régulation de tension du fil. Une tension trop faible crée des boucles dans la préforme, une tension trop grande déformera localement la préforme autour du fil tendu. Cette tension apportée par les fuseaux, est un paramètre à contrôler pour l'obtention d'une tresse à angle maîtrisé, comme vu dans le chapitre 2. Le tableau 2 permet aussi de voir que l'embuvage des fils droits est plus faible que celui des fils de biais. Et que les valeurs d'embuvage augmentent avec le nombre de fils en section de la tresse.

Cependant, ces résultats expérimentaux issus de la mesure sur image, et déduits de la mesure des longueurs de fils permettent de valider l'hypothèse de la trajectoire des fils. Ce dernier peut être considéré comme un assemblage d'une section circulaire et d'une autre rectiligne, comme représenté figure 9, tel que décrit Peirce en 1937 [11], et comme illustré figure 10, sur une vue en coupe d'un fil de biais.

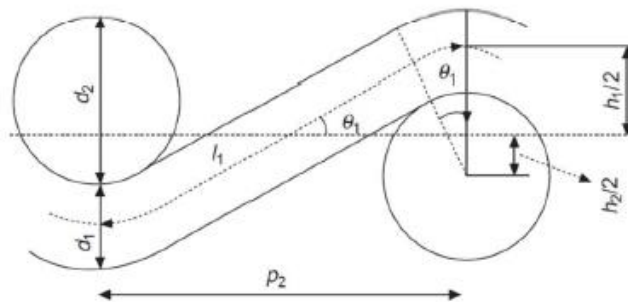


Figure 9 : Illustration de l'embuvage [11]

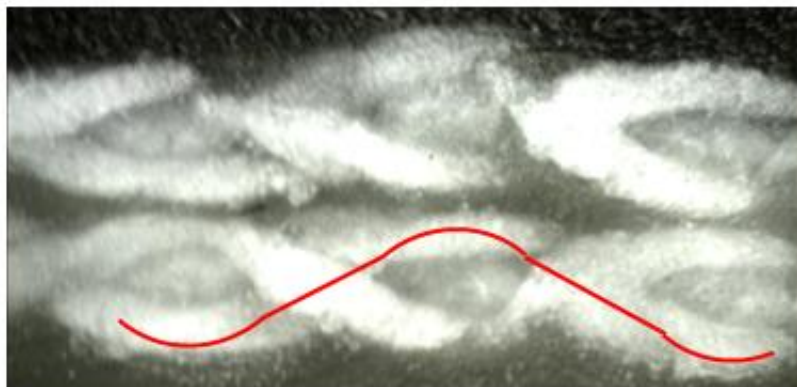


Figure 10 : Trajectoire d'un fil de biais

Les fils droits ont des trajectoires rectilignes dans toute la structure et selon l'axe de production. Ce sont les fils de biais qui possèdent un chemin plus complexe à décrire. Un fil de biais décrit une cinématique cyclique qui est répétée tous les deux entrecroisements. Ce chemin peut être décomposé en deux segments et deux arcs de cercles. Tous les fils de biais suivent cette même trajectoire.

Pour la mesure de la longueur des fils, un fil est extrait manuellement de la structure puis est mesuré. Sa longueur est alors rapportée à la longueur de l'échantillon produit.

La relation analytique pour la longueur des fils de biais, en fonction de l'angle de tressage  $\alpha$  et du diamètre  $D$  de la tresse est donnée par l'équation 3.1.

$$L_{fil} = \frac{\pi * D}{\sin \alpha} \text{ (Eq 3.1)}$$

La précision de la mesure expérimentale est de l'ordre de 7%, induite par les multiples manipulations. La figure 11 représente cette évolution de masse linéique en fonction de l'angle de tressage. A ce paramètre, la longueur de fil de biais dans la structure est apposée pour visualiser la relation entre les deux.

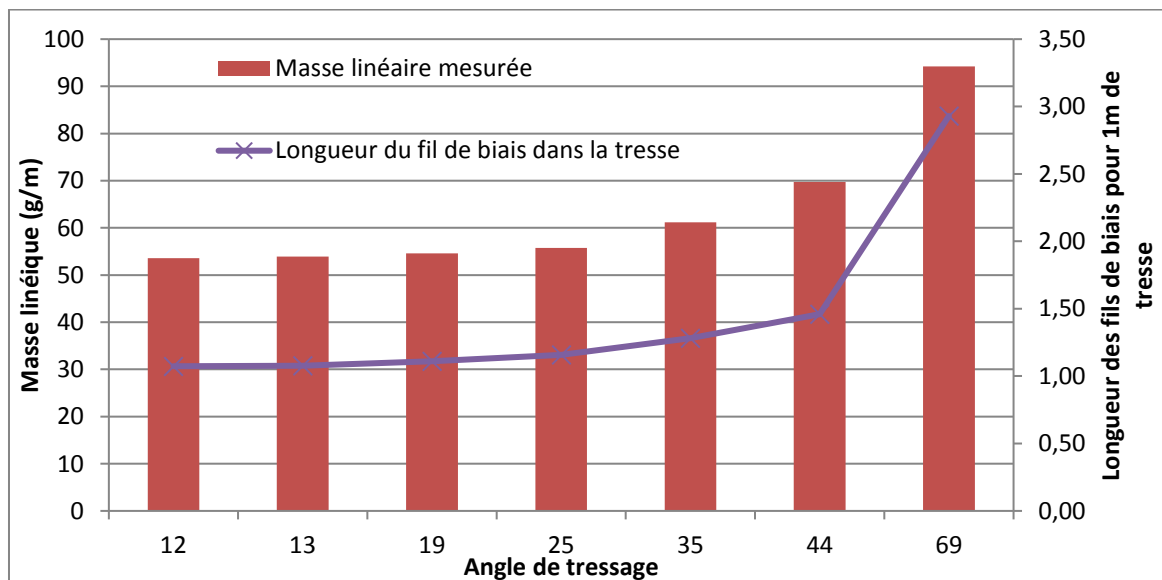


Figure 11 : Masse linéique et longueur de fil de biais théoriques pour un angle de tressage donné pour des tresses en Spectra (2-2)

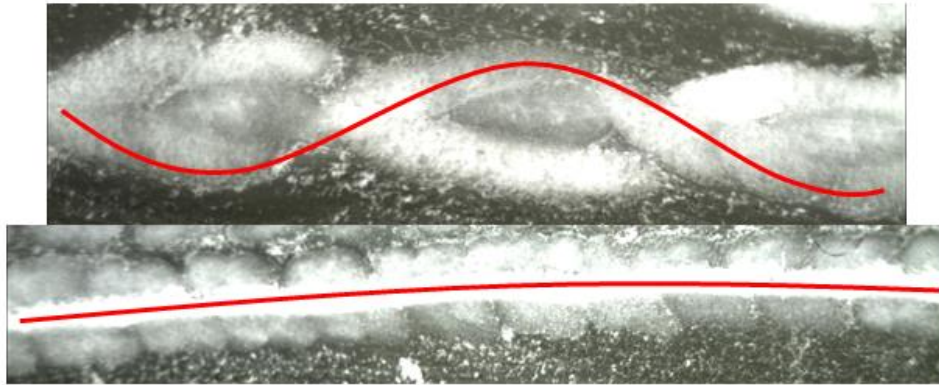


Figure 12: Illustration de l'embuvage (en haut, l'embuvage des fils de biais, en bas, l'embuvage des fils droits)

L'augmentation de la masse linéique des tresses, suivant l'augmentation de l'angle de tressage, correspond à une sur-longueur introduite par les fils de biais, qui elle aussi augmente avec l'angle de tressage.

Les valeurs en termes de masse des tresses triaxiales peuvent être estimées par la somme des densités linéaires des fils de biais ajoutées à celle des fils droits, en reprenant l'équation 3.5. L'ajout de la notion d'embuvage peut aussi être effectué dans cette approximation. Deux types d'embuvage sont à considérer, l'embuvage des fils droits et celui des fils de biais. La figure 12 propose une visualisation en coupe où l'on peut observer le chemin des fils de biais et des fils droits. Une différence importante de trajectoire impose de séparer cette notion d'embuvage en fonction du type de fil considéré. Le tableau 3 présente les résultats des mesures réalisées.

Tableau 3 : Mesure expérimentale de l'embuvage (pour des tresses 200-110)

Paramètre	Fils droits 2-2	Fils de biais 2-2
Embuvage moyen	4% (+/- 0.2%)	16% (+/- 1%)

L'embuvage est calculé suivant la formule suivante :

$$E_{fil} = \frac{L_{fil} - L_0}{L_0} * 100 \text{ (Eq 2.15)}$$

Où  $L_{fil}$  correspond à la longueur d'un fil qui a été extrait de la tresse produite et  $L_0$  à la longueur de l'échantillon considéré.

Dans les tresses considérées, deux types d'embuvage peuvent être distingués. Ces deux types d'embuvage correspondent aux deux types de fils dans la structure :

- Les fils droits, et,
- Les fils de biais.

Comme il est possible de le voir sur la figure 13, les fils droits et les fils de biais ont des embuvages distincts. Avec un embuvage beaucoup plus important pour les fils de biais que pour les fils droits, comme l'a montré le tableau 2.

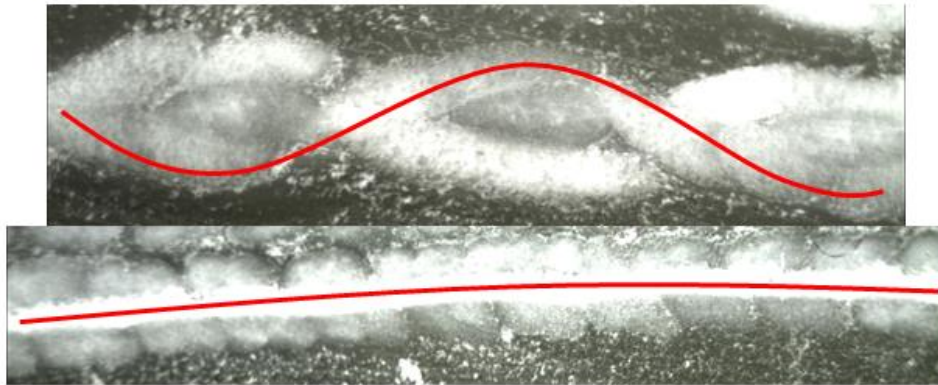


Figure 13 : Illustration de l'embuvage, en haut d'un fil de biais, en bas d'un fil droit

Pour des tresses produites à partir de la même matière (Vectran) mais suivant deux configurations différentes : biaxiales et triaxiales, les embuvages mesurés sont détaillés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Embuvage mesuré pour des tresses biaxiales et triaxiales en Vectran (pour des tresses 200-110)

Type de tresse	Embuvage fils droits	Embuvage fils de biais
1_0	0%	1.5%
1_1	1.5%	3.2%

Une mesure de l'embuvage en fonction de la variation des fils en section va être proposée pour du Spectra.

Les embuvages mesurés pour les tresses en Spectra sont détaillés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Embuvage mesuré pour des tresses en Spectra

Type de tresse	Embuvage fils droits	Embuvage fils de biais
1_1	3%	7%
2_1	3%	10%
2_2	4%	16%

L'embuvage mesuré dépend donc aussi du nombre de fils en section. Plus ce nombre est important, plus la valeur de l'embuvage augmente. Ce qui correspond au parcours géométrique du fil dans la tresse.

Après avoir exposé ces caractéristiques mesurées des tresses produites tant en termes d'angle de tressage, de masse linéique ou d'embuvage, un modèle en masse dépendant de ces différentes composantes va être proposé.

### III. Modèle d'évolution des masses linéiques

Comme vu dans la démarche expérimentale, les masses linéiques des tresses dépendent de paramètres comme :

- Le nombre de fils en section,
- L'angle de tressage,
- Les propriétés de la matière utilisée pour tresser,
- L'embuvage.

Dans la continuité de ces caractérisations, l'idée dans ce paragraphe est de construire un modèle analytique estimant la masse linéique des tresses en fonction de ces paramètres.

La masse des tresses produites peut correspondre à l'addition de trois masses de nappes de fils distinctes :

- La masse des fils de biais orientés en  $-\alpha$  (nappe grise sur la figure 14),
- La masse des fils de biais orientés en  $+\alpha$  (nappe verte sur la figure 14), et
- La masse des fils droits, dans le cas d'une tresse triaxiale (nappe bleue sur la figure 14).

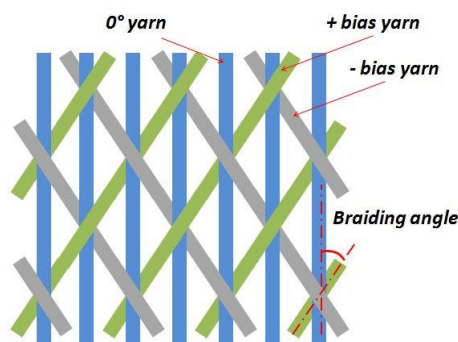


Figure 14: Schéma de tresse triaxiale

Pour des tresses mono-matériau, les masses des fils orientés en  $+$  ou  $-\alpha$  sont équivalentes, du fait de leur symétrie par rapport à l'axe de production. La longueur totale couverte par ces fils de biais est supérieure à celle des fils droits, dans un rapport pondéré par une valeur dépendante de l'angle de tressage (chapitre II.V- figure 17). Par ailleurs une vue en coupe des différentes tresses produites vient confirmer le fait que l'embuvage des fils droits est nettement inférieur à celui des fils de biais.

Pour des tresses produites avec un même nombre de fils et une même matière, la masse de la nappe de fils droits peut être considérée comme constante. Cette affirmation a été confirmée par la démarche expérimentale et plus spécifiquement sur la différence des masses linéiques entre des tresses triaxiales et biaxiales (figure 15) qui reste constante quelle que soit la configuration de tresse considérée. Cette différence est égale à la masse de la totalité des fils droits pour un mètre de produit fini. Nous pouvons aussi voir que la masse de tous les fils droits (dans cet exemple, 5 g/m) est bien inférieure à la masse d'une nappe de fils de biais (qui correspond ici à la moitié de la masse d'une tresse biaxiale, soit globalement et en fonction de l'angle entre 8 et 9 g/m). La première conclusion est qu'avec un plus grand nombre de fils en section les tresses triaxiales sont plus lourdes que les tresses biaxiales produites avec les mêmes paramètres machine.

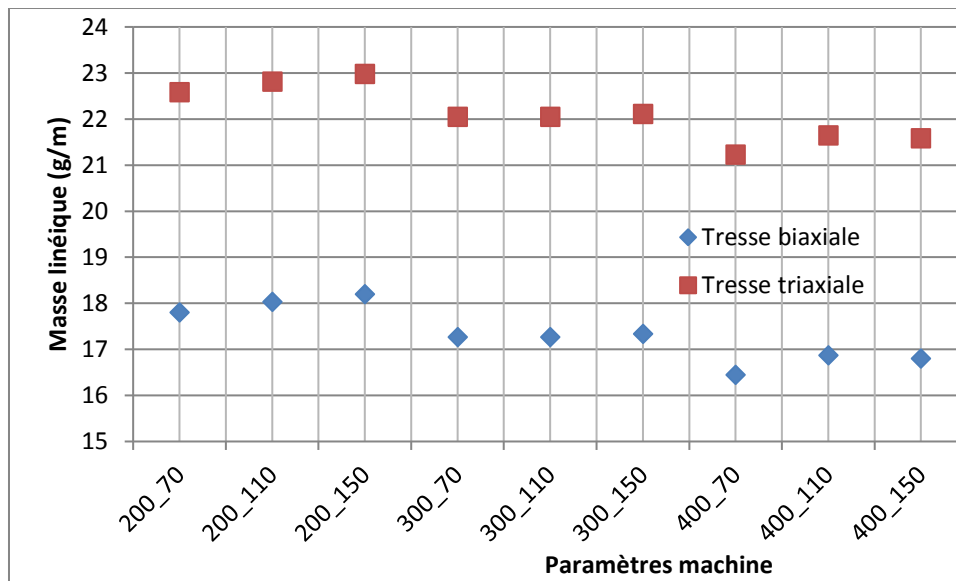


Figure 15 : Masse linéique des tresses en Vectran (96 et 144 fils)

Si les relations analytiques permettant de prédire des caractéristiques géométriques des tresses en fonction des paramètres du procédé sont bien décrites dans la littérature [2], [3], [6], les masses linéiques des tresses sont peu étudiées. Une première approximation des masses linéiques [12] des tresses peut être estimée à partir de celles des fils, du nombre de fils et de l'angle de tressage. En conséquence de quoi, il est possible de définir la masse linéaire des tresses biaxiales et des tresses triaxiales comme suit :

$$M_{lin\ biax} = \frac{N_{biais} * T_{fil}}{\cos \alpha} \quad (\text{Eq 3.2})$$

$$M_{lin\ triax} = \frac{N_{biais} * T_{fil}}{\cos \alpha} + N_{droit} * T_{fil} \quad (\text{Eq 3.3})$$

Où  $N_{biais}$  et  $N_{droit}$  sont respectivement le nombre de fils de biais et de fils droits,  $T$  la densité linéaire du fil et  $\alpha$  l'angle de tressage. Ces formules théoriques font le choix de considérer que tous les fils (droits ou de biais) sont sans embuvage dans la structure, et ne prennent donc pas en compte le surplus de longueur produit par ce dernier. Or, dans la littérature [3], il a été montré l'importance de ce facteur d'embuvage. L'influence de l'entrelacement des fils crée une trajectoire complexe, qui a été estimée expérimentalement et qui augmente la masse globale de la tresse.

L'embuvage a été mesuré expérimentalement sur les tresses produites. L'estimation de ce dernier est donnée dans les tableaux 3, 4 et 5. Le principal point notable est que l'angle de tressage n'est pas le paramètre le plus influent sur la valeur de l'embuvage [13]. Un embuvage plus important a été mesuré pour les tresses triaxiales par rapport aux tresses biaxiales [14]. En prenant en compte cet embuvage pour le calcul de la masse linéique des tresses, un second modèle, prenant en compte l'embuvage est proposé par les équations suivantes :

$$M_{lin\ biax} = \frac{N_{biais} * T_{fil} * E_{biais}}{\cos \alpha} \quad (\text{Eq 3.4})$$

$$M_{lin\ triax} = \frac{N_{biais} * T_{fil} * E_{biais}}{\cos \alpha} + N_{droit} * T_{fil} * E_{droit} \quad (\text{Eq 3.5})$$

Où  $E_{\text{biais}}$  and  $E_{\text{droit}}$  correspondent au facteur d'embuvage des fils de biais et des fils droits mesurés expérimentalement.

La masse de tresse peut donc être théoriquement estimée par :

$$M_{\text{tresse}} (g) = N_{\text{biais}} \cdot E_{\text{biais}} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \cdot T_{\text{fil}} + N_{\text{droit}} \cdot E_{\text{droit}} \cdot T_{\text{fil}} \quad (\text{Eq 3.6})$$

Pour des tresses biaxiales en Vectran, constituées de 96 fils de biais et sans fils droits (1\_0), et de différents angles, la figure 16 compare les masses mesurées expérimentalement avec celles évaluées par les deux modèles avec (Eq. 3.4) et sans (Eq. 3.2) prise en compte de l'embuvage.

On constate que la prise en compte de l'embuvage permet d'être plus proche des valeurs expérimentales, notamment pour les angles les plus élevés. Notons que la formule avec embuvage surestime la prédiction de la masse linéique.

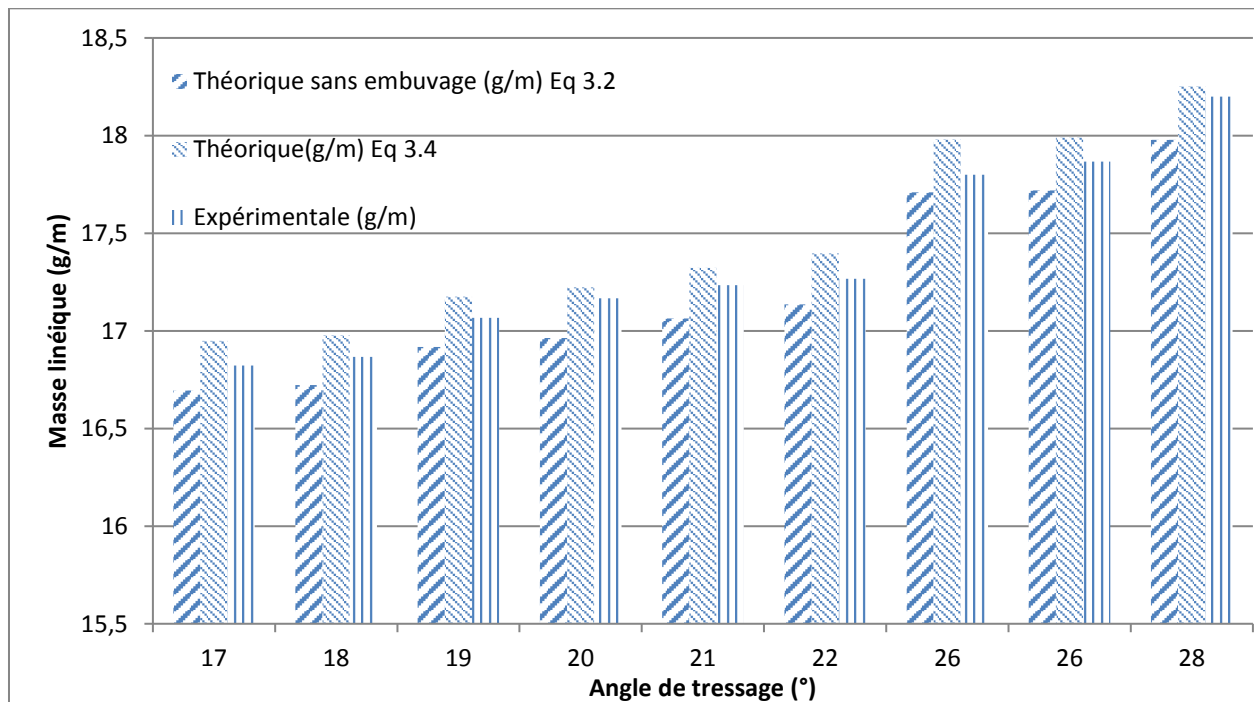


Figure 16 : Comparatif expérimental – modèle de masses linéiques de tresses biaxiales en Vectran (1-0)

De manière similaire on reporte sur la figure 17 ce comparatif entre les modèles et les résultats expérimentaux mais pour des tresses triaxiales en Vectran (96 fils de biais, 48 fils droits, 1\_1).

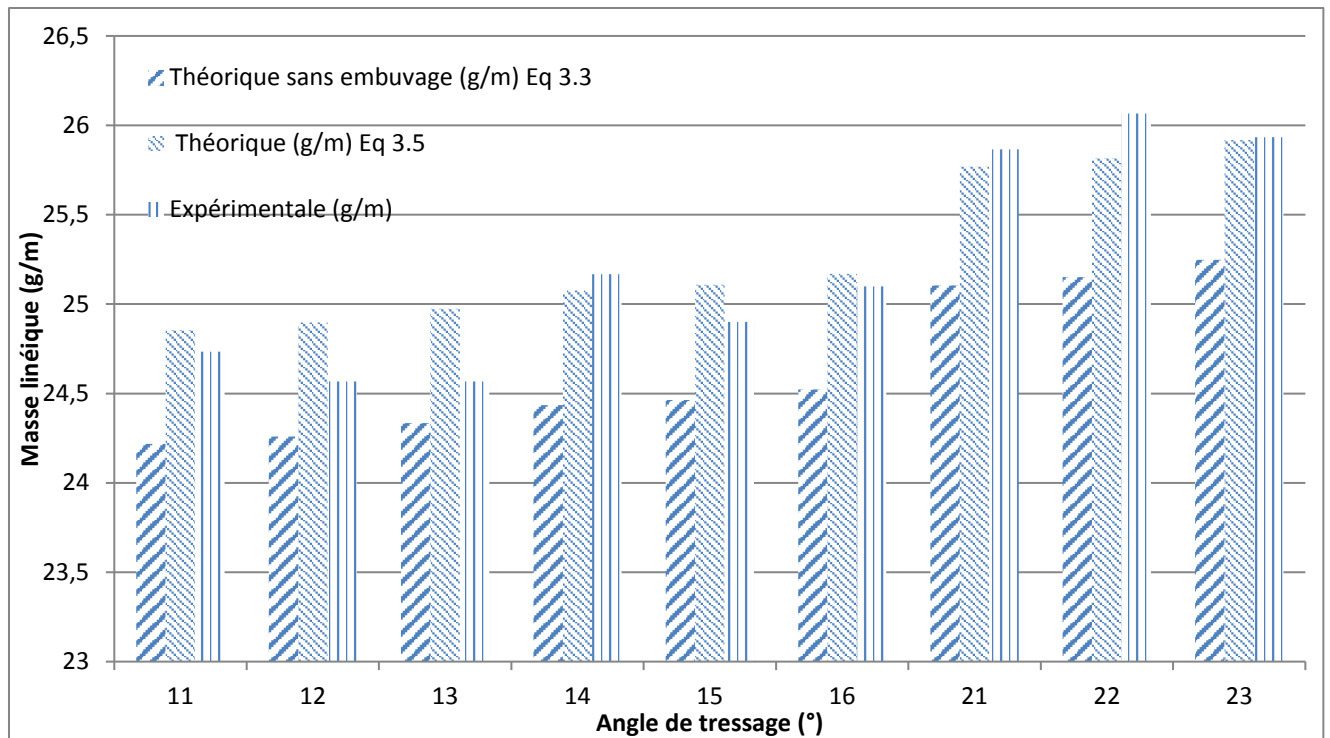


Figure 17 : Comparatif expérimental – modèle de masses linéiques de tresses triaxiales en Vectran (1-1)

Pour des masses linéiques plus importantes, par l'apport des fils droits, et un embuvage des fils de biais plus grand (Tableau 3), on constate sur la figure 17 l'importance de considérer ce facteur d'embuvage dans la prédiction de la masse linéique des tresses.

Pour ce nombre de fils constant en section, pour des configurations biaxiale (1\_0) mais également triaxiale (1-1) les figures 18 et 19 rapportent ces mêmes comparatifs entre les masses linéiques mesurées et estimées par les deux modèles (avec et sans prise en compte de l'embuvage) pour les tresses en Spectra. Pour ces séries, les valeurs d'embuvages dans les modèles (Eq 3.4 et 3.5) sont celles relatives aux mesures effectuées pour les tresses de Spectra (Tableau 5).

Pour cette matière on peut tirer la même conclusion que pour le Vectran sur la nécessité de prendre en compte l'embuvage dans la prédiction des masses linéiques.



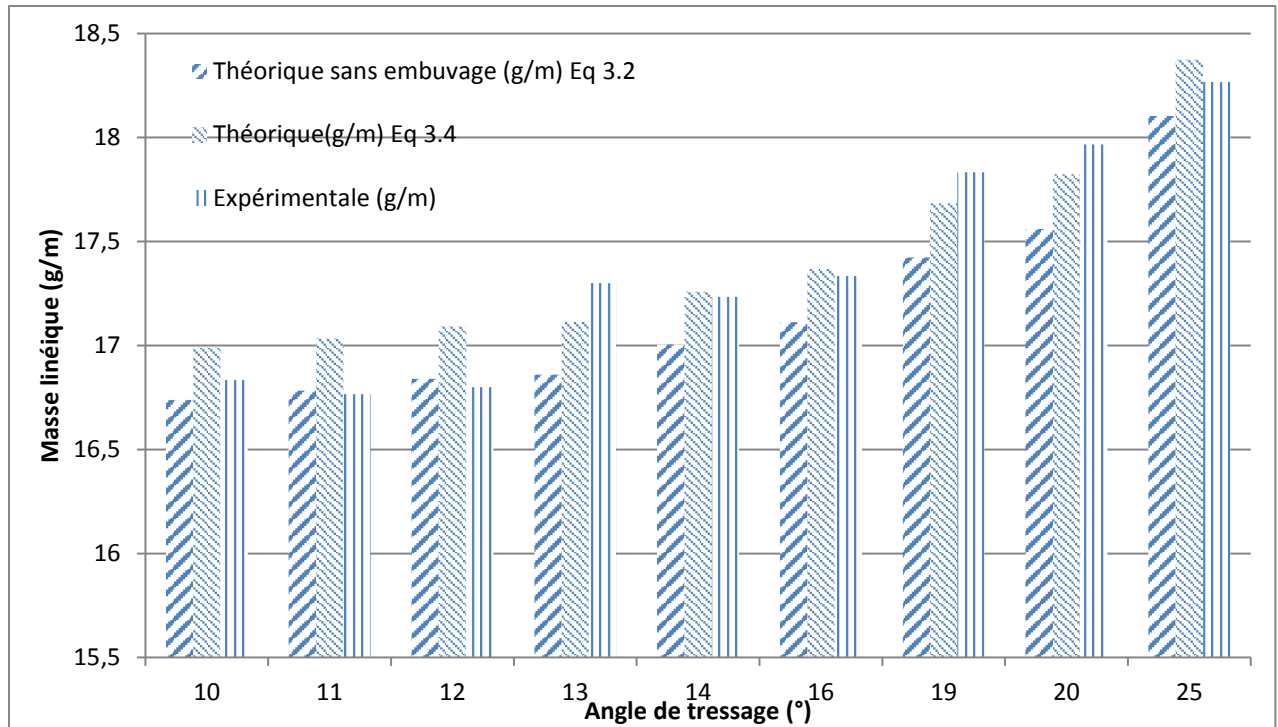


Figure 18 : Comparatif expérimental – modèle de masses linéiques de tresses biaxiales Spectra (1-0)

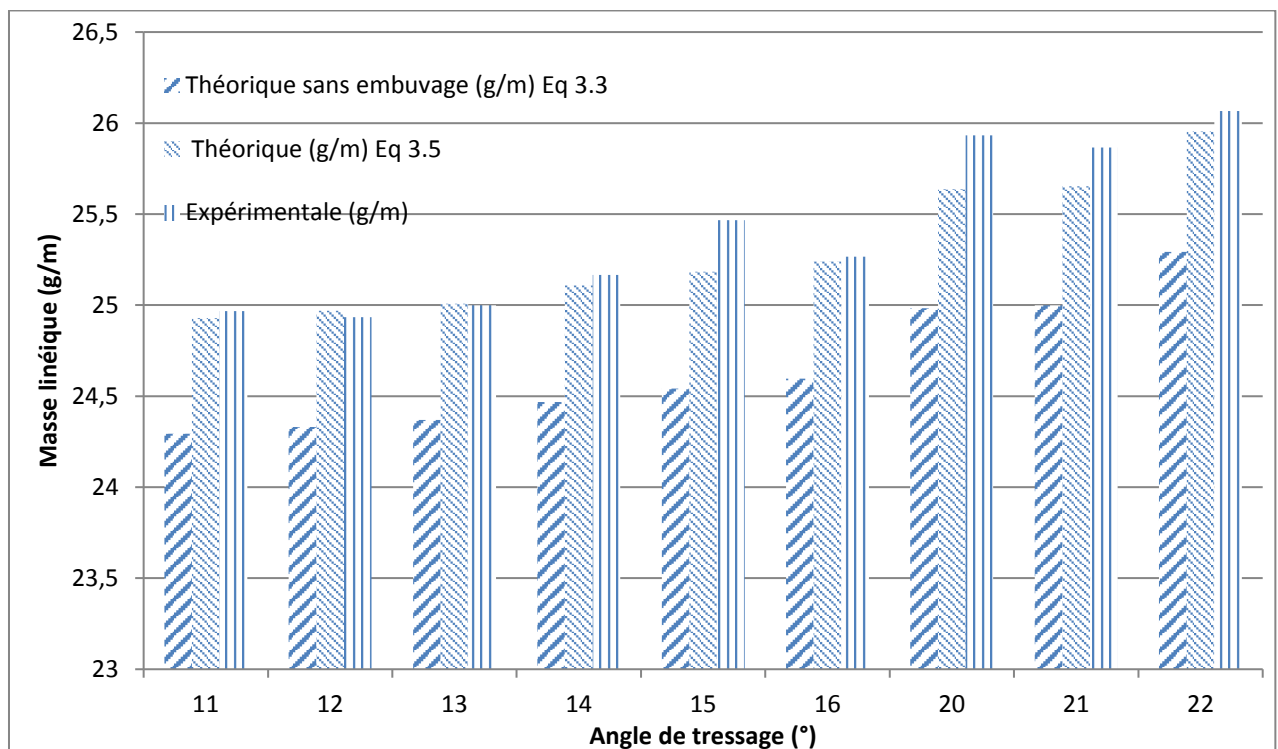


Figure 19 : Comparatif expérimental – modèle de masses linéiques de tresses triaxiales en Spectra (1-1)

De ces quatre graphes, plusieurs conclusions peuvent être avancées. Tout d’abord que les masses théoriques (sans prise en compte de l’embuvage) sont toujours plus faibles que les masses mesurées. Cette différence s’explique par le fait que le modèle repose sur l’hypothèse de fils rectilignes et que la section des fils est considérée comme circulaire. L’ajout de la notion d’embuvage dans la formule théorique permet de se rapprocher de la géométrie réelle de la tresse finale, et donc des résultats expérimentaux.

Il est aussi notable que l'écart entre le modèle théorique sans embuvage et le résultat expérimental reste quasi-constant pour des tresses biaxiales ou triaxiales et ce quelle que soit la matière (Vectran ou Spectra) considérée.

Le modèle théorique prenant en compte l'embuvage est plus proche des résultats expérimentaux que le modèle théorique sans embuvage (que les tresses soient biaxiales ou triaxiales, et en Vectran ou en Spectra). L'écart est moins significatif pour les tresses triaxiales qui sont plus stables au niveau angulaire que les tresses biaxiales, notamment au niveau des manipulations.

Après avoir observé un comparatif entre les modèles proposés et les mesures pour des tresses biaxiales et triaxiales, l'influence de la variation du nombre de fils par bobines sur des tresses triaxiales en Spectra va être présentée (figure 20).

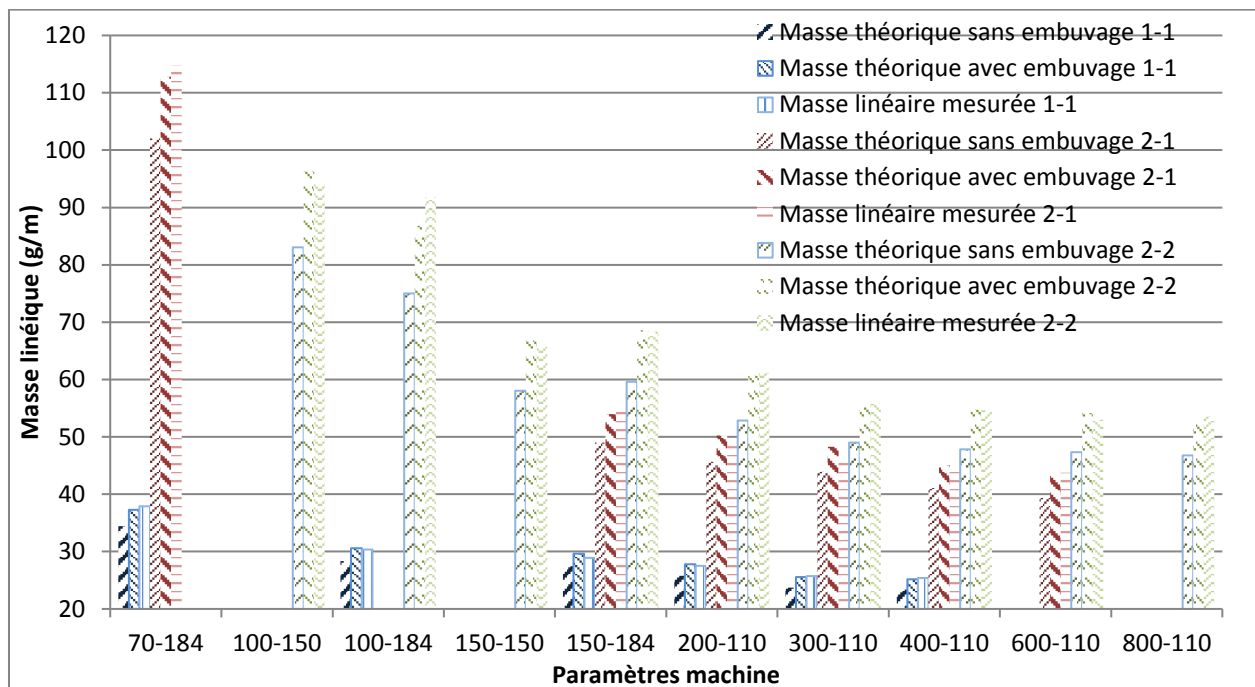


Figure 20 : Comparatif de masses linéiques de tresses triaxiales Spectra

Toutes les configurations de tresses triaxiales en Spectra pour différents nombres de fils en sections et pour différents paramètres procédés sont proposées en figure 20 relativement à leurs masses linéiques, mesurées et estimées par les 2 modèles.

Sur cette figure, la décroissance de la masse linéique en fonction de l'angle est visible comme remarqué précédemment, que plus l'angle de tressage est petit, plus la masse linéique est faible. En effet, théoriquement, plus l'angle est petit, plus la trajectoire donc la longueur des fils de biais est faible, et donc plus la masse de la tresse est faible.

Par ailleurs la masse linéique mesurée est toujours supérieure à la masse théorique sans embuvage. Cette différence est minimisée par la prise en compte l'embuvage dans le modèle.

En fonction du nombre de fils, les différentes configurations de tresses (1-1, 2-1 et 2-2) présentent des évolutions similaires de leurs masses linéiques en fonction des paramètres procédés.

Comme constaté expérimentalement, précédemment, la masse linéique n'est pas directement proportionnelle au nombre de fils, puisque ce dernier modifie l'embuvage.

L'écart entre le modèle recalé en prenant en compte l'embuvage et le modèle ne prenant pas en compte l'embuvage est assez important sur les valeurs de masse linéique. La géométrie du fil au sein de la tresse revêt donc une grande importance. Et pour l'appréhender au mieux, une étude sur les sections des fils aux différents moments de la production et selon les différents paramètres procédés apparaît nécessaire. Un passage à une analyse des tresses à l'échelle microscopique doit être effectué.

#### IV. Résultats de caractérisation à échelle microscopique

La morphologie et le calcul des sections des multi-filaments utilisés pour la production des tresses vont permettre de quantifier des modifications structurelles au niveau du fil qui ont lieu aux différentes étapes de la production, à savoir :

- En sortie de bobine, avant bobinage,
- Après l'opération de bobinage,
- Durant le procédé de tressage, sous la forme d'un poids rapporté de 1N par fil (qui correspond à la valeur de tension exercée par le ressort de rappel du porte-bobineau),
- Après tressage.

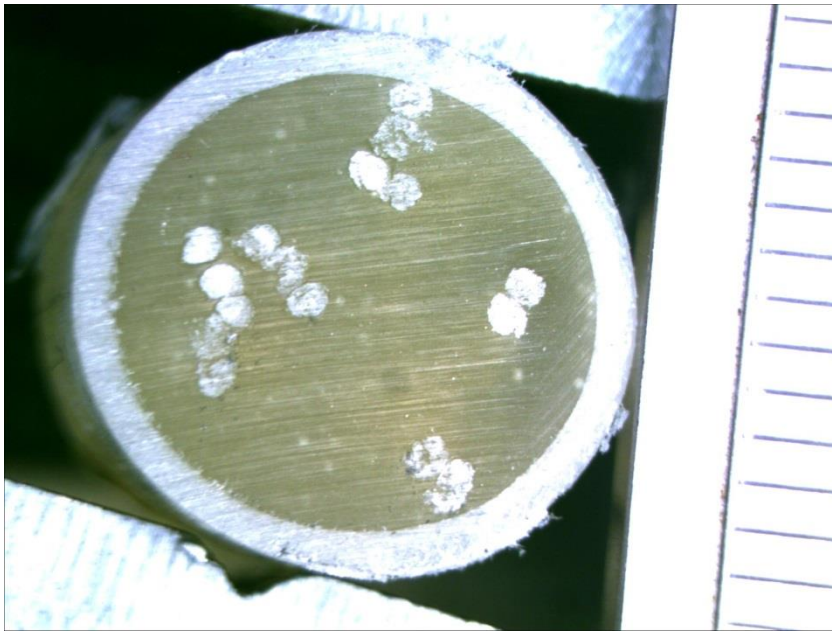
Ces différentes observations vont permettre d'affiner le modèle géométrique de trajectoire du fil (figure 9), qui considère la section des fils comme circulaire. L'implémentation de ces données dans un logiciel de modélisation géométrique permettra aussi une simulation plus réaliste du chemin parcouru par les fils.

La connaissance de la géométrie de la section transverse de ces fils pourra également servir dans des modèles géométriques, pour renseigner les décrochements en hauteur et en largeur dans le plan de la section transverse du fil.

Ici, seules les tresses en Spectra seront analysées. En effet, le procédé de résinage permettant l'obtention d'une tresse figée, donne de bien meilleurs résultats avec une matière comme le Spectra. Le Vectran ne présente pas une imprégnation à cœur, et de fait, les coupes en section ne sont pas correctement exploitables. Toutes les vues en coupe et considérations morphologiques seront issues d'analyses sur des tresses en Spectra.

##### A. Mesures de sections des fils avant et après bobinage.

Nombre de Mesure	Aire mesurée (mm <sup>2</sup> )
1	0,56
2	0,61
3	0,53
4	0,61
5	0,61
6	0,54
7	0,54
8	0,56

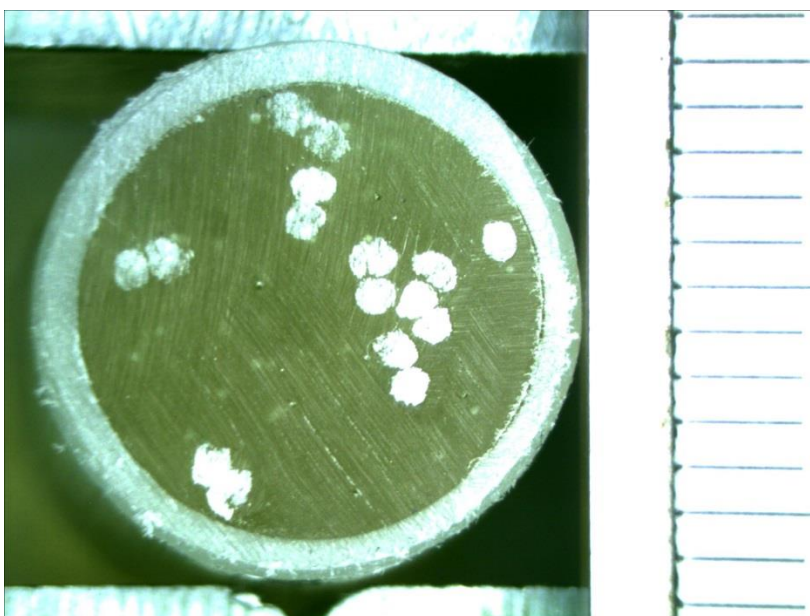


9	0,59
10	0,53
Moyenne	0,57

Figure 21 : Fil simple sortie de bobine

L'analyse d'un fil simple en sortie de bobine suffit à donner un aperçu des données recherchées pour cette étape de bobinage. Une faible torsion a été appliquée au multi-filament pour lui donner une certaine cohérence et faciliter les opérations de manipulation. La section visible (figure 21) vient confirmer cela en présentant un profil circulaire, qui vient couvrir en moyenne une zone de 0.57 mm<sup>2</sup>. Le tableau de la figure 21 récapitule les 10 mesures de section effectuées.

Certaines tresses sont produites à partir de deux multi-filaments sur chaque bobineau. La mesure des géométries des deux multi-filaments après bobinage est donc à vérifier pour déterminer si les opérations de bobinage n'ont pas modifié la géométrie initiale. Il s'avère que les multi-filaments conservent une section circulaire (figure 22), même si l'on peut noter un très léger étalement de leur section transverse pour passer de 0.57 mm<sup>2</sup> à 0.59 mm<sup>2</sup>.



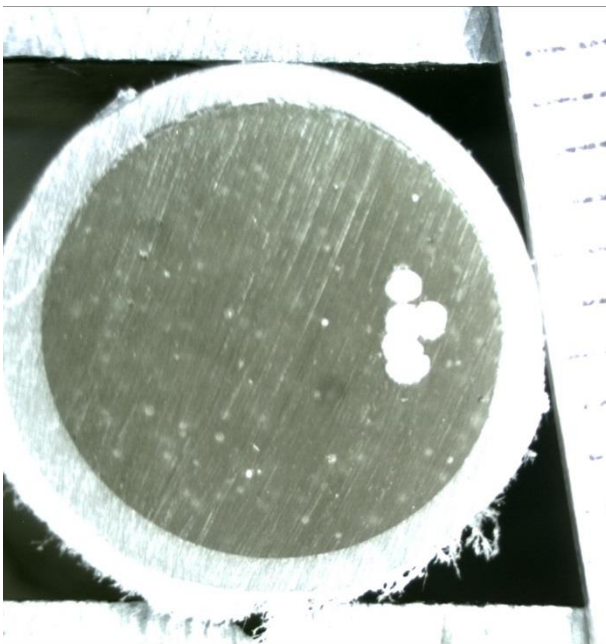
Nombre de mesure	Aire mesurée (mm <sup>2</sup> )
1	0,636
2	0,608
3	0,589
4	0,596
5	0,568
6	0,518
7	0,608
8	0,534
9	0,605
10	0,615
Moyenne	0,5877

Figure 22 : Fil double sortie de bobine

Le bobinage n'a donc qu'une influence négligeable sur la géométrie des multi-filaments qu'ils soient bobinés seuls ou par deux. La zone suivante où le multi-filament est susceptible de changer de section est quand ce dernier se trouve entre le bobineau et le point de tressage de la tresse en production. En reprenant les analyses des sections transverses des différentes étapes précédemment citées, il est possible de dire que l'opération de bobinage ne provoque pas de déformations ni en termes de forme ou de valeur des sections des éléments fibreux.

### B. Fil en sortie de fuseau

Dans cette zone, le fil est soumis à des efforts opposés suivant la direction de l'axe de production. Un des efforts est produit par le ressort de rappel du porte-bobineau égal à 1N, l'autre provient du système de tirage de la tresseuse. Pour cette mise en situation, le fil est placé dans une configuration reproduisant ces efforts puis est noyé dans de la résine époxy, qui permet de figer sa géométrie sous ces contraintes particulières. Le résultat de la caractérisation géométrique de ce multi-filament résiné, figure 23, montre une section circulaire, mais de valeur inférieure. En effet, cette section transversale passe de 0.57 mm<sup>2</sup> à 0.36 mm<sup>2</sup>. Cette diminution de section provient de l'application des efforts qui réorganise les filaments autour de la ligne centrale du multi-filament. Le même ratio de diminution de surface a été également obtenu pour des fils doublés.



