



Etude de préformes en fibre de lin

Rafael Masdeu de Pedro

Projet de fin de études (Ingénierie Industrielle)

Maître de stage : Damien Soulat

Tuteur et coordinateur de projet : Enrique Barbero

Juin 2010

Etude de préformes en fibre de lin.

Remerciements

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il paraît opportun de commencer ce rapport de stage par des remerciements à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de ce stage et qui l'on rendu de par ces enseignements très profitable.

Aussi, je remercie Damien Soulat, mon maître de stage qui m'a formé et accompagné tout au long de cette expérience professionnelle. Je voudrai également remercier Enrique Barbero, mon professeur du projet en Espagne.

Je ne voudrai pas m'e oublier de Carlos Navarro, le professeur qui m'ai introduit dans le domaine des composites et de qui j'ai plus appris de matériaux composites et des structures.

Bien sur que sin l'aide de ma famille, spécialement ma mère, de mes amis d'université et de ma copine je n'aurais pas pu finir ce projet et non plus cette formation d'ingénieur.

Merci beaucoup à tout vous.

Sommaire

1. Objectif	4
2. Introduction	5
3. Lieu du stage	7
3.1 Polytechnique d'Orléans	7
3.2 Le laboratoire Prisme	8
3.3 Le Banc d'essai de préformage de renforts secs	8
3.3.1 Partie mécanique	
3.3.2 Partie optique	
4. Le renfort	17
4.1 De la plante à la fibre de lin	17
4.1.1 Composition de la fibre	
4.1.2 Caractéristiques et propriétés de la fibre de lin.	
4.2 Le tissu	24
4.2.1 Les tissages	
4.2.2 Descriptif des renforts utilisés	
5. Démarche expérimentale	29
5.1 Procédure d'essai	29
5.1.1 Préparation du tissu	
5.1.2 Préparation pour le suivi de marqueurs	
5.1.3 La préparation du démonstrateur et l'étalonnage	
5.1.4 Placement du tissu et emboutissage	
5.1.5 Post-Traitement des données	
5.2 Résultats de la campagne d'essais	41
5.2.1 Essai avec le renfort A : Poinçon Prismatique	
5.2.2 Essai avec le renfort B : Poinçon tétraédrique	
5.2.3 Essai avec le renfort B : Poinçon prismatique	
6. Conclusion	74
6.1 Conclusion technique	
6.2 Conclusion personnelle	
6.3 Perspectives	
Annexes	74
Bibliographie	89

Etude de préformes en fibre de lin.

1. Objectif

Afin de valider mon projet de fin d'études d'ingénierie industrielle j'ai eu l'opportunité de réaliser un stage à l'Université Polytechnique d'Orléans. J'ai développé mon projet dans la thématique de recherche « Comportement et procédés de fabrication des composites » au sein du Laboratoire Prisme.

En particulier, j'ai analysé les possibilités de déformabilité de renforts tissés à base de lin lors de la première étape du procédé RTM

Le procédé R.T.M. (Resin Transfer Moulding) est un moyen de fabrication de composites mince qui permet l'obtention de formes complexes et non développables. Il se décompose en plusieurs étapes. La première étape de ce procédé consiste à emboutir un tissu sec avant d'y injecter une résine et de la faire polymériser. La première phase est délicate car les mécanismes de déformation mis en jeu sont très différents de ceux intervenant dans l'emboutissage des tôles. Les défauts pouvant survenir lors de cette étape (rupture de fils, formation de plis...) altèrent la qualité des pièces composites finies et les déformations mises en jeu doivent être comparées avec les limites acceptables par le renfort. Ainsi lors de cette première étape, on peut classer la déformabilité des renforts selon leur emboutissabilité.

Donc, l'objectif principal de ce projet est l'étude du comportement de renforts à base de lin à partir de différentes architectures de tissés de cette fibre naturelle lorsqu'ils sont soumis à des essais d'emboutissage avec différentes formes pour l'obtention de formes complexes et non développables.

Etude de préformes en fibre de lin.