Nombre de mesure	Aire mesurée (mm <sup>2</sup> )
1	0,364
2	0,387
3	0,356
4	0,323
5	0,361
6	0,397
7	0,331
8	0,306
9	0,366
10	0,37
Moyenne	0,3561

Figure 23 : Fil simple sous force de traction équivalente aux ressorts des porte-bobineaux

### C. Fils dans la structure finale

La dernière zone où il convient d'étudier la géométrie des multi-filaments est dans la tresse elle-même c'est également la plus compliquée à appréhender. En fonction des paramètres, comme

l'angle de tressage, la largeur ou encore la masse linéique de la tresse, la géométrie des multi-filaments va varier. De plus, au niveau macroscopique, deux plans sont à considérer pour donner un aperçu global de la géométrie des différents multi-filaments. Une coupe selon la direction de production, et une autre suivant la section transverse des fils droits (figure 24).

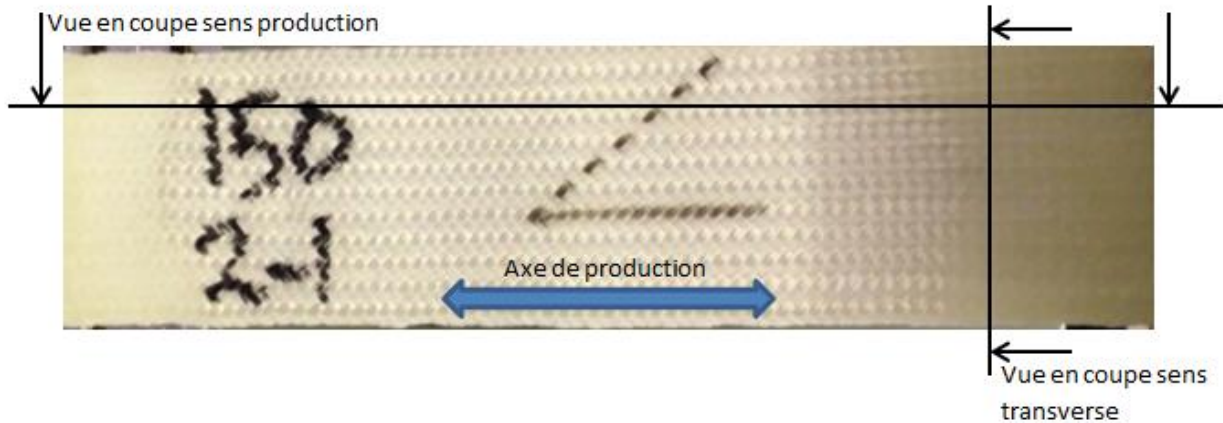
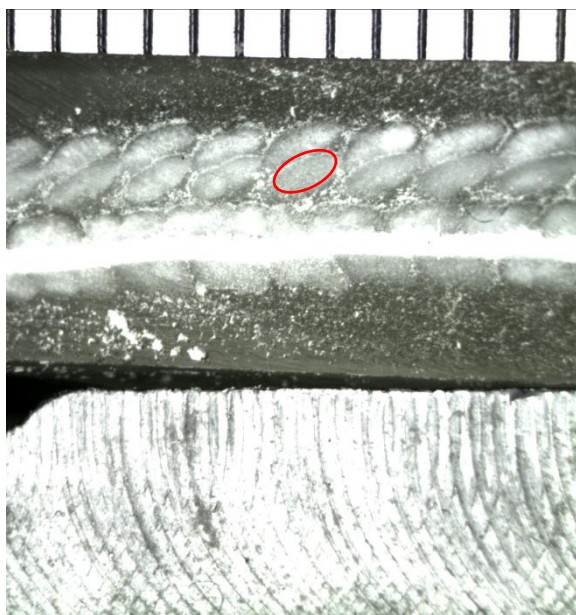


Figure 24 : Visualisation des zones de coupe sur une tresse

La coupe dans le sens production (figure 25) va nous donner une idée du chemin suivi par les fils droits à l'intérieur de la structure mais également des informations sur les sections des fils de biais en fonction de leur orientation angulaire. La coupe en sens transverse (figure 26) va nous apporter des informations sur la section transverse des fils droits, mais aussi une coupe des fils de biais suivant le plan considéré. Le tableau accolé à la figure 26 nous présente les relevés mesurés concernant les fils de biais. Deux multi-filaments sont contenus dans chaque sorte de poche (entourée sur la figure). Les valeurs moyennes des dimensions caractéristiques de l'ellipse représentant l'aire de ces deux fils ainsi que la valeur de cette surface sont précisées dans ce tableau.

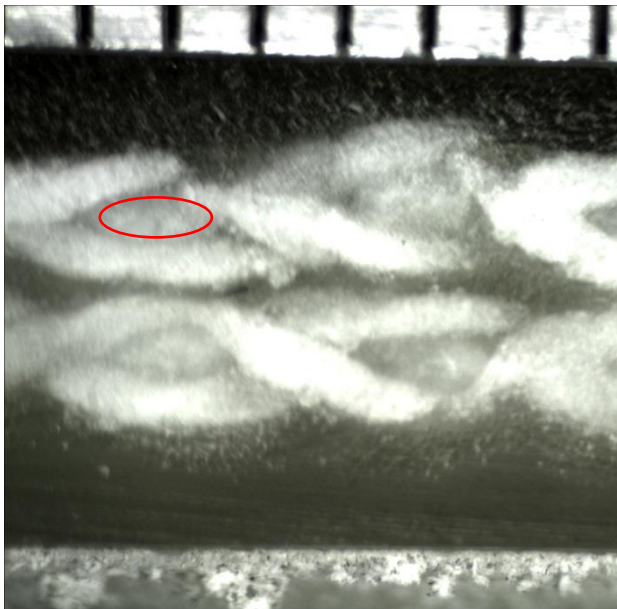


Numéro de mesure	Aire mesurée (mm <sup>2</sup> )	Largueur mesurée (mm)	Longueur mesurée (mm)
1	0,84	0.647	1.554
2	1,009	0.646	1.862
3	0,879	0.665	1.785
4	0,97	0.585	1.619
5	0,954	0.641	1.856
6	0,878	0.627	1.654
7	0,771	0.695	1.758
8	0,975	0.635	1.802
9	0,977	0.614	1.699
10	0,874	0.611	1.720
Moyenne	0,91	0.636	1.757

Figure 25 : Vue en coupe sens production tresse triaxiale Spectra (2-2-100-184). Mesures des sections des fils de biais.

Le tableau de la figure 25 nous apprend aussi sur la morphologie de l'ellipse qui approxime la géométrie des multi-filaments de biais. Le rapport entre la longueur mesurée et la largeur mesurée est d'environ trois, ce qui correspond pour chacun des deux multi-filaments à un rapport d'un et demi.

La figure 26 issue de la coupe en sens transverse de la tresse triaxiale (2\_2) nous informe sur les caractéristiques géométriques en section des fils droits. Le résultat des mesures est résumé dans le tableau qui est accolé.



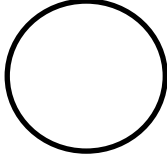
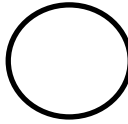
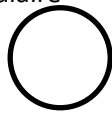
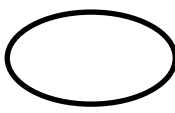
Numéro de mesure	Aire mesurée (mm <sup>2</sup> )	Largueur mesurée (mm)	Longueur mesurée (mm)
1	0,504	0,72	1,06
2	0,634	0,60	1,16
3	0,665	0,47	1,13
4	0,627	0,63	1,12
5	0,669	0,71	1,06
Moyenne	0,62	0,63	1,11

Figure 26 : Vue en coupe transverse 2-2-100-184

Là encore, deux multi-filaments sont contenus dans chaque sorte de poche (entourée sur la figure). Et l'on peut voir dans ce cas que la largeur et la longueur mesurée sont dans un rapport d'environ deux, qu'il convient de ramener à 1 si l'on ne considère qu'un seul des deux fils droits. On peut donc conclure que la section transverse d'un fil droit reste circulaire et sa valeur de section n'est pas sensiblement modifiée lors du procédé de tressage (comparativement à la valeur en sortie de fuseaux).

L'évolution de la section des fils au cours des différentes étapes du procédé de tressage peut donc être résumée dans le tableau 6 :

Tableau 6 : Récapitulatif de la géométrie des multi-filaments au cours du procédé de tressage

Endroit du procédé	Morphologie en section du multi-filament		Mesures en section	
Bobinage	Circulaire 		Section : 0.57 mm <sup>2</sup>	
Alimentation point de tressage	Circulaire 		Section : 0.36 mm <sup>2</sup>	
Produit fini tresse	Fil droit Circulaire 	Fil de biais Ellipse 	Fil droit Section : 0.31 mm <sup>2</sup>	Fil de biais Section : 0.45 mm <sup>2</sup> Axes : 0.88 et 0.64 mm

Les morphologies en section du multi-filament vont changer au cours du procédé de tressage, ces changements vont apporter des modifications structurelles et géométriques dans la préforme finale, sur des notions comme la fraction volumique de fibres ou encore le taux de recouvrement. Effectivement, l'écrasement de la section d'un multi-filament pour passer d'une section circulaire à une section elliptique va modifier le taux de recouvrement en l'augmentant significativement. Cet écrasement va aussi jouer sur le taux volumique de fibre, car tout en gardant le même volume de matière, les dimensions structurelles (largeur, épaisseur) vont être modifiées.

Cette démarche de caractérisation est étendue à l'ensemble de la tresse. L'échelle macroscopique, va être étudiée dans le but d'obtenir des informations sur :

- La géométrie d'une section d'un multi-filament,
- Les dimensions caractéristiques d'une section d'un multi-filament,
- La surface de la section d'un multi-filament.



La morphologie des différents fils (droits ou de biais) nous intéresse dans cette section. Dans les configurations de tresses où le nombre de fil sur un même bobineau est double, ce « double multi-filament » sera considéré comme un multi-filament unique.

Ces mesures ont lieu à différents endroits de la tresse et sur différents échantillons. Les dimensions caractéristiques d'une section d'un multi-filament sont les largeurs (A), les épaisseurs (B) et les surfaces (S) de chaque fil de la section. Ces données brutes seront présentées ici analysées.

Associé à l'ensemble des mesures, les valeurs moyennes sur tous les échantillons, de la largeur  $A_{moy}$ , de l'épaisseur  $B_{moy}$  et de la surface des multifilaments  $S_{moy}$  seront calculées (tableau 7). Les indices « droit » et « biais » serviront à spécifier quel type de multi-filament est considéré. Ces moyennes sont issues de mesures provenant de plusieurs sections d'un même lot de tresse (même nombre de fil en section, même angle de tressage, même matière).

La pondération P effectuée correspond au nombre de colonnes issues de la grille de caractérisation, telle qu'elle a été présentée (Chapitre 2 Figure 33). Ce coefficient revient à évaluer le nombre de multi-filament en section de la vue en coupe. Le nombre de lignes est cependant fixe et égal à deux, puisque la tresse est considérée comme circulaire aplatie (figure 26).

Tableau 7: Calcul des moyennes des différents paramètres

$A_{moy} = \frac{1}{2P} \sum_{i=1}^{i=P} \sum_{j=1}^{j=2} A_{ij}$	Eq. 3.8
$B_{moy} = \frac{1}{2P} \sum_{i=1}^{i=P} \sum_{j=1}^{j=2} B_{ij}$	Eq. 3.9
$S_{moy} = \frac{1}{2P} \sum_{i=1}^{i=P} \sum_{j=1}^{j=2} S_{ij}$	Eq. 0.10

Les différentes positions au sein de la tresse à partir desquelles ont été prises les mesures n'ont pas une réelle influence sur la variation des valeurs mesurées. Deux cas sont à dissocier, celui des fils droits et celui des fils de biais. Les fils droits vont présenter une même morphologie en section avec une surface comparable quel que soit l'endroit de la mesure. Les fils de biais vont subir un réarrangement en passant d'une section circulaire à une section elliptique. Cependant, si l'on considère les fils droits indépendamment des fils de biais, les dimensions microscopiques des fils ne varient que faiblement à travers la tresse.

Ce résultat est conforté par l'étude et l'analyse de section de fils simples soumis à une charge équivalente à la force de rappel des ressorts des bobineaux (figure 23). Où on retrouve ces variations de l'ordre de 5% dans les résultats des mesures. De fait, cette imprécision peut être mise sur le compte de variations lors des prises de mesures. Le résultat qui vient d'être mis en évidence permet de statuer sur le fait que la géométrie de la section d'un multi-filament reste constante tout au long de son trajet dans la tresse. Cela est valable pour les deux types de multi-filaments, droits ou de biais.

Malgré cela, si sur un même multi-filament, la section reste constante tout au long de son chemin, toutes les sections des multi-filaments ne sont pas équivalentes. La compression d'une tresse circulaire pour en faire une tresse « plate à double peaux » va faire varier des sections de multi-filaments. En effet, si au cœur de la tresse, les sections restent plutôt équivalentes, sur les bords de la tresse, un bourrelet se forme. Cela va potentiellement affecter la section des multi-filaments de cette zone. Ces variations dépendent donc de la position des multi-filaments dans la préforme. Les multi-filaments les plus au centre de la tresse présentent des sections elliptiques pour les fils de biais et circulaires pour les fils droits. Ils sont moins contraints par le procédé de résinage, donc moins susceptibles aux déformations. Sur les bords de la tresse, le constat est différent.

Les différentes sections des multi-filaments peuvent être caractérisés par un ratio, qui correspond au rapport des valeurs de largeur et des valeurs d'épaisseur, soit  $\frac{A}{B}$ . Plus ce ratio va être élevé, plus les multi-filaments auront subit une déformation. La valeur initiale de ce ratio (en sortie de bobine, avant tressage) est de 1.

Le tableau 8 représente la valeur de l'aspect ratio ( $\frac{A_{ij-moy}}{B_{ij-moy}}$ ) pour chaque multi-filament, représenté par son couple de coordonnées (i,j).

Tableau 8 : Valeur de l'aspect ratio de la section des fils dans une section de coupe transverse (i,j)

		i		
		1	2	3
j	1-fil de biais	2.68	2.70	2.72
	2-fil droit	1.82	1.83	1.79
	3-fil de biais	2.71	2.67	2.74
	4-fil de biais	2.67	2.72	2.67
	5-fil droit	1.79	1.81	1.84
	6-fil de biais	2.68	2.70	2.69

Sur le tableau 8, les valeurs d'aspect ratio des fils droits et de biais sont données en fonction de la position du multi-filament dans la structure tresse. Cela permet de savoir quel multi-filament va subir une déformation plus ou moins importante. Les déformations vont modifier les sections circulaires de base en des sections elliptiques. La cartographie de ces évolutions va permettre de les situer avec précision au sein de la structure. Au-delà de cette valeur d'aspect ratio, la même cartographie peut être réalisée pour les mesures de sections des multi-filaments. Le compactage des sections sera alors visible. Les diminutions de valeurs de section varient entre 7 et 15%.

La même démarche a été suivie pour une coupe sens production, en tableau 9.

Tableau 9 : Valeur de l'aspect ratio des sections de fils pour une coupe sens production

		i		
		1	2	3
j	1-fil de biais	2.37	2.38	2.37
	2-fil droit	X	X	X
	3-fil de biais	2.40	2.39	2.36
	4-fil de biais	2.39	2.36	2.40
	5-fil droit	X	X	X
	6-fil de biais	2.35	2.38	2.42

Les valeurs correspondant aux fils droits ne peuvent pas être enseignées puisqu'ils sont coupés, dans ce sens de production, dans leur plan de symétrie.

#### D. Conclusion intermédiaire

L'analyse des différents échantillons permet de relier les effets de certains paramètres procédés sur les caractéristiques des tresses. Par exemple, la tension exercée par le bobineau sur la structure tresse influe à l'échelle macroscopique sur les dimensions de la tresse finale. Cette même tension va directement impacter la structure de la tresse, et donc les densités volumiques de la tresse. Cette analyse a permis de déterminer une certaine stabilité et répétabilité dans les orientations et les chemins des multi-filaments. A l'échelle microscopique, la section des multi-filaments varie en fonction des paramètres procédés liés à la tension des multi-filaments. Ces paramètres sont directement pilotés par la tresseuse, assurant ainsi la répétabilité des structures produites. Cela explique aussi pourquoi la dispersion des valeurs mesurées est faible.

L'étude à l'échelle microscopique permet d'avancer que le fil garde une section transverse constante tout au long de la tresse. Cependant, les multi-filaments en fonction de leur position dans la tresse ne présentent pas les mêmes propriétés géométriques en section.

Les données récoltées au cours de cette caractérisation géométrique vont aussi permettre d'alimenter des modèles, qui font l'objet de la suite de ce chapitre.

#### V. Modélisation géométrique à l'échelle macroscopique

La modélisation géométrique a pour but principal de proposer une représentation numérique de la structure textile considérée. Dans le matériau tresse sec (sans résine), cela revient à représenter les zones fibreuses, caractérisées par leurs orientations, leurs sections etc.

Les différents avantages que l'on peut retirer des modélisations géométriques sont :

- Une estimation du taux volumique de fibres, assez difficilement quantifiable, à cause du caractère sec du renfort considéré. Les éléments fibreux ne sont pas maintenus en position comme ils peuvent l'être dans un matériau composite.
- Corréler ces modèles numériques avec les mesures expérimentales,
- Valider l'influence des paramètres procédés sur les caractéristiques géométriques de la tresse numériquement produite.

Ces modélisations géométriques permettront aussi des développements postérieurs, comme par exemple une modélisation mécanique. Les modèles géométriques servent souvent de préliminaires à établir une géométrie pour des études mécaniques par éléments finis.

Tous ces aspects demandent pour pouvoir être exploités correctement, de connaître le plus précisément possible toute la géométrie de la tresse. A savoir les entrelacements entre les multi-filaments, les potentielles désorientations locales, mais également les sections des multi-filaments, tout en prenant en compte l'aspect multi-échelle du matériau tresse.

Les trois échelles (macroscopique, microscopique et mésoscopique), ont été introduites dans le chapitre 1, on les rappelle ci-dessous, à l'aide de la figure 29 :

- Echelle macroscopique, associée à la tresse produite,

- Echelle mésoscopique, associée à une cellule élémentaire de la tresse (son motif répétitif), et,
- Echelle microscopique, celle des éléments fibreux, composée dans notre étude de milliers de filaments en section.

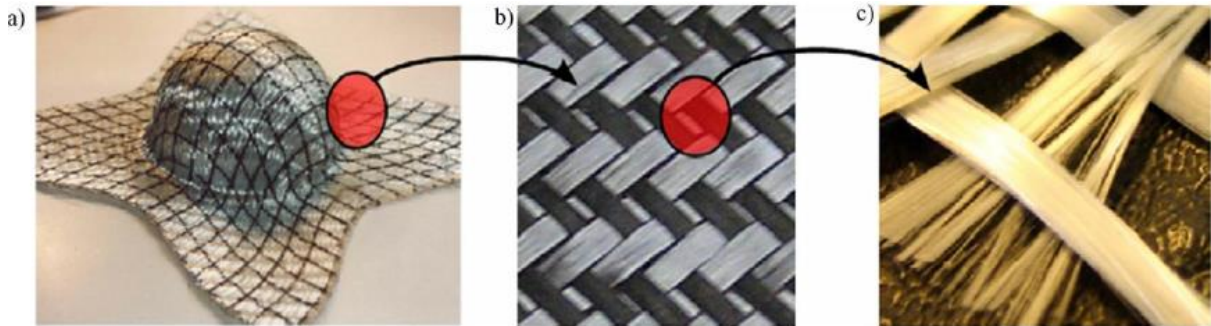


Figure 29 : Echelles d'étude : macroscopique (a), mésoscopique (b) et microscopique (c)

Ces différentes échelles peuvent faire l'objet de simulations qui ont de multiples objectifs.

Une modélisation à l'échelle microscopique se focalisera surtout sur la réorganisation des filaments dans les multi-filaments au cours du procédé de tressage. Cette approche ne sera pas abordée dans ce manuscrit. Une modélisation géométrique à l'échelle mésoscopique permet de représenter le volume élémentaire représentatif (VER) de la structure tressée. Ce volume autorise l'évaluation des paramètres géométriques de la préforme, mais aussi, dans un second temps, sert de base à toute simulation mécanique, pour en évaluer le comportement. Enfin, une modélisation géométrique à l'échelle macroscopique aura pour objectif la description de l'organisation d'éléments fibreux à importer dans le cadre d'une étude mécanique. Les résultats obtenus ainsi pourront être comparés avec le comportement expérimental de la préforme.

Toutes ces possibilités de modélisation ont chacune des avantages et des contraintes. Néanmoins, pour ces modélisations, plusieurs approches sont possibles.

- Une modélisation multi-échelle de la tresse. La modélisation est principalement centrée sur l'échelle macroscopique, tout en prenant en compte les apports des deux autres échelles microscopique et mésoscopique. Cela nécessite un niveau de finesse dans la modélisation, à la fois en temps de développement mais aussi de calculs. C'est pour cela que cette approche ne sera pas retenue.
- Une modélisation de la tresse par micro puis méso-homogénéisation. Cela correspond à injecter dans un modèle à l'échelle macroscopique des propriétés issues des échelles microscopique et mésoscopique qui ont été au préalable homogénéisées.

Ces préalables d'homogénéisation obligent à définir pour chaque échelle un modèle homogénéisé. A l'échelle microscopique, l'homogénéisation qui va alimenter le modèle mésoscopique va consister à considérer le multi-filament comme un mono-filament de section égale à celle mesurée par analyse optique. La méso-homogénéisation consiste à modéliser un VER représentatif de la structure tresse produite. Avec ces deux homogénéisations, le modèle macroscopique devient plus simple à décrire, et la tresse peut être modélisée plus simplement.

Le principal objectif va donc être de modéliser une structure semblable aux tresses produites. L'échelle de modélisation la plus susceptible de fournir un modèle cohérent est l'échelle

mésoscopique. Effectivement, modéliser les milliers de filaments d'une taille de l'ordre du micromètre ne peut être représentatif géométriquement avec une certaine précision. L'échelle macroscopique pourra ensuite être modélisée en reprenant ces données homogénéisées. Et cela pourra servir de base à la description d'un modèle géométrique en vue d'une simulation du comportement mécanique.

La modélisation géométrique se veut une représentation fidèle de la réalité. Cela passe, dans le cas des structures textiles, par l'obligation de connaître pour chaque multi-filament plusieurs données, permettant la description géométrique de ce dernier.

Ces données sont :

- Le chemin du multi-filament au sein de la tresse,
- La géométrie de la section du multi-filament,
- La position du multi-filament dans la structure.

Un multi-filament peut être caractérisé par sa ligne moyenne. Cette dernière correspond au centre de la section du multi-filament.

Ces données, suite à la démarche expérimentale, vont dépendre de plusieurs paramètres, qui sont :

- Le matériau utilisé, qui va influencer sur la possible déformation de l'élément fibreux. Cette déformation va permettre au multi-filament de se positionner au mieux dans la structure.
- La structure intrinsèque de l'élément fibreux qui va agir sur les chemins et les sections du composant fibreux. Un fil, une mèche ou un mono-filament n'auront pas les mêmes flexibilités et déformabilités.
- L'architecture de la préforme qui va influencer sur les chemins des multi-filaments. Ces derniers vont subir des sollicitations différentes en fonction de l'architecture utilisée. De celle-ci va dépendre le nombre d'entrelacement que vont subir les multi-filaments.

Ces multiples paramètres qui conditionnent les caractéristiques peuvent être complexes à intégrer dans une modélisation. Des hypothèses permettent, tout en gardant une certaine précision, d'alléger la complexité de ces modèles.

## VI. Modèles géométriques d'une tresse

Cette partie a pour but de répertorier les différents modèles géométriques à l'échelle mésoscopique qui servent à décrire les structures tresses.

Les hypothèses et les approximations issues de cet état de l'art aideront à construire un modèle permettant la définition géométrique des tresses.

### A. Modèles géométriques pour fils et multi-filaments

Les fils et multi-filaments qui constituent les éléments de la tresse se doivent être modélisés. Ces multi-filaments ont fait l'objet de nombreuses descriptions dans la littérature.

La description de ces différents modèles géométriques sera organisée historiquement, du plus vieux au plus récent. La première date de 1937, avec Peirce [15] qui introduit un modèle géométrique dédié

à la géométrie des fils dans une structure tissée. Les fils sont considérés comme incompressibles et de section circulaire. Le chemin suivi par les différents fils est composé de deux sections circulaires reliées par une section rectiligne. Ce modèle est vite mis en défaut par les observations réalisées sur des vues en coupe des sections des multi-filaments de notre structure (Chapitre 3-IV-C) notamment sur la notion d'incompressibilité des sections. Par conséquent, et par la suite, Peirce propose un nouveau modèle qui considère non plus les sections transverses circulaires mais elliptiques. L'ajout de l'écrasement des sections dans le sens de l'épaisseur de la préforme amène plus de réalisme dans le modèle, mais ne peut être généralisé à toutes les structures textiles. En 1958, Kemp[16] introduit une section de fil non plus elliptique mais en forme de champ de course. Cela permet de se rapprocher davantage de la géométrie des sections après écrasement. Herale et Shanahan, en 1978 [17], définissent la section transverse comme une lentille (soit la zone d'intersection de deux cercles non concentriques). Ces différents modèles sont illustrés figure 30.

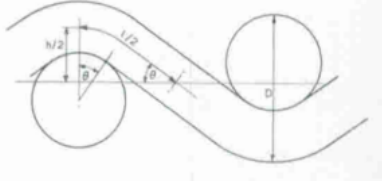
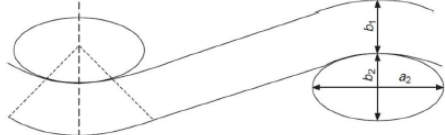
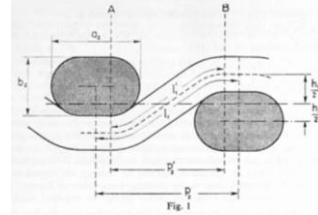
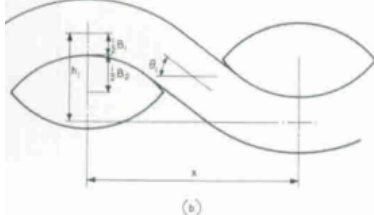
Modèle	Illustration du modèle
Peirce (section circulaire)	
Peirce (section elliptique)	
Kemp	
Herale et Shanahan	

Figure 30 : Différents modèles de chemins et sections

Ces modèles sont valables pour des entrelacements orthogonaux de structures linéaires textiles. Dans le cas des tresses, la définition des sections ou encore des chemins ne sont pas si simples, notamment pour les fils de biais. Byun, en 2000 [12] propose un modèle où le chemin des fils de biais est décrit par des arcs de cercles, illustré en figure 31.

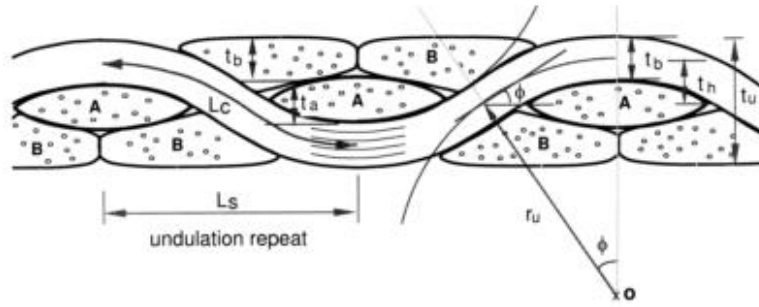


Fig. 3. Schematic yarn sections in the braider-yarn direction.

Figure 31 : Sections schématiques des fils dans la direction d'un fil de biais

Cependant, Byun montre, également (figure 31) que suivant le type de fil considéré (droit ou de biais), la géométrie en section varie. Les fils droits auront une section circulaire, alors que les fils de biais auront une forme quelconque dépendant de leur arrangement particulier.

Le cas de la section et des chemins des multi-filaments dans le cas des tresses sont globalement similaires à ceux des structures textiles tissées. Dans la figure 32, sont recensés les modèles utilisés pour les modèles de structures de tresse.

Modèle	Illustration des modèles
<p>Potluri[3] Reprise de Peirce (section elliptique)</p>	
<p>Potluri[13] Section lentille</p>	

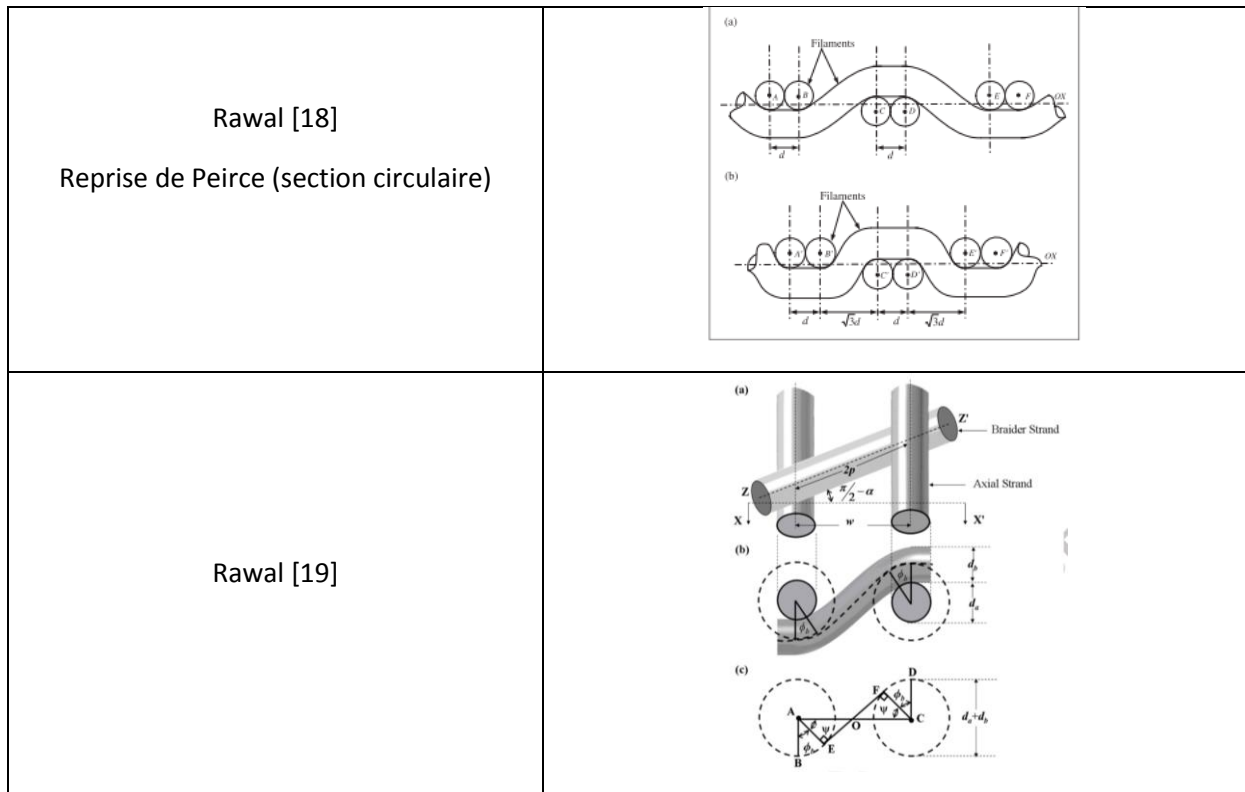


Figure32 : Différents modèles de chemins et sections pour les tresses

Les chemins des fils sont donc constitués d’un assemblage de segments rectilignes et circulaires. Les principales différences qui résident entre ces différents modèles sont donc les sections des éléments fibreux.

**B. Modèles géométriques pour le chemin des multi-filaments dans des structures tresses.**

L’objectif de la modélisation géométrique des tresses est de les reproduire numériquement tout en étant le plus fidèle par rapport à la réalité. Cette étude est centrée sur les tresses biaxiales et triaxiales. Le chemin dans les tresses 2D est une trajectoire ondulatoire. En effet du fait de la faible dimension de l’épaisseur par rapport aux deux autres dimensions, les multi-filaments ne présentent pas de rayon de courbure extrême (comme dans le cas de structures 3D). La difficulté de description du chemin des éléments fibreux dans la tresse est présente à cause de l’embuvage[8], [20]. Ce dernier oblige à considérer le chemin non plus comme un segment rectiligne mais comme un assemblage complexe de segments rectilignes et circulaires.

Cependant, pour une description plus simple, des modèles de chemin de multi-filaments ont été travaillés sans prise en compte de l’embuvage[21]. Que ce soit une tresse de section circulaire à évolution régulière ou une tresse circulaire à évolution conique, la description du chemin du multi-filament est basée sur le chemin d’un hélicoïde sur la géométrie primaire, décrit par le système d’équation 3.11 où le rayon du cercle est noté r:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = \pm r \sin \theta \\ z = r\theta \cot \alpha \end{cases} \quad (\text{Eq 3.11})$$



Le chemin du fil peut être compris comme une particule tournant autour d'un cercle (coordonnées  $x,y$ ), tout en se déplaçant le long de l'axe  $z$ . L'angle de tressage  $\alpha$ , dépend à la fois du mouvement de rotation ( $r,\theta$ ) et du mouvement axial ( $z$ ) au travers de la relation :  $\cot \alpha = \frac{z}{r\theta}$ . Les valeurs de  $\theta$  vont de 0 à  $2\pi$  pour un tour complet d'hélicoïde.

Le chemin des fils dans les tresses triaxiales, pour un surtressage sur mandrin, suit également cette description géométrique (Potluri [3]).

Cependant, une fois que la trajectoire simple du multi-filament est décrite, la notion d'embuage doit être prise en compte. En effet, l'ondulation des multi-filaments au sein de la structure affecte localement l'orientation et le chemin du multi-filament. Par exemple, l'hélicoïde ne suffit plus pour représenter le chemin du fil. En figure 33, l'ondulation du fil rouge impose au fil une déviation de chemin.

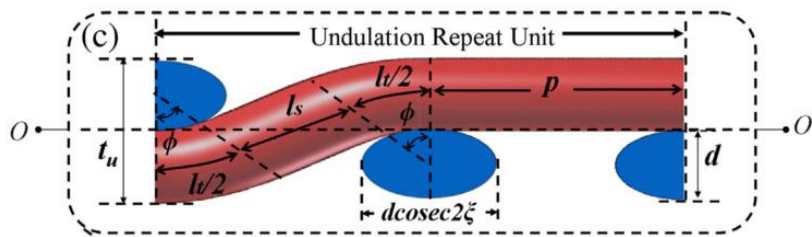


Figure 33 : Visualisation de la trajectoire d'un fil (Rawal[21])

L'ajout de l'ondulation dans la modélisation du chemin du multi-filament apporte plus de finesse dans la description du phénomène. Plusieurs publications [19][22] proposent une nouvelle formulation de la trajectoire (Eq 3.11) pour prendre en compte cette ondulation. Le système (Eq 3.11) devient donc :

$$\begin{cases} x = (r - r_s \sin \theta \lambda) \cos \theta \\ y = (r - r_s \sin \theta \lambda) \sin \theta \\ z = r\theta \cot \alpha \end{cases} \quad (\text{Eq 3.12})$$

Avec  $r_s$  le rayon du multi-filament ondulé et  $\lambda$  la période d'ondulation. Une illustration d'un chemin avec prise en compte de l'embuage est donnée figure 34.

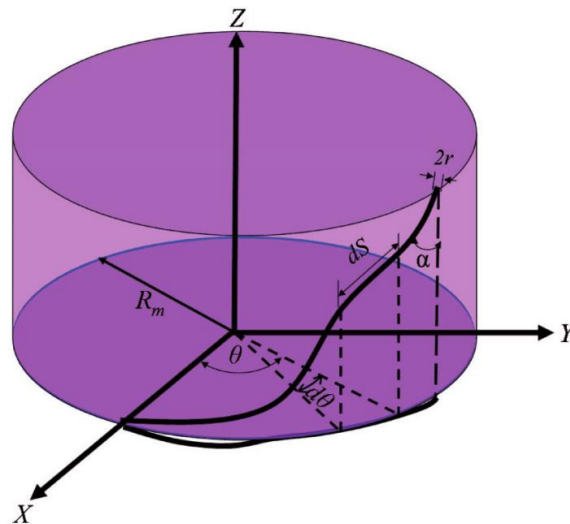
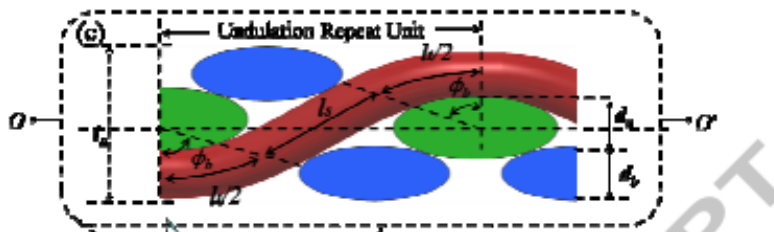


Figure 34 : Visualisation de la trajectoire d'un fil d'une tresse circulaire en prenant en compte l'embuage (Rawal [23])

Le fait de considérer l'embuage dans la modélisation de la trajectoire des multi-filaments a une influence directe sur leur section transverse. Byun [12] et par la suite Naik[20] reprennent ce phénomène en imposant aux éléments fibreux un facteur d'écrasement qui va transformer la section considérée. La question de cet écrasement de section est très discutée dans la littérature avec des valeurs de ce facteur d'écrasement comprises entre 0,65 et 0,75 [24]. Ces modèles ont été utilisés par d'autres auteurs, avec des géométries de sections moins circulaires et plus applaties [25]. Les considérations ne se basent plus sur l'écrasement de la section mais sur la réorganisation de la structure et du chemin des fils face à des éléments fibreux à sections très larges par rapport à l'épaisseur. Ayanci [26] dans sa review sur les tresses 2D tend à montrer par analyse bibliographique que les chemins des fils dépendent en grande partie des sections. En effet, ces dernières vont directement affecter le chemin d'un multi-filament au sein de la structure tresse. La figure 35, nous offre un exemple de visualisation de deux structures tresses similaires (paramètres procédés identiques). La seule différence repose sur la section transverse du fil. En figure 35-a, la section est considérée elliptique. L'épaisseur finale de la tresse correspond donc à trois épaisseurs d'un fil constitutif de la tresse. En figure 35-b, la section est plus écrasée et se répartit dans les vides laissés entre les fils. L'épaisseur finale de la préforme est affectée. Un comparatif rapide entre les deux illustrations nous montre que l'écrasement du fil influe sur la géométrie à l'échelle macroscopique, et a une influence sur le taux volumique de fibres.



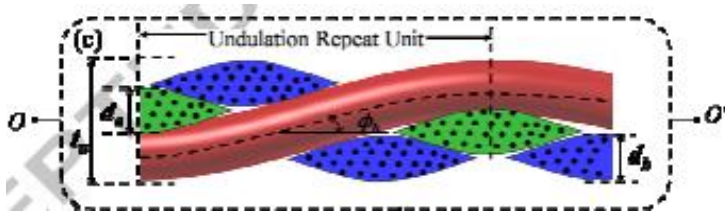


Figure 35 a et b : Visualisation de l'influence de la section des fils sur le chemin de ces derniers ( Saraswat[18])

Bilisik [27] a montré que le chemin du fil dépend de sa section transverse. Plus sa section va être importante (et assez équilibrée avec un aspect ratio supérieur à 0,7), plus le fil voit son chemin se complexifier avec des changements de direction importants.

Le chemin des multi-filaments dans une structure tressée va dépendre d'un grand nombre de paramètres, comme la section transverse des multi-filaments ou encore l'angle de tressage.

## VII. Développement du modèle géométrique d'une tresse

Associée aux caractérisations, un objectif de ce chapitre est la réalisation d'un modèle géométrique cohérent de tresse. Dans le cas des tresses biaxiales, les deux nappes de fils ont le même comportement géométrique par rapport à l'axe de production. Par contre, dans le cas des tresses triaxiales, les fils droits vont déformer localement le chemin de ces fils de biais. De fait, trois nappes de fils sont à considérer. La tresse étant d'un point de vue géométrique, une répétition de plusieurs VER. Une étude prenant en compte ces observations, mais aussi les différents types de modèles énoncés seront présentés dans cette section.

Deux types de logiciels permettant la modélisation géométrique des tresses sont mis en œuvre, TexMind de Yordan Kyosev[28] et SolidWorks de la société Dassault.

Le logiciel TexMind propose une modélisation géométrique des tresses biaxiales ou triaxiales en fonction de différents paramètres d'entrée tels que :

- Le type de schéma de tresse,
- L'angle de tressage,
- Le nombre de fils,
- Les caractéristiques du fil (section, diamètre) ...

Dans le cadre de cette thèse, une collaboration a été mise en place qui a permis d'utiliser ce logiciel [29].

En parallèle de l'utilisation de cet outil, des développements ont été effectués au sein du logiciel de CAO SolidWorks et ce afin d'établir une modélisation géométrique paramétrée d'un VER de tresse biaxiale ou triaxiale. L'objectif est de se servir des données caractérisées expérimentalement comme données d'entrée de cette démarche de simulation. Des hypothèses de modélisation viendront compléter ces données afin de simplifier cette étape de modélisation.

Lors du développement d'un modèle géométrique, les deux caractéristiques principales sont le chemin du multi-filament et la section de ce dernier. Comme introduit dans la partie bibliographique, l'architecture finale de la préforme et les paramètres procédé prescrivent le chemin et les sections des multi-filaments. L'étape de caractérisation a permis de caractériser les chemins parcourus et les différentes sections des multi-filaments. Associées à ces données des hypothèses de modélisation ont été postulées.

### A. Hypothèses de modélisation sous SolidWorks

- Les multi-filaments sont représentés en 3D volumique.

La représentation en 3D volumique permettra, dans notre étude, de représenter les sections des multi-filaments composant la tresse. Ces multi-filaments sont composés d'une matière unique. La section qui sera considérée pour ces solides s'appuiera sur les résultats de caractérisation où une étude sur les sections transverses a été proposée.

- L'élément fibreux sera considéré comme continu.

Le solide qui va représenter un multi-filament sera défini par un chemin unique et d'une géométrie de section définie. Tout le long du modèle, un solide représentera un et un seul multi-filament.

- Tout au long du chemin du multi-filament dans la structure, la géométrie de sa section sera considérée comme constante.

Comme indiqué dans la partie analyse des sections de ce chapitre, quelle que soit la position de la mesure de la section dans la tresse, la géométrie des sections est semblable. Elles seront donc considérées comme constantes.

- La géométrie de la section des multi-filaments de biais et celle des multi-filaments droits sont distinctes.

Comme indiqué dans la partie analyse des sections de ce chapitre, quelle que soit la position de la mesure de la section dans la tresse, la géométrie des sections des multi-filaments dépend de leur orientation dans la préforme finale. Dans le modèle proposé, tous les multi-filaments de biais auront la même géométrie de section, différente de celle des multi-filaments droits.

- Le chemin des éléments fibreux suivra un chemin en forme d'hélicoïde mais localement, son chemin subira une légère ondulation, comme proposé par Saraswat et al. [19].

Cette hypothèse ne concerne que les fils de biais.

La modélisation de la tresse à échelle mésoscopique dépend donc de plusieurs paramètres.

- Les géométries de section des solides représentant les multi-filaments, et,
- Les chemins que vont suivre les différents solides associés aux fils.

Les caractérisations géométriques servent de données d'entrée pour la définition de ces paramètres.

Dans un premier temps, le chemin suivi par les multi-filaments droits sera considéré comme rectiligne. Les lignes centrales de ces éléments seront donc toutes parallèles, et l'ensemble définira le diamètre médian de la tresse.

Les multi-filaments de biais auront un chemin qui va suivre ce cylindre formé par les multi-filaments droits, tout en ondulant autour d'eux.

### B. Méthode de modélisation des éléments fibreux

Dans la littérature, les géométries de sections le plus souvent utilisées pour modéliser les fils des tresses sont elliptiques ou lenticulaires.

La caractérisation menée sur ces différentes sections montre des géométries particulières : circulaire pour les fils droits, elliptique pour les fils de biais.

En vue de synthétiser l'approche sur la section géométrique des éléments fibreux composant la tresse, la figure 36 rappelle toutes les géométries possibles et la valeur de la section du multifilament considéré.

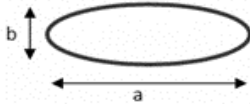
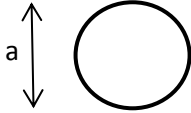
Géométrie de la section	Visualisation des paramètres a et b	Valeurs de la section S en fonction de a et b
Elliptique		$S_{\text{ell}} = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{4}$
Circulaire		$S_{\text{cir}} = \pi \cdot a^2 / 4$

Figure 36 : Description des géométries des sections des éléments fibreux modélisés.

Les fils droits sont les plus simples à positionner. De par leur géométrie rectiligne et leur espacement constant autour d'un cylindre, ce sont ces éléments qui vont servir de base à la construction du modèle de tresse. Le diamètre d'une tresse, pour un nombre de fil donné et pour un angle de tressage fixé, va être défini et constant tout au long du modèle. Pour une approche plus simple, les fils droits sont considérés sans embuvage. La représentation de cette première structure est montrée en figure 37.

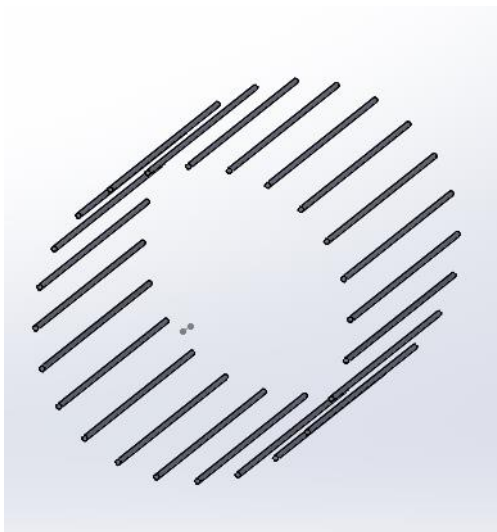


Figure 37 : Modélisation des éléments droits

Les fils de biais peuvent dans un premier temps être considérés comme décrivant une spline cylindrique, de base circulaire, comme proposé par le système d'équation 3.11. Un affinement de la section issu de l'observation des vues en coupe sera proposé dans la suite du chapitre. La notion d'embuvage est donc absente de ce premier modèle. Les défauts inhérents à cette approche relèvent des multiples interpénétrations des fils (figure 38) entre eux. Les fils de biais interpénètrent les fils droits mais aussi les fils de biais de la nappe en  $+\alpha$  interpénètrent ceux de la nappe en  $-\alpha$ .

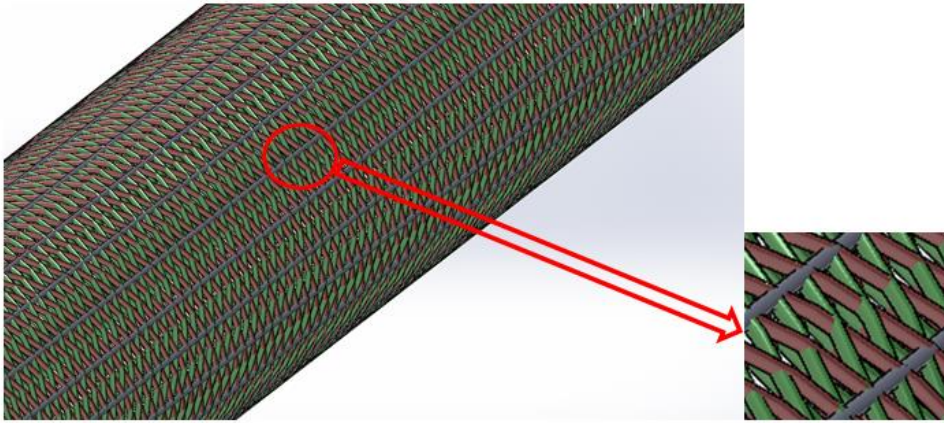


Figure 38 : Modélisation d'une tresse 144 fils sans prise en compte de l'embuvage

La notion d'embuvage des fils de biais est intégrée dans un second temps dans le modèle en utilisant le système d'équation 3.12. Un fil de biais est ensuite ajouté et positionné correctement (sans interpénétration avec un fil droit). Le résultat obtenu est représenté en figure 39. Une vue particulière (de face) de cet assemblage permet de garantir visuellement le bon placement du fil de biais par rapport aux fils droits. Une fois bien positionné, une fonction de répétition circulaire permet d'obtenir une tresse avec le bon nombre de fils en section (figure 40).

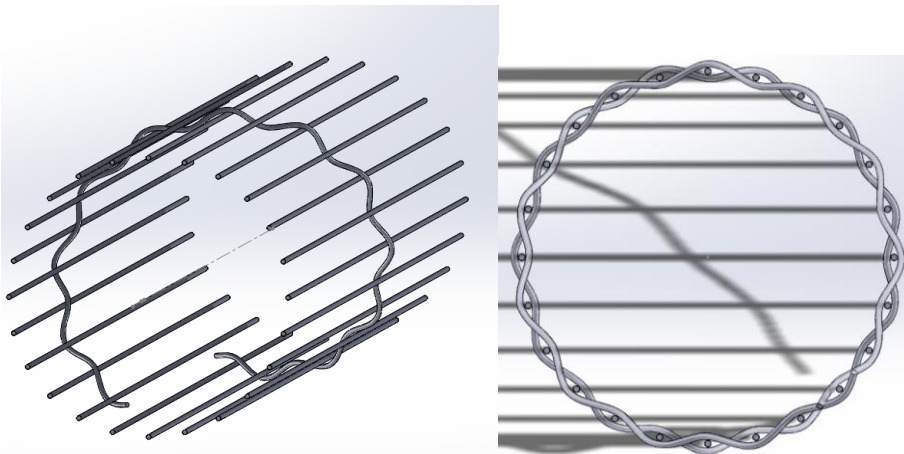


Figure 39 : Modélisation d'un fil de biais et vue en coupe transverse de la tresse avec prise en compte de l'embuvage

Cet assemblage permet la visualisation du modèle de tresse développé. Le système d'équation permet de bien positionner les fils de biais par rapport aux fils droits. Par contre, si les fils de biais ondulent maintenant autour d'une trajectoire hélicoïdale, garantissant leur non interpénétration avec les fils droits ; les deux nappes de fils de biais s'interpénètrent localement toujours (figure 40).

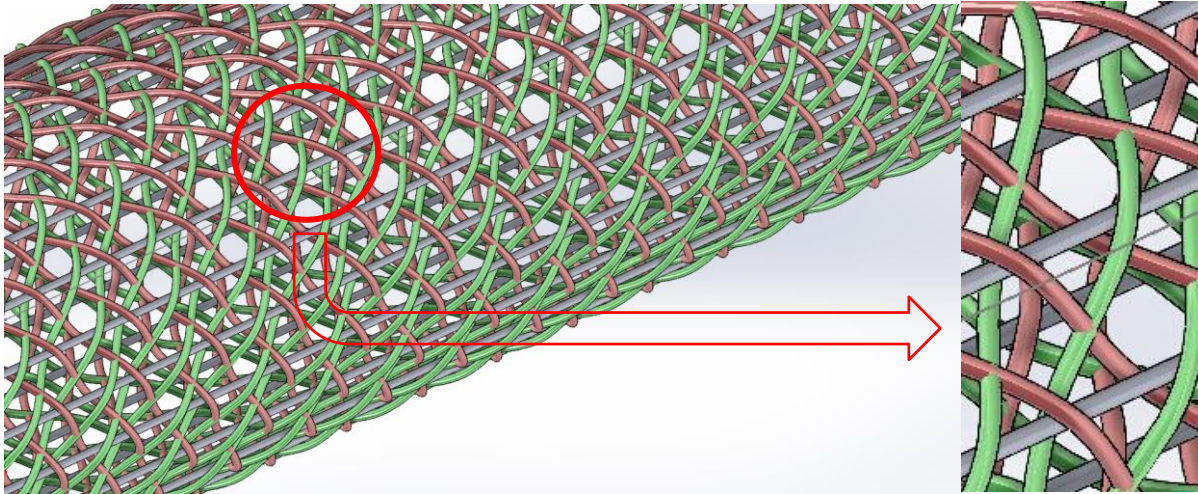


Figure 40 : Visualisation de l'interpénétration des mèches

Ces interpénétrations doivent être corrigées par intégration dans le système d'équations, régissant la trajectoire du fil, d'une fonction permettant une inflexion locale de la trajectoire à l'endroit de l'interpénétration.

Cependant, une première corrélation entre le modèle et les vues en coupe d'échantillons peut être avancée. Le positionnement dans le modèle des deux nappes des fils de biais autour des fils droits est validé par les vues en coupe. Effectivement, les trajectoires des fils de biais mais aussi leur positionnement relatif sont respectés, comme illustré figure 41.



Figure 41 : Vue en coupe d'une tresse modélisée et d'une tresse réelle

A part la prise en compte d'une inflexion supplémentaire dans la trajectoire des fils de biais, une amélioration supplémentaire peut être apportée au modèle. Cette dernière consiste en la prise en compte de la section réelle du fil. Pour l'instant, dans le modèle tous les fils présentent une section circulaire. L'observation des vues en coupe nous précise cette section, ses dimensions et sa forme. Le modèle de section du fil doit donc passer d'une section circulaire à une section en forme de lentille.

Toutes les visualisations précédentes sont issues du logiciel SolidWorks. Certaines limites de cette simulation ne permettent pas dans ce manuscrit de proposer une simulation finalisée.

Cette amélioration supplémentaire permettra une diminution de l'espace inter-filamentaire et donc une augmentation du taux de fibres dans la tresse.

### C. Définition d'un VER

De par l'hypothèse selon laquelle, la géométrie de la section de chaque groupe d'éléments fibreux de la structure est définie indépendamment, il n'est pas possible de réduire le modèle à une cellule de plus petite taille représentative du modèle. Les fils de biais auront une géométrie particulière, et les fils droits, une autre. Dans le cadre de la modélisation de la tresse triaxiale, afin de faciliter la démarche, nous avons pris en compte dès le début, le caractère répétitif du chemin de l'élément « fil de biais » et en avons modélisé un unique cycle. Il s'agissait d'une certaine définition d'un motif répétable dans la direction de la longueur. L'autre définition du motif répétable se trouve à l'échelle mésoscopique, et qui est une représentation du motif répétable suffisant pour recréer la tresse.

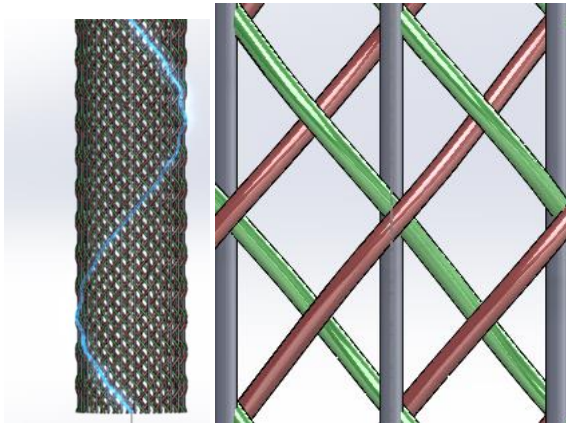


Figure 42 : Modélisation du motif répétable dans la direction de la longueur et du VER

Les motifs modélisés (fig.42) des structures tresses sont selon deux représentations, une représentation à l'échelle macroscopique et une représentation à une échelle mésoscopique. Ces deux représentations permettent de décrire la constitution géométrique de la tresse. Le VER permet la description de la plus petite cellule élémentaire permettant par répétition de retrouver la géométrie totale de la tresse. Le motif répétable dans la direction de la longueur suit un fil de biais tout au long d'un tour d'hélicoïde. La structure obtenue représente un volume qui permet de décrire toutes les orientations et géométries d'un fil donné de la tresse (ce volume sera nommé motif répétable tresse). Enfin, à partir de la caractérisation géométrique effectuée, chaque élément fibreux a été modélisé selon une géométrie particulière. Des hypothèses de sections lenticulaires et constantes le long de leur chemin rectilignes ont été imposées. Le modèle et les éléments fibreux le composant conservent néanmoins les principaux attributs mis en lumière lors de l'opération de caractérisation géométrique.

Les caractéristiques des motifs modélisés sont données dans le tableau 10.

Tableau 10 : Paramètres géométriques des motifs répétables

Description	Unité	Paramètres	Motif répétable tresse (144 fils, $\alpha=45^\circ$ )	VER motif élémentaire
Largeur	mm	A	31	3,2
Epaisseur	mm	B	2,2	0,6
Longueur	mm	L	171	3,2



Volume VER	mm <sup>3</sup>	V <sub>tot</sub>	11662,2	6,14
Volume fibreux	mm <sup>3</sup>	V <sub>f</sub>	9712,03	5,12
Taux volumique de fibre	%	T <sub>f</sub>	83,3	83,1

On note également que le taux volumique de fibres pour les motifs relatifs à la tresse et au VER a des valeurs proches d'environ 83%. Les différences de valeurs, s'expliquent à la fois par des erreurs de mesures lors de l'étape de caractérisation mais aussi par des hypothèses utilisées pour la modélisation. Le taux volumique de fibre entre les deux motifs répétables sont similaires ce qui correspond à une validation du rapport d'échelle.

### VIII. Résultats de la simulation, comparatif par rapport aux données expérimentales

Le logiciel « TexMind Tresser Geo 3D » permet de créer la géométrie tridimensionnelle de la tresse. Pour cela, il se base sur des modèles géométriques qui permettent de reproduire le mouvement des bobineaux. Pour cela, la position des roues à aubes ainsi que les agencements des porte-bobineaux doivent être connus. Les principaux paramètres de la machine sont par conséquent des données d'entrées de ce logiciel. La gestion de l'armure que l'on souhaite produire est aussi possible en laissant des bobineaux vides. Pour les bobineaux occupés, des couleurs permettent un suivi de trajectoire dans la structure. Le logiciel génère ensuite une géométrie de tresse plate ou circulaire. La géométrie représentée est basée sur des calculs géométriques prédictifs des trajectoires en fonction des paramètres machine mais également des propriétés du fil simulé, à l'aide de la trajectoire du porte-bobineau. Les informations pouvant être rentrées pour les simulations sont :

- Le nombre de roues à aubes,
- Le type de tresse,
- La vitesse de rotation des roues à aubes,
- Le diamètre de la tresse,
- L'angle de tressage,
- La vitesse de production,
- La densité linéaire du fil,
- La densité du fil,
- La géométrie de la section du fil.

Les résultats des simulations proposées dans cette section seront issus du logiciel Texmind développé par Yordan Kyosev.

Les tresses produites qui vont être comparées aux résultats issus de la simulation sont des tresses triaxiales. Le tableau 11 reprend les différentes configurations considérées par cette corrélation.

Tableau 11 : *Echantillons réalisés*

Nom des échantillons	Nombre de fils de	Nombre de fils	V <sub>t</sub> (m/h)	ω <sub>t</sub> (tr/min)
----------------------	-------------------	----------------	----------------------	-------------------------

	biais	droits		
1	192	96	144	47.01
2	192	96	108	46.21
3	192	96	72	47.03
4	192	96	55.2	45.16
5	192	96	36	44.54
6	192	96	27	62.84
7	192	96	18	63.74

Le procédé de caractérisation des échantillons a été présenté dans le chapitre 2. L'angle de tressage, la longueur des fils à l'intérieur de la structure et la masse linéaire sont les caractéristiques géométriques qui seront étudiés dans cette partie.

Les valeurs angulaires des tresses sont représentées sur la figure 43 en fonction de la vitesse de tirage. Les angles mesurés sur échantillons sont comparés à la relation analytique (Eq 2.2).

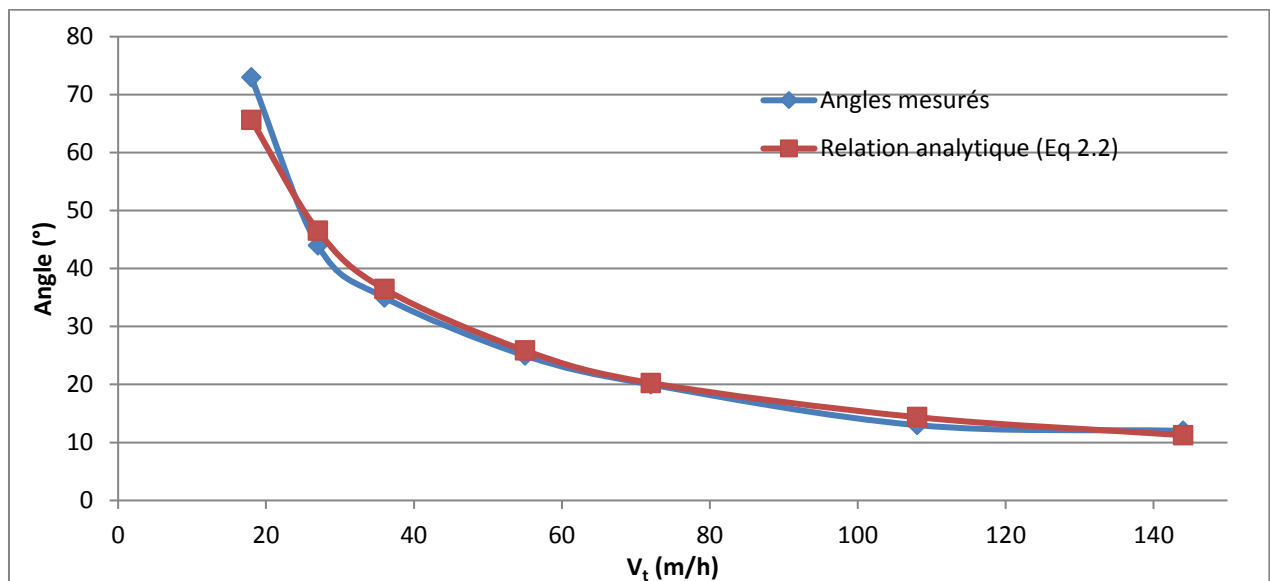


Figure 43 : Comparaison entre les angles théoriques et les angles mesurés

Pour pouvoir opérer une simulation numérique, plusieurs données d'entrée doivent être renseignées dans le logiciel TexMind.

- Le nombre de fils,
- Le diamètre de la section des fils,
- Le diamètre de la tresse, et,

- L'angle de tressage ou le nombre de circonvolutions d'un fil de biais sur un mètre linéaire de tresse.

Les comparaisons entre les tresses simulées par le logiciel Texmind et les tresses produites vont se limiter à deux configurations de tresses présentant des angles de tressage différents (à 19° et à 69°). La même géométrie et les mêmes paramètres d'entrée sont renseignés. Nous considérerons une configuration à 2 fils par bobines. Le nombre total de fils est également à renseigner (288 fils). Concernant la section des fils, les données des vues en coupe présentées dans ce chapitre seront utilisées. La section sera considérée comme circulaire, y compris pour les fils de biais.

Sur les figures 44 et 45 on représente la comparaison entre les tresses simulées et les tresses produites pour les 2 angles de tressage considérés (un grand et un petit). Sur ces images sont post traitées les valeurs d'angles de tressage, d'une part expérimentalement et par ailleurs sur la tresse modélisée.

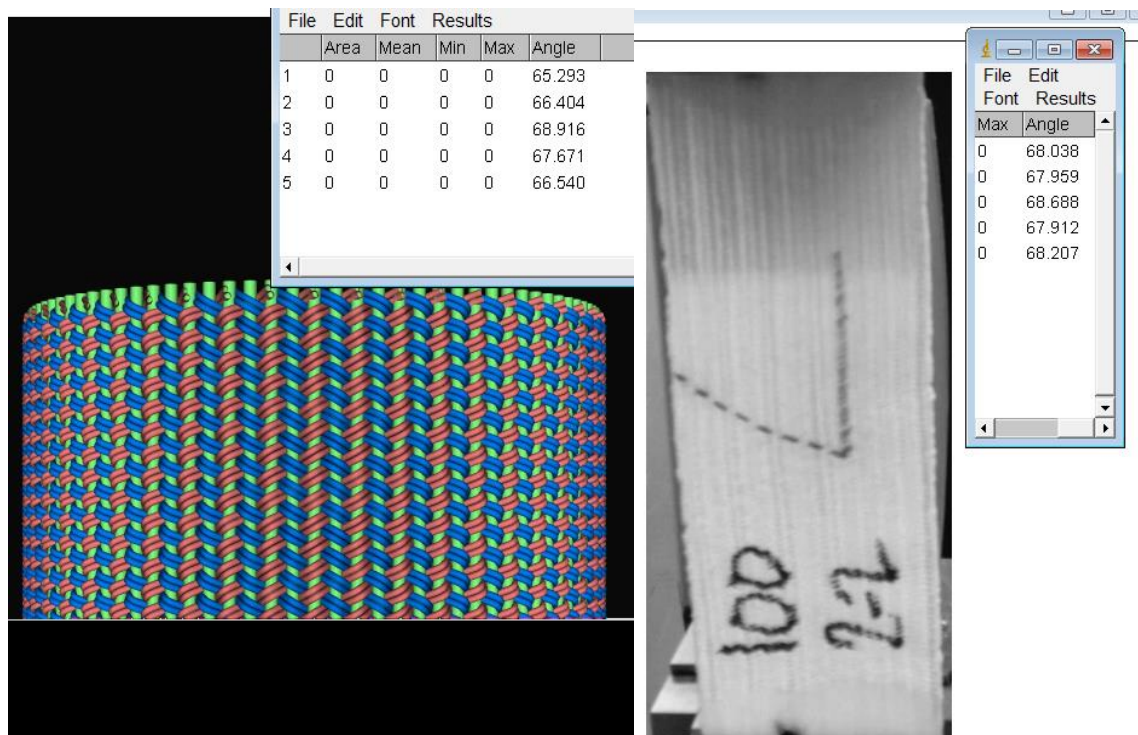


Figure 44 : Comparaison entre tresses produites et simulées (grand angle de tressage)

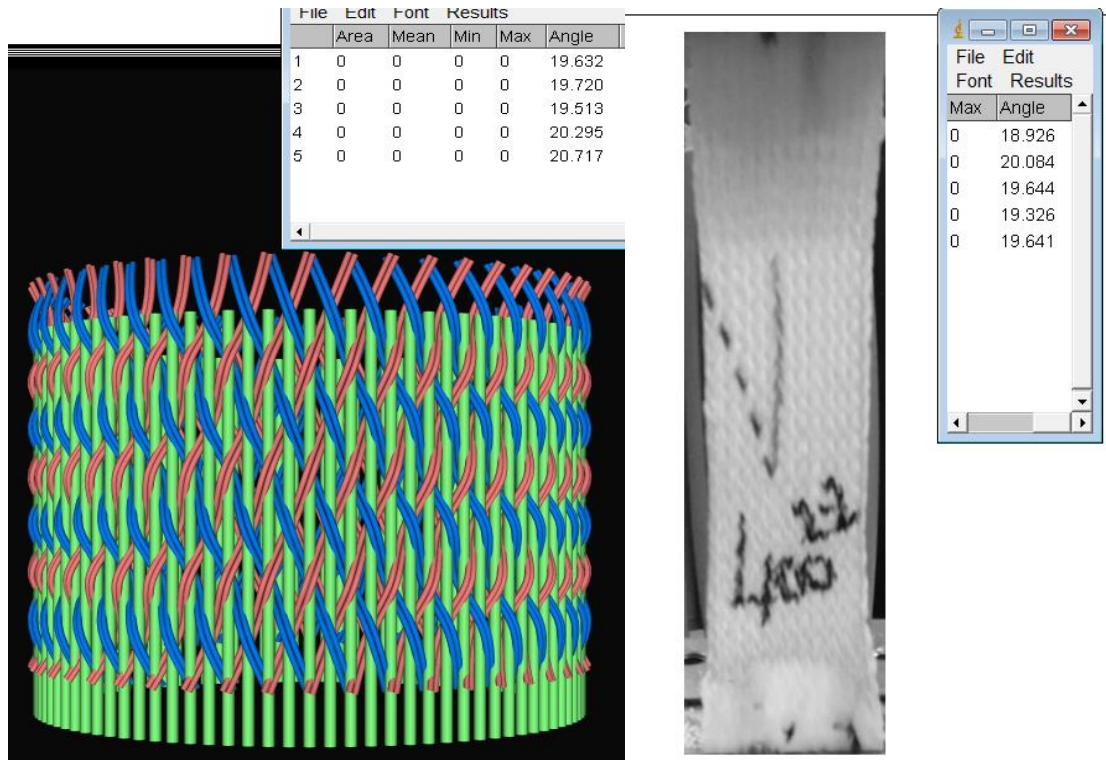


Figure 45 Comparaison entre tresses produites et simulées (faible angle de tressage)

Ces comparaisons entre échantillons produits et simulés montrent que la prédiction proposée par le logiciel pour des paramètres d'entrée correspondants est proche des valeurs mesurées sur les tresses produites. Après cette étude sur le comparatif au niveau des angles de tressage, un comparatif sur les masses linéiques et sur les trajectoires de fils (au sens de la circonvolution, donc de la longueur) est proposé.

Les données d'entrée utilisées par le logiciel pour le calcul des masses linéiques des tresses sont les suivantes :

- La densité des fils,
- Le titre des fils,
- La section du fil,
- Le nombre de fils (droits ou de biais),
- L'angle de tressage.

On reporte dans le tableau 12 la comparaison entre les valeurs de masses linéiques (pour 1m linéaire de tresse) mesurées et calculées pour un ensemble de tresses triaxiales d'angles différents. Dans ce tableau figurent également les longueurs des fils de biais.

Tableau 12 : Comparaison entre masses linéiques mesurées et simulées

Echantillons	Simulation (1m de tresse)		Echantillons produits (1m de tresse)	
	Masse linéique (g/m)	Longueur des fils de biais (m)	Masse linéique (g/m)	Longueur des fils de biais (m)
Angle de tressage (°)				
12	48,84	1,02	53,60	1,07

13	52,03	1,09	53,90	1,08
19	50,46	1,06	54,63	1,11
25	52,15	1,09	55,74	1,16
35	57,93	1,22	61,19	1,29
44	65,69	1,39	69,70	1,46
70	87,38	2,78	94,24	2,92

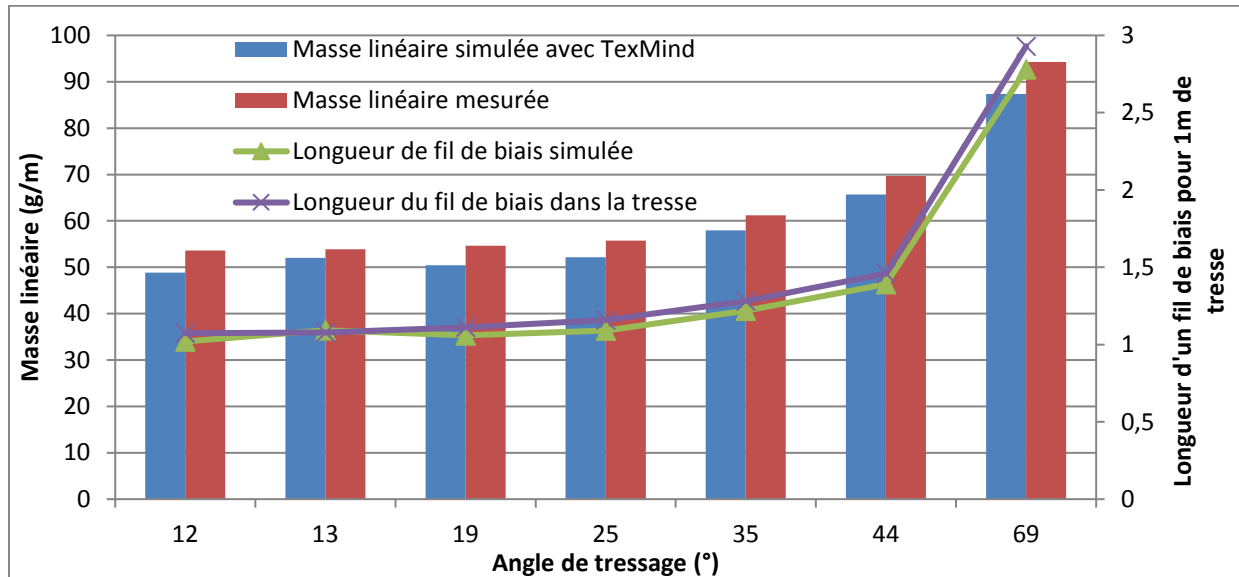


Figure 46 : Comparaison des masses linéiques et des longueurs de fils de biais entre les valeurs mesurées et calculées par le logiciel Texmind

Les valeurs du tableau 10, en termes de masses linéiques et de longueur de fil de biais sont représentées graphiquement sur la figure 46.

Comme dit précédemment, la valeur d'embuvage est une valeur moyennée des embuvages mesurés sur chaque configuration. Les valeurs étaient assez proches (à part pour un très grand angle de tressage) pour autoriser une moyenne à être considérée.

L'embuvage des fils droits n'est pas pris en compte par le logiciel de simulation. Cela explique une partie de l'écart relatif entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées (figure 46). La prédiction des mesures peut aussi être améliorée en considérant un paramètre supplémentaire. En effet, pendant le procédé de tressage, la section des fils change, et passe d'une section circulaire à une section elliptique. La prise en compte de cette spécificité devrait aussi aider à obtenir une simulation plus réaliste. Cette remarque est surtout valable dans le cas des grands angles de tressage, pour lesquels l'entrelacement des fils est plus important, et donc où l'embuvage est augmenté.

Le logiciel de simulation géométrique donne donc une estimation de la masse de la tresse par mètre. Pour obtenir ces estimations, les données initiales des propriétés du fil doivent être renseignées. Mais le caractère indéformable des sections (hypothèse prise par le logiciel) ne correspond pas aux observations des vues en coupe des tresses produites. Ce phénomène explique aussi une partie du décalage entre la simulation et les observations.

## IX. Conclusions

Le chapitre précédent a eu pour but l'analyse de l'influence entre les paramètres procédés et les protocoles de caractérisation de tresses.

A partir de la machine de tressage ont été produites des préformes tressées sèches. Différentes configurations, correspondant à des paramètres procédés ou des paramètres matériaux (type de multi-filaments, en Vectran ou en Spectra par exemple) ont été testées afin d'obtenir un panel de produits représentatif permettant l'obtention de relations entre les paramètres initiaux de configurations et les caractéristiques géométriques des préformes obtenues.

Ces préformes ont été gardées sèches, configuration qui n'est que très rarement étudiée dans la littérature où il est préféré l'exploitation des propriétés des tresses dans des matériaux composites. Les propriétés mécaniques et géométriques de ces derniers dépendent de celles de la préforme sèches, un travail de caractérisation est donc nécessaire voire essentiel pour poursuivre l'étude au niveau d'un matériau fini composite.

Une analyse des masses linéiques des tresses produites a été présentée dans ce chapitre. En lien, évidemment avec l'angle de tressage. De ces mesures les différentes configurations de tresses produites ont permis l'élaboration d'un modèle prédictif du calcul de la masse linéique des tresses. Cela a aussi mis en exergue une certaine différence entre les résultats expérimentaux et ceux théoriques. La raison tient en les hypothèses admises dans le modèle théorique, notamment en ce qui concerne la géométrie de la section des fils. De fait, dans un second temps une analyse de la morphologie des fils au niveau microscopique a été présentée. La notion d'embuvage et surtout les valeurs associées ont pu être quantifiées de cette analyse. Ces morphologies et ces embuvages seront un point d'entrée pour affiner le modèle proposé.

Enfin, la caractérisation des différents échantillons de tresses sèches a permis de mettre en lumière des relations entre les paramètres procédés et les paramètres préformes et ce à différentes échelles. De même que des influences ont été définies (par exemple, la dépendance de certains paramètres géométriques à l'angle de tressage), une caractérisation des différents paramètres géométriques dépendant d'actions nécessitant une intervention manuelle (découpage, mesures in situ) ont permis de quantifier avec une certaine (mais relative à ces interventions manuelles) précision des valeurs géométriques nous permettant une analyse des préformes produites. Une proposition d'analyse des sections transverses des multi-filaments à différentes étapes du procédé de tressage a permis d'obtenir les données utiles à une future modélisation géométrique. Le développement d'un modèle se basant sur les propriétés géométriques issues de ce chapitre et son application à la prédiction de comportement mécanique est l'objet d'étude du chapitre 4.

## Bibliographie du chapitre 3

- [1] G. Deleuze, *Différence et répétition*. PUF, 1968.
- [2] P. Potluri, "Braiding," in *Wiley encyclopedia of composites*, 2012, pp. 1–15.
- [3] P. Potluri, A. Rawal, M. Rivaldi, and I. Porat, "Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3D preforms," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 6, pp. 481–492, Jun. 2003.
- [4] Q. Zhang, D. Beale, S. Adanur, R. M. Broughton, and R. P. Walker, "Structural Analysis of a Two-dimensional Braided Fabric," *J. Text. Inst.*, vol. 88, no. April 2015, pp. 41–52, 1997.
- [5] J. F. A. Kessels and R. Akkerman, "Prediction of the yarn trajectories on complex braided preforms," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 8, pp. 1073–1081, Aug. 2002.
- [6] J. H. Van Ravenhorst and R. Akkerman, "Circular braiding take-up speed generation using inverse kinematics," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 64, no. April, pp. 147–158, 2014.
- [7] L. Chen, X. M. Tao, and C. L. Choy, "Mechanical analysis of 3-D braided composites by the <sup>®</sup> nite multiphase element method," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 59, pp. 2383–2391, 1999.
- [8] J. Lyons and C. M. Pastore, "Effect of braid structure on yarn cross-sectional shape," *Fibers Polym.*, vol. 5, no. 3, pp. 182–186, 2004.
- [9] D. Li, J. Li, L. Chen, Z. Lu, and D. Fang, "Finite Element Analysis of Mechanical Properties of 3D Four-Directional Rectangular Braided Composites Part 1: Microgeometry and 3D Finite Element Model," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 17, no. 4, pp. 373–387, 2010.
- [10] G. W. Du and P. Popper, "Analysis of a Circular Braiding Process for Complex Shapes," *J. Text. Inst.*, vol. 85, no. 3, pp. 316–337, 1994.
- [11] F. Peirce, "The geometry of cloth structure," *J. Text. Inst. Trans.*, vol. 28, no. 3, 1937.
- [12] J.-H. Byun, "The analytical characterization of 2-D braided textile composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 5, pp. 705–716, Apr. 2000.
- [13] P. Potluri and A. Manan, "Mechanics of non-orthogonally interlaced textile composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 4, pp. 1216–1226, Apr. 2007.
- [14] A. Endruweit and A. C. Long, "A model for the in-plane permeability of triaxially braided reinforcements," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 2, pp. 165–172, Feb. 2011.
- [15] F. T. Peirce, *5—the Geometry of Cloth Structure*, vol. 28, no. 3. 1937.
- [16] A. Kemp, "An Extension of Peirce's Cloth Geometry to the Treatment of Non-circular Threads," *J. Text. Inst. Trans.*, vol. 49, no. 1, pp. T44–T48, 1958.
- [17] J. W. S. Hearle and W. J. Shanahan, "11—an Energy Method for Calculations in Fabric Mechanics Part I: Principles of the Method," *J. Text. Inst.*, vol. 69, no. 4, pp. 81–91, 1978.

- [18] A. Rawal, R. Kumar, and H. Saraswat, "Tensile mechanics of braided sutures," *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 16, pp. 1703–1710, 2012.
- [19] H. Saraswat, A. Rawal, and R. Singh, "Tensile behaviour of multi-layered braided structures," *J. Mater. Sci.*, vol. 49, no. 18, pp. 6427–6436, 2014.
- [20] R. A. Naik, P. G. Ifju, and J. E. Masters, "Effect of fibre architecture parameters on deformation fields and elastic moduli of 2-D braided composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 28, no. 7, p. -, 1994.
- [21] A. Rawal, "Geometrical Modeling of the Yarn Paths in Three-dimensional Braided Structures," *J. Ind. Text.*, vol. 35, no. 2, pp. 115–135, 2005.
- [22] A. Rawal, H. Saraswat, and R. Kumar, "Tensile response of tubular braids with an elastic core," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 47, no. 1, pp. 150–155, 2013.
- [23] A. Rawal, S. Gupta, H. Saraswat, and A. Sibal, "Geometrical modeling of near-net shape braided preforms," *Text. Res. J.*, vol. 85, no. 10, pp. 1055–1064, 2014.
- [24] K. Birkefeld, M. Röder, T. von Reden, M. Bulat, and K. Drechsler, "Characterization of Biaxial and Triaxial Braids: Fiber Architecture and Mechanical Properties," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 19, no. 3–4, pp. 259–273, Feb. 2011.
- [25] E. Zywicz and T. Nguyen, "On the flexural and extensional behavior of a large-tow triaxial braided composite," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 16, pp. 2989–2999, 2000.
- [26] C. Ayranci and J. Carey, "2D braided composites: A review for stiffness critical applications," *Compos. Struct.*, vol. 85, no. 1, pp. 43–58, Sep. 2008.
- [27] K. Bilisik and N. Sahbaz, "Structure-unit cell-based approach on three-dimensional representative braided preforms from four-step braiding: Experimental determination of effects of structure-process parameters on predetermined yarn path," *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 3, pp. 220–241, 2012.
- [28] Y. Kyosev, *Braiding Technology for Textiles*. Woodhead Publishing, 2015.
- [29] B. Duchamp, D. Soulat, X. Legrand, and Y. Kyosev, "ELABORATION AND GEOMETRICAL SIMULATION OF TRIAXIAL BRAIDED REINFORCEMENTS," in *Euromech colloquim*, 2016.



## Chapitre 4 : Caractérisation mécanique en traction et modèles de comportement associés

<u>Chapitre 4 : Caractérisation mécanique en traction et modèles de comportement associés</u> .....	161
<u>I. Introduction</u> .....	162
<u>II. Résultats : Multi-filaments</u> .....	162
<u>III. Cinématique de test</u> .....	164
<u>IV. Comportement mécanique en traction des tresses biaxiales</u> .....	165
<u>A. Déformation à la rupture</u> .....	167
<u>B. Force maximale</u> .....	169
<u>C. Pente</u> .....	170
<u>D. Conclusions intermédiaires sur les tresses biaxiales</u> .....	171
<u>V. Comportement mécanique en traction des tresses triaxiales</u> .....	171
<u>A. Définition du double pic</u> .....	172
<u>B. Définition de l'angle de tressage limite</u> .....	173
<u>C. Classement des tresses triaxiales suivant leur comportement mécanique</u> .....	176
<u>D. Evolution angulaire lors de l'essai de traction et notion d'angle de blocage</u> .....	177
<u>E. Déformation</u> .....	180
<u>F. Effort maximal</u> .....	183
<u>G. Pente</u> .....	184
<u>VI. Modélisation du comportement en traction</u> .....	186
<u>A. Modélisation du comportement des fils droits</u> .....	186
<u>B. Modélisation du comportement des fils de biais</u> .....	188
<u>C. Définition du modèle</u> .....	189
<u>D. Comparaison avec les résultats expérimentaux</u> .....	191
<u>E. Modèle énergétique</u> .....	195
<u>VII. Analyse thermique des tresses lors de la traction uniaxiale</u> .....	198
<u>VIII. Réponses des tresses au phénomène de charge-décharge</u> .....	203
<u>IX. Résultats de la simulation, comparatif par rapport aux données expérimentales</u> .....	205
<u>X. Retro-conception</u> .....	207
<u>A. Tresses triaxiales de type 1</u> .....	208
<u>B. Tresses triaxiales de type 2</u> .....	209
<u>C. Tresses triaxiales de type 3</u> .....	210
<u>XI. Conclusions</u> .....	211

Bibliographie du chapitre 4 ..... 213

## I. Introduction

Cette partie concerne les résultats obtenus en traction sur des échantillons de tresses biaxiales ou triaxiales élaborés au chapitre 2. Ces résultats sont analysés en termes d'influence sur le comportement mécanique des tresses de certains paramètres géométriques, introduits au chapitre 3, comme l'angle de tressage mais également le nombre de fils en section ou la matière utilisée.

La caractérisation mécanique est focalisée dans le cadre cette étude sur le comportement en traction et suit le protocole introduit dans le chapitre 2. Après avoir étudié le comportement en traction des fils, le comportement des tresses biaxiales et tiraxiales sera analysé. Les mécanismes en fonction de ces types de tresses mais également des angles seront discutés. Sur la base de ces résultats expérimentaux, dans un second temps, et à l'image du modèle proposé dans le chapitre 3, par exemple sur la masse linéique, un modèle prédictif et analytique sur ce comportement en traction sera établi. Ce chapitre inclura également des résultats expérimentaux d'une part de la température mais également de charge-décharge sur ces produits tresses. Enfin ce chapitre se terminera sur une démarche dite de retro-conception.

Pour des raisons de clarté du propos, l'essentiel des résultats sera présenté sur des tresses en Spectra.

## II. Résultats : Multi-filaments

Les différents multi-filaments proposés par les partenaires du projet ont été caractérisés dès réception, selon le protocole introduit dans le chapitre 2-VII-C-11. Cette caractérisation en traction est essentielle pour connaître la tenue de la matière relativement aux efforts de tension imposés lors du procédé de tressage. Les multi-filaments utilisés dans le cadre de cette étude sont tous retordus à 50 tours par mètre. On représente figures 1 et 2 les courbes en traction des matières Spectra et Vectran.

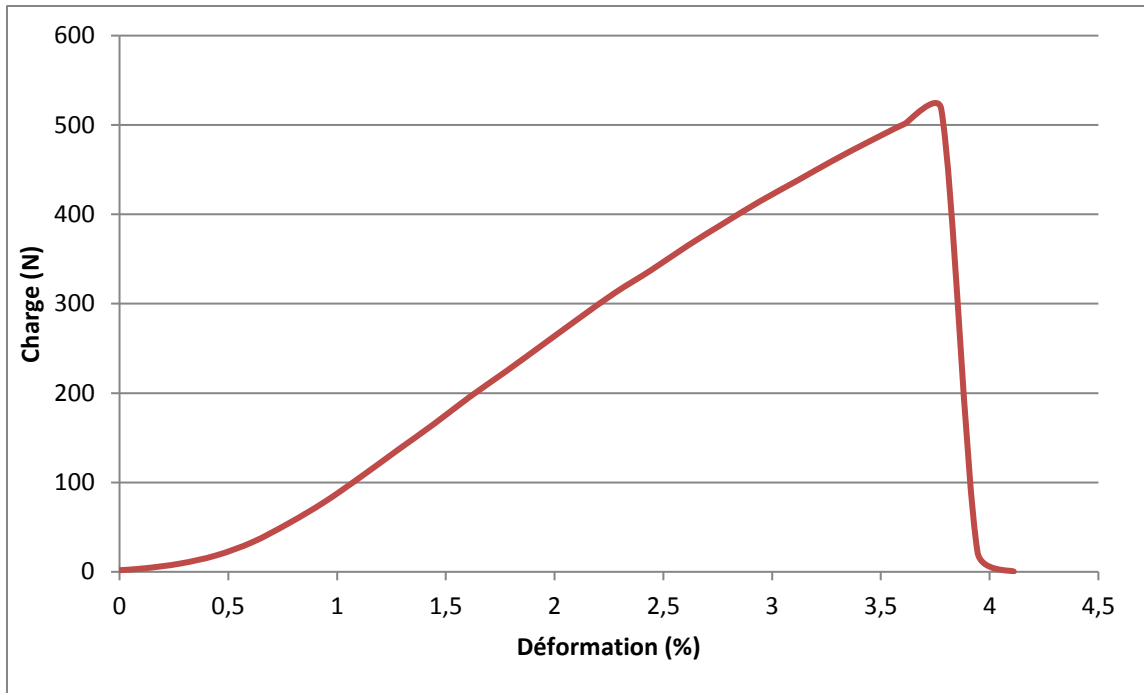


Figure 1 : Comportement en traction multi-filament Spectra 160 Tex

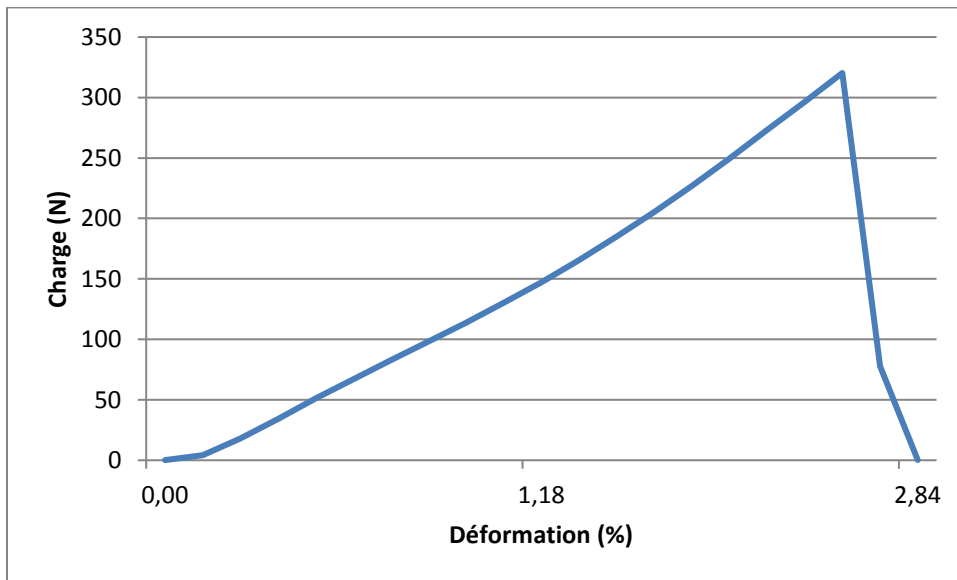


Figure 2 : Comportement en traction multi-filament Vectran 160 Tex

Le tableau 1 résume les données sur le comportement mécanique de ces deux matières en termes d'effort maximal, de déformation à la rupture, mais également de pente, intitulée module de charge. Pour ce paramètre issu de ces courbes de tractions (en effort-déformation), il est exprimé en N, et correspond à la pente de la partie linéaire, il est calculé dans la gamme de déformation entre 1 à 2,5%.

Tableau 1 : Caractéristiques des multi-filaments

	Vectran	Spectra
Titre (Tex)	160	160

Force maximale (N)	320	517
Déformation à la rupture (%)	2.51	3.77
Module de charge(N)	13007	14096

### III. Cinématique de test

A l'échelle des tresses, différentes vitesses de traction ont été testées pour étudier l'impact de ce paramètre sur le comportement mécanique. On reporte figure 3 les courbes obtenues pour des tresses triaxiales en Spectra d'angle 60° pour les vitesses suivantes :

- 5 mm/min,
- 10 mm/min,
- 50 mm/min,
- 100 mm/min, et,
- 200 mm/min.

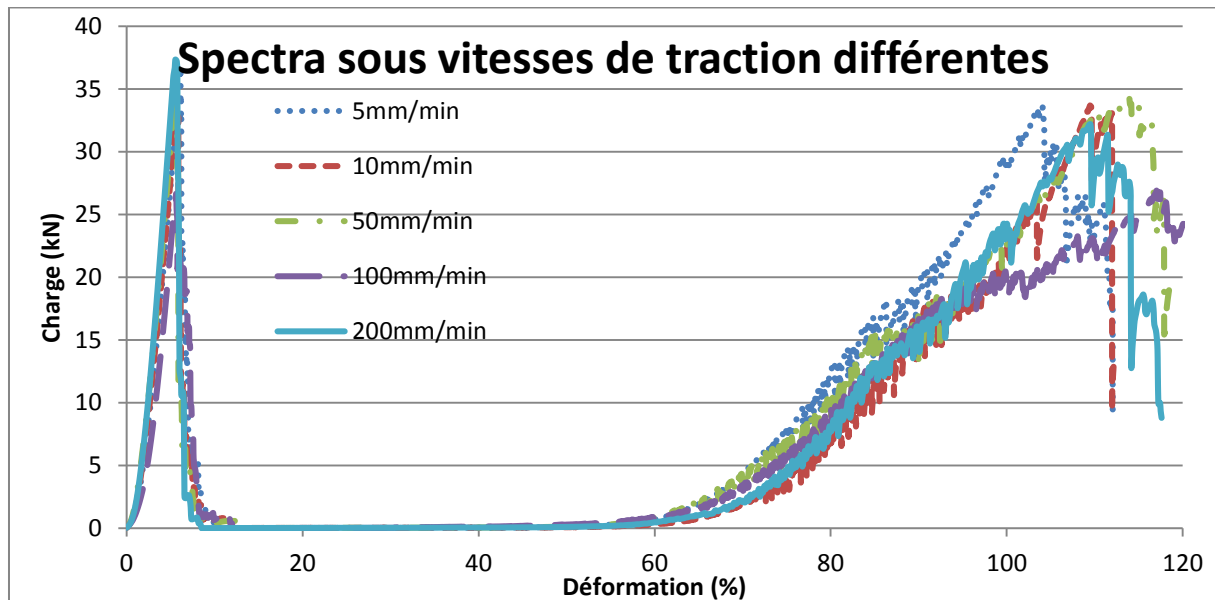


Figure 3 : Tresses en Spectra sous plusieurs vitesses de traction différentes

La figure 3 nous indique que les courbes de traction à ces différentes vitesses suivent la même évolution. On constate un premier pic de charge, suivi d'un second. Cette évolution particulière sera expliquée et analysée dans la suite de ce chapitre. Cependant, les différentes vitesses de traction n'influencent pas sur le comportement mécanique en traction. Le premier pic intervient au même moment, et la valeur de charge maximale reste identique. Le second pic de charge débute au même taux de déformation quelle que soit la vitesse de traction appliquée sur les tresses. La valeur maximale de charge pour le second pic est comparable, ainsi que les valeurs de déformation à la rupture pour toutes valeurs de vitesse de traction.