2. Introduction.

Les matériaux composites sont issus de la combinaison de deux ou plus constituants. Ils possèdent de meilleures propriétés que ses constituants. Les deux avantages clefs des matériaux composites sont :

- Réunir deux ou plusieurs matériaux à caractéristiques différentes, qui n'ont pas, séparés, des caractéristiques significatives, mais qui ensemble forment un matériau avec des propriétés importantes.
- Les fibres utilisées comme renfort ont des propriétés mécaniques (résistance et rigidité) nettement meilleures que celles du même matériau mais sous forme massive. Car la diminution de dimensions caractéristiques implique une diminution de la probabilité de trouver des défauts importantes et aussi une structure plus parfaite.

Quelques propriétés qui peuvent être améliorées avec les composites sont : la résistance mécanique, la rigidité spécifique, la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure, le poids, la résistance à la fatigue, l'isolement thermique et acoustique, la conductivité thermique...

La matrice assure la liaison du renfort fibreux et l'empêche de bouger, elle apporte par conséquent de la continuité au matériau composite. Elle assure une protection chimique. Le renfort est le matériau qui apporte la rigidité et assure la résistance à la traction notamment. Certains matériaux sont composites pour eux-mêmes comment le bois, les muscles, les os ou la fibre de lin.

Il existe différents types de matrice : matrices métalliques (alliages d'aluminium, titane...), minérales (carbure de Si), organiques (résines thermoplastiques ou thermodurcissables). Dans les matrices thermoplastiques, elles peuvent être d'origine fossile (Polypropylène) ou d'origine biosourcée (PLA –poly lactique acide). Ces dernières font l'objet de recherche pour leurs propriétés de recyclabilité.

Il existe plusieurs types de renforts : minérale (fibre de verre, fibre de carbone), organique (fibre d'aramide comment le kevlar), métallique (bore, aluminium), et fibre naturelle ou végétale (lin, jute, chanvre, ramie, coton...)

Mon projet s'intègre dans cet objectif de l'étude de la fibre de lin. On ne va pas analyser un composite mais s'intéresser aux renforts tissés à base de fibres de lin, et plus spécifiquement lors du procédé de fabrication des pièces.

Etude de préformes en fibre de lin.

Il y a de nombreux champs d'application aux matériaux composites. Tant au niveau mondial qu'europpéen, les applications plus importantes sont dans les secteurs de la construction civil, de l'automobile, la construction industrielle, l'électricité, le sport et le loisir, la construction nautique et l'aéronautique. L'industrie française des matériaux composites, et en particulier cette dernière application, l'aéronautique, est en forte croissance lors de ces dernières années. Après l'Allemagne et l'Italie, la France est le troisième pays d'Europe et représente le 15% de la production Européenne.

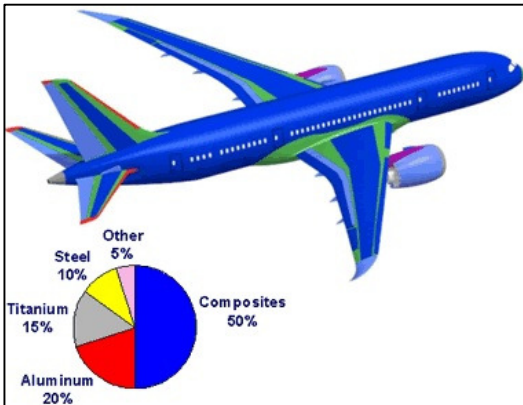


Figure 1 : Composites sur l'Airbus A 380

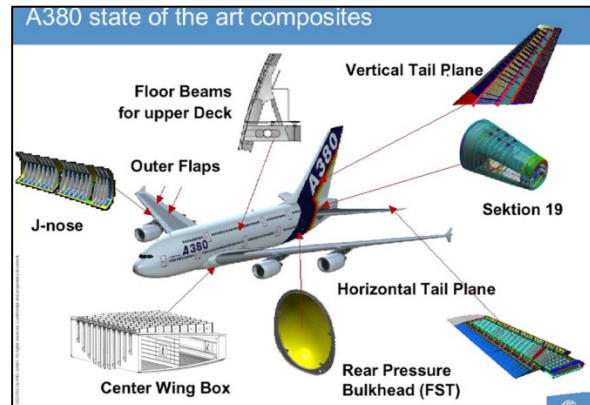


Figure 2 : Un proche avenir

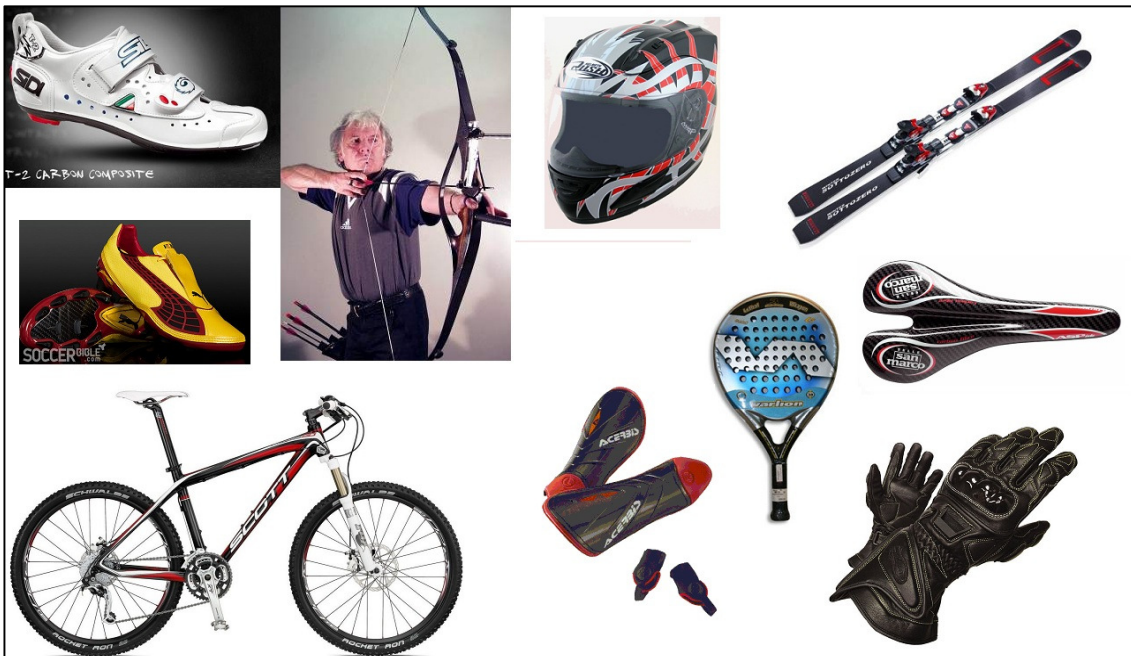


Figure 3 : Articles sportifs en matériaux composites

Etude de préformes en fibre de lin.

3. Lieu du stage

Mon stage a été réalisé à L'école Polytechnique de l'Université d'Orléans (Polytech'Orleans), grâce à l'accord européen Erasmus, pendant une période de cinq mois. Au sein de cette école j'ai effectué ce projet au sein du Laboratoire Prisme (Laboratoire de recherche de l'Université d'Orléans).

3.1 Polytechnique d'Orléans.

Cette école d'ingénieurs est née en 2002 suite à la fusion de : l'Ecole Supérieure de l'énergie et des Matériaux (l'ESEM) et l'Ecole Supérieure des Procédés Electroniques et optiques (l'ESPEO). Les deux écoles se sont rassemblées pour offrir aux étudiants une formation plus adaptée aux besoins des entreprises d'ingénierie. L'Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans, dont le nom d'usage est Polytech'Orléans, a mis en place dès la rentrée 2003 un premier cycle intégré ouvert aux jeunes bacheliers.

Polytech'Orléans s'est spécialisé dans trois domaines d'excellence :

- Electronique, Informatique, Optique, Plasmas
- Mécanique, Energétique, Matériaux, Mécatronique
- Génie civil, Aménagement, Géosciences, Environnement

Au sein de ces 3 pôles, Polytech'Orléans délivre des diplômes d'ingénieur (accrédités par la Commission des Titres d'Ingénieur) dans 4 spécialités :

- Génie civil
- Mécanique et Energétique
- Electronique et Optique
- Production (en partenariat avec l'ITII centre / formation par apprentissage ou formation continue)

Aujourd'hui, la pluridisciplinarité de Polytech'Orléans permet à ses diplômés de devenir des cadres innovants aux compétences multiples.