Les résultats de tests de traction uniaxiale, sont par la suite, issus d'essais réalisés à une vitesse de 50 mm/min, en accord avec la norme NF ISO 13934.

#### IV. Comportement mécanique en traction des tresses biaxiales

Pour ces résultats expérimentaux, des configurations de tresses produites dans une gamme d'angle de tressage de 10 à 30° ont été considérées.

Le comportement mécanique en traction d'une tresse biaxiale représenté par une courbe d'effort-déformation peut être séparé en trois phases (figure 4).

Une première partie non-linéaire est caractérisée par une faible croissance de l'effort pendant l'augmentation de la déformation. Dans cette zone, beaucoup d'auteurs[1]–[4] considèrent que quand un échantillon de tresse est étendu, sa géométrie sera déformée jusqu'à une condition de blocage où la déformation géométrique atteint son maximum. Le blocage est une phase de la déformation de la tresse au cours de laquelle la rotation des fils de biais n'est plus possible et s'alignent dans la direction de l'effort [5]. Ce phénomène est couramment étudié pendant la première partie (non-linéaire) du comportement en cisaillement plan des renforts tissés. Mais dans le cas des tests de cisaillement, les fils sont assujettis à un cisaillement pur sans être en traction. Quand les fils entrent en contact les uns avec les autres, la condition de blocage est atteinte, et cette dernière est associée à un angle de blocage dans le cas des renforts tissés. Dans le cas d'un test de traction sur une tresse biaxiale, tous les fils sont soumis à l'effort appliqué. En conséquence de quoi, il est possible de considérer que durant cette portion de courbe, la tresse subit une modification géométrique par une évolution de l'angle [6]. Dans la seconde partie de la courbe, traduite par une augmentation linéaire de la charge en fonction de la déformation, tous les multi-filaments de biais contribuent à la raideur de la préforme. Dans cette partie de la courbe, les propriétés des multi-filaments gouvernent le comportement de la tresse. C'est dans cette partie linéaire, qu'il est possible de calculer un « module équivalent » à l'aide de la pente de cette droite (représentée en gras sur la figure 6). La troisième partie de cette courbe est au-delà du pic maximal de charge et est associée à un phénomène de décharge après rupture des différents multi-filaments. De cette partie de courbe peut être mesurée la charge maximale et la déformation à rupture de la tresse.

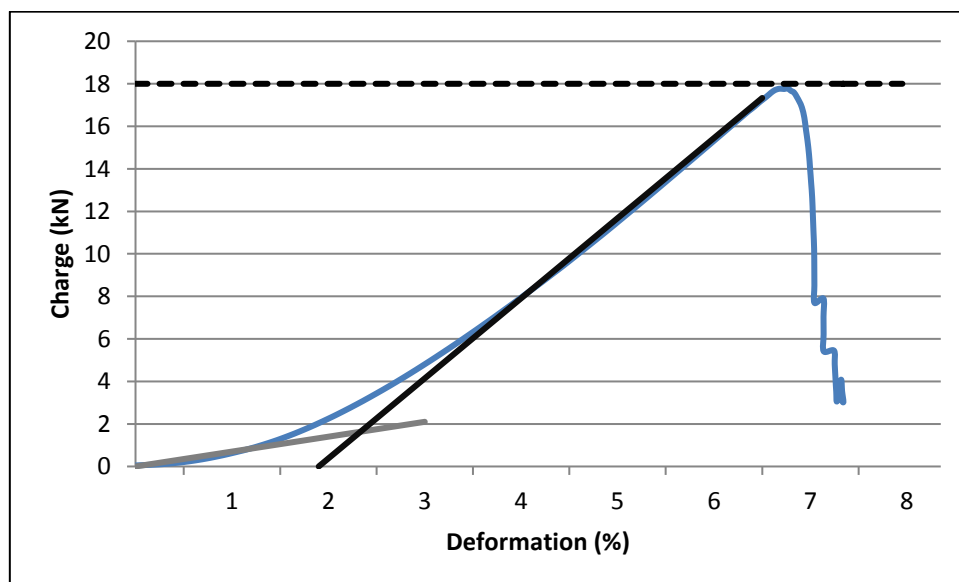


Figure 4 : Comportement en traction d'une tresse biaxiale (échantillon avec un angle de tressage de 20°)

Sur la figure 5 est représenté le comportement en traction de deux tresses biaxiales, de même matière, et comportant un même nombre de fils, mais d'angles de tressage différents. L'influence de

l'angle est clairement identifiée sur le comportement en traction, et plus spécifiquement sur les trois parties de la courbe introduites précédemment.

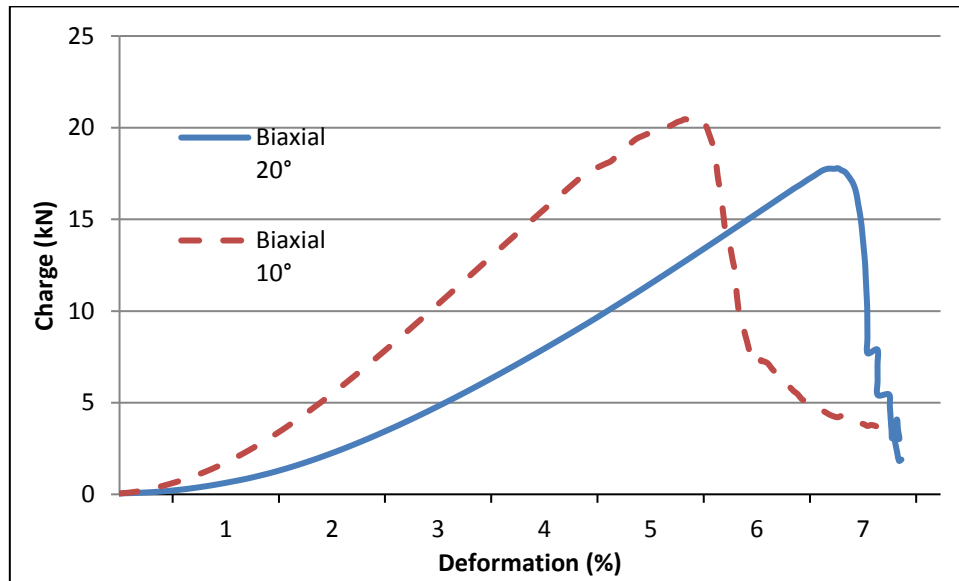


Figure 5 : Comparaison entre les comportements en traction de deux tresses biaxiales

Concernant la première zone, un plus grand angle de tressage implique une zone non-linéaire plus étendue. En conséquence, la transition géométrique des tresses biaxiales dotées d'un grand angle est plus longue comparativement à des tresses d'angles plus faibles. Dans la seconde zone, un plus grand angle de tressage implique une plus faible pente et une charge à rupture moins importante. Par ailleurs, un plus grand angle de tressage confère à la tresse une plus grande déformation à rupture.

L'évolution des angles de tressage, mesurée pendant les tests de traction grâce à une acquisition d'images et au logiciel d'analyse image J, introduit dans la partie protocole du chapitre 2, est superposée, sur la figure 6, au comportement en traction de deux tresses biaxiales. Ces évolutions montrent que durant les tests de traction, l'angle de tressage diminue, et spécifiquement dans la première zone non-linéaire. Ce phénomène montre que les multi-filaments s'alignent dans la direction de la charge appliquée et en conséquence, la rigidité de traction des tresses augmente. Dans la partie linéaire du comportement en traction, l'angle de tressage atteint une valeur minimale puis reste constant. Plus l'angle initial de tressage est grand, plus la diminution lors de l'essai est importante. Ce comportement des tresses est différent d'autres structures textiles comme les tissus. Effectivement, le comportement en cisaillement dans le plan de préformes tissées laisse apparaître un alignement quasi-complet des fils composant ce tissu. Les fils des tresses ne peuvent géométriquement pas être totalement alignés avec la direction de la charge appliquée. Cela implique que l'angle final reste différent de zéro.

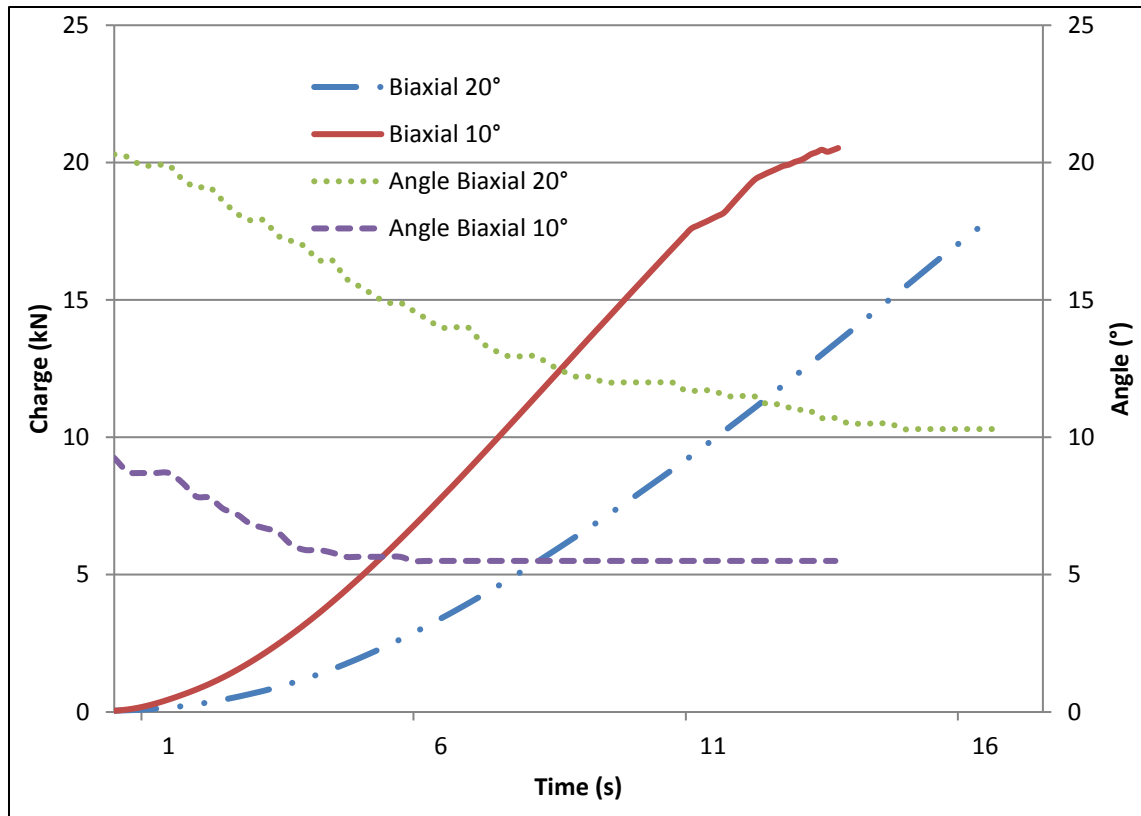


Figure 6: Evolution de l'angle de tressage durant le test de traction de tresses biaxiales

Après avoir présenté les mécanismes du comportement en traction de tresses biaxiales, sur les 3 paramètres (déformation à rupture, effort maximal et pente) caractérisant ce comportement, nous allons présenter les résultats obtenus sur l'ensemble des échantillons biaxiaux élaborés.

#### A. Déformation à la rupture

Les informations sur cette notion de déformation à la rupture sont issues des courbes de traction des échantillons.

La notion de déformation à la rupture représente la déformation de la structure tresse au moment où la charge maximale est la plus élevée. On reporte tableau 2, l'ensemble des valeurs expérimentales de ces déformations pour les tresses biaxiales en Spectra et en vectran. La dénomination des échantillons (colonne 1) est associée à celle introduite en chapitre 2.

Tableau 2: Tableau récapitulatif des déformations des tresses biaxiales

Dénomination des tresses	Angle de tressage (°)	Déformation (%)	Ecart type
Spectra_1_0_200_150	27	7,89	0.297
Spectra_1_0_200_70	25	7,36	0.285

Spectra_1_0_200_110	25	8,21	0.289
Spectra_1_0_300_70	18	5,44	0.301
Spectra_1_0_300_110	16	5,21	0.288
Spectra_1_0_300_150	14	5,39	0.285
Spectra_1_0_400_70	12	5,21	0.297
Spectra_1_0_400_110	11	5,25	0.296
Spectra_1_0_400_150	10	5,29	0.296
Vectran_1_0_200_150	27	7,89	0.301
Vectran_1_0_200_70	26	7,46	0.288
Vectran_1_0_200_110	26	7,65	0.299
Vectran_1_0_300_70	23	6,68	0.291
Vectran_1_0_300_110	21	5,76	0.293
Vectran_1_0_300_150	20	5,97	0.291
Vectran_1_0_400_70	19	5,27	0.295
Vectran_1_0_400_110	18	5,02	0.300
Vectran_1_0_400_150	16	4,81	0.298

Comme le montre la figure 7, cette valeur de déformation va dépendre de l'angle de tressage. Plus l'angle de tressage diminue, plus la valeur de la déformation à la rupture diminue. Cependant, cette valeur de déformation à la rupture reste supérieure à la déformation à la rupture d'un fil simple (cf Tableau 1), du fait de la sur-longueur de fil inhérente à l'angle de tressage. L'embuvage des fils va également rajouter une longueur à considérer dans la déformation à la rupture.

De ce tableau de valeur, on peut déduire une formule théorique de la déformation à rupture de ces tresses biaxiales, fonction de la longueur de l'échantillon de tresse (200 mm) testée et de l'angle initial de tressage,  $\alpha$ , (Equation 4.1):

$$Def_{rupture}(\%) = \frac{\frac{200}{\cos \alpha} - 200}{200} * 100 \quad (\text{Eq 4.1})$$

On reporte figure 8, l'ensemble des résultats expérimentaux de la figure 7 et les résultats issus de l'équation 4.1 Pour des mêmes paramètres procédés (vitesse de tirage, vitesse de rotation des roues à aubes), les deux matières, Spectra et Vectran, donnent des tresses d'angles différents. Comme précisé dans le chapitre 3, plus la vitesse de tirage est importante, plus l'angle est faible. On constate bien une diminution de la déformation à rupture lorsque l'angle diminue. Le modèle théorique tend à surestimer la valeur de déformation à rupture pour des angles élevés, et à sous-estimer cette valeur pour des angles plus faibles. Dans ce modèle est considéré l'angle de tressage initial, or à la rupture, comme expliqué précédemment à l'aide de la figure 6, l'angle a diminué. Cette évolution explique la différence entre le modèle et les résultats expérimentaux.



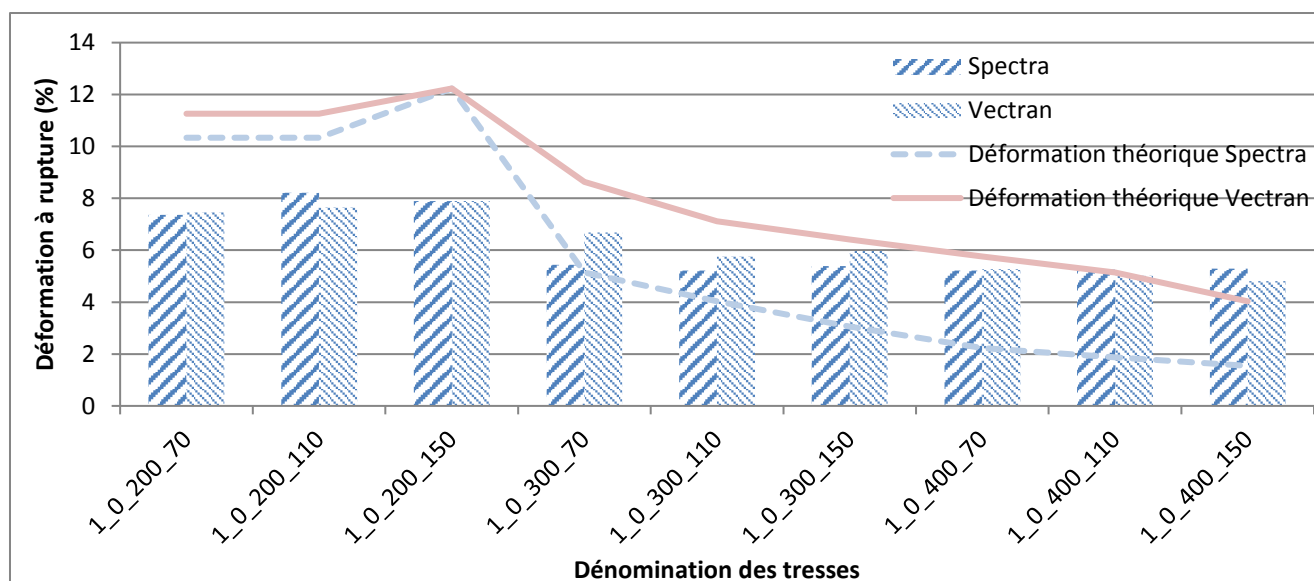


Figure 8 : Visualisation des déformations à la rupture des tresses biaxiales

**B. Force maximale**

On reporte Figure 9, l'ensemble des valeurs expérimentales relevées concernant les efforts à rupture pour les tresses biaxiales en Spectra et en Vectran. Le tableau 3, illustre graphiquement ces valeurs expérimentales.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des forces maximales tresses biaxiales

Dénomination des tresses	Angle de tressage (°)	Charge maximale(N)	Ecart type
Spectra_1_0_200_150	27	15938	2888
Spectra_1_0_200_70	25	16445	2905
Spectra_1_0_200_110	25	17590	2890
Spectra_1_0_300_70	18	18418	2750
Spectra_1_0_300_110	16	16655	2780
Spectra_1_0_300_150	14	17609	2785
Spectra_1_0_400_70	12	20087	2684
Spectra_1_0_400_110	11	19693	2701
Spectra_1_0_400_150	10	20529	2697
Vectran_1_0_200_150	27	12989	2874
Vectran_1_0_200_70	26	13167	2865
Vectran_1_0_200_110	26	12034	2847
Vectran_1_0_300_70	23	14773	2752
Vectran_1_0_300_110	21	16653	2761
Vectran_1_0_300_150	20	14467	2768
Vectran_1_0_400_70	19	20890	2697
Vectran_1_0_400_110	18	20426	2691
Vectran_1_0_400_150	16	19524	2695

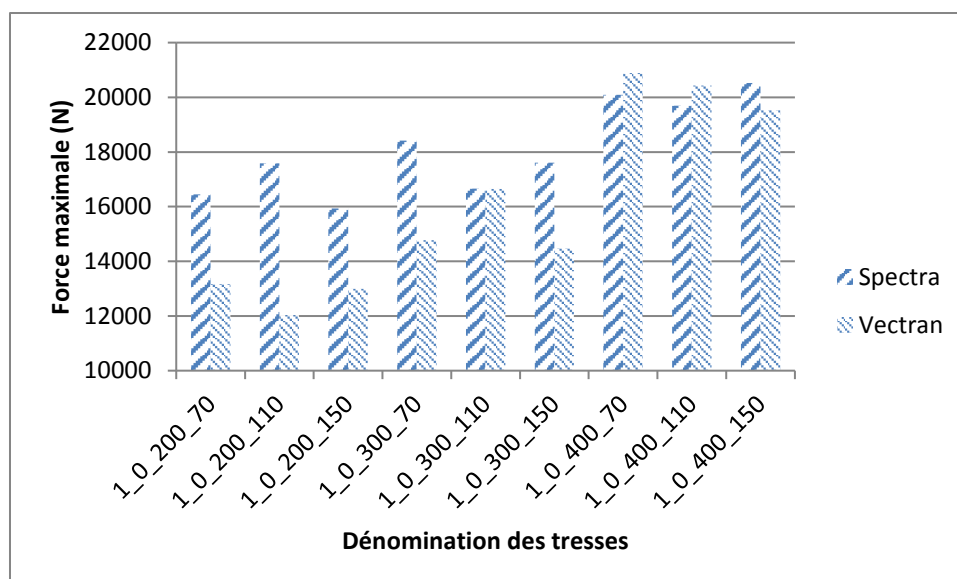


Figure 10 : Représentation des forces maximales des tresses biaxiales

Les forces maximales atteintes par les tresses biaxiales montrent une forte dépendance à l'angle de tressage quelle que soit la matière utilisée (Vectran ou Spectra). A l'inverse des déformations à la rupture, plus l'angle est petit plus l'effort maximal va croître, comme illustré à la figure 10.

Cette observation se retrouve aussi dans la littérature [5] où pour de grands angles de tressage, la charge maximale devient très faible.

### C. Pente

La force maximale et la déformation à la rupture, analysées précédemment, permettent d'introduire la pente de la courbe dans son domaine le plus linéaire possible (en gras sur la figure 6).

Pour toutes les tresses biaxiales qui ont été élaborées, les valeurs de ces pentes sont données sur le tableau 4, et représentées graphiquement sur la figure 12.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des pentes des tresses biaxiales

Dénomination des tresses	Angle de tressage (°)	Pente	Ecart type
Spectra_1_0_200_70	25	371342	7351
Spectra_1_0_200_110	25	371510	7125
Spectra_1_0_200_150	27	322554	7461
Spectra_1_0_300_70	18	420954	7613
Spectra_1_0_300_110	16	442600	7341
Spectra_1_0_300_150	14	410132	7468
Spectra_1_0_400_70	12	493690	7298
Spectra_1_0_400_110	11	493432	7513
Spectra_1_0_400_150	10	505971	7489
Vectran_1_0_200_70	26	306199	7354
Vectran_1_0_200_110	26	309395	7125
Vectran_1_0_200_150	27	288589	7641
Vectran_1_0_300_70	23	346183	7241

Vectran_1_0_300_110	21	388483	7256
Vectran_1_0_300_150	20	395948	7487
Vectran_1_0_400_70	19	561578	7101
Vectran_1_0_400_110	18	549409	7206
Vectran_1_0_400_150	16	591197	7258

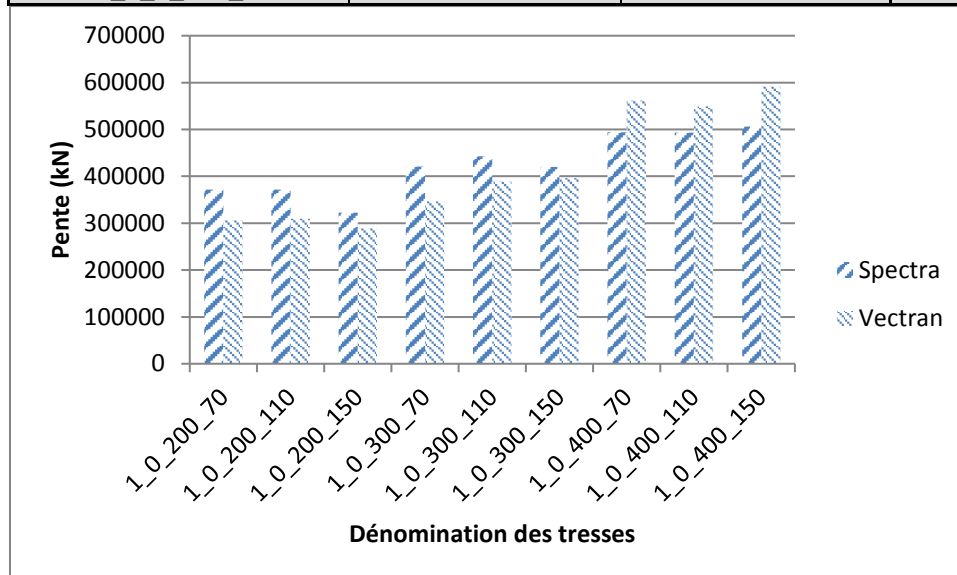


Figure 12 : Pente des tresses biaxiales

La figure 12 montre que l'équivalent de ce module, sous la forme de pente, décroît quand l'angle de tressage augmente. Ces résultats identifiés sur tresses sèches, confirment ceux obtenus et décrits dans plusieurs publications [7]–[12], pour des composites élaborés à base de renforts tressés. Dans ces travaux, à l'échelle de composites, il est montré la diminution du module dans le sens de production en fonction de l'augmentation de l'angle de tressage, et à l'inverse l'augmentation du module dans le sens transverse.

#### D. Conclusions intermédiaires sur les tresses biaxiales

Cette première série de résultats sur les tresses biaxiales testées a permis d'introduire les mécanismes relativement au comportement en traction. L'influence de l'angle de tressage sur les paramètres, introduits, (déformation à la rupture, charge maximale ou encore pente) a été mise en évidence. Grâce à la mesure de l'angle lors de l'essai, l'évolution de ce paramètre a pu être mise en évidence. Plus l'angle initial est petit, plus la pente et la charge maximale sont importantes. Un grand angle de tressage aura pour conséquence un temps de réponse de la tresse plus important à la sollicitation en traction, celle-ci n'intervenant que lorsque le réalignement des fils dans la direction de l'effort est opéré.

#### V. Comportement mécanique en traction des tresses triaxiales

Les échantillons produits de tresses triaxiales, en fonction du nombre de fils composant la tresse, permettent d'avoir une gamme angulaire plus large (de 10° à 73°) que celle des tresses biaxiales (10-27°). Dans le cadre de ces essais de traction, dans le sens de production, précisons que la sollicitation s'applique dans la direction des fils droits.

On reporte sur la figure 13, les courbes de comportements en traction de deux tresses triaxiales d'angles de tressage différents. Ces comportements peuvent être dissociés en plusieurs zones.

Comme pour les tresses biaxiales, on distingue une première partie non-linéaire, au cours de laquelle les tresses subissent une transition géométrique (phase d'alignement des fils de biais dans la direction de traction). Cette partie est suivie d'une zone linéaire où les propriétés des multi-filaments régissent le comportement en traction des tresses. La particularité de ce comportement se trouve après le pic de charge maximale. Pour un petit angle de tressage, tous les fils (de biais ou droits) sont rompus, à ce pic d'effort et la courbe décroît. Cependant, pour les tresses triaxiales présentant un plus grand angle de tressage, nous pouvons voir après ce pic, et à l'issue d'une première décharge, une seconde montée de l'effort. On introduit cette dénomination comme « double pic de charge ». Ce phénomène, n'existant pas pour les tresses biaxiales, est dû à la présence des fils droits de la tresse triaxiale. Un angle limite peut être également introduit. Cette valeur d'angle de tressage dissocierait les tresses dites à simple pic de charge des tresses à double pic. Cette notion sera discutée par la suite.

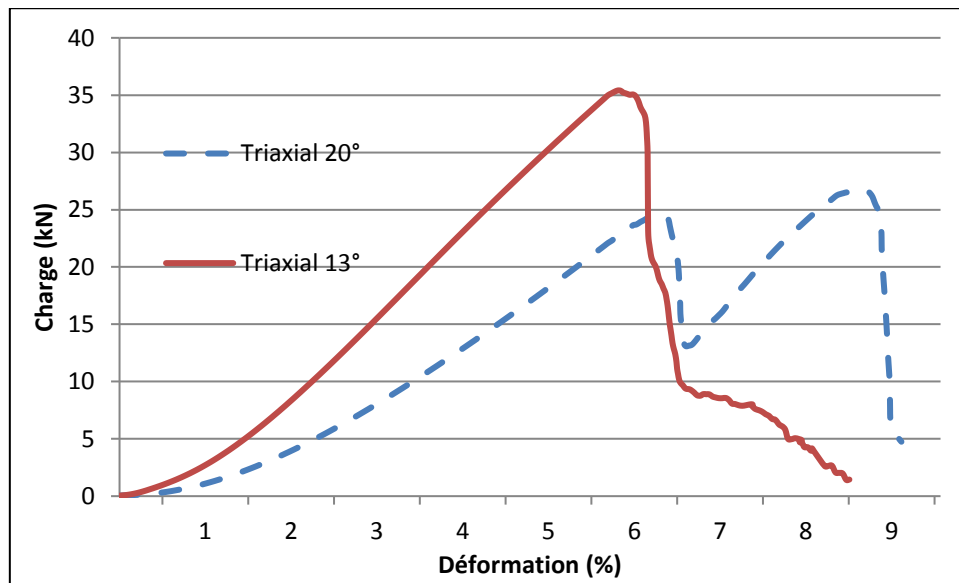


Figure 13 : Comparaison entre le comportement en traction de deux tresses triaxiales

#### A. Définition du double pic

Les fils droits dans la direction de chargement sont assujettis à la charge appliquée dans leur direction ; les fils de biais, après la transition géométrique (phase d'alignement), contribuent à la rigidité des tresses (zone linéaire). Le premier pic de charge est associé au point de rupture des fils droits, qui provoque par conséquent la première chute de la charge. Dans un second temps la force augmente à nouveau de la même manière qu'une tresse biaxiale simple, en raison des fils de biais qui, s'ils ne sont pas rompus, gardent une bonne résistance mécanique. Ce comportement singulier a été décrit dans le cas de renforts NCF soumis à des tests de traction à 45°, avec une première zone associée au comportement en traction de la structure jusqu'à ce que les fils de couture (stitching) cassent. Cette partie était suivie par un second pic associé à un cisaillement pur des couches de NCF [32].

Le comportement en traction des tresses triaxiales peut donc être résumé par une première partie non-linéaire, suivie par une zone linéaire, dans laquelle est calculée le module de traction de la tresse (en termes de pente) jusqu'au premier pic produit par la rupture des fils droits. En fonction de l'angle de tressage initial, un second comportement peut être considéré et caractérisé par une seconde zone linéaire jusqu'à un point de rupture.

De manière similaire aux tresses biaxiales (figure 6), l'évolution de l'angle lors de l'essai de traction a pu être mesurée. On reporte figure 14 cette évolution, superposée à la courbe de comportement d'une tresse triaxiale, dite à double pic, comme défini précédemment.

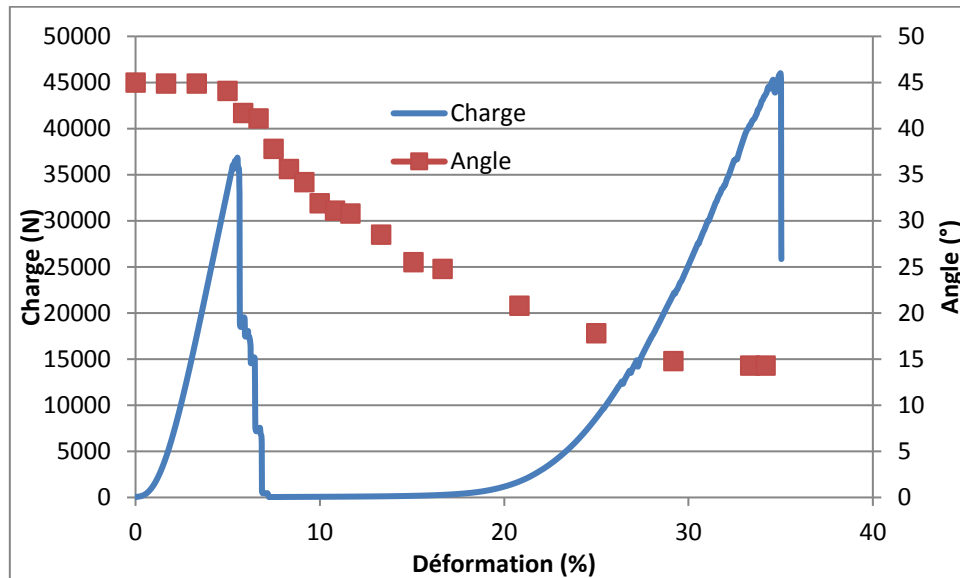


Figure 14: Evolution de l'angle de tressage pendant un test de traction d'une tresse triaxiale (angle 45° configuration 3-2)

Cette courbe montre une très faible décroissance de l'angle de tressage jusqu'à la fin du premier pic de charge. Comparativement aux tresses biaxiales dont l'angle commence à évoluer dès le début du test de traction, pour les tresses triaxiales, cette évolution débute seulement après la rupture des fils droits. Ce constat montre, que dans cette première zone, les fils droits restreignent le mouvement des fils de biais. Une deuxième zone d'évolution de l'angle est comprise entre la fin du premier pic et le début du deuxième pic, où l'angle de tressage décroît de manière conséquente. La rupture des fils droits permettant cette évolution de l'angle entre les fils de biais. Une troisième zone est atteinte au début du second pic de charge avec une stabilisation de l'angle de tressage vers une valeur angulaire constante. Comparativement aux tresses biaxiales, l'évolution de l'angle de tressage montre également une valeur asymptotique. Après la rupture des fils axiaux, nous avons une grande variation de cet angle de tressage et par conséquent une grande influence sur la réorganisation des fils de biais.

Toutefois, les fils axiaux rompus après le premier pic restent dans la structure de tresse et viennent influencer la réorganisation des fils de biais. C'est pour cela que l'angle de tressage à rupture atteint une valeur minimale non-nulle (souvent autour de 10-15°, selon les tresses considérées).

Après avoir vu comment il est possible de dissocier les tresses en fonction de leur comportement en traction (simple ou double pic), il est nécessaire d'investiguer sur les angles de tressage qui caractérisent ces tresses, et notamment sur l'angle limite de tressage, introduit précédemment, qui les distinguerait.

### B. Définition de l'angle de tressage limite

L'angle de tressage limite est appelé ainsi car il va différencier les deux types de tresses triaxiales, celles qui font un double pic et celles qui ne font qu'un simple pic lors du test de traction uniaxiale.

Si  $L_0$  représente la longueur initiale d'un fil,  $Def(t)$  la déformation à l'instant  $t$  de ce même fil et  $\alpha$  l'angle initial (de tressage) de ce fil par rapport à la direction de la production, ce fil a une longueur à tout moment de la traction égale à :

$$L(t) = \frac{L_0}{\cos \alpha} + Def(t) \cdot L_0 \quad (\text{Eq 4.2})$$

Donc, les caractéristiques du fil utilisé pour produire la tresse (notamment sa déformation à la rupture, notée  $All_{rupture}$ ) suffisent pour connaître la longueur à laquelle chaque fil de la tresse va rompre.

On considère, comme introduit dans la présentation des structures triaxiales, qu'une tresse triaxiale est une superposition de fils droits et de deux nappes de fils de biais (une à  $+\alpha$ , l'autre à  $-\alpha$ ). L'angle de tressage implique pour les fils composant ces nappes de biais, une longueur de base plus importante que celle des fils droits.

L'angle limite sera l'angle à partir duquel les deux phénomènes de rupture (rupture des fils droits et rupture des fils de biais) sont dissociés. Cet angle limite est en fait défini par la « sur-longueur » qu'apporte l'angle de tressage aux fils de biais par rapport aux fils droits. Et pour avoir une apparition du double pic, il faut que dans une tresse triaxiale la longueur du fil de biais considéré soit supérieure à somme de la longueur initiale d'un fil droit et de l'allongement à la rupture que ce fil droit va subir lors du test de traction. De fait, il faut que la condition suivante soit respectée :

$$\frac{L_0}{\cos \alpha} > L_0 + \frac{L_0 \cdot All_{rupture}}{L_0} \quad (\text{Eq 4.3})$$

Soit :

$$\frac{L_0}{\cos \alpha} > L_0 + All_{rupture} \quad (\text{Eq 4.4})$$

De cela, l'angle limite est défini comme l'angle à partir duquel un double pic va se former. Cet angle peut être défini en fonction de la déformation à la rupture du fil utilisé et de la longueur initiale de l'échantillon considéré. Cet angle critique peut être calculé de la façon suivante à partir de la formule (4) :

$$\alpha_{limite} = \cos^{-1} \left( \frac{1}{1 + \frac{All_{rupture}}{L_0}} \right) \quad (\text{Eq 4.5})$$

Où,

$All_{rupture}$  définit la déformation à la rupture du filament utilisé (en %), et  $L_0$  définit la longueur utile de la tresse testée (en mm), soit la longueur d'un fil droit dans la tresse.

Les valeurs utilisées pour calculer les angles limites représentées sur la figure 15 proviennent des premiers lots de matières reçus. Ces derniers présentaient un allongement à la rupture de 7-8%.

La figure 15 permet de visualiser les angles limites des deux matières considérées (Vectran et Spectra) et issus de la formule 4.5. (nommés « limit angle Vectran » et « limit angle Spectra »). Ces valeurs viennent dissocier la limite d'angle entre les tresses triaxiales ne faisant qu'un seul pic de celles en faisant deux. A ces droites sont superposés les angles de tressage mesurés de tresses triaxiales élaborées en vectran et Spectra pour différents paramètres de production mais également avec des nombres différents de fils en section.

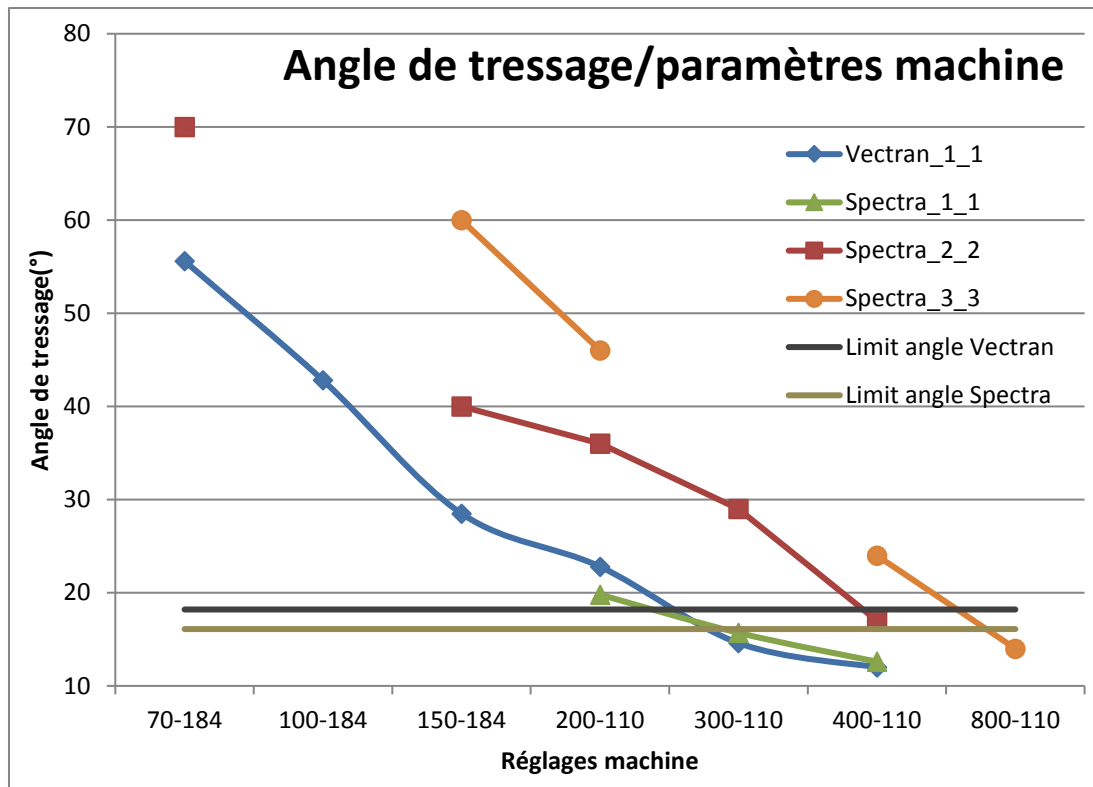


Figure 15: Délimitation de l'angle limite

Pour valider cette définition théorique de l'angle limite de tressage, l'allure des courbes de traction des tresses s'approchant de ces angles limite est investiguée. On reporte ainsi sur la figure 16 les courbes de comportement mécanique des tresses triaxiales en Vectran et Spectra 200-110 et 300-110 (en configuration 1\_1 : 96 fils de biais et 48 fils droits). Conformément à la figure 15 (courbes en vert et en bleu) ces deux vitesses de tirage distinguent la valeur de l'angle limite. On constate, sur ces courbes de comportement, figure 16, que cette limite d'angle permet bien de dissocier les tresses qui font un double pic de celles à simple pic.

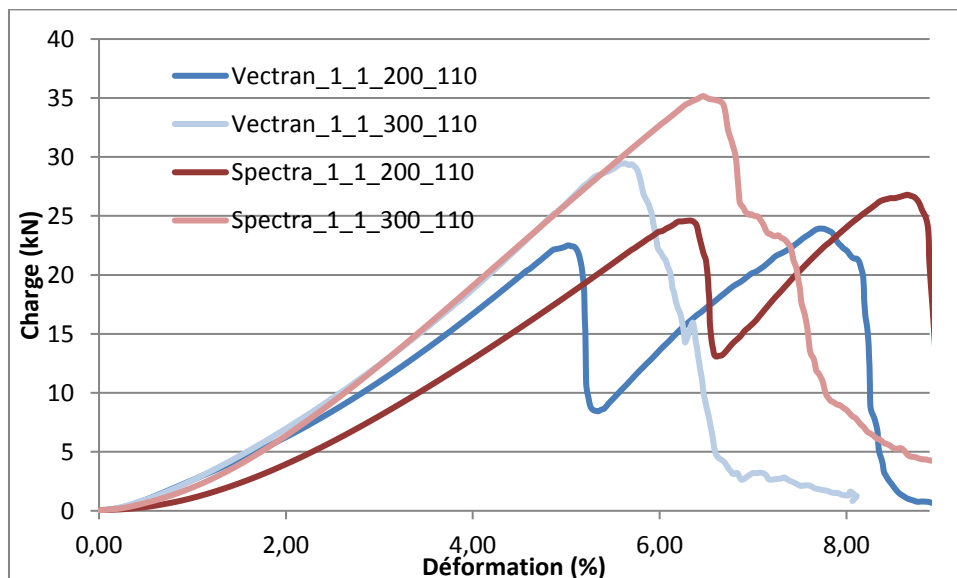


Figure 16: Courbes de traction des tresses proches de l'angle limite

De fait, dans la partie suivante, une proposition de classement des tresses en fonction de ce critère est proposée.

### C. Classement des tresses triaxiales suivant leur comportement mécanique

La dissociation en 2 groupes, en fonction de l'angle tressage, des tresses triaxiales peut-être raffinée dans une démarche de classification.

L'ensemble des tresses produites peut être séparé en trois groupes, représentés sur la figure 17 :

- Les tresses ne formant qu'un simple pic (tresses de type 1),
- Les tresses formant un double pic mais dont la charge après rupture des fils droits n'atteint pas zéro avant le second pic de charge (tresses de type 2),
- Les tresses formant un double pic où la charge atteint zéro après la rupture des fils droits (tresses de type 3).

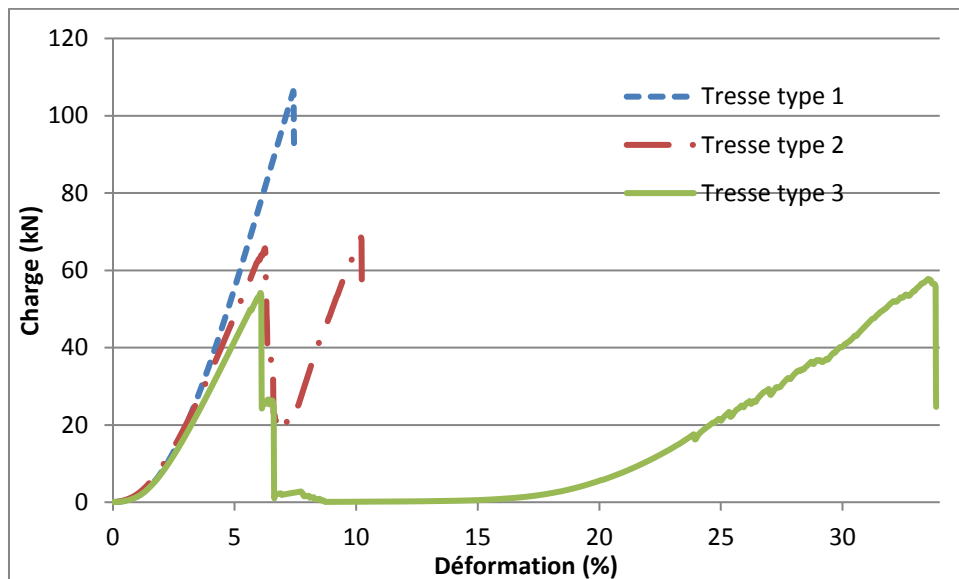


Figure 17: Distinction des 3 types de tresses

Concernant le type 1, la présence d'un pic de charge unique montre que la rupture de tous les fils se fait au même moment. La gamme d'angle concernée est celle des angles inférieurs à  $16^\circ$

Pour le type 3, qui peut être considéré comme le plus simple à appréhender, au sens, où le premier pic est clairement dissocié du second. Dans le premier pic de ces tresses, le module et la force maximale vont dépendre essentiellement des fils droits. Le second pic dépendra lui essentiellement des fils de biais. La gamme d'angle concernée est celle des angles supérieurs à  $28^\circ$

Le type 2 de tresses est le plus compliqué à expliquer. La présence d'un double pic montre que la rupture des fils droits et de biais ne survient pas au même moment. Le fait que la charge après le premier pic n'atteint pas un effort nul, montre que le premier pic n'est pas seulement dû aux fils droits, mais qu'une influence des fils de biais sur ce pic est effective. Ce type de tresse nommé type 2 est donc un type de tresse intermédiaire aux types 1 et 3. Ce type 2 se retrouve pour des tresses triaxiales dont l'angle de tressage est compris dans une gamme entre  $20^\circ$  à  $25^\circ$ .



#### D. Evolution angulaire lors de l'essai de traction et notion d'angle de blocage

Durant un test en traction uniaxiale, la tresse triaxiale va être soumise à un effort qui va avoir tendance à aligner les fils. De fait, l'angle de tressage va être modifié au cours du test. Associée à la mesure effectuée au cours de l'essai, et introduit figure 14, l'objectif dans cette partie relève du suivi et de la mesure de cet angle de tressage et notamment à des moments spécifiques de l'essai (1<sup>er</sup> pic, 2<sup>nd</sup> pic).

Le suivi des angles de tressage durant les tests de traction permet de déterminer valeurs angulaires atteintes à des moments clefs du comportement en traction de la tresse :

- A l'instant zéro, où l'angle initial se mesure,
- Au moment du premier pic, et,
- Au moment de la rupture finale de la tresse.

Dans le cadre des tresses triaxiales de Spectra, on reporte sur les Figures 18 à 20 les angles mesurés, à ces trois instants, en fonction des paramètres de tressage (vitesse de tirage, vitesse de rotation des roues à aubes) mais également du nombre de fils en section. La dénomination reprend celle introduite dans la présentation des échantillons au chapitre 2. (1\_1 : 48 fils droits, 96 fils de biais ; 2\_2 : 96 fils droits, 192 fils de biais ; 3\_3 : 144 fils droits, 288 fils de biais).

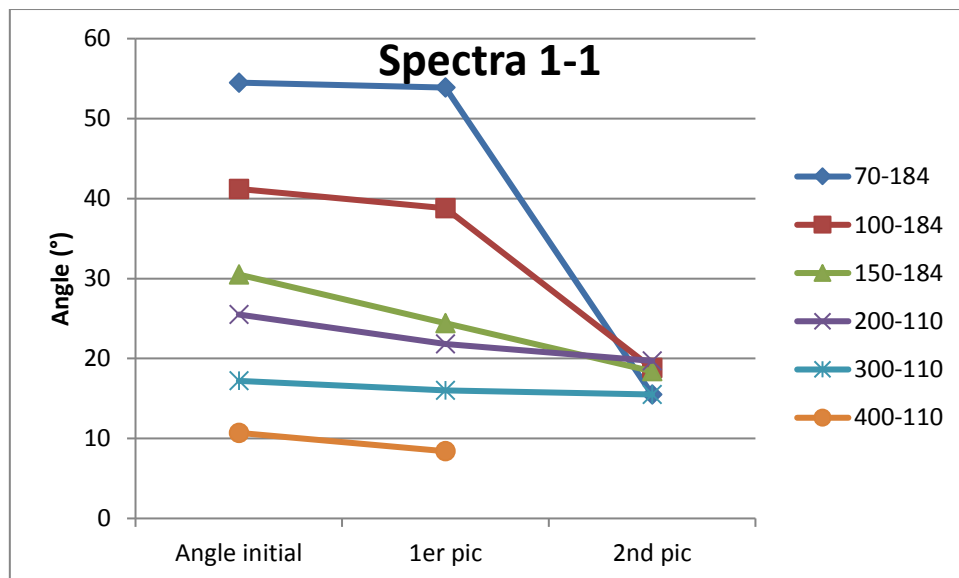


Figure 18: Angles au cours du test de traction pour les échantillons Spectra 1-1

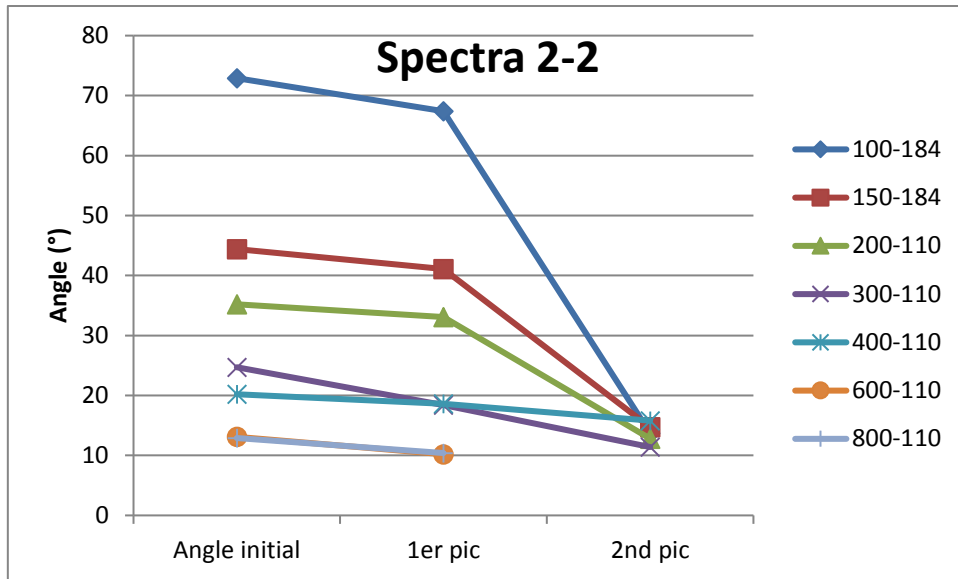


Figure 19: Angles au cours du test de traction pour les échantillons Spectra 2-2

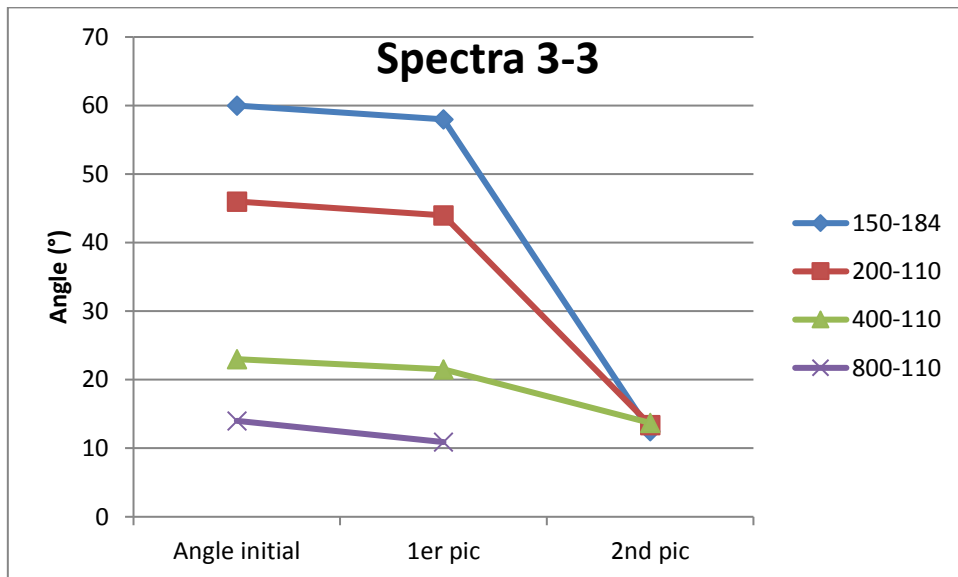


Figure 20: Angles au cours du test de traction pour les échantillons Spectra 3-3

Des figures 18-20, on peut tirer les enseignements suivants :

Pour les tresses de type 1 (à simple pic : Spectra 1\_1 : 400\_110 ; Spectra 2\_2 : 600\_110 et 800\_110 ; Spectra 3\_3 : 800\_110) la diminution de l'angle entre l'état initial et le 1<sup>er</sup> pic est faible (inférieure à 5°). Pour les tresses de type 2 (d'angle initial compris entre 18-25°, incluant la Spectra 1\_1\_150\_184), la diminution de l'angle est quasi-linéaire entre l'angle de tressage initial et l'angle au 2<sup>nd</sup> pic. Enfin pour les tresses de type 3 (de grands angles), une évolution de l'angle en deux phases : une diminution très faible jusqu'au 1<sup>er</sup> pic, suivie d'une réduction importante entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>nd</sup> pic.

Par ailleurs, pour cette matière, quel que soit l'angle initial, et en fonction du nombre de fils en section, les tresses convergent vers la même valeur (asymptotique) d'angle final. Ce dernier correspond à un angle de blocage, à partir duquel les fils de biais ne peuvent plus se réaligner.

Par comparaison avec l'étude du comportement des tresses biaxiales, on avait constaté que celles-ci semblaient également atteindre un angle minimal, à l'issue du test de traction de l'ordre de 10°, plus

faible que pour les tresses triaxiales. Cela est dû aux fils droits présents dans les tresses triaxiales qui ne laissent pas aux fils de biais toute leur liberté à se réaligner (figure 21).

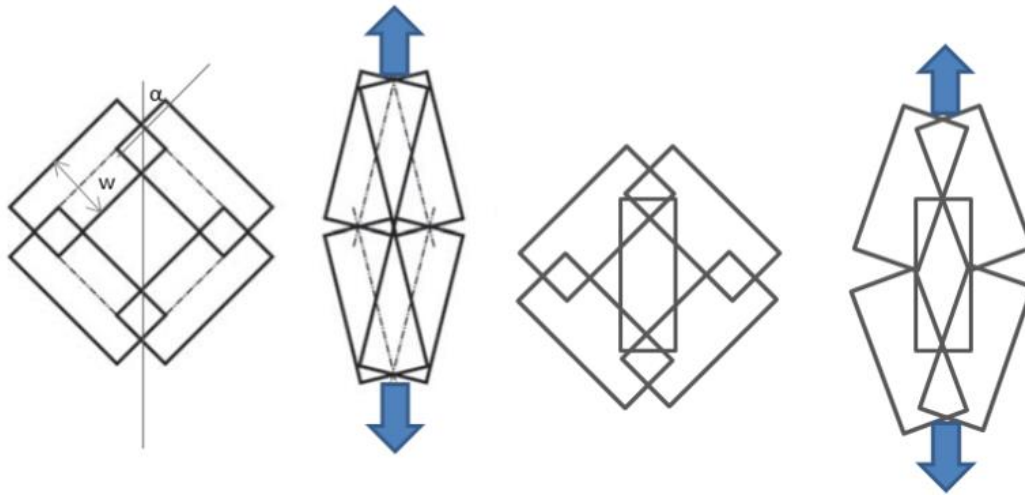


Figure 21 : Etat d'une cellule unitaire a)biaxiale ; b)triaxiale, état bloqué sous tension uniaxiale

L'angle de tressage évolue au cours du test de traction jusqu'à atteindre un minimum (figures 18-20). La figure 21 montre une cellule unitaire à un état non-déformé, puis soumise à une tension uniaxiale, jusqu'à atteindre un angle minimum. Ce minimum correspond physiquement à un état de la tresse où les fils de biais ne peuvent plus se réorganiser. L'angle à ce moment-là atteint la valeur asymptotique mise en évidence sur les figures 18-20. On désigne, par analogie avec le comportement en cisaillement des renforts tissés, cet angle par angle de blocage ( $\gamma$ ).

Dans le cadre des tresses biaxiales, Kyosev [13] a établi une formule permettant, analytiquement, d'estimer cet angle de blocage et donné dans la formule (Eq 4.6) :

$$\gamma = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left( \frac{2 * N_{bobineau} * (w+d) * \sin \alpha}{\pi * D_0} \right) \quad (\text{Eq 4.6})$$

Où  $N_{bobineau}$  correspond à la moitié du nombre de bobineaux,  $w$  à la largeur du fil utilisé,  $d$  l'épaisseur du fil,  $\alpha$  l'angle initial de tressage et  $D_0$  le diamètre de la tresse.

A l'aide des résultats de caractérisation issus du chapitre 3 concernant les dimensions des sections des fils composant la tresse, du diamètre des tresses considérées, et de l'angle de tressage initial de ces tresses, on reporte figure 22, les valeurs de l'angle de blocage théorique issues de la formule 4.6 que l'on compare aux valeurs expérimentalement mesurées pour les tresses triaxiales en Spectra.

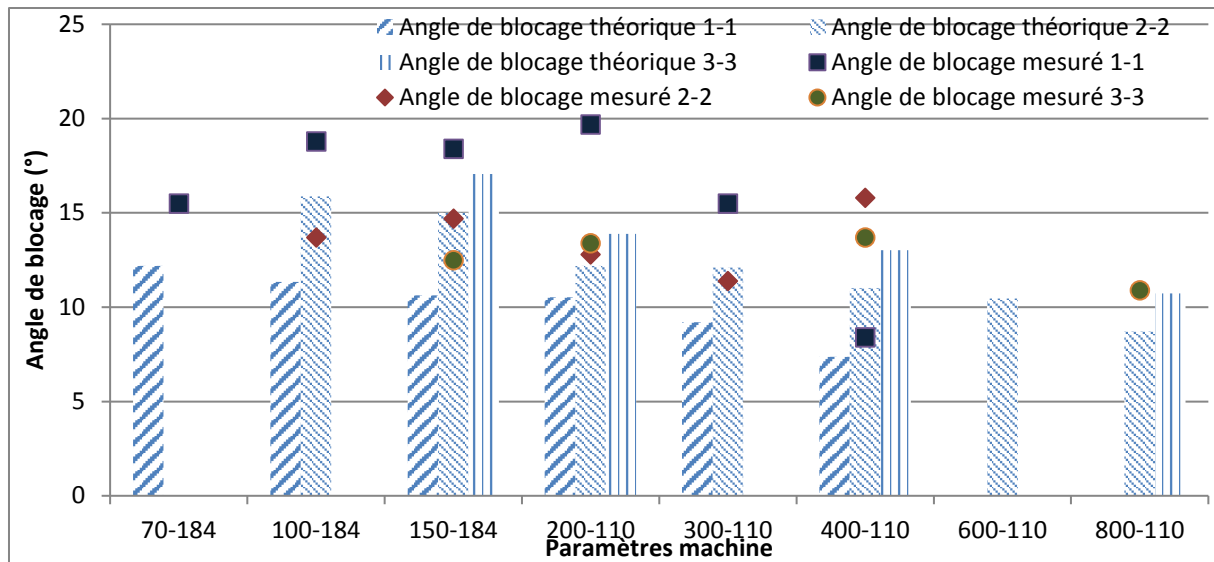


Figure 22: Angles de blocage théorique

De manière générale on constate que les angles de blocage donnés par la formule théorique sous-estiment les valeurs expérimentales, mais permettent un premier encadrement. Ces écarts proviennent d'une part de l'imprécision des mesures des sections des fils dans la tresse. Par ailleurs dans la formule théorique l'effet de la présence des fils droits qui modifie la réorganisation de l'angle n'est pas prise en compte.

Cela va avoir une influence certaine sur les déformations à la rupture des tresses triaxiales, comme cela va être détaillé maintenant.

### E. Déformation

La déformation à la rupture d'une tresse triaxiale va à l'instar des tresses biaxiales dépendre des propriétés en déformation du fil et de la géométrie de la tresse. Bien que dans le cas des tresses triaxiales, la présence de deux types de fils (droits ou de biais) complique un peu l'analyse du phénomène.

La déformation des tresses triaxiales, au contraire des tresses biaxiales, est plus complexe à appréhender. Effectivement, certaines tresses triaxiales font un double pic. Et la présence des fils droits dans la structure, même après leur rupture effective, ne permet pas de considérer après le premier pic la tresse résultante comme étant une tresse biaxiale.

Dans l'étude des tresses biaxiales, un modèle analytique de déformation à rupture, fonction de la longueur de l'échantillon tresse et de l'angle de tressage a été proposé (Eq. 4.1), que l'on rappelle dans l'équation 4.7 :

$$Def_{rupture}(\%) = \frac{\frac{200}{\cos \alpha} - 200}{200} * 100 \quad (\text{Eq 4.7})$$

Où,  $\alpha$  est l'angle de tressage initial, et 200 la longueur en mm de l'échantillon de tresse.

On reporte, dans les figures 23-25, pour les tresses triaxiales de Spectra, avec différents nombres de fils en section (1\_1 ; 2\_2 ; 3\_3), et de différents angles de tressage, les valeurs mesurées de déformation à rupture lors des essais de traction et celles données par la formule théorique (4.7).

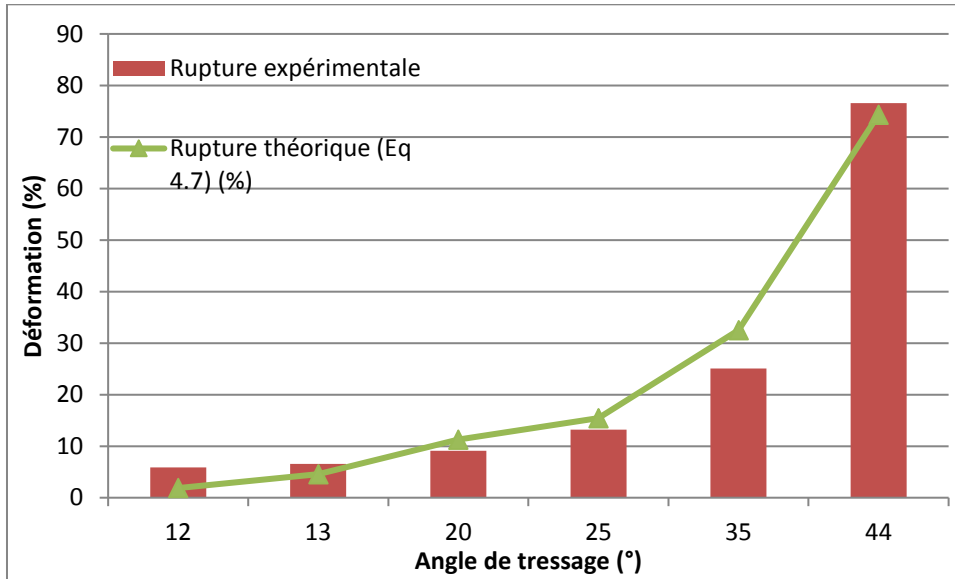


Figure 23: Déformation théorique et mesurée des tresses Spectra 1-1

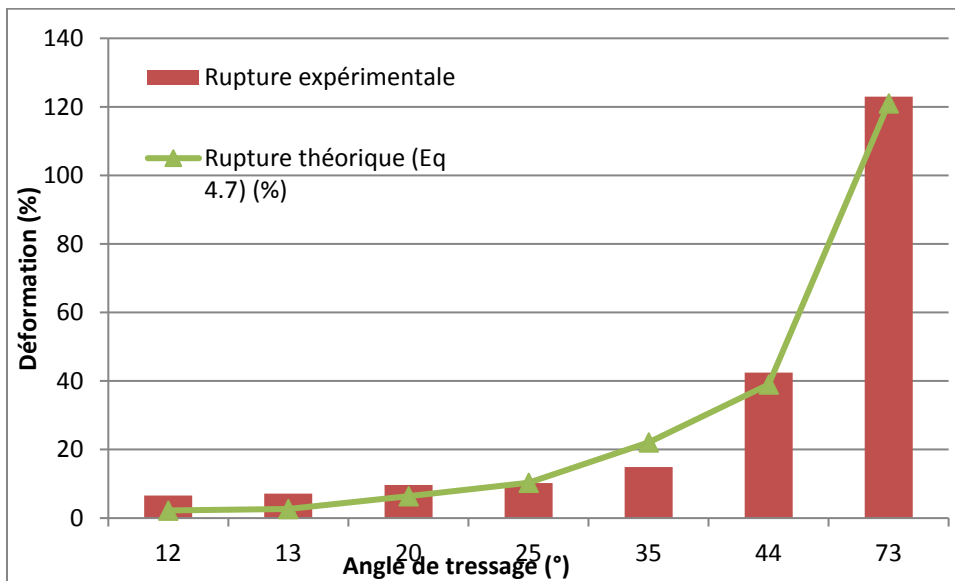


Figure 24: Déformation théorique et mesurée des tresses Spectra 2-2

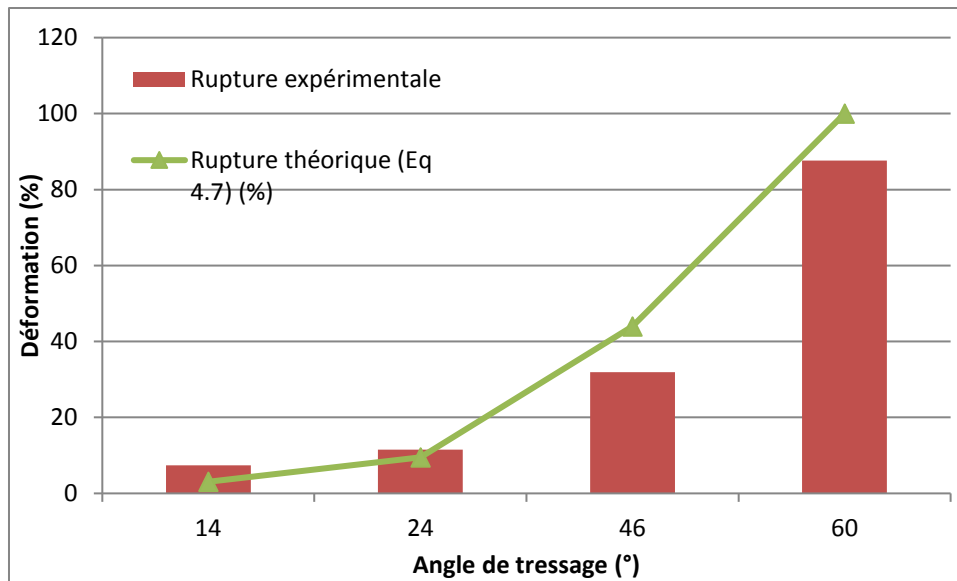


Figure 25: Déformation théorique et mesurée des tresses Spectra 3-3

Des figures 23-25, on peut tirer les enseignements suivants :

Pour les tresses de type 1 (d'angles petits) pour lesquelles la rupture est atteinte au premier pic, la valeur de déformation à rupture reste relativement identique quel que soit le type de tresse considéré. Dans cette configuration, lors de la rupture des fils droits, les fils de biais n'ont pas atteint l'angle de blocage ( $\gamma$ ) et donc n'ont aucune influence sur le moment de la rupture des fils droits. Par ailleurs plus l'angle de tressage est grand (tresse de type 3) plus la déformation à rupture est importante. Cela est dû à la sur-longueur de fil induite dans la tresse par l'angle de tressage.

La déformation à la rupture théorique est presque toujours supérieure aux valeurs expérimentalement mesurées. Cela s'explique par le fait que l'embuvage n'est pas pris en compte dans ce modèle théorique.

Associée à cette analyse sur la déformation à rupture, la déformation à laquelle débute le second pic peut être également approchée analytiquement.

En considérant que l'angle de blocage, introduit précédemment, est l'angle minimal atteint par la tresse à la déformation à rupture, les fils de biais n'ont plus qu'une longueur utile égale à :

$$L_{\text{utile}} = \frac{200}{\cos(\alpha - \gamma)} \quad (\text{Eq 4.8})$$

Où  $\alpha$  est l'angle de tressage initial et  $\gamma$ , l'angle de blocage de la tresse considérée.

Le début du second pic, qui correspond à la réponse de la tresse lorsqu'aucune réorganisation structurelle ne reste possible, intervient à une déformation en pourcentage défini par la formule (Eq 4.9).

$$Def_{\text{début 2nd pic}} = \frac{\frac{200}{\cos(\alpha - \gamma)} - 200}{200} * 100 \quad (\text{Eq 4.9})$$

Ce résultat va notamment servir pour la partie rétro-conception où un modèle théorique de tresse sera proposé.

F. Effort maximal

La force maximale est mesurée au niveau du point culminant de la courbe de traction, et ce pour chaque pic. On reporte, dans les figures 26-28, pour les tresses triaxiales de Spectra, avec différents nombres de fils en section (1\_1 ; 2\_2 ; 3\_3), et différents angles de tressage, les valeurs obtenues expérimentalement.

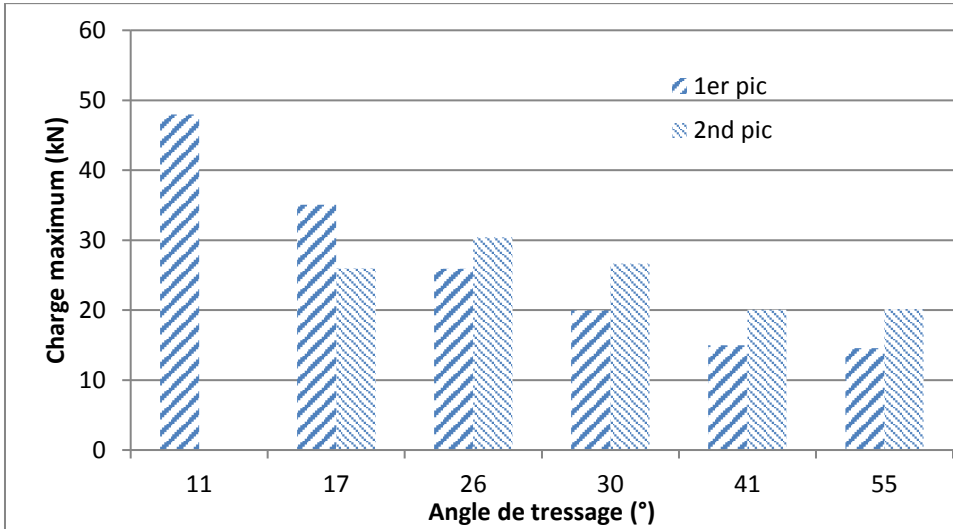


Figure 26: Force maximale théorique et mesurée sur Spectra 1-1

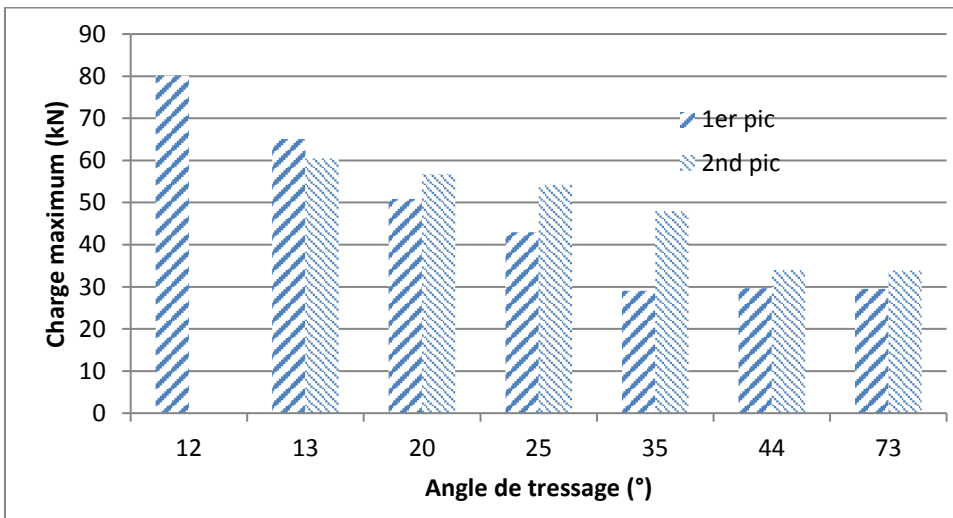


Figure 27: Force maximale théorique et mesurée sur Spectra 2-2

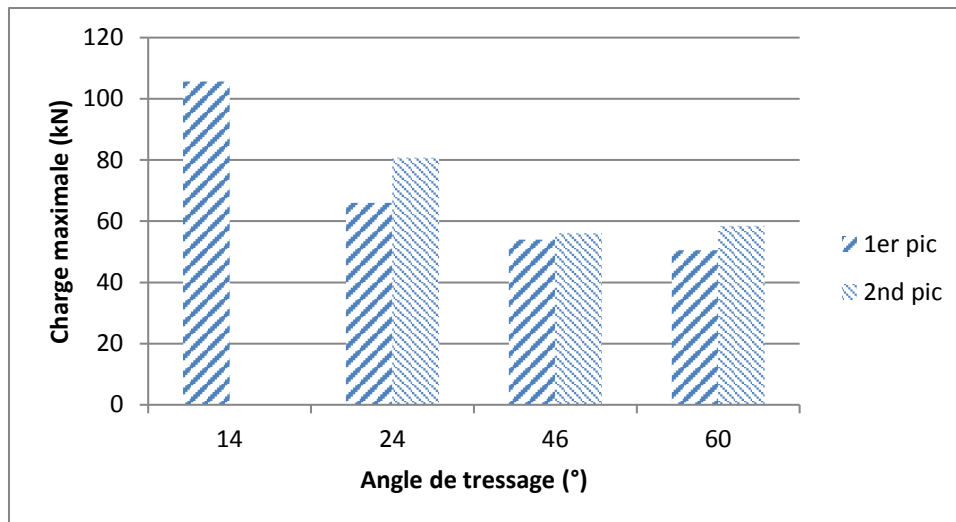


Figure 28: Force maximale théorique et mesurée sur Spectra 3-3

Comme énoncé dans les mécanismes, plus l'angle est grand, plus l'effort maximal admissible par la tresse diminue tout en convergeant vers une valeur asymptotique. Ce palier concerne tout autant l'effort au premier qu'au second pic. Par contre plus le nombre de fils en section est important plus l'effort maximal, à chaque pic, est élevé. De manière plus précise en comparant les tresses 1-1, 2-2 et 3-3, à angle de tressage similaire, le rapport des forces maximales est dans un rapport du nombre de fils dans la tresse.

Pour les tresse de type 3 (grands angles) les résultats semblent montrer un effort au 2<sup>nd</sup> pic supérieur à celui du 1<sup>er</sup> pic. Ce comportement est inverse à celui des tresses de type 2, où l'effort au 1<sup>er</sup> pic est quantitativement plus élevé que celui au 2<sup>nd</sup> pic.

### G. Pente

La pente correspond à la partie la plus linéaire des courbes de traction. On reporte, dans les figures 29-31, pour les tresses triaxiales de Spectra, avec différents nombres de fils en section (1\_1 ; 2\_2 ; 3\_3), et différents angles de tressage, les valeurs mesurées expérimentalement, pour les deux pics. Les évolutions de ces valeurs, en fonction des angles de tressage, suivent la même tendance que celle constatée pour les efforts. On peut ainsi constater une diminution de la valeur de ces pentes avec une augmentation de l'angle. Par contre autant la pente du premier pic semble converger vers une valeur asymptotique, autant la pente du 2<sup>nd</sup> pic continue à décroître avec l'augmentation de l'angle. Hormis pour les tresses de type 2 où les pentes des 2 pics semblent du même ordre, pour les tresses de type 3 (de grands angles) les pentes du 1<sup>er</sup> pic sont toujours plus élevées que celles du 2<sup>nd</sup> pic.

En fonction du nombre de fils considérés on peut constater une certaine proportionnalité des valeurs de pentes relativement au nombre de fils, notamment droits, présents dans les tresses. Ainsi à angle de tressage équivalent, les tresses 2-2 ont une pente proche du double par rapport aux tresses 1-1, et les tresses 3-3 ont des pentes proches d'un rapport 3 comparativement aux tresses 1-1.



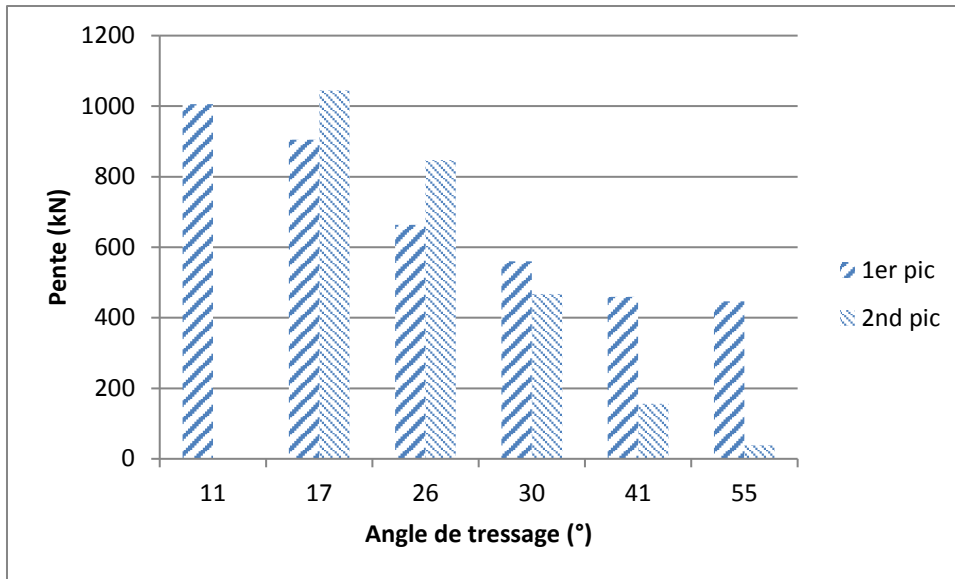


Figure 29: Pente théorique et mesurée sur Spectra 1-1

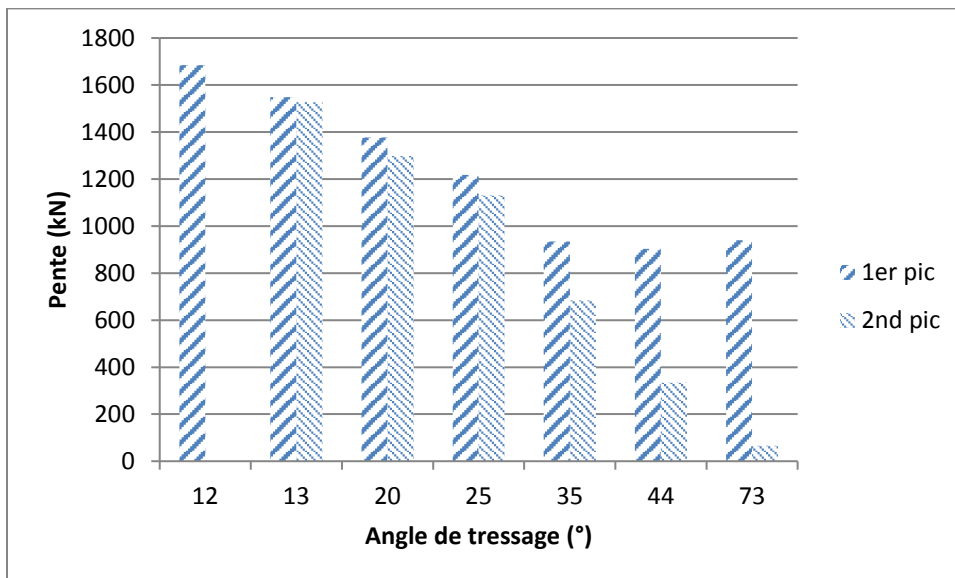


Figure 30: Pente théorique et mesurée sur Spectra 2-2

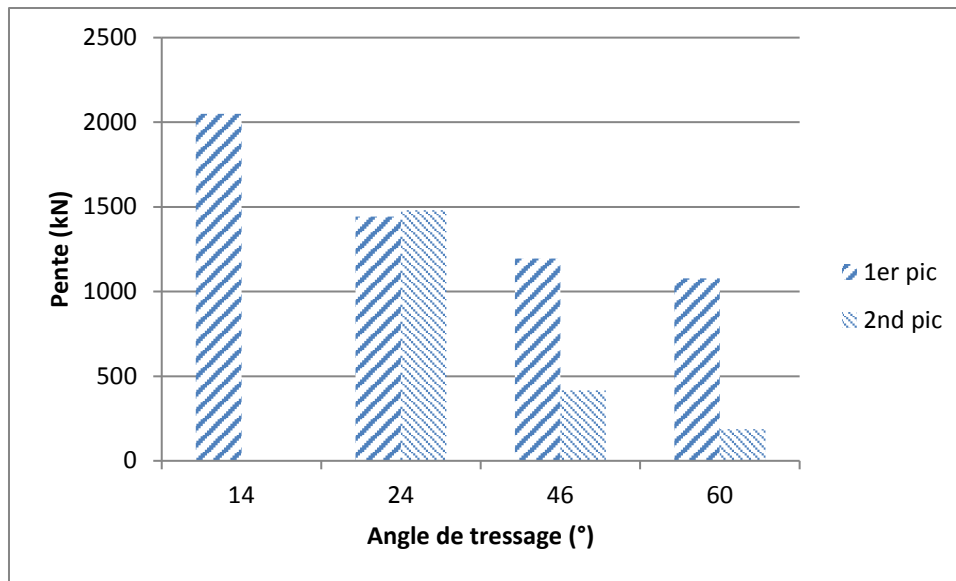


Figure 31: Module théorique et mesuré sur Spectra 3-3

## VI. Modélisation du comportement en traction

L'exploitation des résultats expérimentaux a montré que le comportement en traction des tresses (biaxiales ou triaxiales) peut être divisé en plusieurs zones dont les mécanismes ont été analysés. L'objectif de ce paragraphe est de définir un modèle permettant de prédire les paramètres, introduits précédemment, qui caractérisent ce comportement en traction (Pente, effort maximal, déformation à rupture), en fonction des paramètres d'entrées (caractéristiques du fil) et des propriétés de la tresse (angle de tressage).

Dans une première partie nous nous concentrerons sur le premier pic de tresses triaxiales, caractérisé par la pente dans la zone linéaire et l'effort maximal. Pour ce faire nous allons dissocier le rôle de chacun des fils (droits et de biais) constituant la tresse

### A. Modélisation du comportement des fils droits

A l'échelle des fils, le tableau 1 récapitule les propriétés en traction des matières considérées, caractérisées par un effort maximal à rupture, la pente de la zone linéaire et une valeur de déformation à rupture.

Si deux fils de même nature sont accolés, en tant que fils droits, et assujettis à ce même test de traction uniaxiale, la déformation à rupture reste la même, par contre la charge maximale atteinte doit doubler, ainsi que la pente de l'ensemble. Cette proportionnalité va dépendre du nombre de fils considérés.

Pour les tresses 1-1 (144 fils), 2-2 (288 fils) et 3-3 (432 fils), dont les fils droits sont respectivement au nombre de 48, 96 et 144, on représente (en pointillés) sur la figure 32 leurs courbes dites théoriques de traction qui correspondrait à celle d'un fil unitaire dont la charge est multipliée par le nombre de fils considérés. A ces courbes, on superpose (en trait plein) celle du fil unitaire, associée à son échelle (à droite du graphe).

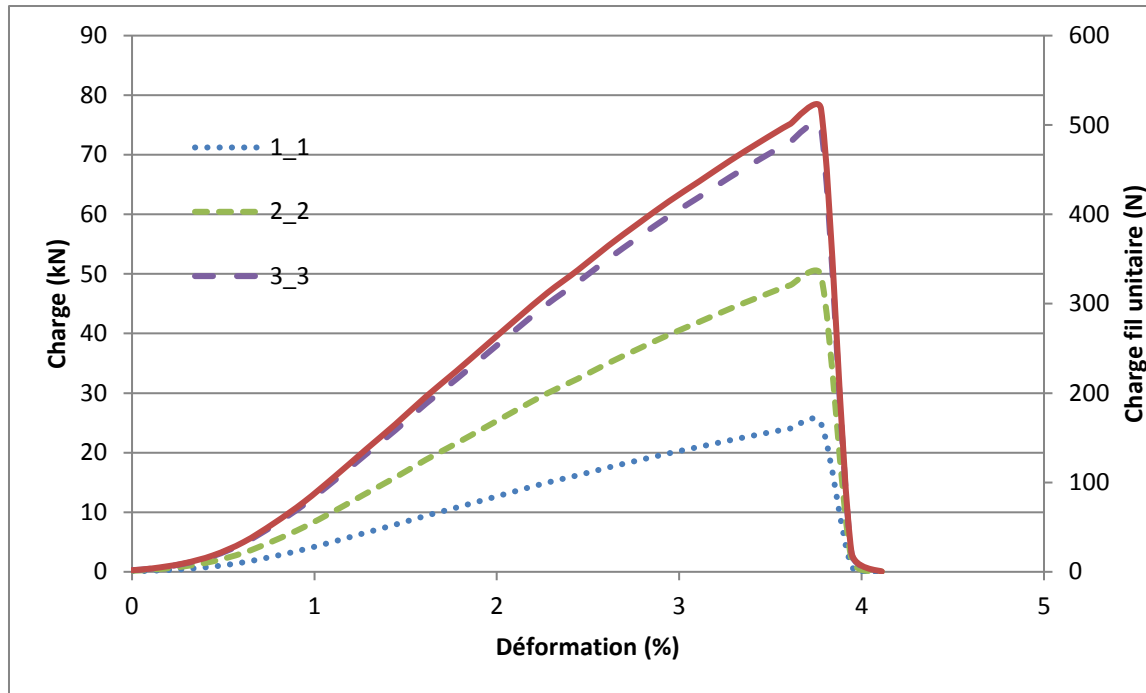


Figure 32: Projection des courbes des fils droits pour des tresses 1-1, 2-2 et 3-3 en Spectra

Ces courbes théoriques étant définies, on les superpose, sur la figure 33 aux courbes expérimentales de l'essai de traction, restreintes au 1<sup>er</sup> pic de charge. Ces tresses étant de type 3 (grand angle), le premier pic correspond quasiment qu'à l'action des fils droits.

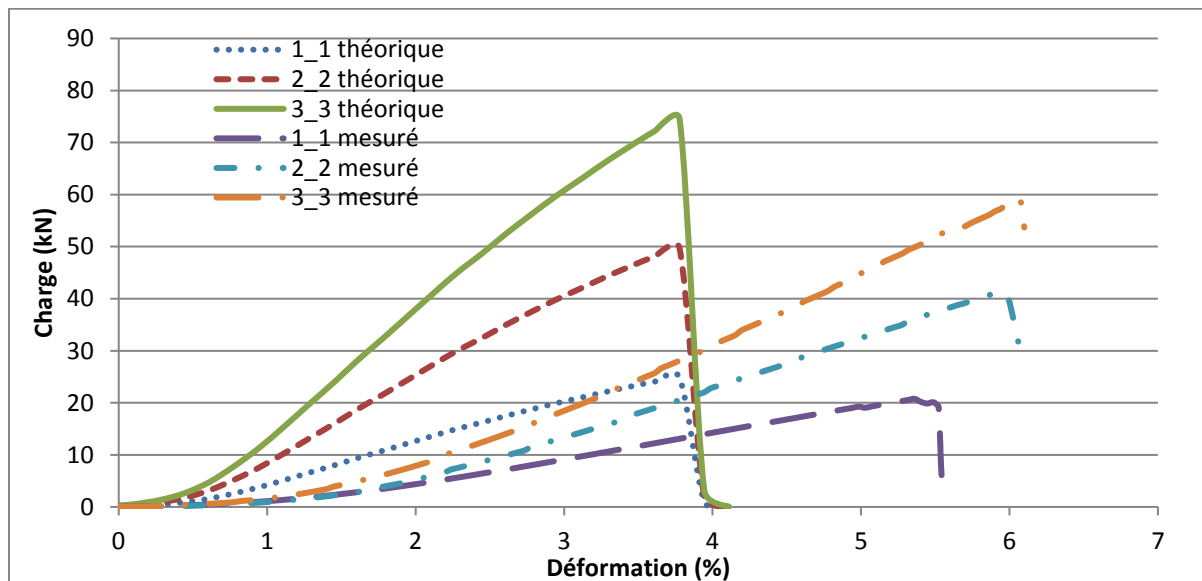


Figure 33: Courbes de traction théoriques et mesurées des premiers pics des tresses 1-1, 2-2 et 3-3 de type 3

De cette figure 33 on peut avancer les remarques suivantes. Tout d'abord, la déformation à la rupture mesurée est plus importante que celle calculée par ces modèles théoriques. Ensuite la force maximale mesurée est toujours plus faible que la force maximale théorique. Les pentes des tresses suivent aussi ces remarques. Plus le nombre de fils en section sera important, plus la pente sera raide.

Le tableau de la figure 34 récapitule les valeurs et les écarts en termes d'efforts et de pentes. Concernant les efforts (et on rappelle que la force théorique correspond à la force maximale d'un fil

unitaire multipliée par le nombre de fils droits présents dans la tresse), on constate un écart constant et autour d'environ 20% entre ces valeurs théoriques et expérimentales quel que soit le nombre de fils. Cet écart montre qu'un modèle prédictif de l'effort maximal au premier pic d'une tresse et basé sur des fils droits surestime les valeurs réelles de la tresse et qu'une tresse ne peut être schématisée, dans cette zone de comportement, que par les N fils droits qu'elle contient. Par ailleurs et comme vu au chapitre 2 dans l'étude de l'embuvage, dans une tresse triaxiale les fils droits ne sont pas parfaitement alignés dans la direction de production, de par leur ondulation.

	<b>1_1</b>	<b>2_2</b>	<b>3_3</b>
<b>Force théorique (N)</b>	24854	49708	74564
<b>Force mesurée (N)</b>	20108	41236	59053
<b>Ecart (%)</b>	19,1	18,1	20,1
<b>Pente théorique (N)</b>	8189	15160	21756
<b>Pente mesurée (N)</b>	5879	11688	15806
<b>Ecart (%)</b>	28,2	22,9	27,3

Figure 34 : Tableau récapitulatif des valeurs de force maximale pour les premiers pics théoriques et expérimentaux de tresses 1-1, 2-2 et 3-3 de type 3

La pente du premier pic d'une tresse va donc être influencée par deux paramètres, le nombre de fil en section de la tresse et l'angle de tressage. Plus le nombre de fils dans la tresse est important plus la pente du premier pic de la tresse va être importante. Les valeurs expérimentales sont toujours plus faibles que les valeurs théoriques. Cela est dû entre autres aux différentes phases de manipulation des fils qui ont entraîné des dégradations, aux incertitudes de mesures.

## B. Modélisation du comportement des fils de biais

Le comportement des fils de biais est illustré dans la figure 35 par une comparaison de l'évolution des pentes (au 1<sup>er</sup> pic) de tresses biaxiales et triaxiales en fonction de l'angle de tressage. Comme expliqué précédemment, pour les mêmes paramètres procédés, les angles de tressage sont différents pour des tresses biaxiales et triaxiales. Ces angles sont recalés sur l'axe des abscisses de ce graphe.

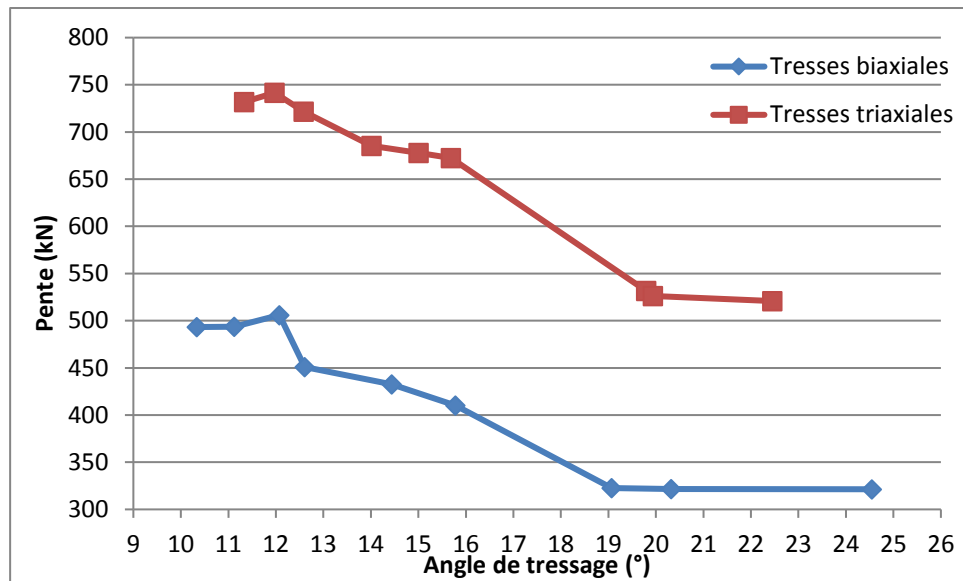


Figure 35 : Comparaison des pentes des tresses biaxiales et triaxiales

Ces courbes montrent que la pente des tresses triaxiales est toujours supérieure à celle des tresses biaxiales, ce qui est dû à l'ajout de fils droits dans les tresses triaxiales. En conséquence, les tresses triaxiales ont une plus grande rigidité que les tresses biaxiales. Ce résultat a été montré dans les publications [7]–[12], à une échelle pour des composites à base de tresses.

Comme spécifié ci-dessus, beaucoup de modèles sont présents dans la littérature pour prédire le comportement mécanique des composites à base de tresses. Le développement de modèles concernant les tresses sèches est peu étudié. Le but de la suite de ce chapitre est d'établir un modèle analytique pour prédire le comportement en traction des tresses sèches biaxiales et triaxiales. Ces développements concernent seulement la prédiction de la rigidité longitudinale des tresses soumises à une charge de traction uniaxiale sans prendre en compte l'embuvage des fils.