Polytech'Orléans c'est, en cette rentrée 2009-2010 :

- 1000 élèves-ingénieurs,
- 250 ingénieurs diplômés par an,
- 60 doctorants,
- 100 enseignants-chercheurs,
- 50 personnels administratifs et techniques.

Polytech'Orléans c'est 6 laboratoires associés :

- GREMI : Groupe de recherche sur l'énergétique des milieux ionisés
- PRISME : Institut Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique et Energétique
- CEMHTI: Conditions extrêmes et matériaux: haute température et irradiation

Etude de préformes en fibre de lin.

- CRMD : Centre de recherche sur la matière divisée
- ISTO : Institut des sciences de la terre d'Orléans
- ICARE : Institut de Combustion Aérothermique Réactivité et Environnement

3.2 Le laboratoire Prisme

Le laboratoire PRISME est issu d'une fusion de plusieurs laboratoires de recherches et équipes de recherches associées (LMSP, LME, LVR, LESI, LEES). Cette fusion est intervenue en janvier 2008 afin de constituer un laboratoire dans les domaines de recherche des Sciences de l'ingénieur. Ce laboratoire est structuré en 7 équipes projet, dont l'équipe projet « Mécanique des Matériaux hétérogènes » au sein de laquelle j'ai été accueilli. Cette équipe de recherche regroupe 12 enseignants-chercheurs et une dizaine de doctorants.

Les objectifs de l'équipe-projet MMH sont de déterminer et modéliser le comportement mécanique des matériaux (composites, réfractaires, géomatériaux, os) au travers de quatre axes scientifiques :

- a) Comportement et procédés de fabrication des composites
- b) Thermomécanique de matériaux réfractaires et couplages multi-physiques
- c) Biomécanique
- d) Génie civil

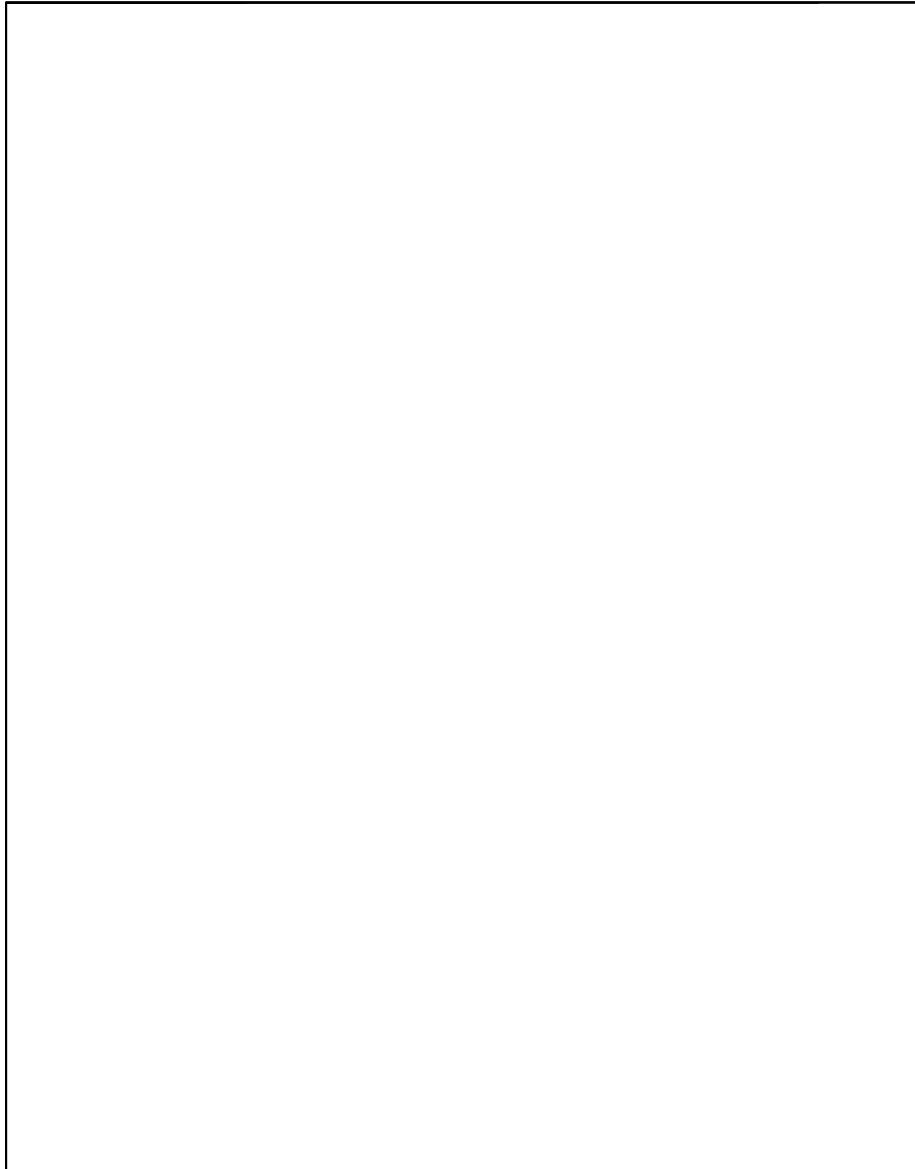
Les thématiques de recherche développées dans le thème « Comportement et procédés de fabrication des composites » au sein duquel j'ai été intégré, s'inscrivent autour de la compréhension et de la détermination du comportement des renforts composites lors de la mise en œuvre des pièces.