### C. Définition du modèle

Dans cette étude, tous les fils sont soumis à la charge de traction (figure 36) appliquée suivant l'axe longitudinal. Il est seulement considéré, en traction uniaxiale, dans le système de coordonnées globales notées  $(e_i, e_j)$ , seulement la première composante de la rigidité, la charge  $(F_{11})$ , et la déformation  $\varepsilon_{11}$ , calculés à partir du déplacement global  $u_{11}$ . Le système de coordonnées locales associé aux fils définis par leur angle, est noté  $(e'_i, e'_j)$ . Cet angle  $(\alpha)$  est égal à l'angle de tressage formé par les fils de biais et les fils axiaux.

La transformation entre le système local et le système global de coordonnées est décrit dans la littérature qui traite de l'établissement de modèles pour prévoir le comportement élastique des composites à base de tresses [8], [14], [15][16]–[27][28]–[31] et basés entre autres sur la théorie classique des laminés (CLT).

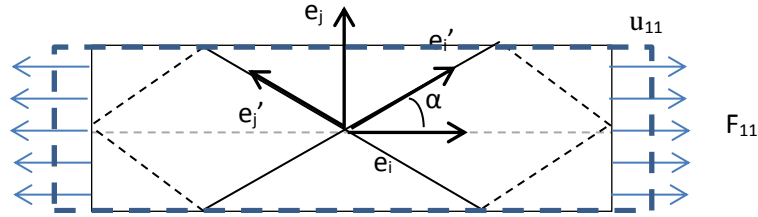


Figure 36: Définition des coordonnées locales et globales

Après la transformation entre le système de coordonnées locales et le système de coordonnées globales, la relation contrainte-déformation, exprimée dans le système de coordonnées globales [20], pour un fil ( $\alpha$ ) peut être résumée par (Eq 4.10).

$$\{\sigma\}^\alpha = [T_1]^{-1} [Q^{loc}] [T_1]^T \{\varepsilon\}^\alpha \text{ or } \{\sigma\}^\alpha = [Q^{glob}] \{\varepsilon\}^\alpha \quad (\text{Eq 4.10})$$

Où  $[Q^{loc}]$  représente la rigidité dans le système local de coordonnées,  $\{\sigma\}^\alpha$  et  $\{\varepsilon\}^\alpha$  sont les vecteurs contenant toutes les composantes de contrainte et de déformation.  $[T_1]$  est la matrice de transformation construite à partir des cosinus et des sinus de l'angle ( $\alpha$ ) et donnée par (Eq 4.11).

$$[T_1] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 0 & 0 & 0 & 2mn \\ n^2 & m^2 & 0 & 0 & 0 & -2mn \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & -n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & m & 0 \\ -mn & mn & 0 & 0 & 0 & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \text{ avec } m = \cos(\alpha), n = \sin(\alpha) \quad (\text{Eq 4.11})$$

Dans plusieurs publications,  $[Q^{loc}]$  prend en compte l'embuvage des fils [5, 11, 49-59, 74-76].

Cette équation (Eq 4.10) développée pour les matériaux composites, est exprimée en termes de composantes de contraintes, de déformation, et de matrice de rigidité. En relation avec la caractérisation expérimentale présentée précédemment avec des résultats en charge en fonction de la déformation, nous utiliserons cette relation mais en termes de charge (N) en fonction de la contrainte, comme donné en (Eq 4.12).

$$\{F\}^\alpha = [C_\alpha] \{\varepsilon\}^\alpha \quad (\text{Eq 4.12})$$

La matrice de raideur est par conséquent associée à la matrice de rigidité (en N), noté  $[C]$ . De cette relation (Eq 4.10), la rigidité dans le système de coordonnées globales pour un fil ( $\alpha$ ) ( $[C]_\alpha$ ) peut être calculée depuis la raideur ( $[C_\alpha^{loc}]$ ) exprimée dans le système de coordonnées locales par la relation (Eq 4.13)

$$[C_\alpha] = [T_1]^{-1} [C_\alpha^{\text{loc}}] [T_1]^T \quad (\text{Eq 4.13})$$

Associé à une sollicitation uniaxiale, seule la première composante de rigidité,  $C_\alpha^{11}$ , doit être considérée.

Dans ce travail, en première approximation, nous considérons les fils (de biais et axiaux) comme étant droits (sans ondulation). En conséquence, la première composante de la matrice ( $[C_\alpha^{\text{loc}}]$ ) (dans le système de coordonnées locales) est la pente (noté  $E_\alpha$ ) identifié pour un fil et décrit dans la figure 36.

Des équations Eq 4.10 et Eq 4.12 la relation suivante est obtenue (Eq 4.14).

$$C_\alpha^{11} = E_\alpha \cos^4(\alpha) \quad (\text{Eq 4.14})$$

$E_\alpha$  correspond à la pente à l'échelle du fil (ou module de charge, donné dans le tableau 1, pour les matières considérées). De cette équation, valable pour un fil ( $\alpha$ ), il est possible d'en déduire, avec une somme sur tous les fils, la relation reliant la charge appliquée axialement,  $F_{11}$  à la déformation  $\varepsilon_{11}$  mesurée dans la direction axiale. Grâce à l'introduction de la rigidité de la tresse, exprimée par  $N$ , et noté  $E_{\text{Braid}}$  (Eq 4.15).

$$F_{11} = E_{\text{Braid}} \varepsilon_{11} \quad \text{avec} \quad E_{\text{Braid}} = \sum_{\alpha} C_\alpha^{11} \quad (\text{Eq 4.15})$$

Dans cette somme, il est nécessaire de dissocier les fils de biais caractérisés par leur angle de tressage et les fils droits orientés suivant la direction de la charge appliquée. La rigidité peut finalement être donnée par l'équation (Eq 4.16).

$$E_{\text{Braid}} = N_{\text{bias}} E_\alpha \cos^4(\alpha) + N_{\text{axial}} E_\alpha \quad (\text{Eq 4.16})$$

Où  $N_{\text{bias}}$  et  $N_{\text{axial}}$  sont respectivement le nombre de fils de biais et le nombre de fils droits.

#### D. Comparaison avec les résultats expérimentaux

Pour chaque tresse élaborée, et dont le comportement a été caractérisé en traction, il est montré sur les figures 37 et 38, respectivement pour les tresses biaxiales et triaxiales, la comparaison entre la pente mesurée et celle estimée par l'équation (4.16).

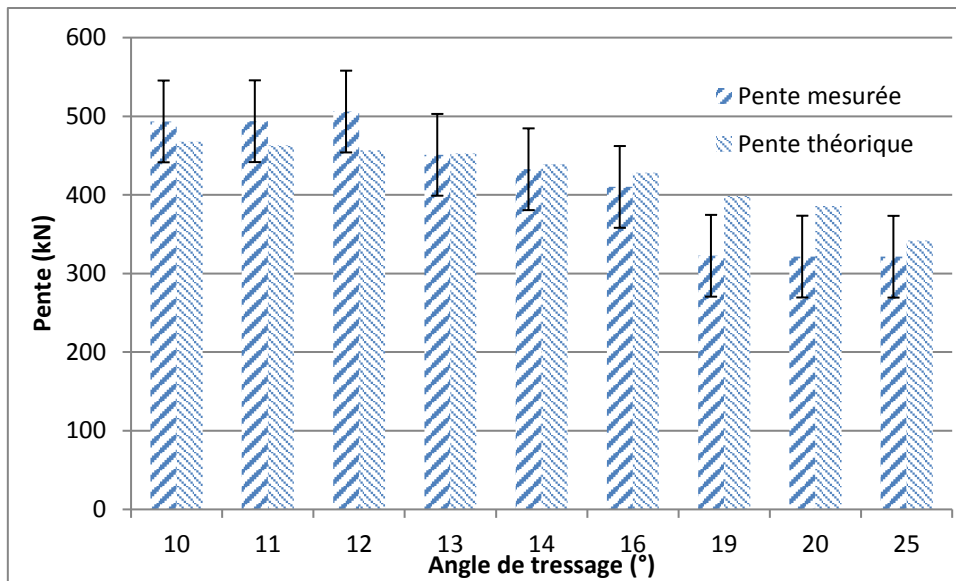


Figure 37: Comparaison entre la pente mesurée et la pente prédite pour les tresses biaxiales Spectra 1-0

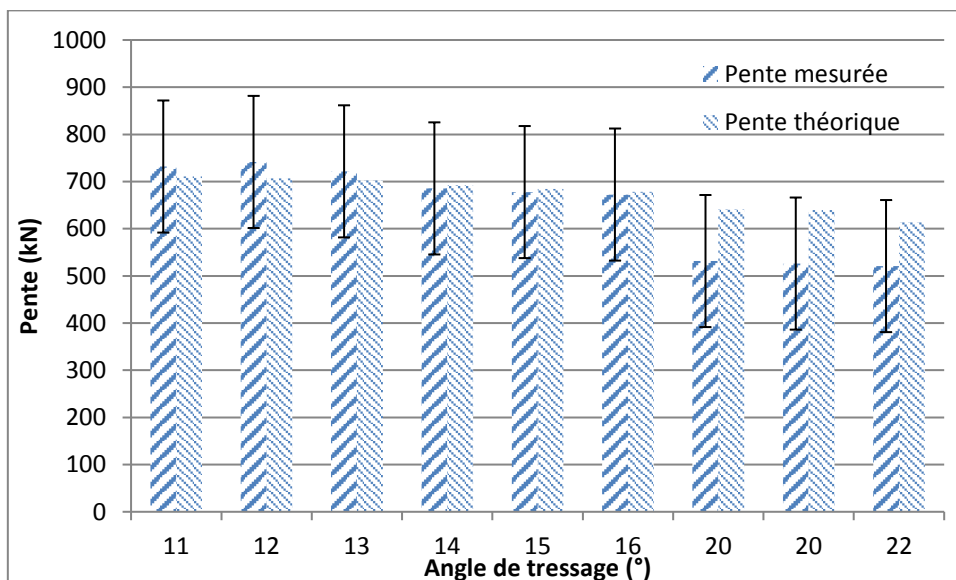


Figure 38: Comparaison entre la pente mesurée et la pente prédite pour les tresses triaxiales Spectra 1-1

De ces figures on constate que la différence faible, pour les petits angles de tressage, devient significative pour des angles plus grands.

Cette comparaison a également été établie, sur les figures 39 et 40, pour un nombre variable de fils en section, dans le cadre de tresses triaxiales. Avec ces échantillons, la gamme d'angle de tressage couverte est plus importante.



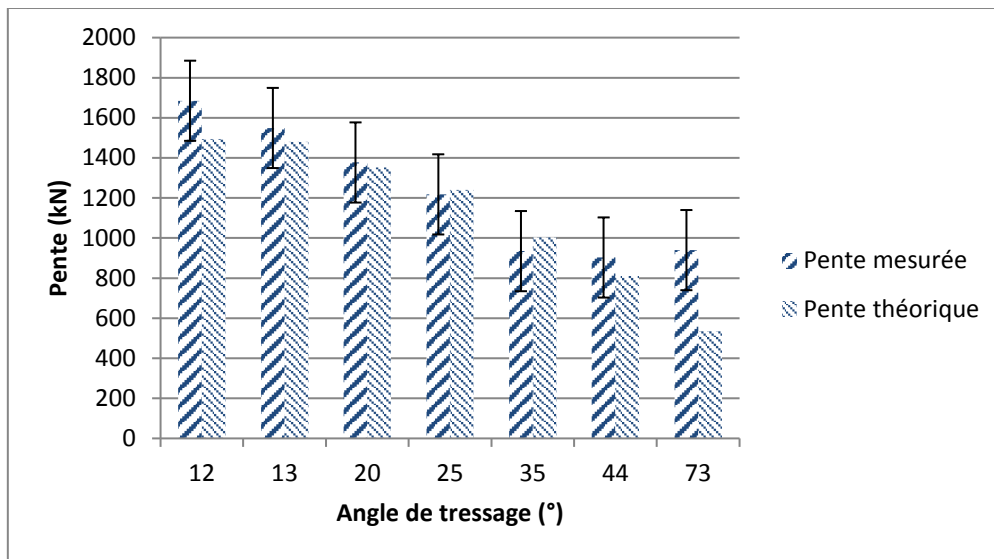


Figure 39: Comparaison entre la pente mesurée et la pente prédite pour les tresses triaxiales Spectra 2-2

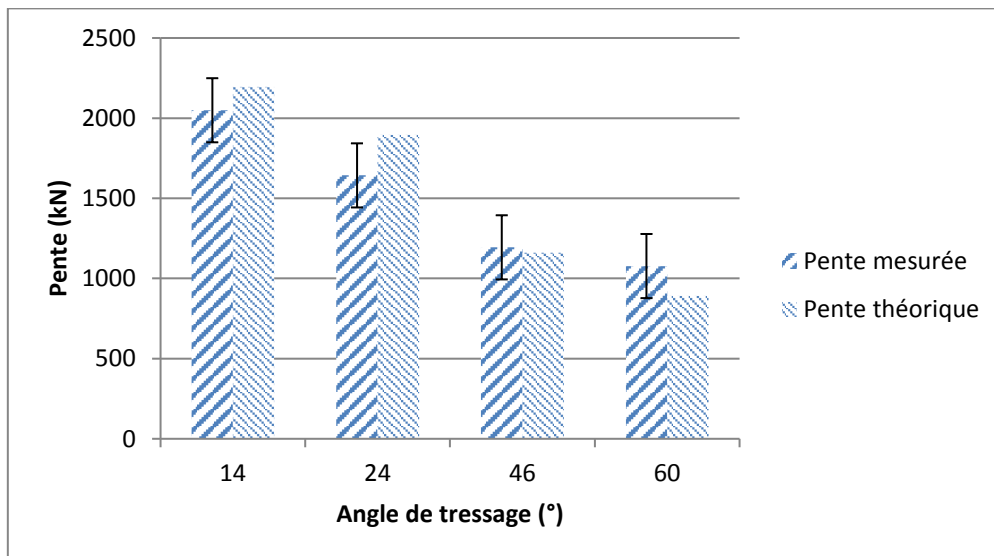


Figure 40 Comparaison entre la pente mesurée et la pente prédite pour les tresses triaxiales Spectra 3-3

Ces résultats confirment, pour des angles de tressage plus importants, l'écart entre ce modèle prédictif de la rigidité de la tresse au 1<sup>er</sup> pic et les valeurs expérimentales.

Afin de pondérer cette différence le modèle théorique (Eq 4.16) est modifié afin de prendre en compte le ratio de fibres dans les tresses. Comme classiquement utilisé dans la théorie classique des laminés, un coefficient pondérateur est introduit. Ce coefficient correspond au rapport des volumes de fils ( $V_{fils}$ ) dans la structure par le volume total de la tresse ( $V_{tresse}$ ). L'équation (Eq 4.16) est remplacée par la suivante (4.17).

$$E_{tresse} = \frac{V_{fils}}{V_{tresse}} (N_{biais} E_{\alpha} \cos \alpha^4 + N_{droit} E_{\alpha}) \quad (\text{Eq 4.17})$$

Pour estimer le volume des fils, l'hypothèse de considérer la section des fils comme circulaire a été faite.

On reporte sur les figures 41 et 42, les comparaisons entre les valeurs expérimentales et celles calculées par les relations analytiques (Eq 4.16 et 4.17) respectivement pour les tresses biaxiales et triaxiales avec 1 fil par bobineaux. (1\_0 et 1\_1).

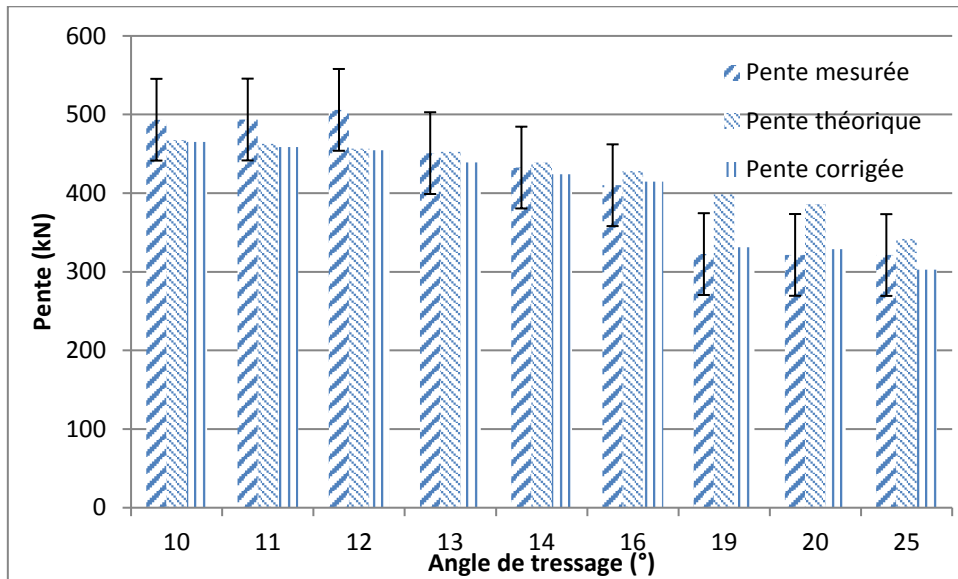


Figure 41: Comparaisons entre la pente mesurée et la pente prédite/corrigée pour les tresses Spectra 1-0

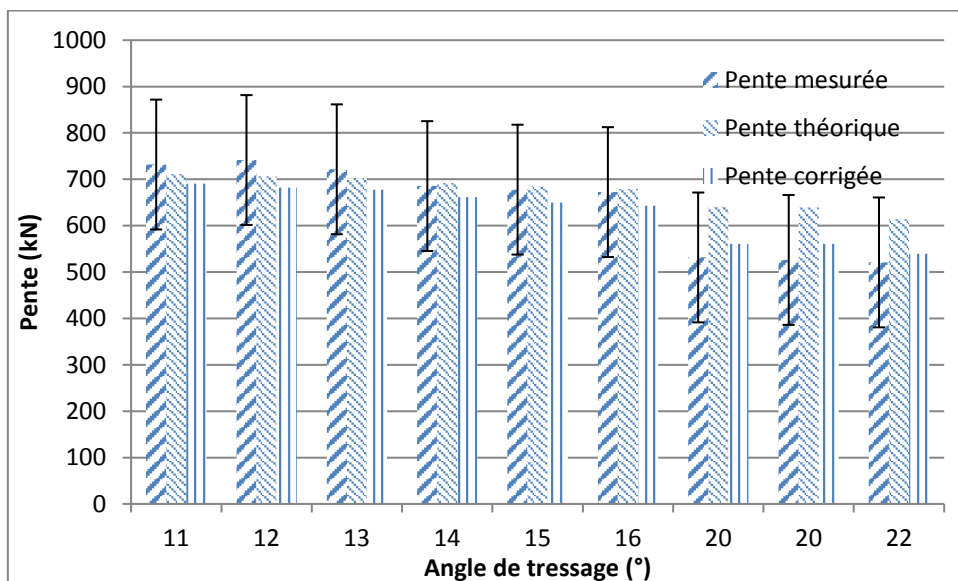


Figure 42: Comparaisons entre la pente mesurée et la pente prédite/corrigée pour les tresses Spectra 1-1

La formule corrigée permet d’être plus proche des résultats expérimentaux. En ce qui concerne les tresses triaxiales, la prévision du module doit encore être affinée surtout en ce qui concerne les tresses qui présentent un comportement de double pic.

Pour un nombre différent de fils en section, l’équation 4.17 reste aussi prédictive. La figure 43 illustre ce résultat pour des tresses avec un nombre variable de fils en section (en prenant en compte le modèle 4.17).

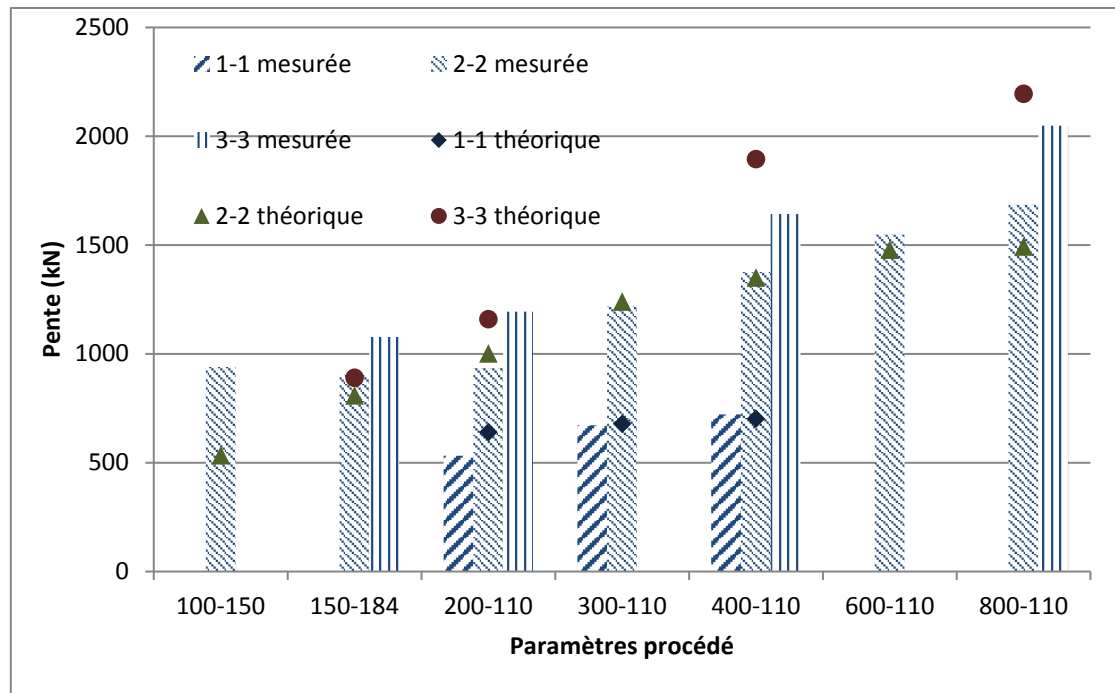


Figure 43: Comparaison entre la pente mesurée et la pente prédite pour les tresses triaxiales/ nombre de fils en section

La caractérisation mécanique des tresses, biaxiales ou triaxiales, permet à partir de la courbe effort-déformation, en traction, de déduire des caractéristiques sur le comportement en fonction des paramètres du procédé et de la géométrie initiale des tresses. L'analyse de ces caractéristiques ainsi que l'établissement de modèles, montrent la complexité de couvrir les différents types de tresses (biaxiale, triaxiale de type 1, 2 ou 3) ainsi que l'ensemble des mécanismes. Ainsi, dans le cas des tresses présentant un double pic, le premier pic est caractérisé et expliqué, mais le reste de la courbe est plus difficile à appréhender.

Pour ce faire, un critère dépendant à la fois de la déformation et de la charge doit être introduit.

### E. Modèle énergétique

Dans cette partie, le critère utilisé pour classifier les échantillons, permettant de prendre en compte la déformation et la valeur de charge, est un critère énergétique.

Sur la figure 44 (pour les tresses biaxiales) et la figure 45 (pour les tresses triaxiales), on reporte l'évolution de ces énergies en fonction de la déformation. Ces quantités d'énergie ayant été calculées par l'aire sous la courbe du comportement en traction.

L'énergie dissipée est une notion qui nous permettra de faire un lien entre les caractérisations géométriques et mécaniques et l'application dans le programme BALLOO, traitée dans le chapitre 5. Ce qui fait du critère énergie dissipée un bon critère de discrimination dans le choix d'une configuration finale de tresse optimale.

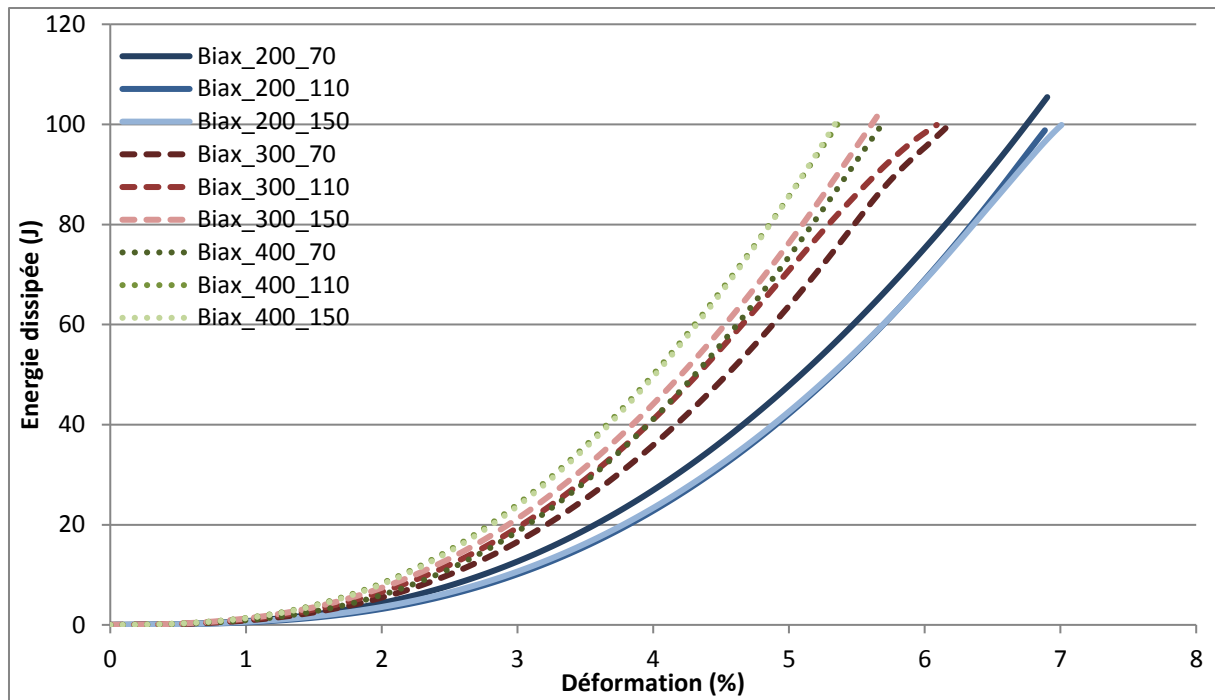


Figure 44 : Energie pour tresses Spectra 1-0

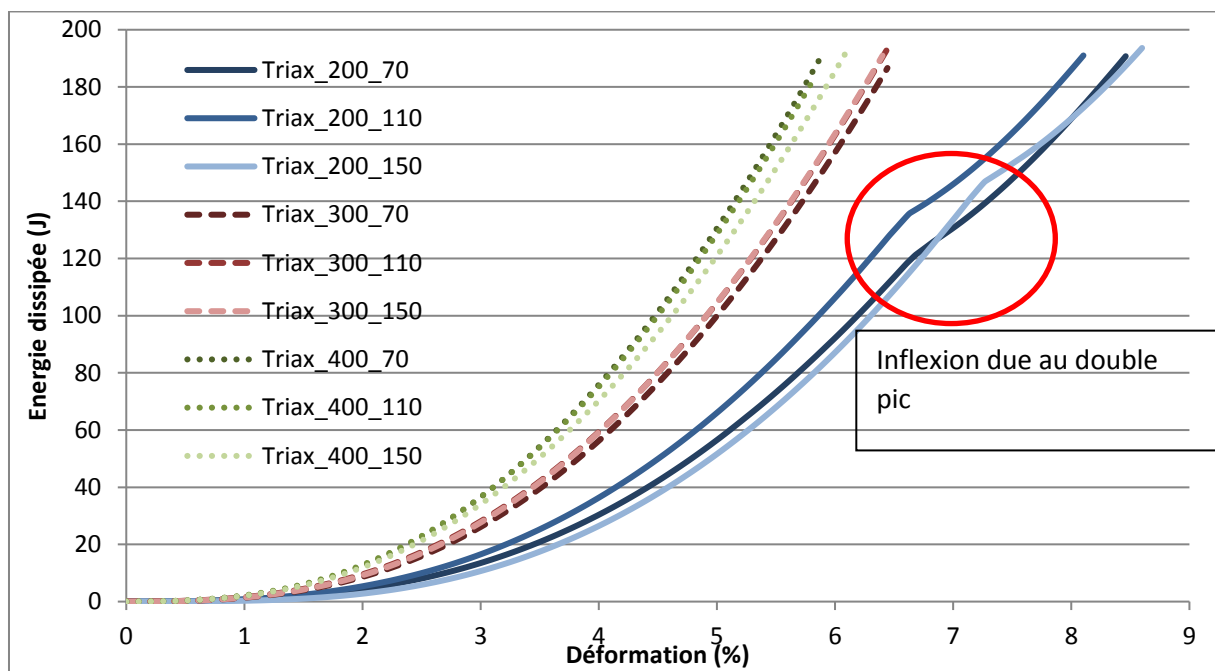


Figure 45: Energie pour tresses Spectra 1-1

Les valeurs des énergies dissipées par les tresses atteignent un maximum à peu près équivalent. Par contre les évolutions diffèrent. Certaines courbes, pour des tresses triaxiales de type 1, atteignent leur maximum assez rapidement. Et elles continuent par une légère augmentation. Les courbes des tresses ayant un angle de tressage supérieur à l'angle limite montrent une double inflexion de la courbe qui correspond au double pic introduit précédemment.

Concernant les tresses triaxiales, l'énergie dissipée peut être définie selon deux modèles. Le premier correspond aux tresses de type 1. La courbe augmente puis, un maximum est atteint assez rapidement. Cela veut dire que plus aucune énergie n'est dissipée par l'échantillon. Le second modèle correspond aux tresses de type 2 ou 3. La courbe est séparée en deux différentes phases. Entre deux augmentations de l'énergie dissipée se trouve une inflexion (figure 45). Cette inflexion correspond à la rupture des fils droits dans la tresse triaxiale.

Au final, la capacité de dissipation d'énergie pour les deux groupes de tresses est équivalente. C'est l'évolution de la dissipation qui va être différente avec, dans un cas, une dissipation rapide de la totalité de l'énergie, et dans l'autre cas une dissipation plus lente, qui nécessite une déformation plus importante pour atteindre son maximum. L'énergie dissipée par les tresses triaxiales est plus importante que celle dissipée par les tresses biaxiales, par le nombre de fils entrant en jeu dans le processus de dissipation d'énergie.

Pour résumer, comme la valeur maximale atteinte sur les courbes est équivalente, il devient intéressant de se pencher sur l'évolution de ces courbes pour établir un classement des tresses.

L'énergie dissipée par un fil utilisé pour produire les structures présentées en figure 45 et 46 est de 1,3J. Cette valeur est calculée, pour le Spectra, à partir des caractéristiques données dans le tableau 1.

De cette valeur, et des paramètres géométriques de la tresse, à l'instar de la modélisation du comportement mécanique de la tresse, l'énergie totale dissipée peut être modélisée par (Eq 4.18) :

$$Energie\ dissipée_{tresse} = (N_{droit} + N_{biais} * \cos \alpha^4) * Energie\ dissipée_{fil} \text{ (Eq 4.18)}$$

Ce modèle en énergie, calqué sur le modèle en pente, servira dans la partie rétro-conception à la fin de ce chapitre.

Toutes ces observations sont valables pour des tresses ayant le même nombre de fils en section. Sur la figure 46 on représente l'évolution de l'énergie de trois tresses triaxiales de Spectra avec un nombre différent de fils droits par bobineaux, (un, deux ou trois) et un nombre constant de fils de biais par bobineaux (ici, 3).

Les tresses considérées sont de type 3, avec un angle de tressage comparable (autour de 45°), et forment donc un double pic de charge. Les considérations précédentes sur l'inflexion des courbes et les valeurs maximales atteintes sont toujours valables. La différence majeure entre ces trois courbes réside dans la valeur d'énergie dissipée à laquelle l'inflexion apparaît. En effet, la courbe représentant la tresse avec un fil droit par bobineau (3\_1) présente une inflexion pour une valeur de 100J. La courbe associée à la tresse avec deux fils par bobineaux droits (3\_2), l'inflexion est à 200J ; celle de la tresse avec trois fils par bobineaux droits (3\_3), à 300J. Les trois courbes montrent une inflexion arrivant à la même valeur de déformation suivie d'un palier. Ce qui met là encore en avant le fait que les fils de biais n'ont pas d'action dans la première partie de ces courbes d'évolution de l'énergie.

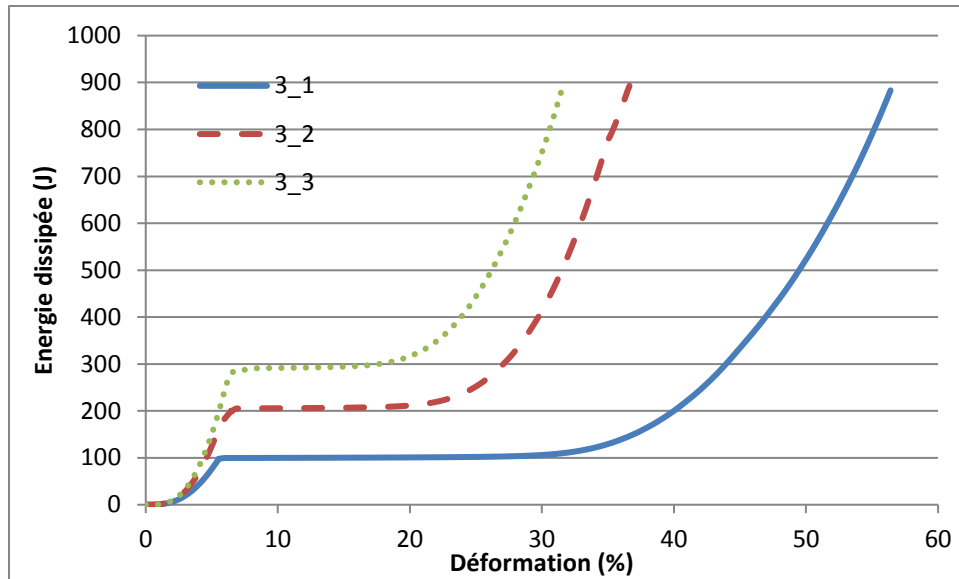


Figure 46 : Courbe d'énergie dissipée pour des tresses à nombre de fils droits variable

La déformation à laquelle intervient la fin du plateau est différente en fonction du nombre de fils droits en section de la tresse. Cela s'explique par une différence dans les valeurs d'angle de blocage de ces trois configurations. De plus avec un seul fil droit par bobineau droit, l'espace de réorganisation des fils de biais sera plus important que pour trois fils par bobineaux droits, et donc la valeur de déformation pour la reprise de charge (dans la courbe de charge/déplacement) interviendra plus tard.

L'énergie dissipée se matérialise par une rupture des fils dans la structure. Cette rupture va créer un échauffement local au niveau de la zone de rupture. Mais, l'échauffement de la tresse au cours de l'essai peut aussi parvenir des frottements consécutifs à la réorganisation des fils entre eux. Pour mieux comprendre et localiser ces phénomènes, une analyse thermique a été conduite cours de l'essai de traction.

## VII. Analyse thermique des tresses lors de la traction uniaxiale

Ce protocole d'acquisition des images captées par la caméra thermique a été défini au chapitre 2-VII-C-15.

La figure 47 montre plusieurs étapes du test de traction, à partir des données acquises par la caméra thermique. L'échelle de couleur est définie comme suit : Le pourpre-bleu représente les zones les plus froides de l'image, alors que le jaune-blanc sont les zones les plus chaudes de l'image.

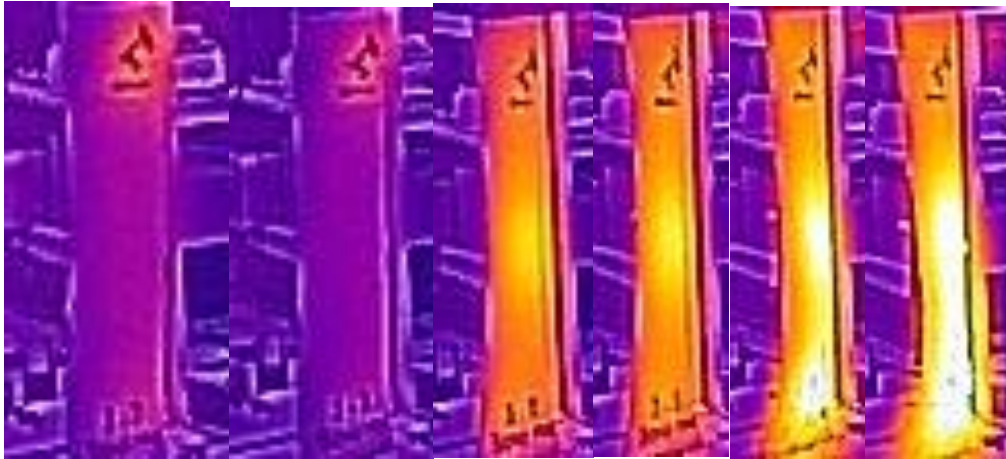


Figure 47 : Evolution de la dissipation thermique durant le test de traction sur une tresse triaxiale

De cette figure 47, on peut constater une certaine homogénéité de la température dans l'échantillon.

Une classification des tresses triaxiales (types 1, 2 ou 3), a été introduite précédemment en fonction de leur angle de tressage, sur la base des mécanismes lors de l'essai de traction uniaxiale (simple pic, double pic, etc...). L'évolution de la température lors de ces essais peut être dissociée en fonction de cette classification. Concernant les tresses triaxiales de type 1. Ces tresses émettent une chaleur radiante qui augmente rapidement au cours du test jusqu'au point de rupture (figure 48).

Pour les figures suivantes, l'axe de droite représente les températures relevées. Le point de départ de toutes ces mesures est autour de 20°C, soit la température ambiante de la pièce au moment des tests.

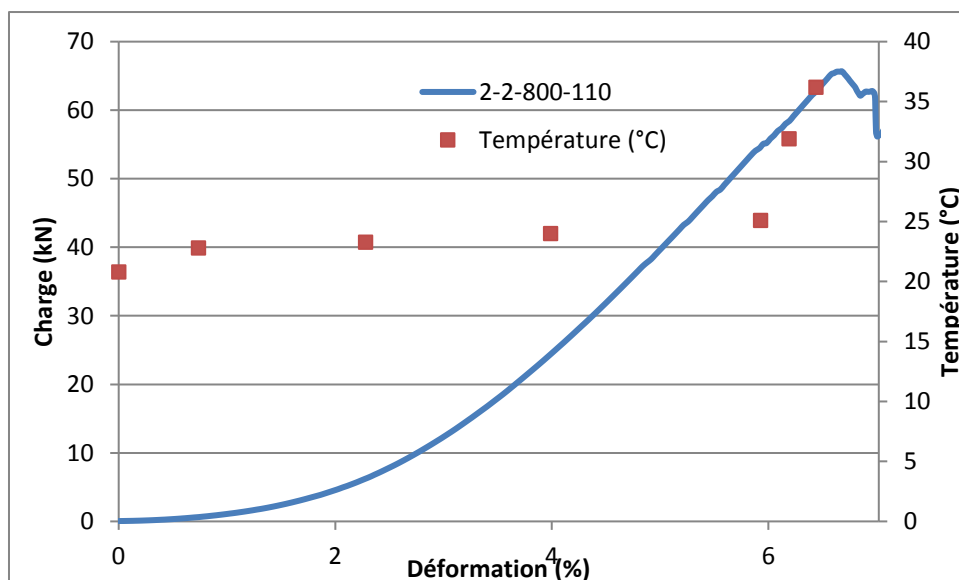


Figure 48 : Evolution de la température durant un test de traction d'une tresse triaxiale (tresse de type 1)

Cependant, pour les tresses triaxiales de type 2 ou 3, l'évolution est différente et peut être séparée en deux parties, avant et après le premier pic de charge, comme représentée sur les figures 49 et 50.

Lors de l'essai de traction, qui se déroule à température ambiante, les mécanismes de réorganisation structurelle de la tresse (évolution de l'angle) de rupture des fils droits sont accompagnés de

frottements entre les fils droits et les fils de biais. Ces frottements vont créer un échauffement de la tresse. Le maximum de la chaleur émise intervient lorsque la tresse vient rompre totalement. Cette évolution de température est celle représentée sur la figure 48. La température maximale considérée est celle relevée comme étant la plus importante lors de l'analyse d'images thermiques prises au cours du test de traction.

Sur la figure 49 est superposée l'évolution de la température au sein d'une tresse de type 2 à une courbe de comportement mécanique lors du test de traction uniaxiale. Après la rupture des fils droits, la phase de réorganisation structurale puis de reprise de la charge intervient très rapidement ce qui se traduit par une augmentation croissante de la température qui atteint son maximum à la rupture de la tresse.

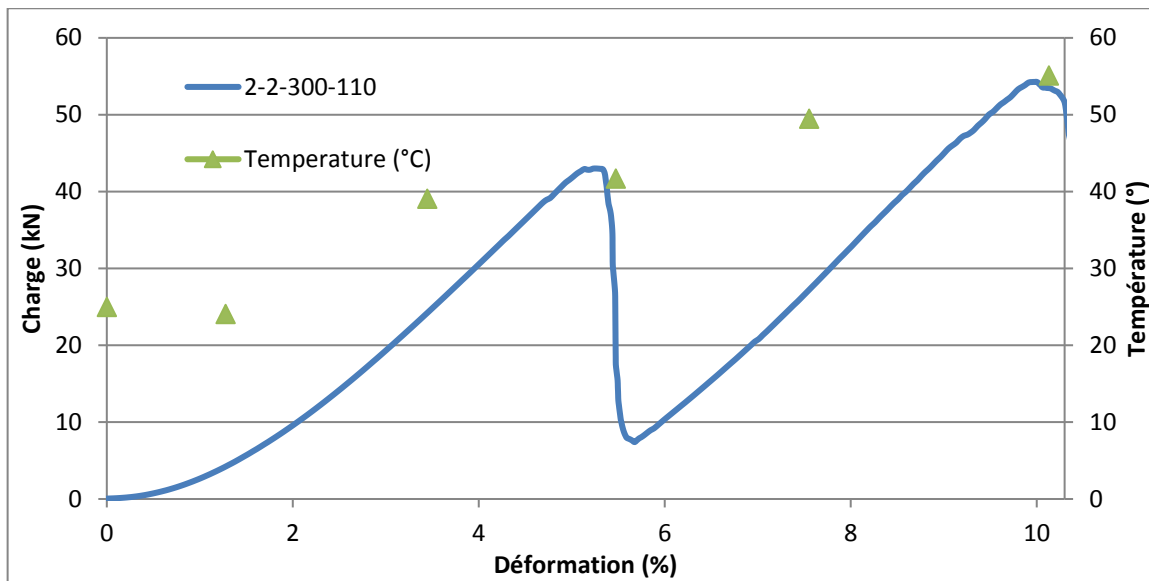


Figure 49 : Evolution de la température durant un test de traction d'une tresse triaxiale (tresse de type 2)

Cette augmentation a été constatée pour toutes les tresses triaxiales de type 2 et 3. Par contre l'évolution thermique dépend de l'angle de tressage. Sur la figure 50, on reporte cette évolution pour une tresse triaxiale ayant un grand angle de tressage (de type 3). Et par comparaison avec une tresse triaxiale ayant un plus faible angle de tressage, entre les deux pics, on constate un palier (avec une légère diminution) de cette température. Dans cette zone de comportement, la réorganisation et le réalignement des fils de biais ont une cinématique plus longue pour des tresses à grand angle de tressage. Ce phénomène laisse le temps à la température de se stabiliser sans être compensée par des frottements entre les différents fils.



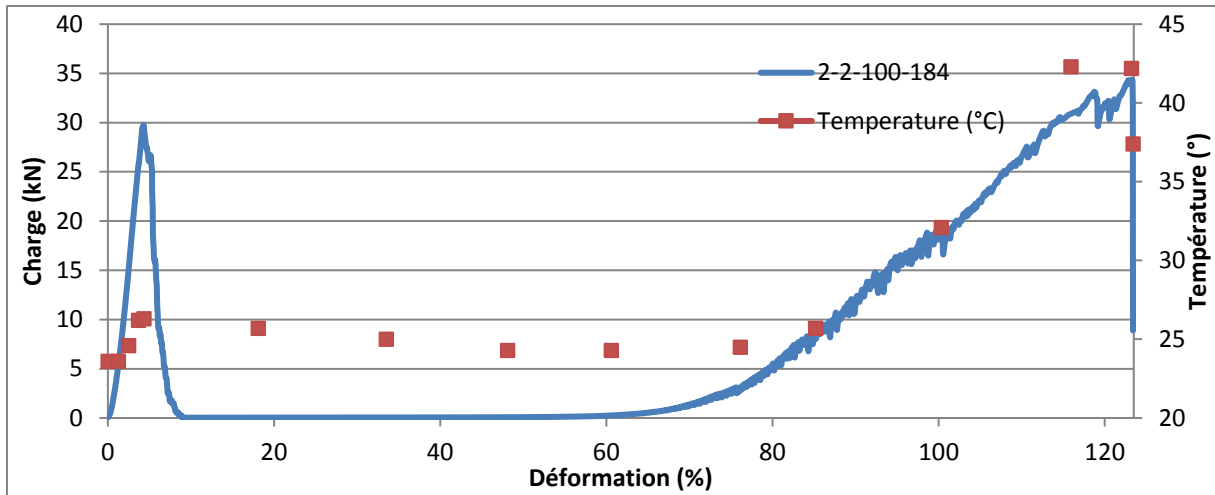


Figure 50 : Evolution de la température durant un test de traction d'une tresse triaxiale (tresse de type 3)

On reporte sur la figure 51 les températures maximales atteintes par les tresses triaxiales en fonction de leur angle de tressage initial. Cette figure montre que plus l'angle de tressage est petit, plus la température maximale mesurée est élevée.

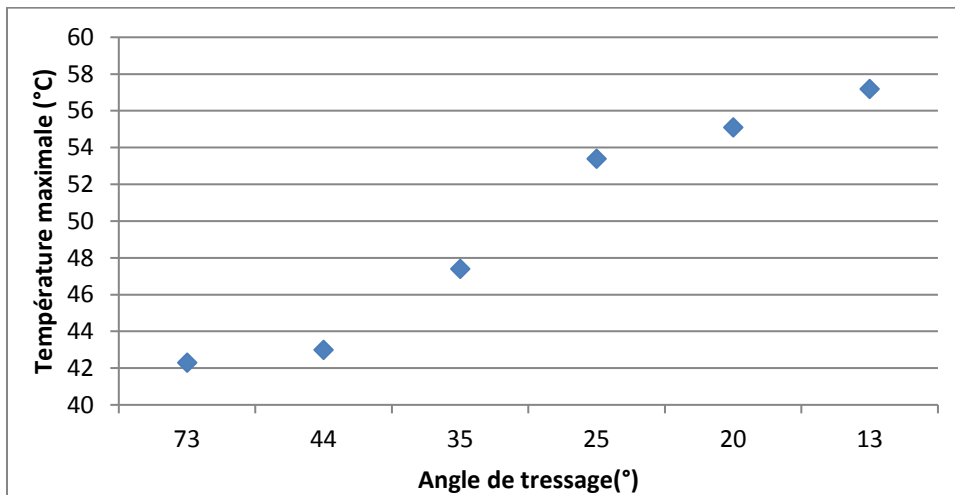


Figure 51 : Evolution de la température maximale en fonction de l'angle de tressage

Ce maximum de température atteinte dépend donc de l'angle de tressage initial. De plus, l'évolution de cette température dépend du type de tresse considérée. Cette influence est illustrée en figure 52 sur laquelle sont représentés les profils d'évolution des températures des tresse triaxiales de types 1, 2 et 3.

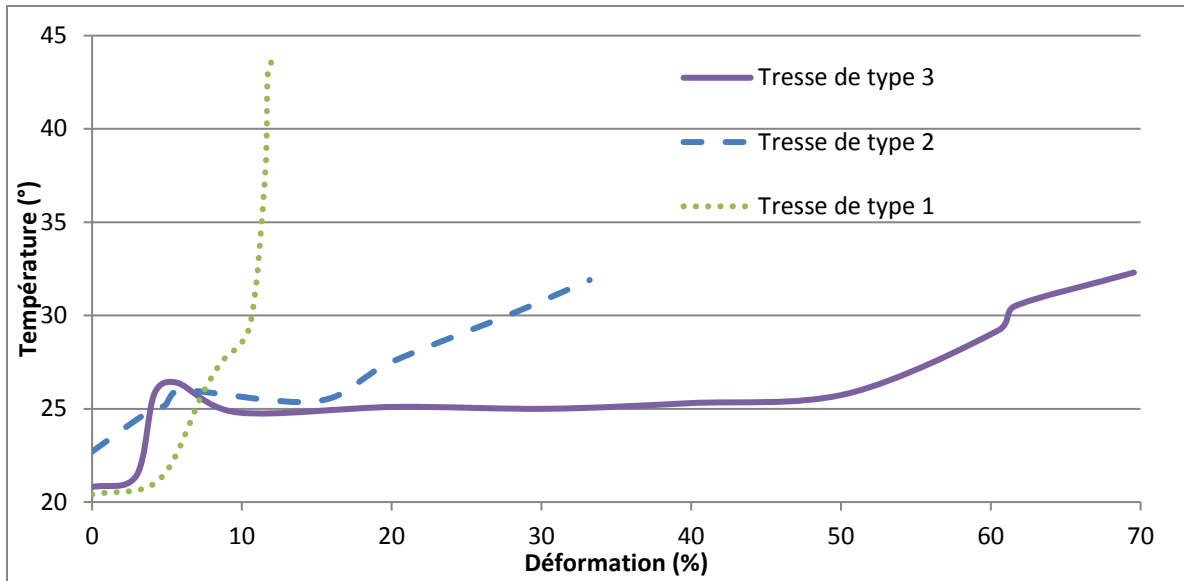


Figure 52 : Courbes d'évolution de température en fonction du type de tresse

Le comportement thermique des tresses triaxiales lors d'un test de traction uniaxiale dépend tout comme le comportement mécanique, de l'angle de tressage.

La figure 53 propose une visualisation des trois types de tresses dont le nombre de fils de biais évolue. Plus le nombre de fil de biais est important, plus le maximum de la température atteinte durant l'essai de traction va être élevé.

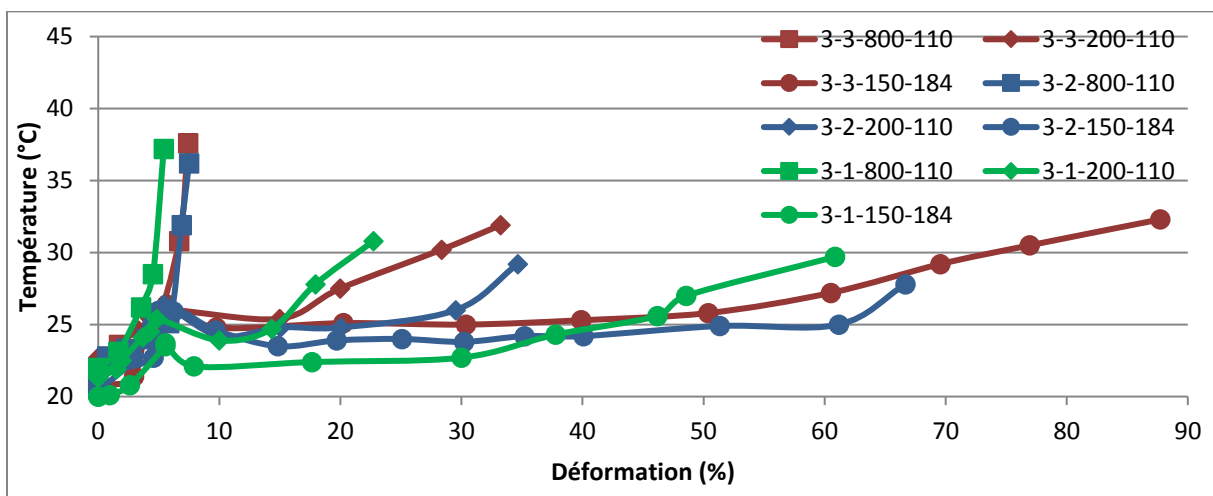


Figure 53 : Evolution de la température en fonction du nombre de fil et du type de tresse

Toutes ces observations et conclusions sont valables pour des tresses en Spectra. Le comportement spécifique de ce dernier à la température a permis d'émettre ces conclusions. Pour les étendre à tout type de tresse, il convient de réitérer la même étude avec des matériaux différents.

### VIII. Réponses des tresses au phénomène de charge-décharge

Pour l'étude de la réponse des tresses à un cycle de charge-décharge, les échantillons ont été soumis à une charge jusqu'à une valeur correspondant à 80% de la charge maximale acceptable puis à une décharge jusqu'à un effort nul.

Pour tous les types de tresses (associées à chaque couple de paramètres procédé vitesse de production-vitesse de rotation des bobineaux), un échantillon de référence a été testé en traction jusqu'à rupture. C'est cette valeur de charge à la rupture qui a servi dans le calcul des 80% de la charge admissible.

Comme illustré par ces courbes de charge-décharge des figures 54 et 55, l'angle de tressage a une forte importance dans l'allure de réponse des tresses à ce cycle. Cela rejoint les remarques déjà faites dans ce chapitre sur la relation entre l'angle de tressage et la réponse mécanique des tresses.

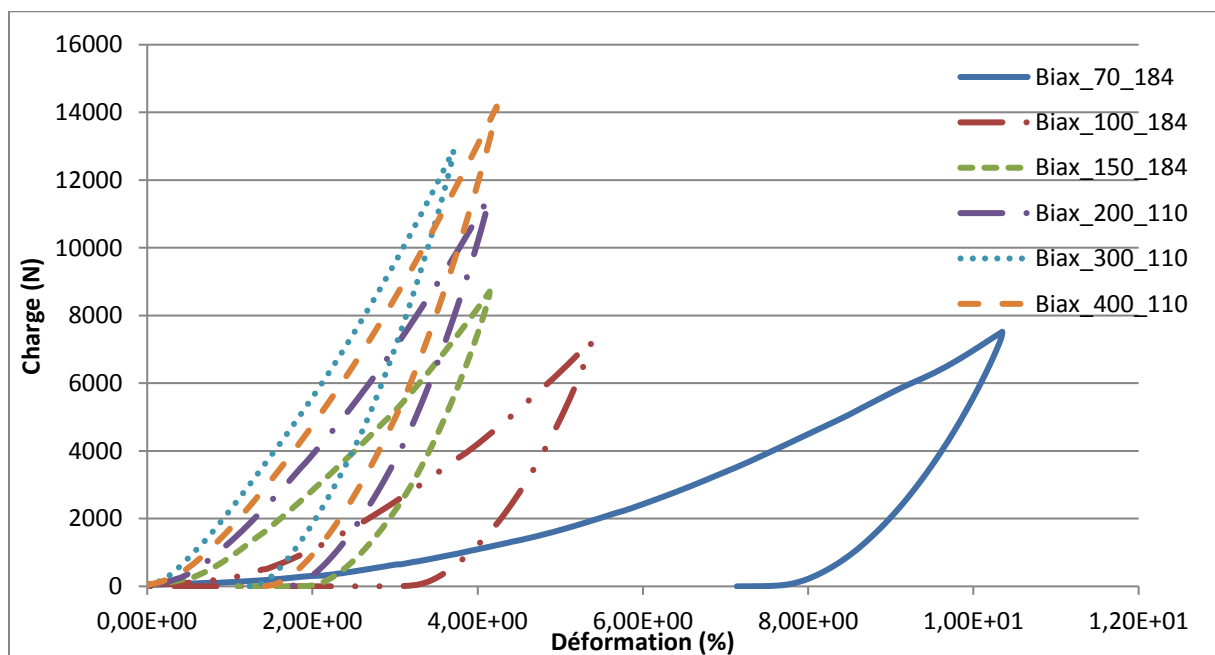


Figure 54 : Tests de charge-décharge sur tresses biaxiales (1-0)

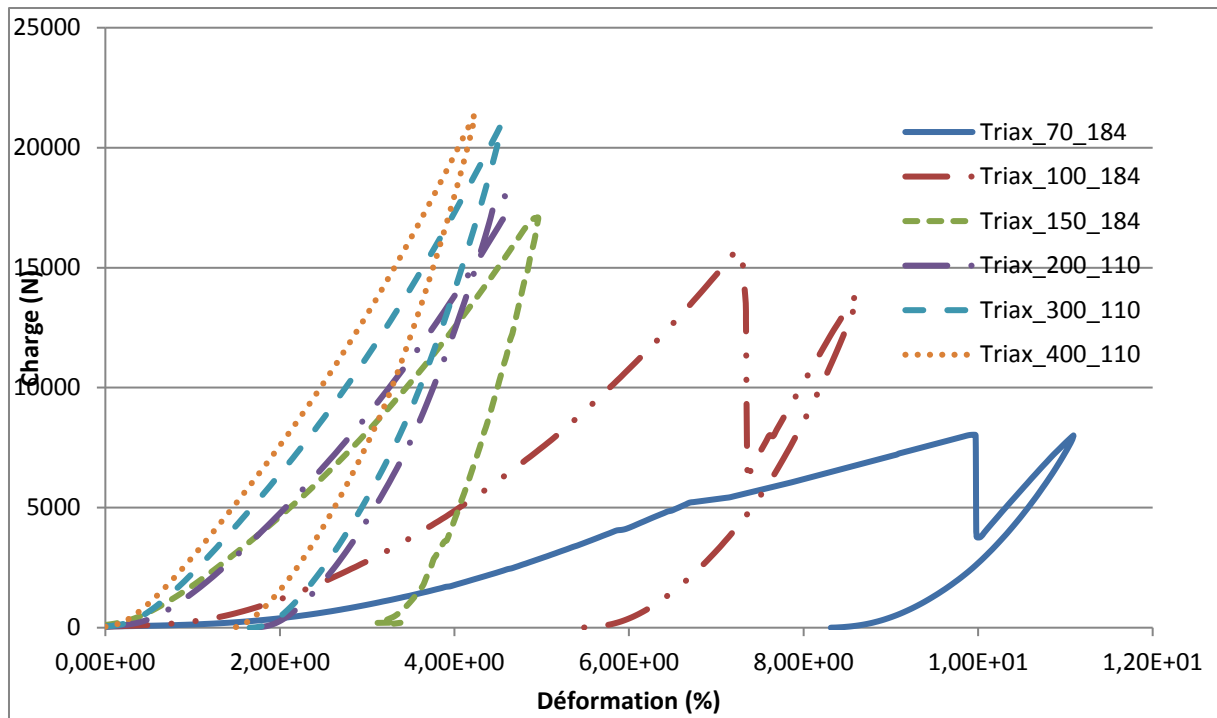


Figure 55 : Tests de charge-décharge sur tresses triaxiales (1-1) en Vectran

Le relevé des différentes pentes des courbes de charge-décharge des tresses sont récapitulées en figure 56. Les pentes correspondant à la décharge présentent toutes un coefficient directeur supérieur aux pentes de charge.

A la fin du cycle de décharge, le point initial n'est pas rejoint. De fait, une déformation structurelle par rapport à la géométrie initiale de la tresse est toujours présente. Les tresses n'ont pas un comportement élastique et toute déformation est irréversible. Le réarrangement de la structure avec l'alignement des fils dans la direction de la charge est valable pour la partie charge, par contre pour la partie décharge, ce réalignement reste dans l'état atteint au pic de la charge. L'angle final après ce cycle de charge-décharge conserve la valeur minimale qu'il a atteinte lors du pic de charge.

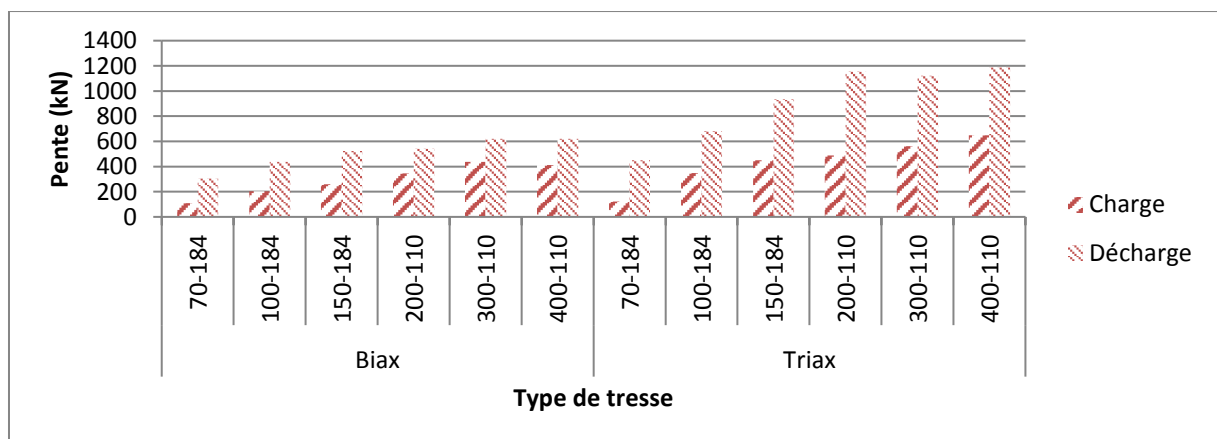


Figure 56 : Pentes des courbes de charge-décharge

Le test de charge-décharge permet d'affirmer que, lors du test de traction uniaxiale, toute modification géométrique est irréversible.

## IX. Résultats de la simulation, comparatif par rapport aux données expérimentales

Les résultats de la simulation qui sont présentés dans cette section sont issus du logiciel Texmind, développé par Yordan Kyosev[32]. Ces derniers sont présentés en complément des résultats géométriques présentés au chapitre 3-VIII qui montraient que ce modèle permettait de bien représenter une tresse quant à son angle de tressage, ou la longueur de fil parcourue. Dans le cadre de ce paragraphe les résultats concernent les caractéristiques mécaniques et notamment la prédiction d'effort maximal, calculée dans ce logiciel. L'objectif étant de comparer ces valeurs avec les résultats expérimentaux.

Cette étude comparative entre tresses produites et tresses simulées a été réalisée sur des tresses triaxiales en Spectra produites avec deux fils par bobineaux, (tresse de 288 fils).

Les courbes de traction de deux de ces tresses (d'angles de tressage égaux à 19° et 35°), sont rappelés figure 57, et correspondent aux mécanismes classifiés dans les types 2 et 3 (avec la présence d'un double pic). La figure 57 précise à quels points sont considérées les charges correspondant au premier et au second pic.

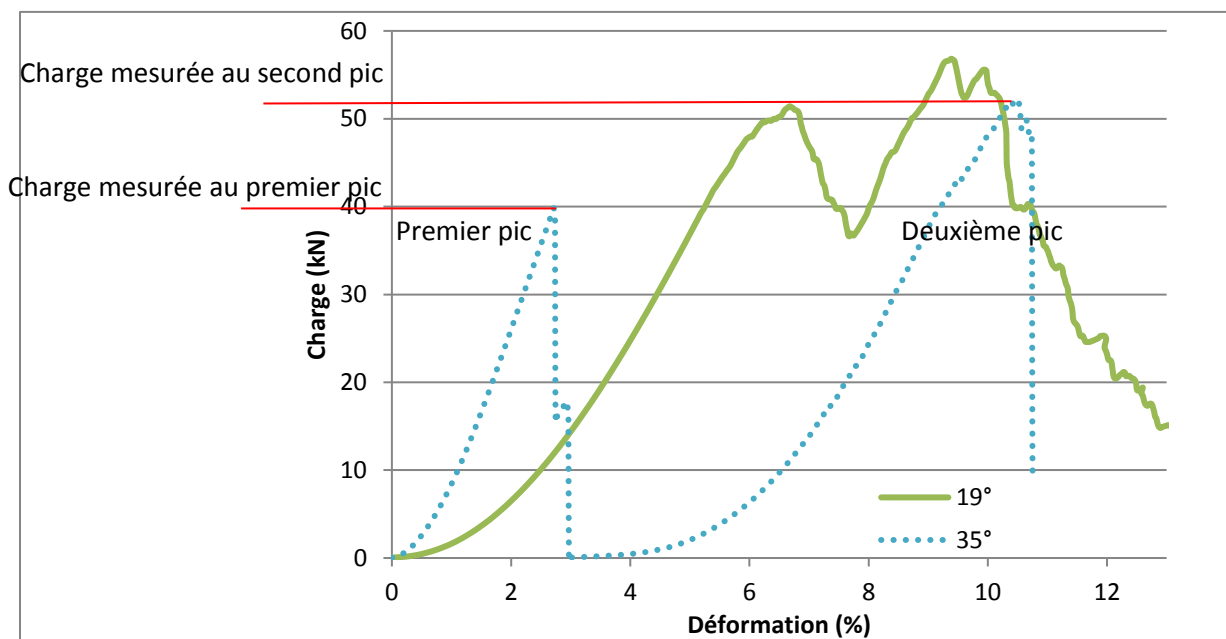


Figure 57 : Illustration de deux courbes de traction (19° and 35°)

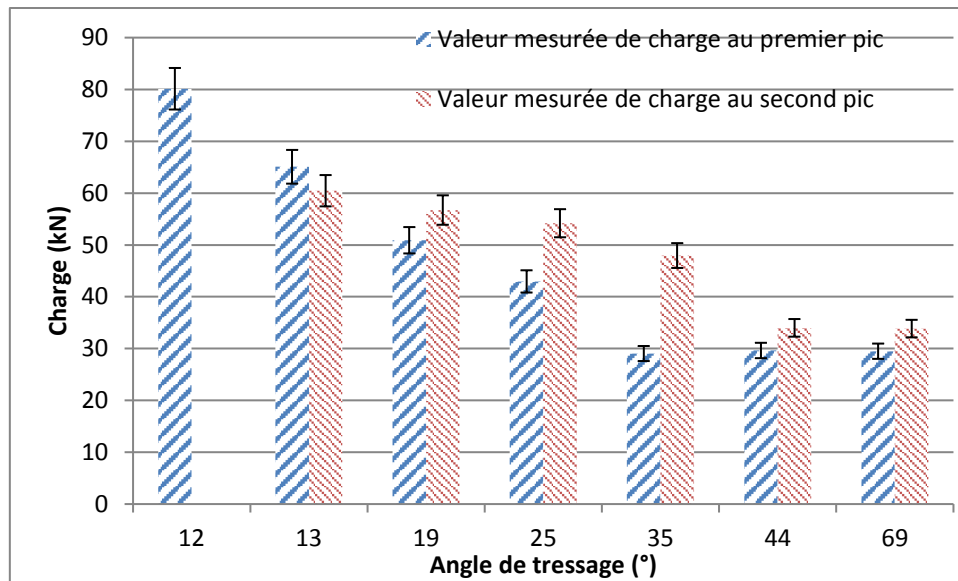


Figure 58 : Charge maximale expérimentale pour différents angles de tressage

Associée à la figure 57, on reporte sur la figure 58 les valeurs expérimentales des efforts maximaux respectivement au premier et au second pic de différentes tresses triaxiales en fonction de leurs angles de tressage. Les valeurs des efforts diminuent avec l'augmentation de l'angle, pour atteindre un palier pour les plus grands angles. L'explication de ce phénomène a été développée dans les sections précédentes.

La prédiction de la charge maximale des tresses par le logiciel Texmind est basée sur l'effort maximal du fil, le nombre de fils contenus dans la tresse, le cosinus de l'angle de tressage.

Cependant, ce moyen de calcul ne correspond pas avec le phénomène de double pic. Une tresse comme celles considérées dans cette étude peut être séparée en deux nappes de fils. Une nappe correspondrait aux fils droits, et la seconde aux fils de biais. Pour des tresses à grands angles de tressage, l'effort maximal au premier pic peut être approximé par l'unique force à la rupture des fils droits. Le second pic correspond à une tresse biaxiale dans laquelle il resterait des fils droits rompus.

La figure 59 présente une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées par le logiciel Texmind. Ce comparatif est proposé pour les 2 pics de charge des différentes tresses produites. La valeur de référence pour le logiciel est la charge à rupture d'un fil unitaire. La simulation de la force maximale supportée par la tresse est faite ainsi :

- Pour les tresses de type 1, cette valeur de charge d'un fil unitaire est multipliée par le nombre de fils composant la tresse.
- Pour les tresses de type 2 et 3, La simulation des deux pics se fait séparément. La valeur de charge du premier pic est considérée comme étant la charge du fil unitaire pondérée par le nombre de fils droits contenus dans la tresse. Pour le second pic, la valeur de charge simulée correspond à la valeur d'un fil unitaire pondérée à la fois par le nombre de fil de biais dans la tresse mais aussi pondérée par le cosinus de l'angle de tressage.

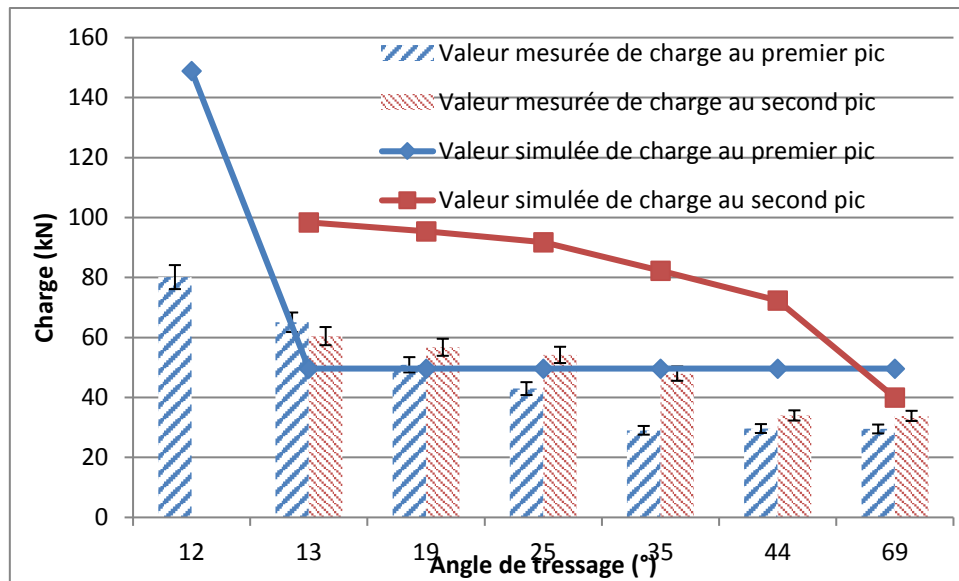


Figure 59 : Visualisation de la différence entre échantillons mesurés et simulés (en termes de force)

Les observations globales (décroissance de la valeur de la charge qui suit l'augmentation de l'angle de tressage) restent valables pour les valeurs données par la simulation. Cependant, des écarts conséquents en termes de valeurs sont notables. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence. Tout d'abord, l'embuage des fils et la dégradation des propriétés mécaniques dues au procédé de tressage ne sont pas pris en compte dans la simulation, et ils ont un réel impact sur les valeurs de charge. Ensuite, les fils droits restants dans la structure après le premier pic de charge ne sont pas pris en compte par le logiciel. Leur influence sur les résultats est avérée mais n'a pas été quantifiée.

## X. Retro-conception

L'analyse du comportement mécanique des tresses a permis la proposition de modèles théoriques permettant de prédire l'évolution de la rigidité des tresses (pentes), d'effort maximal (aux différents pics), mais également sur les caractéristiques en déformation. Ces modèles analytiques autorisent la proposition d'une rétro-conception dont l'objectif est de déterminer les paramètres procédés (à matière considérée constante) menant à la production de la tresse répondant à un cahier des charges défini (charge maximale à atteindre, déformation à la rupture, etc.).

Les paramètres d'entrée de la rétro-conception repose sur des paramètres que l'on sait maîtriser (maîtrise de l'angle de tressage comme montré au chapitre 2-VI).

Le modèle mis en place est défini par un nombre de paramètres, dissociables en trois groupes :

Les paramètres « matériaux », identifiables par des essais sur fil simple :

- L'effort à rupture des fils ;
- La rigidité et la section des fils, (considérés comme constants) ;
- La déformation à la rupture des fils ;

Les paramètres géométriques des tresses, et à identifier à chaque variation de paramètres procédés :

- L'angle de tressage;
- La longueur de la tresse considérée ;

Les paramètres de rupture :

- Type de tresse.

Les modèles de rétro-conception vont suivre le type de tresse considérée. Comme dans ce chapitre, trois types de tresses ont été définis, trois modèles de rétro-conception ont été proposés, répondant chacun à un des types de tresse.

Par ailleurs, cette rétro-conception va se baser sur le modèle énergétique défini dans ce chapitre et sur l'équation (Eq 4.18).

Les énergies dissipées par les tresses dans cette partie seront calculées en mesurant l'aire sous la courbe du début de la traction jusqu'à la déformation atteinte à rupture de la tresse.

Concernant le calcul d'énergie sous la courbe, pour la rétro-conception, et dans une volonté de simplification du modèle, les montées de charge seront considérées comme linéaires et les ruptures comme définitives et totales.

A partir de ces données, la rétro-conception devrait nous donner le comportement global de la tresse, ses déformations à la rupture mais aussi la charge maximale atteinte à la rupture.

#### A. Tresses triaxiales de type 1

Ces tresses ne montrent qu'un seul pic de charge. Dans le cas des tresses triaxiales de type 1, cela signifie que tous les fils rompent en même temps. Pour ce type de tresses, seuls trois points sont nécessaires pour obtenir la courbe de la tresse rétro-conçue. Le premier point est l'origine (effort-déformation nulles). Le deuxième point est représenté par le couple (déformation à rupture, charge maximale). Comme vu précédemment, la déformation à la rupture peut s'exprimer en fonction de la longueur initiale de l'échantillon et de l'angle de tressage. La valeur de charge maximale est calculée par le produit du nombre de fil en section par la charge maximale d'un fil, le tout pondéré par le cosinus de l'angle de tressage initial. Le troisième point représente la rupture totale de la tresse, soit une valeur de charge nulle, et de déformation à rupture. Le résultat (tresse rétro-conçue) est représenté sur la figure 60.

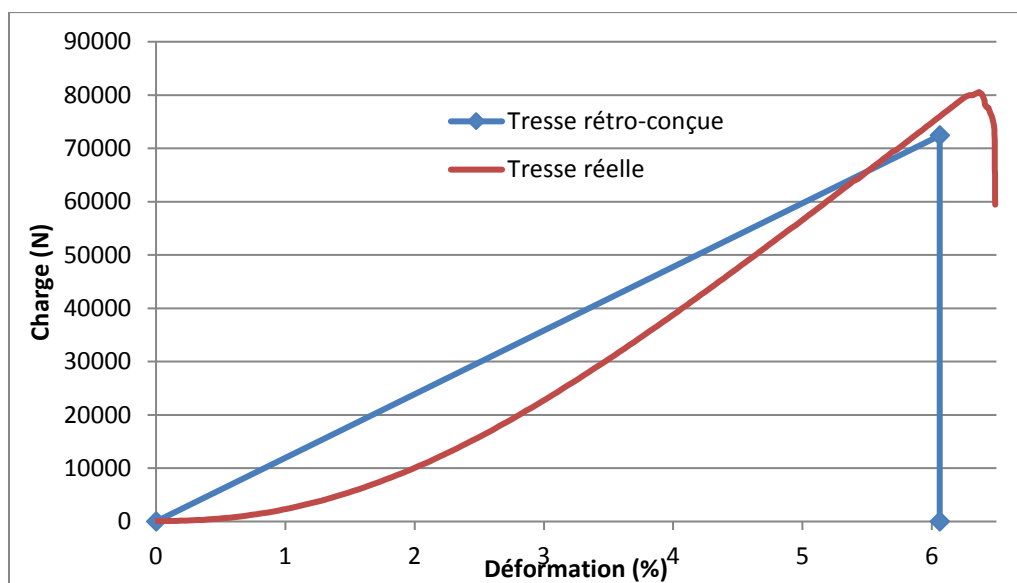


Figure 60 : Courbe de traction d'une tresse rétro-conçue et d'une tresse réelle de type 1



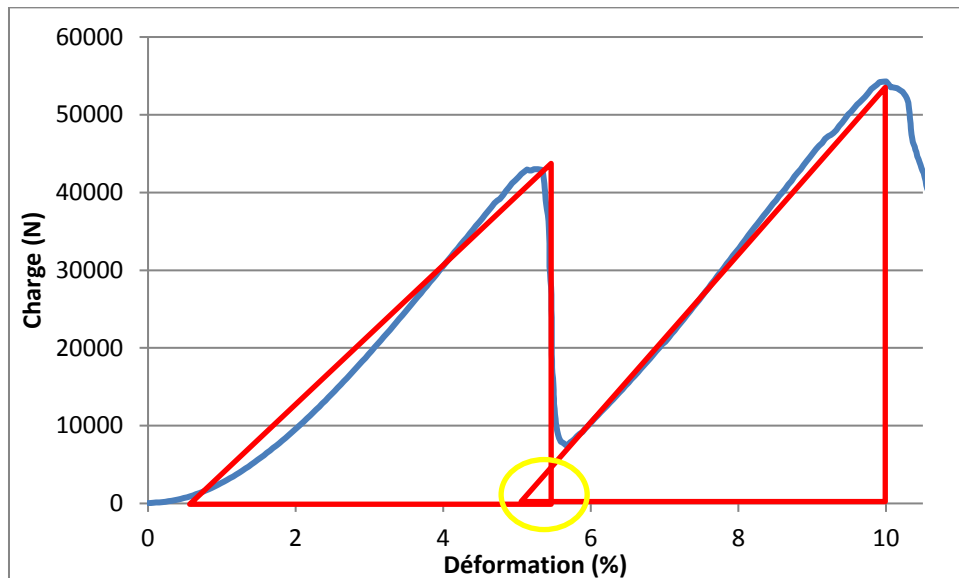
Le tableau 5 résume les principaux points importants pour proposer un modèle théorique d'une tresse triaxiale de type 1.

**Tableau 5 : Rétro-conception d'une tresse de type 1**

Déformation (%)	0	Def <sub>rupture</sub> (Eq 4.1)	Def <sub>rupture</sub> (Eq 4.1)
Charge (N)	0	$= \frac{2 * \text{Energie dissipée}_{tresse}}{\text{Def}_{rupture}}$	0

### B. Tresses triaxiales de type 2

Les tresses triaxiales de type 2 ont la particularité de montrer un profil à double pic lors de l'essai de traction. Cependant, entre le premier et le second pic, l'effort ne redescend pas à zéro. Donc, il y a effectivement dissociation entre la rupture des fils droits et des fils de biais, mais, l'action des fils de biais sur le comportement de la tresse intervient assez tôt pour que son effet soit notable avant la chute suivant le premier pic. La reprise de charge a donc lieu avant que la valeur de la charge atteigne zéro.



**Figure 61: Deux triangles théoriques pouvant composer une tresse de type 2**

Cette courbe de charge peut être approximée par deux triangles sécants, représentés figure 61. La zone de recouvrement entre ces deux triangles ne devant être comptabilisée qu'une fois. De fait, pour obtenir les points nécessaires pour pouvoir tracer la courbe de la tresse rétro-simulée, les coordonnées de ce point (entouré en jaune sur la figure 61) doivent être connues. Il correspond au point d'intersection entre les deux segments représentant la perte de charge après le premier pic et la reprise de charge du deuxième pic. Le résultat de cette rétro-conception est représenté figure 62, et peut-être caractérisé par 5 points.

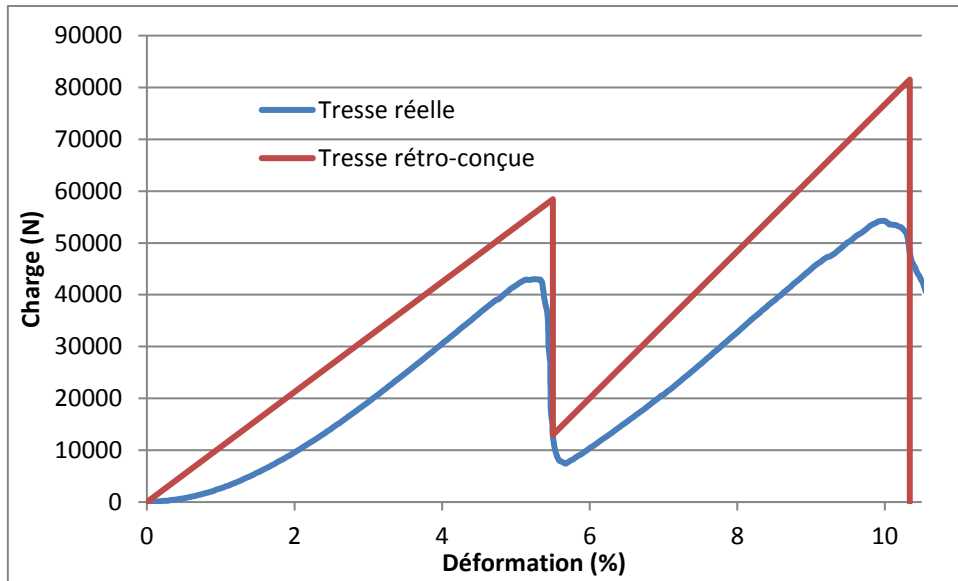


Figure 62 : Courbe de courbe de traction d'une tresse rétro-conçue et d'une tresse réelle de type 2

Le tableau 6 résume les 5 points importants pour proposer un modèle théorique d'une tresse triaxiale de type 2. Le calcul de charge du troisième point de ce modèle fera l'objet de perspectives.

Tableau 6 : Rétro-conception d'une tresse de type 2

Déformation (%)	0	$Def_{fil}$	$Def_{fil}$	$=Def_{rupture}$	$=Def_{rupture}$
Charge (N)	0	$Energie\ dissipée_{tresse} * 2 / Def_{début\ 2nd\ pic}$	<b>A déterminer</b>	$Energie\ dissipée_{tresse} * 2 / (Def_{rupture} - Def_{début\ 2nd\ pic})$	0

### C. Tresses triaxiales de type 3

Les tresses triaxiales de type 3 présentent la double particularité de former un double pic, et de voir leur charge atteindre une valeur nulle après le premier pic. Dans cette configuration, six points sont nécessaires pour pouvoir tracer une tresse simulée. Le premier point sera l'origine de la courbe, le second représentera le sommet du premier pic, le troisième le point où la charge après le premier pic atteint cette valeur nulle, le quatrième, le point où la reprise de charge du second pic devient effective ; le cinquième représentera le sommet du second pic et enfin, le sixième le point où la rupture totale de la tresse est atteinte. La courbe résultante est montrée en figure 63.

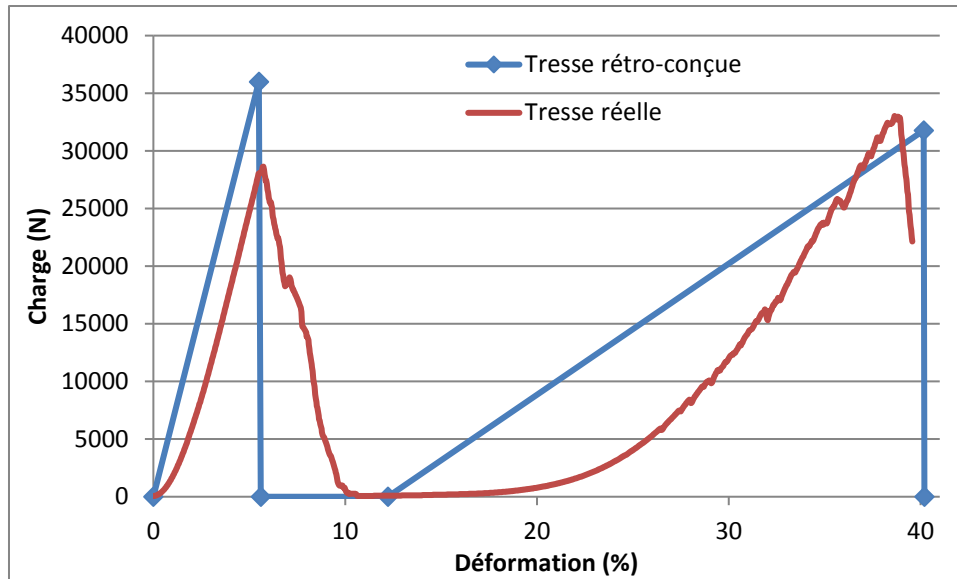


Figure 63 : Courbe de charge de traction d'une tresse rétro-conçue et d'une tresse réelle de type 3

Tableau 7 : Rétro-conception d'une tresse de type 3

Déformation (%)	0	$Def_{fil}$	$Def_{fil}$	$\frac{200}{\cos(\alpha - \alpha_{blocage})} - 200$ * 100	$Def_{rupture}$	$Def_{rupture}$
Charge (N)	0	$\frac{Energie\ dissipée_{tresse} * 2}{Def_{début\ 2nd\ pic}}$	0	0	$\frac{Energie\ dissipée * 2}{(Def_{rupture} - Def_{début\ 2nd\ pic})}$	0

Le modèle de retro-conception est basé sur les données issues du test en traction uniaxiale sur un fil initial. Ce fil ne subit aucun embuvage ou effort de cisaillement ou compression transverse, au contraire des fils présents dans la tresse. Cela explique en partie pourquoi les valeurs permettant de construire les courbes rétro-conçues sont toujours supérieures aux valeurs des courbes réelles. Cette proposition permet de poser les bases d'un modèle issu des données d'un fil simple, qu'il convient d'affiner à l'avenir.

### XI. Conclusions

Ce chapitre consacré à l'analyse mécanique des tresses essaie d'embrasser tous les comportements mécaniques possibles d'une tresse sèche biaxiale ou triaxiale (en Vectran ou Spectra). Après une différenciation entre les tresses biaxiales et triaxiales, issue de leur paramètre d'entrée (nombre de fils), une étude approfondie sur les tresses triaxiales a été menée. Celle-ci a débouchée sur une définition d'un certain nombre de mécanismes comme celui du double pic. Une étude sur les courbes de traction uniaxiale des tresses a permis de mettre en évidence des comportements inhérents aux paramètres d'entrée des tresses. Et en cela, un modèle théorique du comportement des tresses a pu être établi. Pour pousser l'étude plus loin, et se rapprocher du besoin du donneur d'ordre du projet Balloo, détaillé dans le chapitre 5, une analyse en énergie dissipée par les tresses lors d'un test de traction est proposée.

Cette dernière est complétée, dans ses conclusions par une étude de la dissipation thermique des tresses durant le test de traction uniaxiale. Notons que ce comportement thermique, spécifique aux

matières utilisées, est, à la connaissance de l'auteur, peu décrit dans la littérature. De même que le comportement en charge-décharge qui a été étudié. Ces études expérimentales ont permis de classer les tresses, notamment triaxiales, en fonction de leur angle de tressage. Lors de l'analyse du comportement mécanique mais également thermique, l'évolution des quantités, par le biais du suivi de l'évolution des angles a permis de rattacher ces mécanismes d'évolution (de la charge, de la rigidité, de la température) en fonction de ces angles de tressages. Ces notions expérimentales, étudiées dans le cadre de ces travaux, sur les tresses, et en traction, pourraient être étendues à d'autres renforts (tissés, par exemple) mais également au comportement en cisaillement plan.

Enfin, fort de ces résultats, une proposition de rétro-conception est faite. Celle-ci est issue à la fois de la compréhension des phénomènes de déformation à la rupture du fil constituant la tresse mais aussi des modèles énergétiques proposés. La volonté étant de pouvoir prédire le comportement mécanique d'une tresse à partir d'un unique test de traction uniaxiale sur un unique fil composant cette tresse.

Dans le cadre de cette étude, comme dans le chapitre 3, nous avons eu la possibilité de corréler les résultats expérimentaux avec ceux calculés par le logiciel Texmind développé par Yordan Kyosev. Les écarts mis en exergue, permettront, suite à cette collaboration, d'améliorer les calculs prédictifs dans ce logiciel.

Le chapitre 3 axé sur l'analyse géométrique des tresses, et ce chapitre 4 orienté sur l'analyse mécanique de ces dernières, servent de base à la compréhension du comportement global des tresses sèches. Tresses, qui dans le chapitre 5, seront utilisées très spécifiquement dans le cadre de la confection d'un exosquelette visant un allègement des réservoirs tout en conservant la même résistance mécanique.

## Bibliographie du chapitre 4

- [1] P. Taylor, H. Dabiryan, and M. S. Johari, "The Journal of The Textile Institute Analysis of the tensile behavior of tubular braids using energy method , part I : theoretical analysis," *J. Text. Inst.*, no. July, 2015.
- [2] S. Del Rosso, L. Iannucci, and P. T. Curtis, "Experimental investigation of the mechanical properties of dry microbraids and microbraid reinforced polymer composites," *Compos. Struct.*, vol. 125, pp. 509–519, 2015.
- [3] A. Rawal, "Geometrical Modeling of the Yarn Paths in Three-dimensional Braided Structures," *J. Ind. Text.*, vol. 35, no. 2, pp. 115–135, 2005.
- [4] P. Subramani, S. Rana, D. V. Oliveira, R. Figueiro, and J. Xavier, "Development of novel auxetic structures based on braided composites," *Mater. Des.*, vol. 61, pp. 286–295, 2014.
- [5] A. C. Long, "Process modelling for liquid moulding of braided preforms," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 32, no. 7, pp. 941–953, Jul. 2001.
- [6] A. Rawal, H. Saraswat, and A. Sibal, "Tensile response of braided structures: a review," *Text. Res. J.*, vol. 85, no. 19, pp. 2083–2096, 2015.
- [7] B. Dauda, S. O. Oyadiji, and P. Potluri, "Characterising mechanical properties of braided and woven textile composite beams," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 16, no. 1, pp. 15–31, 2009.
- [8] C. Ayranci and J. P. Carey, "Predicting the longitudinal elastic modulus of braided tubular composites using a curved unit-cell geometry," *Compos. Part B Eng.*, vol. 41, no. 3, pp. 229–235, Apr. 2010.
- [9] L. Laberge-Lebel and Suong Van Hoa, "Manufacturing of Braided Thermoplastic Composites with Carbon/Nylon Commingled Fibers," *J. Compos. Mater.*, vol. 41, no. 9, pp. 1101–1121, 2007.
- [10] K. Birkefeld, M. Röder, T. von Reden, M. Bulat, and K. Drechsler, "Characterization of Biaxial and Triaxial Braids: Fiber Architecture and Mechanical Properties," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 19, no. 3–4, pp. 259–273, Feb. 2011.
- [11] G. D. Roberts, J. M. Pereira, M. Braley, W. a Arnold, J. D. Dorer, and W. R. Watson, "Design and Testing of Braided Composite Fan Case Materials and Components," *NASA/TM*, no. October, p. 18, 2009.
- [12] A. Rawal, R. Kumar, and H. Saraswat, "Tensile mechanics of braided sutures," *Text. Res. J.*, vol. 82, no. 16, pp. 1703–1710, 2012.
- [13] Y. Kyosev and M. Aurich, "Investigations about the braiding angle and the cover factor of the braided fabrics using Image Processing and Symbolic Math Toolbox of Matlab," in *Braiding technology : Specialized techniques and applications*, Y. Kyosev, Ed. Woodhead Publishing, 2016.

- [14] C. Ayranci and J. Carey, "2D braided composites: A review for stiffness critical applications," *Compos. Struct.*, vol. 85, no. 1, pp. 43–58, Sep. 2008.
- [15] P. Potluri and A. Manan, "Mechanics of non-orthogonally interlaced textile composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 4, pp. 1216–1226, Apr. 2007.
- [16] W. Kuo, T. Kob, and H. Chena, "Elastic moduli and damage mechanisms 3D braided composites incorporating pultruded rods in," *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, no. 97, 1998.
- [17] Z. X. Tang and R. Postle, "Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials  $\pm$  part I : fabric structure and fibre volume fraction," *Compos. Struct.*, vol. 49, pp. 451–459, 2000.
- [18] L. Castejón, A. Miravete, and J. Cuartero, "Mechanics of Composite Materials and Structures of  $(0^\circ, \pm \alpha^\circ)$  Braided Composites and Its Application In Crashworthiness Simulations," *Mech. Compos. Mater. Struct.*, vol. 8, no. November 2014, pp. 219–229, 2001.
- [19] A. Aggarwal, S. Ramakrishna, and V. K. Ganesh, "Predicting the strength of diamond braided composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 36, no. 05, pp. 625–643, 2002.
- [20] S. C. Quek, A. M. Waas, K. W. Shahwan, and V. Agaram, "Analysis of 2D triaxial flat braided textile composites," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 45, no. 6–7, pp. 1077–1096, Jun. 2003.
- [21] J. S. Tate, A. D. Kelkar, and J. D. Whitcomb, "Effect of braid angle on fatigue performance of biaxial braided composites," *Int. J. Fatigue*, vol. 28, no. 10 SPEC. ISS., pp. 1239–1247, 2006.
- [22] A. K. Pickett and M. R. C. Fouinneteau, "Material characterisation and calibration of a meso-mechanical damage model for braid reinforced composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 2, pp. 368–377, 2006.
- [23] A. K. Pickett, J. Sirtautas, and A. Erber, "Braiding simulation and prediction of mechanical properties," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 16, no. 6, pp. 345–364, 2009.
- [24] F. Schmidt, M. Rheinfurth, P. Horst, and G. Busse, "Effects of local fibre waviness on damage mechanisms and fatigue behaviour of biaxially loaded tube specimens," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 72, no. 10, pp. 1075–1082, 2012.
- [25] G. Fang and J. Liang, "A review of numerical modeling of three-dimensional braided textile composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 45, no. 23, pp. 2415–2436, 2011.
- [26] D. Li, D. Fang, N. Jiang, and Y. Xuefeng, "Finite element modeling of mechanical properties of 3D five-directional rectangular braided composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 42, no. 6, pp. 1373–1385, Sep. 2011.
- [27] P. Qu, X. Guan, Y. Jia, S. Lou, and J. Nie, "Effective elastic properties and stress distribution of 2D biaxial nonorthogonally braided composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 8, pp. 997–1008, 2012.
- [28] C.-L. Hwan, K.-H. Tsai, W.-L. Chen, and S. Sun, "Predicting the elastic moduli of three-dimensional (four-step) braided tubes using a spatial spring model," *J. Compos. Mater.*, vol. 47, no. 8, pp. 991–1000, 2012.