3.3 Le Banc d'essai de préformage de renforts secs

Le laboratoire Prisme et la société EADS (IW) se sont associés pour développer un banc d'essai expérimental, dit démonstrateur, capable de quantifier les déformations lors de la première étape de mise en forme du procédé R.T.M. C'est une machine d'emboutissage vertical ascendant ou descendant. Ce banc d'essai est l'élément fondamental que j'ai utilisé pour mener mon projet à bien et il est constitué de 2 parties :

- Une partie mécanique : pour imprimer une forme au renfort étudié. Cette partie contient les mêmes éléments mécaniques que pour à l'emboutissage des tôles métalliques.
- Une partie optique (constituée de caméras et de logiciels pour le calcul des déformations) qui sert à la mesure sur le renfort.

Etude de préformes en fibre de lin.



3.3.1 Partie mécanique

Cette machine d'emboutissage est composée d'une matrice ouverte à l'intérieur et supportée par un profil sur un cadre, et d'un poinçon, concentrique avec cette matrice, auquel le tissu s'adapte progressivement pendant l'emboutissage. En position basse le poinçon se trouve au-dessous du cadre et est monté sur un vérin électrique commandé par le logiciel Drive, (présenté plus tard) qui permet de réguler la vitesse d'ascension du poinçon. Le cadre est ascendant ou descendant à l'aide de vérins pneumatiques afin d'inter-changer les poinçons, de démouler les préformes, ou nettoyer après un essai. Voici un schéma qui montre les principaux éléments du démonstrateur.

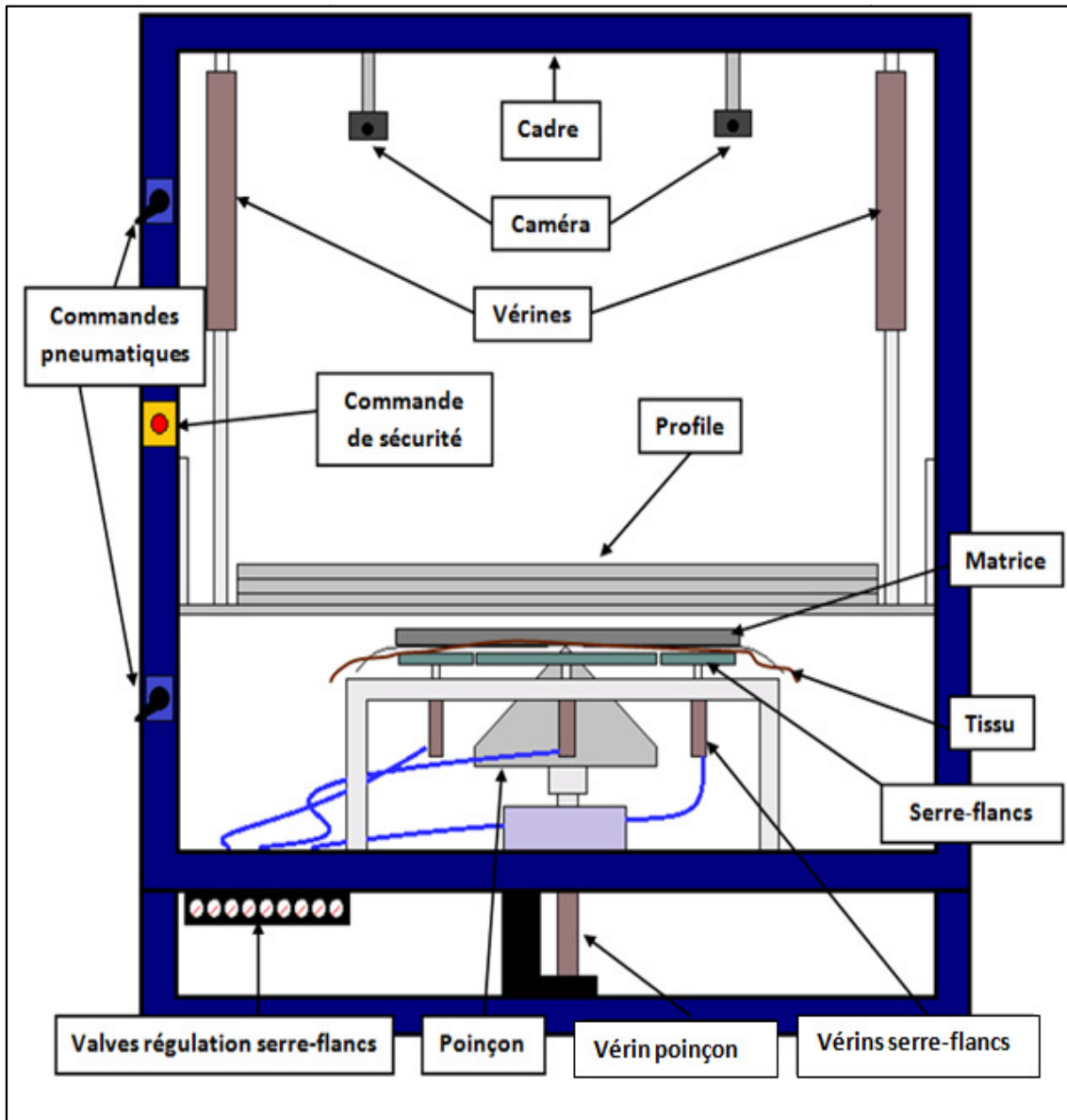


Figure 5 : Schéma du Banc d'essai

Poinçons et matrices :

Il y a trois poinçons disponibles qui donnent la forme intérieure de la préforme:

- Un poinçon prismatique triangulaire, de base carrée dont le côté mesure 28 cm et la hauteur 17 cm avec un angle de pointe de 90° .
- Un poinçon de la forme tétraédrique, dont le côté mesure 28 cm
- Un poinçon cubique.

Ces trois poinçons permettent d'obtenir des formes non développables. Elles sont qualifiées de formes compliquées à obtenir par préformage car toutes disposent d'arêtes et de points-triples.

Etude de préformes en fibre de lin.

La profondeur maximale de l'embouti est de 200 mm et les dimensions de chaque coté des matrices sont de 300 mm. Les matrices sont ouvertes sans contre-forme. Il est essentiel que les matrices soient ouvertes pour que les caméras situées en haut du banc d'essai puissent filmer l'opération de préformage.



Figure 6 : Poinçons

Les serre-flancs :

Le long du périmètre intérieur de la matrice se positionnent les serre-flancs, qui permettent de serrer le tissu contre la partie inférieure de la matrice pendant tout le procès d'emboutissage. Ces serre-flancs sont montés sur des vérins pneumatiques commandés manuellement grâce à une valve présente sur le cadre de la machine. Sur les serre-flancs sont montées des plaques interchangeable selon les formes de poinçon utilisées qu'on appellera plaques serre flancs et qui sont réparties comme indiquée sur la figure suivante. Un serre flanc a un diamètre de 8 cm, et les plaques serre-flancs peuvent être carrées de 10 ou 12cm de côté ou rectangulaires (26,5 cm x 12 cm).