- [29] J. A. Schultz and M. Garnich, "Meso-scale and multicontinuum modeling of a triaxial braided textile composite," *J. Compos. Mater.*, no. March 2012, 2012.
- [30] X. Ji, A. M. Khatri, E. S. Chia, R. K. Cha, B. T. Yeo, S. C. Joshi, and Z. Chen, "Multi-scale simulation and finite-element-assisted computation of elastic properties of braided textile reinforced composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 48, no. 8, pp. 931–949, 2014.
- [31] Z. T. Kier, A. Salvi, G. Theis, A. M. Waas, and K. Shahwan, "Estimating mechanical properties of 2D triaxially braided textile composites based on microstructure properties," *Compos. Part B Eng.*, vol. 68, pp. 288–299, 2015.
- [32] Y. Kyosev, *Braiding Technology for Textiles*. Woodhead Publishing, 2015.

## Chapitre 5 : Utilisation des tresses dans le cadre de l'allègement des réservoirs

<u>Chapitre 5 : Utilisation des tresses dans le cadre de l'allègement des réservoirs</u> .....	216
<u>I. Introduction</u> .....	217
<u>II. Contexte</u> .....	217
<u>III. Bibliographie sur l'impact des hélicoptères et des tests à l'échelle du réservoir</u> .....	218
<u>IV. Application au programme Balloo</u> .....	222
<u>A. Programme Balloo</u> .....	222
<u>B. Technologies d'exosquelette</u> .....	223
<u>C. Réalisation de structures filets par technologie de tressage</u> .....	223
<u>D. Application à l'exosquelette</u> .....	224
<u>V. Essais de drop test</u> .....	225
<u>VI. Conclusions</u> .....	226
<u>VII. Bibliographie</u> .....	228
<u>Conclusions générales et perspectives</u> .....	229



## I. Introduction

L'ensemble de cette étude sur les tresses sèches et leur comportement mécanique a pour but, outre une compréhension plus accrue de leurs réponses mécaniques sous sollicitation de traction, de répondre à un cahier des charges. Ce cahier des charges est directement issu du projet FUI Balloo, labellisé en 2012 dans lequel ces travaux de thèse s'inscrivent. Ce chapitre est dédié aux applications des tresses, dans le cadre de ce projet. La finalité étant de développer un démonstrateur de réservoir souple (dit Réservoir BALLOO) allégé.

Ce chapitre va détailler les liens entre le programme BALLOO, le choix de matériaux s'intégrant dans la conception du réservoir souple, et leur assemblage en vue de satisfaire les spécifications requises pour les réservoirs souples. Spécifications décrites dans la norme MIL-DTL-27422F [1] qui a suppléé la norme MIL-DTL-27422E[2], initialement en vigueur au début du projet.

Dans les constituants du réservoir nous focaliserons sur la notion d'exosquelette développée, qui a pour objectif de reprendre les efforts plus spécifiquement lors l'essai dit de « Drop-tests », un des tests spécifiques de la norme. Les solutions matériaux et les architectures textiles retenues pour la fabrication de cet exosquelette seront présentées.

Ce chapitre sera aussi dédié aux premiers essais conduits à échelle réduite de ce démonstrateur, sur des vessies assemblées permettant de justifier la présence de l'exosquelette.

## II. Contexte

Le prix de l'énergie étant croissant, le secteur aéronautique investit depuis de nombreuses années dans l'allègement des appareils. Le réservoir est une des composantes essentielles pour les aéronefs (hélicoptères, drones, avions sans pilote), concernée par l'allègement. Les enjeux sont de diminuer le poids du réservoir, de pouvoir augmenter les distances parcourues avec la même quantité d'énergie ou d'avoir la possibilité de transporter des passagers supplémentaires.

La réduction du coût de production des réservoirs sera aussi un critère prépondérant dans le choix de la solution à retenir.

La société PRONAL, initiateur du projet BALLOO est une PME industrielle qui, depuis près de 50 ans, apporte et renouvelle sans cesse, ses compétences dans le domaine des structures flexibles et/ou gonflables - Elastomère / Plastomère / Composites. La société PRONAL propose une gamme de produits qui s'étend des réservoirs souples de stockage, de transport, vérins souples, coussins de levage, obturateurs de canalisation, préhenseurs, compensateurs, coussins de relevage d'avion et multiples produits fabriqués sur mesure. Aujourd'hui, plus de 3000 clients internationaux font confiance à la société PRONAL pour être acteur au sein de Projets d'Etude dans des domaines aussi diversifiés que le militaire, l'aéronautique, l'offshore, l'industrie mécanique/hydraulique, le nucléaire, l'environnement.

L'entreprise PRONAL est reconnue pour son savoir-faire et la qualité de ses réservoirs en forme. Le procédé propre à PRONAL leur permet de proposer une homogénéité parfaite du réservoir. Fort de ce savoir-faire, PRONAL souhaite poursuivre l'innovation engagée depuis plus de dix années en s'appuyant sur des partenaires possédant toutes les compétences complémentaires afin de mettre en œuvre un réservoir optimisé possédant les propriétés suivantes :

- auto-obturant (au sens d'antibalistique),
- anti-crash,

- allégé en poids.

Les enjeux importants ont orienté la société PRONAL vers le montage d'un projet collaboratif, lui permettant ainsi d'associer tous les acteurs de la chaîne de fabrication, les donneurs d'ordre et les partenaires de recherche pour aboutir à la mise au point d'un réservoir allégé et multifonctionnel. A l'issue de ce projet, la Société PRONAL possédera une avance technologique forte sur ses concurrents et engendrera de nouvelles compétences numériques et la maîtrise accrue de nouveaux matériaux et technologies.

L'objectif premier du projet BALLOO est de concevoir un démonstrateur de réservoir souple plus performant vis à vis du phénomène de crash au regard du test 4.5.6.2 (Crash Impact test) de la norme MIL-DTL-27422E [2], ainsi que du phénomène d'auto-obturation suite à un impact balistique au regard du test 4.5.6.4.2 (Low Temperature Gunfire resistance test) de cette même norme.

Pour se faire, l'amélioration de la compréhension globale des phénomènes dynamiques mis en jeu, second objectif du projet, permettra la proposition de matériaux, de procédés d'élaboration et d'assemblage innovants. Cela afin de permettre la réalisation d'un démonstrateur de réservoir souple amélioré par rapport à l'état de l'art PRONAL, et ce vis-à-vis de spécifications de tenue au crash et à l'impact balistique directement issues ou inspirées de la norme, et de critères de performances généraux (masse, coût, etc).

Enfin, la réduction des coûts de développement (incluant le nombre de prototypes, aux échelles matériau et réservoir) sera réalisée par un développement de méthodologies de simulation numérique. Ces dernières permettront l'établissement de diagnostics structuraux virtuels des nouvelles solutions proposées, relativement à la norme en vigueur.

Le produit final doit répondre à des besoins bien spécifiques, exprimés par un certain nombre de critères qu'il convient de respecter :

- Contenir plus de carburant pour le même emplacement dans l'aéronef ;
- Résister aux crashes, conserver son étanchéité après impact au sol ;
- Être auto obturant, préserver une quantité suffisante de carburant dans le réservoir pour permettre le fonctionnement de l'appareil après impact ;
- Être plus léger à vide que la solution actuellement en service
- Être confectionné dans un matériau souple, ce qui facilite la mise en œuvre dans des espaces confinés (caisson)
- Être en accord avec les différentes normes européennes et américaines concernant les réservoirs souples de carburant.
- Pouvoir contenir des Bio carburants

En sus de ces objectifs, il est nécessaire de satisfaire les critères définis par la norme MIL-DTL-27422E.

### III. Bibliographie sur l'impact des hélicoptères et des tests à l'échelle du réservoir

L'impact au sol d'un hélicoptère lors d'un crash représente une vraie menace pour la sécurité des passagers. Cette situation est encore plus critique quand l'intégrité du réservoir d'essence est menacée. Lors d'un crash d'hélicoptère, une grande déformation de la structure est possible et cela

peut générer d'importants dommages sur le réservoir. A cause du contenu de ce dernier, il est nécessaire de prévenir ce possible endommagement. Actuellement, la perforation des réservoirs et l'épanchement du carburant dans l'habitacle sont des raisons de sur-accident. En effet, selon les derniers rapports d'incidents émis par les différentes instances de sécurité dont dépendent les aéronefs de type hélicoptère, la seconde cause de mortalité (après l'impact) chez les occupants d'un hélicoptère en vol qui atterrit de façon non conventionnelle est le sur accident créé par l'inflammation du carburant après son épanchement dans la structure[3]. De fait, depuis la prise en compte de ce phénomène, des améliorations constantes sur les réservoirs ont été effectuées pour accroître la sécurité de ces derniers. Cette problématique est analysée dans la littérature et est rendue compte par des essais, à ces échelles d'impact d'hélicoptère, sur des bancs dédiés (Figure 1).

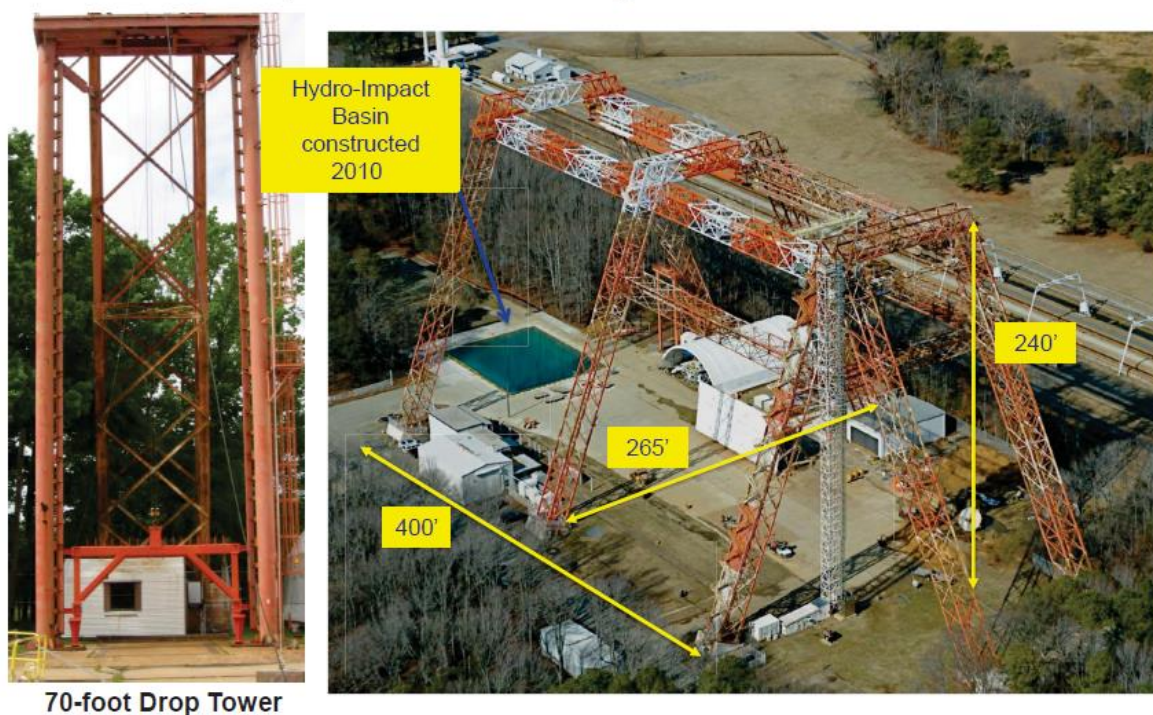


Figure 1 : Site d'essai de crash (NASA) [4]

Ces essais permettent de focaliser sur les dommages générés spécifiquement sur les réservoirs suite au Crash. (Figure 2). La remise à niveau des standards (à l'impact) qui n'avaient pas évolué depuis les années 1970[5], ont conduit à l'élaboration de normes et par conséquent de réservoirs résistant au Crash qui ont éliminé en majeure partie les décès et blessures graves dues à la fuite du carburant [6].



Figure 2 : Positionnement du réservoir d'hélicoptère [7]

Par conséquent des études se sont focalisées sur les niveaux de performance décrits dans les normes [1, 2] et à satisfaire pour la conception de ces réservoirs. Ces performances sont évaluées sur plusieurs critères. Outre la capacité d'auto-obturation du réservoir lors d'un tir balistique, une résistance au crash est requise, et est vérifiée par un test dit de « Drop-Test ». Dans ce test, le réservoir, plein, est lâché en chute libre depuis une hauteur donnée et impacte le sol. L'intégrité (critère de non fuite) du réservoir doit être préservée.

Quelques rares études décrivent des démarches expérimentales. Ainsi Kim et al. [7], figure 3, rapporte des essais menés en site propre en vue du développement de modèles de simulation, mais la constitution du réservoir (notamment le nombre de couches) n'est pas détaillée dans cette publication.



Figure 3 : Illustration d'un drop test [7]

Anghileri et al. [3], [8], fait état de test d'impact de type Drop-test de caissons métalliques entourant une vessie souple de silicone faisant office de réservoir.

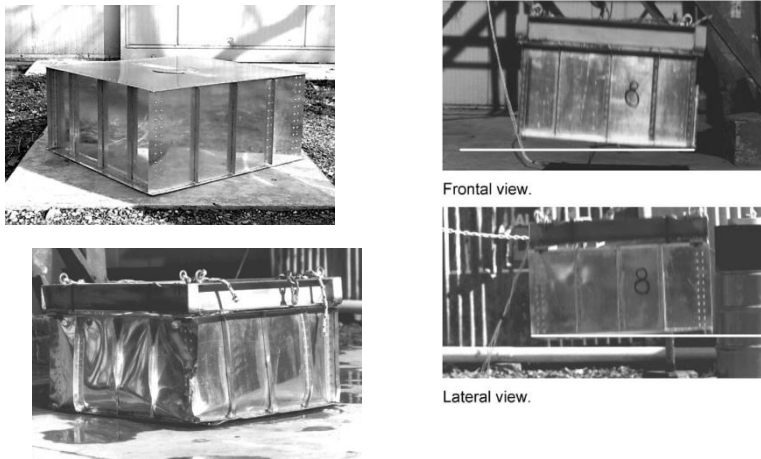


Figure 4 : Caisson métallique de protection avant et après impact [10]

Notons l'étude [10], figure 4, focalisée sur l'interaction fluide-structure et la prise en compte du ballonnement du fluide dans le réservoir pour la modélisation par éléments finis.

Les études conduites par K. Heater all. [9], restent les plus descriptives de ces travaux expérimentaux notamment sur la notion de réservoirs renforcés par un exosquelette (figure 5)

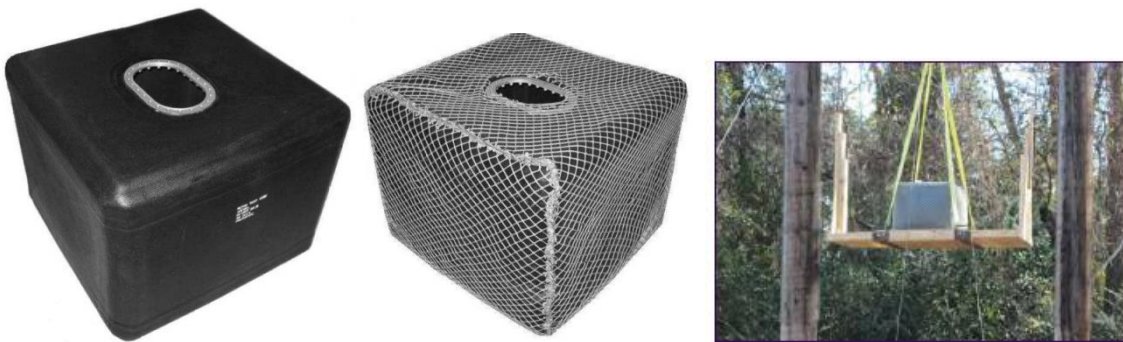


Figure 5 : Réservoirs sans et avec exosquelette. Plate-forme du Drop-test [9]

Dans ces études des réservoirs souples renforcés ou non ont été assujettis au Drop-test (figure 5). La figure 6.a représente l'impact du réservoir, sans exosquelette et qui conduit à la fuite du fluide, la figure 6.b avec exosquelette mais avec des jonctions qualifiées de faible. Enfin la figure 6.c montre qu'un réservoir muni de l'exosquelette et des jonctions optimisées garde son intégrité après l'impact.



Figure 6 : Résultats après Impact. a) sans exosquelette, b) avec exosquelette, c) avec exosquelette et jonctions entre les faces optimisées [9]

Cette notion d'exosquelette qui permet d'assurer l'intégrité du réservoir à l'impact est reprise dans le cadre du programme BALLOO. En parallèle de ces études expérimentales, et vu la complexité de ces essais, de très nombreux travaux [7], [10]–[14] abordent le Drop-test par le biais de la simulation numérique. Ces aspects seront brièvement abordés, par le biais des travaux de la société ALTAIR dans le work-package dédié à la simulation dans le programme BALLOO.

## IV. Application au programme Balloo

### A. Programme Balloo

Les objectifs du programme BALLOO relèvent de l'élaboration de réservoirs souples pour avions intégrant les besoins suivants :

- Réservoirs allégés à durée de vie augmentée, multifonctionnels,
- Réduire le coût de production des réservoirs,
- Maîtriser les technologies par rapport à l'impact environnemental.

Et s'intégrant dans le cadre fixé de la norme MIL-DTL-27422F.

Afin de diminuer la masse des réservoirs, l'idée consiste à minimiser le nombre de couches de textiles enduits empilées sur les parois externes et de les remplacer par un exosquelette qui reprendra les efforts mécaniques. Ce dernier est une structure textile garantissant une iso-performance du réservoir notamment lors de la spécification au Drop-test (lâcher en chute libre à 20 m de hauteur selon la norme).

Cette notion d'exosquelette est illustrée (figure 7) dans la littérature notamment dans deux publications de références [9], [10].



Figure 7 : Réservoir souple avec et sans exosquelette

La constitution de cet exosquelette (nature des fibres, architecture textile, assemblage) n'est pas détaillée dans ces publications. L'objectif du programme est de mettre en œuvre cet exosquelette textile autour du réservoir afin d'une part que celui-ci puisse absorber l'énergie dissipée lors du Drop-test, mais également reprendre une partie des efforts des couches de textiles enduits afin de diminuer le nombre de ces couches.

### B. Technologies d'exosquelette

Dans ce paragraphe, une revue comparative des différents procédés textiles envisageables pour la réalisation de l'exosquelette a été effectuée. En accord avec les compétences du partenaire ENSAIT une solution a été retenue par tressage sur le métier à tresser de l'ENSAIT.

### C. Réalisation de structures filets par technologie de tressage

#### 1. Matière

Les matières utilisées pour la réalisation de structures filet doivent répondre à un certain nombre de spécification. Notamment, au niveau des températures d'utilisation ou encore du prix des matières. Trois matières ont été retenues, et sont confidentielles.

En plus d'autoriser des rayons de courbure très importants, ces matières présentent un module d'Young élevé, tout en restant dans des gammes de prix raisonnables.

De ces choix concernant les matières, différentes structures, issues de technologies textiles, peuvent répondre au besoin de production d'une structure type filet.

#### 2. Structures textiles

Pour le tressage, le chapitre 2 propose une large présentation de cette technologie.

Parmi les technologies textiles, le tressage, contrairement au tissage, permet d'élaborer des structures avec des directions de renforts entrelacés pas forcément à 90°. Les tresses sont par conséquent caractérisées par leur angle de tressage, défini comme l'angle entre la direction de production et les fils de biais. La gamme d'angle d'entrelacement des fils varie entre 10° et 170°, i.e. un angle de tressage entre 5° et 85°. Comparativement aux structures tissées, cette variation importante d'angle confère aux tresses une capacité de déformabilité plus importante. De plus, un

troisième ensemble de fils peut être inséré suivant l'axe de tressage pour obtenir une tresse dite triaxiale. La figure 8 illustre ces deux types de tresses.

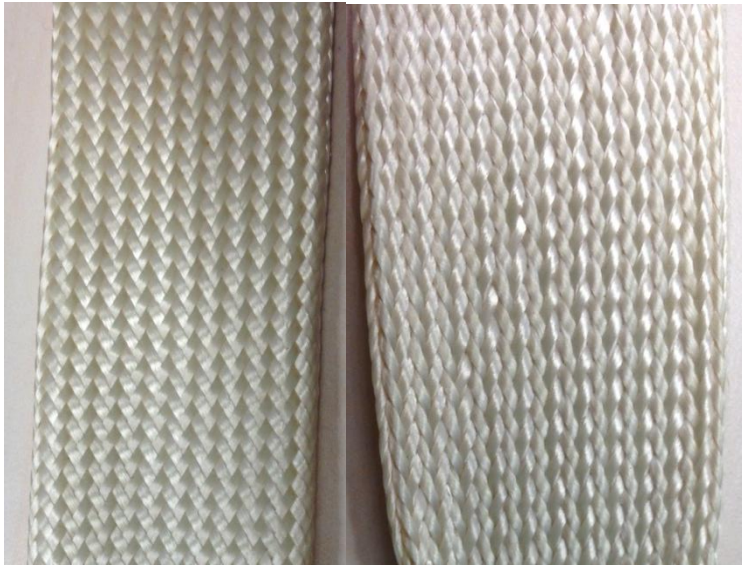


Figure 8 : Tresses biaxiales et triaxiales

Les tresses, qui ont été produites pour cette étude (figure 8), sont circulaires et dont les propriétés mécaniques ont été discutées dans le chapitre 4. L'application des tresses aux structures filets passe par un enroulement des tresses autour du réservoir. Ce principe sera développé dans la suite de ce chapitre.

#### D. Application à l'exosquelette

L'élaboration et la caractérisation des différents échantillons de tresses ont montré que plusieurs paramètres influent sur le comportement mécanique : la matière utilisée, le type de tresses (biaxiale ou triaxiale), l'angle de tressage, mais également le nombre de fils utilisés. Par ailleurs comme synthétisé précédemment le comportement est caractérisé par des pentes, des efforts et des déformations. Afin de pouvoir sélectionner les architectures les plus performantes pour l'exosquelette, un critère en énergie a été adopté. Des courbes d'énergie dissipée, deux facteurs sont à mettre en lumière. Le premier est évidemment l'énergie totale dissipée par l'échantillon. Et le second est l'évolution de cette dissipation d'énergie. Durant le test du drop test, le réservoir souple stocke une quantité d'énergie qui doit être contrôlée pendant l'impact au sol si la rupture de ce dernier veut être évitée. En réalité, l'énergie dissipée est ainsi un bon indicateur de performance des échantillons produits.

A partir des courbes de traction uniaxiale, comme présenté au chapitre 4, l'énergie absorbée est calculée.

Ce critère énergétique permet ainsi de comparer les différentes structures et ainsi recentrer sur les architectures les plus absorbantes en termes d'énergie. Un exemple illustre cette démarche en figure 9.



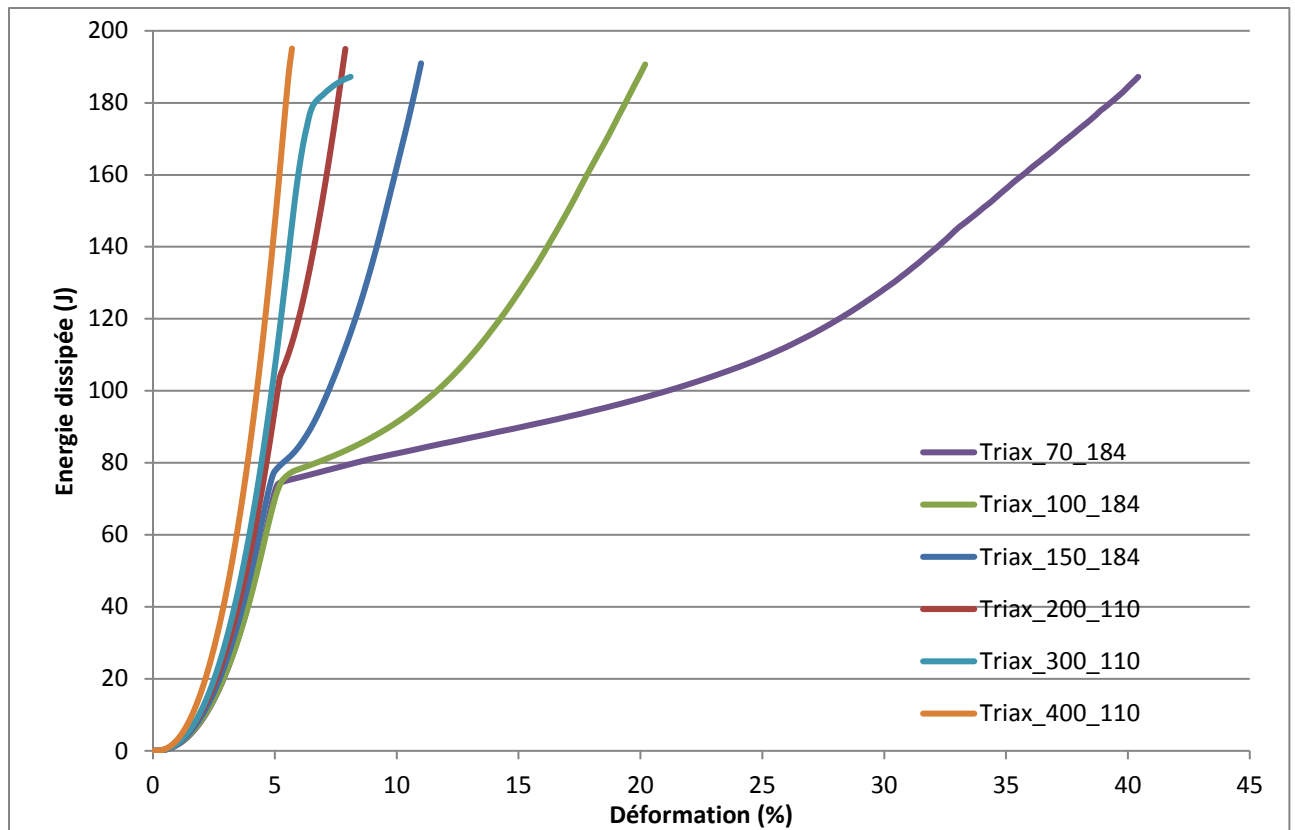


Figure 9 : Critère énergétique. Comparaison des structures tressées

Deux types d'évolutions de courbes ont été détaillés dans le chapitre 4. Pour les tresses qui présentent un angle de tressage faible, la dissipation d'énergie est rapide, et atteint rapidement son maximum. Au contraire, pour les courbes associées aux tresses à angle de tressage élevé, on peut distinguer l'apparition d'un palier. Ce palier vient séparer la courbe en deux, une première partie qui correspond à la dissipation d'énergie par les fils droits, l'inflexion de la courbe représente alors la réorganisation des fils de biais restant dans la tresse. Puis la reprise de la pente représente l'énergie qui va être dissipée par les fils de biais et la structure restante.

Comme énoncé dans le chapitre 4, les tresses triaxiales dissipent plus d'énergie que les tresses biaxiales, dû au nombre de fils en section plus important. L'angle de tressage a également une influence sur l'évolution de l'énergie. Les tresses ayant un angle de tressage autour de  $20^\circ$  présentent une dissipation d'énergie la plus à même de répondre au cahier des charges du projet. Ce seront donc ces tresses-là qui seront choisies pour les essais de drop test.

Pour un respect de la masse cible énoncée dans le cahier des charges, les tresses composées de 144 fils sont choisies.

## V. Essais de drop test

La conception de ce réservoir innovant se doit d'être performant notamment vis à vis du phénomène de crash au regard du test 4.7.18.1 (Crash impact test with rotary wing type aircraft) de la norme MIL-DTL-27422F.

Un largage dans une configuration d'ensemble de sangles paraît plus simple à mettre en œuvre qu'une plateforme guidée,[9][12]. L'option du filet de sangle comme représenté figure 10 (issue de la norme de la MIL-DTL-27422E) est retenue. Notons que la géométrie des sangles utilisées permet de

garantir que ces dernières n'ont aucun effet sur le résultat du test. Les dimensions imposées à ces sangles de largage permettent une déformation du réservoir sans le contraindre.

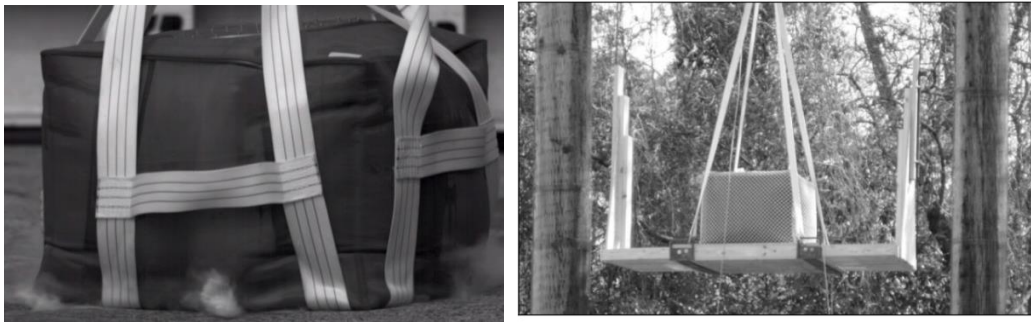


Figure 10 : Filet de sangle pour respecter l'horizontalité à l'atterrissage lors du Drop-test

Dans le cadre du programme support de cette étude, le comportement mécanique est identifié pour être intégré comme modèle de comportement afin de simuler le test de lâcher. Dans un premier temps, les courbes de comportement des tresses sèches ont été implémentées dans le logiciel d'analyse par éléments finis RADIOSS. Le modèle de simulation s'appuie le renforcement du réservoir souple [9]. Ce maillage peut être considéré comme un assemble de brins en + ou - 45°. Le maillage de cette structure est visible en figure 11. Des essais de lâcher ont été réalisés numériquement[15].

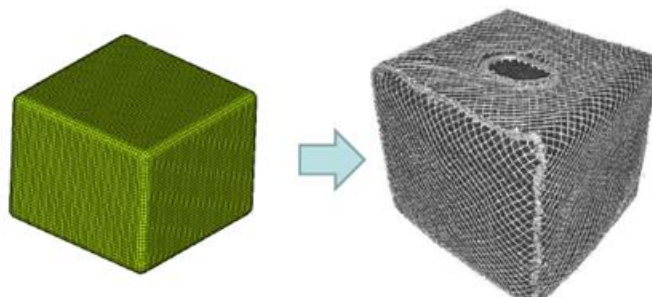


Figure 11 : Maillage du modèle numérique. Vue du réservoir renforcé [15]

## VI. Conclusions

Dans ce chapitre, la démarche d'assemblage des architectures textiles entrant en jeu dans la conception de l'exosquelette du réservoir Balloo a été présentée. Les essais de caractérisation permettant de sélectionner les structures les plus optimales relativement au cahier des charges établi, ont été détaillés, notamment au niveau des capacités de dissipation d'énergie.

En vue de cela, le développement de modèles analytiques capable de prédire le comportement mécanique prenant en compte la matière utilisée, l'angle de tressage, le nombre de fils a paru comme intéressant pour effectuer une sorte de rétro-conception, avec une évaluation directe en

fonction du niveau d'énergie à dissiper, de la matière à utiliser et de la géométrie de production à mettre en œuvre.

Dans ce chapitre 5, l'essai de Drop-test a été présenté, d'une part relativement à la littérature et aux normes associées mais également par le protocole élaboré dans le consortium BALLOO. Les premiers essais à échelle réduite ont permis de confirmer l'intérêt de la piste d'une architecture textile en tant qu'exosquelette. Ces essais à échelle réduite vont être poursuivis pour optimiser ces architectures ainsi que les phases d'assemblages entre le réservoir et cet exosquelette.

Un travail futur sur l'auto obturant et sur les couches d'enduction élastomère va être mené par le consortium et constitueront une nouvelle base de travail pour l'élaboration d'un exosquelette final parfaitement optimisé pour cette application de drop test comme stipulé par la norme MIL-DTL-27422F. Ce travail d'optimisation va concerner à la fois les couches internes de textile enduit, la couche d'auto-obturant, mais aussi l'exosquelette.

## VII. Bibliographie

- [1] D. of Defense, "MIL-DTL-27422F," no. June, pp. 1–16, 2014.
- [2] "MIL-DTL-27422E," pp. 1–44, 2007.
- [3] M. Anghileri, "Assessment of a crashworthy fuel tank finite element model for ground impact analysis.pdf," *Am. Helicopter Soc.*, 2008.
- [4] M. Annett, "Full-Scale Crash Testing of Transport Rotorcraft," no. October, 2012.
- [5] M. Couch and D. Lindell, "Study on Rotorcraft Safety and Survivability," *Am. Helicopter Soc.*, no. May, pp. 10–13, 2010.
- [6] L. Labun, "A study of rotary-wing crashes to support new crashworthiness criteria," in *AHS Forum 66*, 2010.
- [7] H.-G. Kim and S. Kim, "Numerical simulation of crash impact test for fuel cell group of rotorcraft," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 19, no. 6, pp. 639–652, 2014.
- [8] M. Anghileri, L.-M. L. Castelletti, E. Francesconi, A. Milanese, and M. Pittofrati, "Rigid body water impact—experimental tests and numerical simulations using the SPH method," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38, no. 4, pp. 141–151, Apr. 2011.
- [9] K. Heater and B. Pilati, "Lightweight , High Performance Aircraft Fuel Bladders," *Am. helicopter Soc.*, 2010.
- [10] M. Anghileri, L.-M. L. Castelletti, and M. Tirelli, "Fluid–structure interaction of water filled tanks during the impact with the ground," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 31, no. 3, pp. 235–254, Mar. 2005.
- [11] C. Luo, H. Liu, J. Yang, and K. Liu, "Simulation and Analysis of Crashworthiness of Fuel Tank for Helicopters," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 20, no. 3, pp. 230–235, Jun. 2007.
- [12] M. R. Smith, "Rotorcraft fuel system drop test simulation methodology," pp. 1–11, 2009.
- [13] P. Ding, A. J. Buijk, and W. A. Van der Veen, "Simulation of Fuel Tank Filling using a Multi-material Euler Solver with Multiple Adaptive Domains Reprinted From : Computational Fluid Dynamics," no. 724, 2005.
- [14] W. A. Van der Veen, "Crushing Simulation of a Partially Filled Fuel Tank beyond failure," no. 724, 2005.
- [15] B. Duchamp, D. Soulat, X. Legrand, J. Pedro, and B. Ramirez, "Contribution à l'élaboration de préformes textiles pour le renforcement de réservoirs souples," in *JNC 19*, 2015, pp. 1–8.

## Conclusions générales et perspectives

Dans le contexte actuel d'allègement des structures dans le domaine des transports, les matériaux textiles, traditionnellement réservés en tant que renforts à des applications à haute valeur ajoutée tendent aujourd'hui à se généraliser à différents secteurs. Dans cette optique, on assiste aujourd'hui à l'émergence de matériaux composites souples produits avec des contraintes fortes en termes de coûts et de respect des normes en vigueur.

Ces travaux de thèse, financés dans le cadre du programme FUI Balloo, ont justement pour finalité le développement de structures textiles pour le domaine des réservoirs souples. Si de nombreux travaux de thèses portent sur les renforts tissés, l'élaboration, la caractérisation et l'utilisation de structures tressées, objet de ce manuscrit, sont beaucoup moins décrits

Le chapitre 1 a permis de voir que les structures 2D ou les structures 3D, qu'elles soient produites en « one-shot » ou issues d'un assemblage de structures 2D, présentent des propriétés mécaniques et géométriques très diverses. Une présentation des différentes technologies permettant de mettre en forme ces structures a été proposée. La présentation de ces différents procédés a permis d'introduire une description plus complète du procédé de tressage, et des différentes matières utilisées dans le cadre de ces travaux. Ce chapitre 1 à visée introductive et bibliographique a permis de définir le cadre des recherches au niveau procédé et propriétés des structures tressées.

Dans le chapitre 2, une analyse fonctionnelle du procédé de tressage a permis de détailler les différentes parties de la tresseuse utilisée dans cette étude. Les paramètres influant sur les propriétés des tresses ont été discutés. Ce chapitre a permis de mettre en évidence les paramètres procédés influant sur la géométrie finale de la préforme, et ce en fonction de l'échelle considérée. Pour essayer de quantifier les modifications qu'induiraient ces paramètres sur la tresse, une analyse géométrique théorique de la structure tresse dépendant de ces paramètres a été proposée. Les critères importants pour la différenciation des structures produites ont été mis en avant. La nécessité de maîtriser les paramètres du procédé vis-à-vis des résultats sur tresse produite s'avère primordiale. Les protocoles de caractérisation, qui ont servi à identifier les propriétés ont été présentés. Ces protocoles de caractérisation concernent aussi bien des caractéristiques géométriques que mécaniques ou thermiques.

Dans le chapitre 3, les préformes produites sont issues des observations du chapitre 2 sur la relation paramètres machine-produit fini. Ces préformes ont été gardées sèches, configuration qui n'est que très rarement étudiée dans la littérature où il est préféré l'exploitation des propriétés des tresses dans des matériaux composites. Les propriétés mécaniques et géométriques de ces derniers dépendent de celles de la préforme sèches, un travail de caractérisation est donc nécessaire voire essentiel pour poursuivre l'étude au niveau d'un matériau fini composite. Une analyse des masses linéiques des tresses produites a été présentée dans ce chapitre. En lien, évidemment avec l'angle de tressage. De ces mesures les différentes configurations de tresses produites ont permis l'élaboration d'un modèle prédictif du calcul de la masse linéique des tresses. Cela a aussi mis en exergue une certaine différence entre les résultats expérimentaux et ceux théoriques. La raison réside dans les hypothèses admises dans le modèle théorique, notamment en ce qui concerne la géométrie de la section des fils. De fait, dans un second temps une analyse de la morphologie des fils au niveau microscopique a été présentée. La notion d'embuage et surtout les valeurs associées ont pu être quantifiées de cette analyse. Enfin, la caractérisation des différents échantillons de tresses sèches a permis de mettre en lumière des relations entre les paramètres procédés et les paramètres préformes et ce à différentes échelles. De même que des influences ont été définies (par exemple, la dépendance de certains paramètres géométriques à l'angle de tressage), une caractérisation des

## Conclusions générales et perspectives

différents paramètres géométriques dépendant d'actions nécessitant une intervention manuelle (découpage, mesures in situ) ont permis de quantifier avec une certaine (mais relative à ces interventions manuelles) précision des valeurs géométriques nous permettant une analyse des préformes produites. Une proposition d'analyse des sections transverses des multi-filaments à différentes étapes du procédé de tressage a permis d'obtenir les données utiles à une future modélisation géométrique.

Le chapitre 4 a été consacré à l'analyse mécanique des tresses en traction uniaxiale et couvre tous les types de tresses réalisés. Les mécanismes du comportement pour les tresses biaxiales et triaxiales, ont été analysés et plus spécifiquement pour les tresses triaxiales avec le phénomène de double pic. Une étude sur les courbes de traction uniaxiale des tresses a permis de mettre en évidence des comportements inhérents aux paramètres d'entrée des tresses. Et en cela, un modèle théorique du comportement des tresses a pu être établi. Ce dernier est complété, dans ses conclusions par une étude de la dissipation thermique des tresses durant le test de traction uniaxiale. Notons que ce comportement thermique, spécifique aux matières utilisées, est, à la connaissance de l'auteur, peu décrit dans la littérature. De même pour le comportement en charge-décharge qui a été étudié. Ces études expérimentales ont permis de classer les tresses, notamment triaxiales, en fonction de leur angle de tressage. Lors de l'analyse du comportement mécanique mais également thermique, l'évolution des quantités, par le biais du suivi de l'évolution des angles a permis de rattacher ces mécanismes d'évolution (de la charge, de la rigidité, de la température) en fonction de ces angles de tressages. Ces notions expérimentales, étudiées dans le cadre de ces travaux, sur les tresses, et en traction, pourraient être étendues à d'autres renforts (tissés, par exemple) mais également au comportement en cisaillement plan. Enfin, fort de ces résultats, une proposition de rétro-conception est faite. Celle-ci est issue à la fois de la compréhension des phénomènes de déformation à la rupture du fil constituant la tresse mais aussi des modèles énergétiques proposés. La volonté étant de pouvoir prédire le comportement mécanique d'une tresse à partir d'un unique test de traction uniaxiale sur un unique fil composant cette tresse.

Dans le cadre de cette étude, comme dans le chapitre 3, nous avons eu la possibilité de corrélérer les résultats expérimentaux avec ceux calculés par le logiciel Texmind développé par Yordan Kyosev. Les écarts mis en exergue, permettront, suite à cette collaboration, d'améliorer les calculs prédictifs dans ce logiciel.

Le chapitre 3 axé sur l'analyse géométrique des tresses, et ce chapitre 4 orienté sur l'analyse mécanique de ces dernières, servent de base à la compréhension du comportement global des tresses sèches. Tresses, qui dans le chapitre 5, ont été utilisées très spécifiquement dans le cadre de la confection d'un exosquelette visant un allègement des réservoirs tout en conservant la même résistance mécanique. Dans ce chapitre, la démarche d'assemblage des architectures textiles entrant en jeu dans la conception de l'exosquelette du réservoir Balloo a été présentée. Les essais de caractérisation permettant de sélectionner les structures les plus optimales relativement au cahier des charges établi, ont été détaillés, notamment au niveau des capacités de dissipation d'énergie. Associés à ces tests de drop test, les vidéos en caméra rapide et les différents types d'exosquelette testés vont servir de données d'entrée pour une future simulation numérique du test de chute. Là encore, l'accent sera porté sur la capacité de l'exosquelette à dissiper l'énergie emmagasinée par le réservoir lors de sa chute. Une optimisation de cet exosquelette en fonction des niveaux d'énergie à dissiper est également prévue. Effectivement, les premières tresses posées sur le réservoir sont normalement suffisantes pour absorber toute l'énergie à dissiper. En perspective pour cette partie drop test, l'étude de l'interaction des différents constituants du réservoir dans cette évolution de l'énergie reste à faire. La part de chaque constituant n'étant pas la seule à être significative dans le

## Conclusions générales et perspectives

résultat final (les interactions inter-couches sont encore à évaluer), un travail d'optimisation structurelle est à mener. En vue de cela, le développement de modèles analytiques capable de prédire le comportement mécanique prenant en compte la matière utilisée, l'angle de tressage, le nombre de fils a paru comme intéressant pour effectuer une sorte de rétro-conception, avec une évaluation directe en fonction du niveau d'énergie à dissiper, de la matière à utiliser et de la géométrie de production à mettre en œuvre. Dans ce chapitre 5, l'essai de Drop-test a été présenté, d'une part relativement à la littérature et aux normes associées mais également par le protocole élaboré dans le consortium BALLOO. Les premiers essais à échelle réduite ont permis de confirmer l'intérêt de la piste d'une architecture textile en tant qu'exosquelette. Ces essais à échelle réduite vont être poursuivis pour optimiser ces architectures ainsi que les phases d'assemblages entre le réservoir et cet exosquelette.

Un travail futur sur l'auto obturant et sur les couches d'enduction élastomère va être mené par le consortium et constitueront une nouvelle base de travail pour l'élaboration d'un exosquelette final parfaitement optimisé pour cette application de drop test comme stipulé par la norme MIL-DTL-27422F. Ce travail d'optimisation va concerner à la fois les couches internes de textile enduit, la couche d'auto-obturant, mais aussi l'exosquelette.

## Résumés :

Le dimensionnement des réservoirs pour l'aéronautique s'appuie sur les niveaux de performance à satisfaire par rapport aux certifications décrites dans la norme MIL-DTL- 27422-E. Ces performances sont évaluées entre autre sur la capacité d'auto-obturation par un test balistique mais également pour la tenue au crash par un « drop –test ». Dans le cadre de ce test le réservoir, rempli, est lâché en chute libre d'une certaine hauteur et vient heurter le sol rigide, l'intégrité (sans fuite) du réservoir devant être préservée. Les réservoirs flexibles sont constitués de trois composants majeurs : une couche interne au contact du fluide, une couche principalement dédiée à la fonction auto-obturant, et un certain nombre de plis d'élastomères renforcés par des textiles pour les propriétés anti-crash. La démarche d'allègement conduit à repenser la conception de ces réservoirs tout en conservant les taux de performance, relativement à ces spécifications. Pour ce faire, c'est principalement la couche la plus lourde, composée par les textiles enduits, qui est à optimiser. Ces travaux de thèse s'intègrent dans ce contexte, dans le cadre du projet FUI Balloo, et ont pour objectif de diminuer le nombre de plis, en incorporant des structures de renforts textiles (exosquelette) autour des réservoirs souples. L'élaboration par tressage de ces structures textiles, la caractérisation géométrique mais également mécanique en traction uniaxiale de ces renforts ont constitué le cœur des développements réalisés. Dans ces travaux, le procédé de tressage est positionné relativement aux autres technologies d'élaboration des renforts textiles. Grâce au métier à tresser disponible au laboratoire GEMTEX (EA n°2461 ENSAIT), et par la maîtrise des paramètres procédés, diverses configurations de tresses ont pu être élaborées. Une démarche expérimentale de caractérisations des propriétés géométriques et mécaniques de ces structures tressées a été conduite et a été associée à une approche de modélisation de ces caractéristiques. Enfin ces structures tressées, assemblées sur un prototype de réservoir ont aussi fait l'objet de tests à cette échelle.

The dimensioning of the aircraft tanks is based on the performance levels to satisfy with respect to certifications described in MIL-TLD-27422-E. These performances are evaluated among others on the self-sealing capacity by a ballistics test but also for crash resistance by a "drop -test." For this test the tank, filled, is dropped in free fall from a height and hits the rigid ground, the integrity (without leakage) of the tank has to be preserved. Flexible tanks are consisted of three major components: an inner layer in contact with the fluid, a layer mainly dedicated to the self-sealing function, and a number of layers of elastomeric reinforced fabric for anti-crash properties. The lightweight approach led to rethink the design of these tanks while maintaining the performance levels in relation to these specifications. To do this, it is mainly the heavier layer, composed of coated textiles, which is to be optimized. This thesis work is part of this context, in the FUI Balloo project and aim to reduce the number of layers, incorporating textile reinforcement structures (exoskeleton) around bladders. The development of these textiles by braiding structures, the geometric characterization but also mechanical in uniaxial tension of these reinforcements have been the heart of the developments made. In this work, the braiding process is positioned relative to other textile reinforcements elaboration technologies. With the braider machinery available in laboratory GEMTEX (EA No. 2461 ENSAIT), and by a control of the process parameters, various braids configurations have been developed. An experimental approach of geometrical and mechanical properties characterization of these braided structures was conducted and was associated with a modeling approach of these characteristics. Finally these braided structures, assembled on a prototype tank were also tested on this scale.