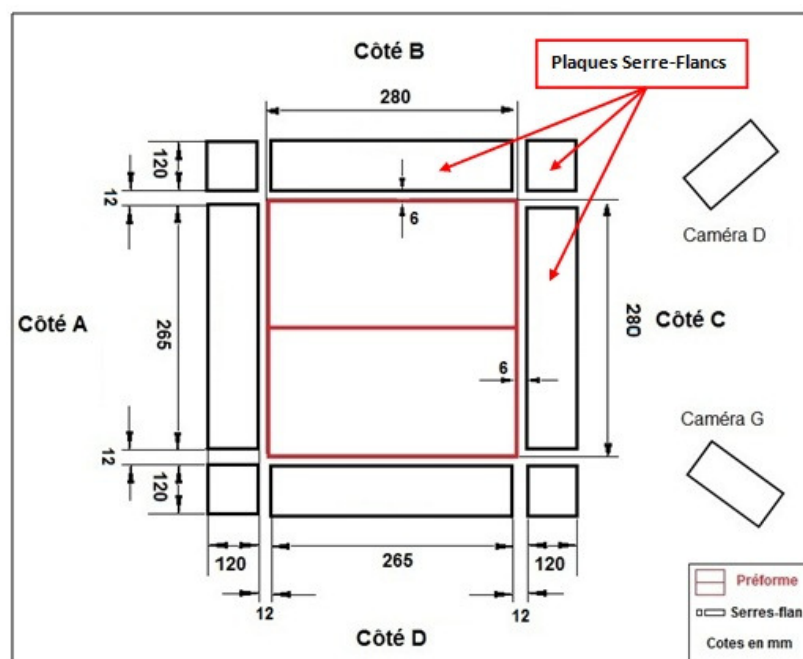


Figure 7 : Distribution des serre-flancs pour la préforme prismatique

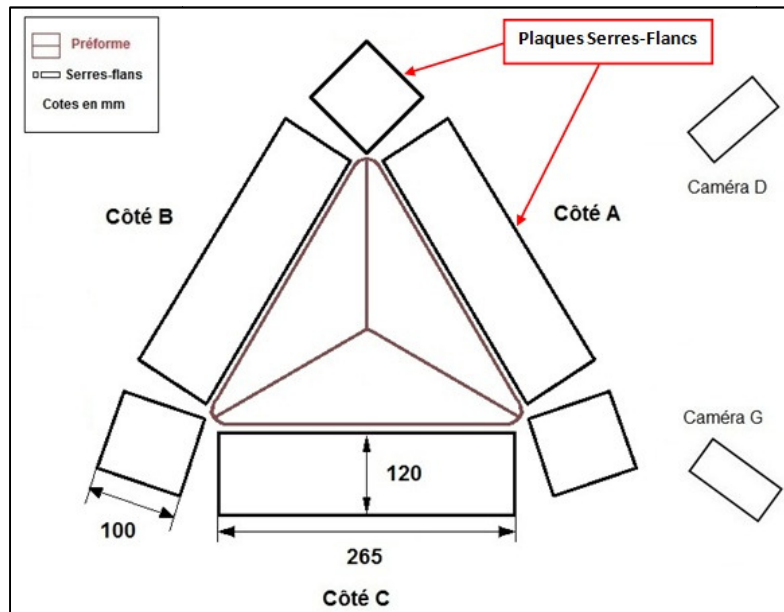


Figure 8 : Distribution des serres-flancs pour la préforme pyramidal

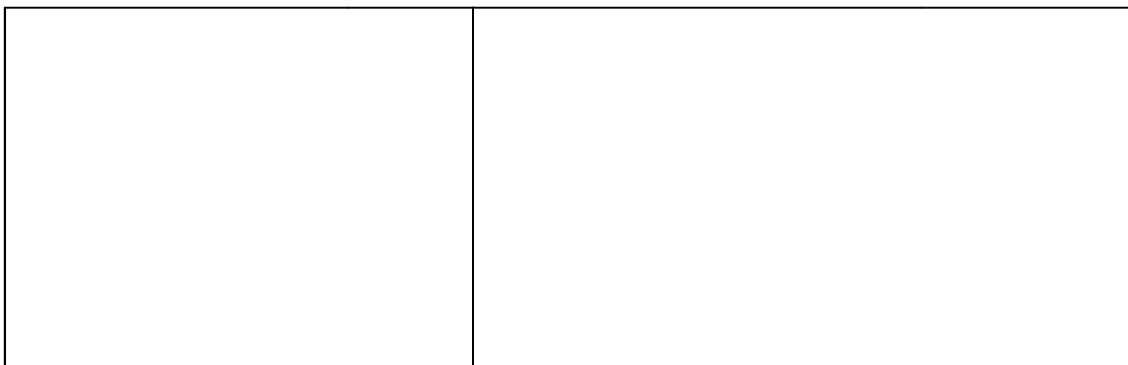


Figure 9 : Plaques serre-flancs



Figure 10 : A) Serre-flanc, B) Plaque serre-flanc, C) Serre-flanc et plaque serre-flanc

Etude de préformes en fibre de lin.

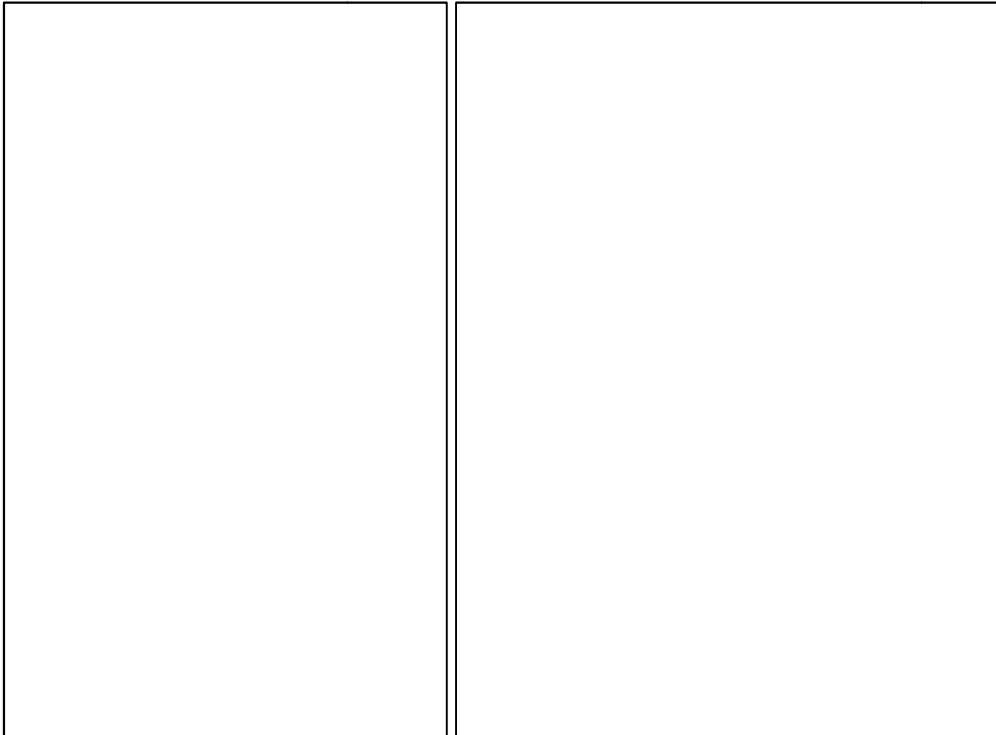


Figure 11 : Cylindres pneumatiques

Il existe un système avec une valve générale qui commande tous les vérins et également neuf valves individuelles. Le nombre de cylindres nécessaires, et par conséquent le nombre de valves, varie en fonction de la forme utilisée. Ainsi, pour la forme prismatique huit cylindres sont utilisés, alors qu'avec le poinçon pyramidal 6 cylindres sont nécessaires. Ces fonctionnalités permettent de faire varier les emplacements des serres flancs, donc des pressions associées. Pour les essais dans le cadre de ce projet la pression a été fixée à 1bar sur chaque serre flanc. Il faut que cette pression soit suffisante pour maintenir le tissu tendu lors de l'emboutissage, mais elle ne doit pas être trop élevée pour ne produire pas de défauts de type déchirure de tissu. Il faut aussi essayer de réguler la pression de tous les vérins de manière homogène afin de conserver la symétrie des formes.



Figure 12 : Valves de serres-flancs

Etude de préformes en fibre de lin.

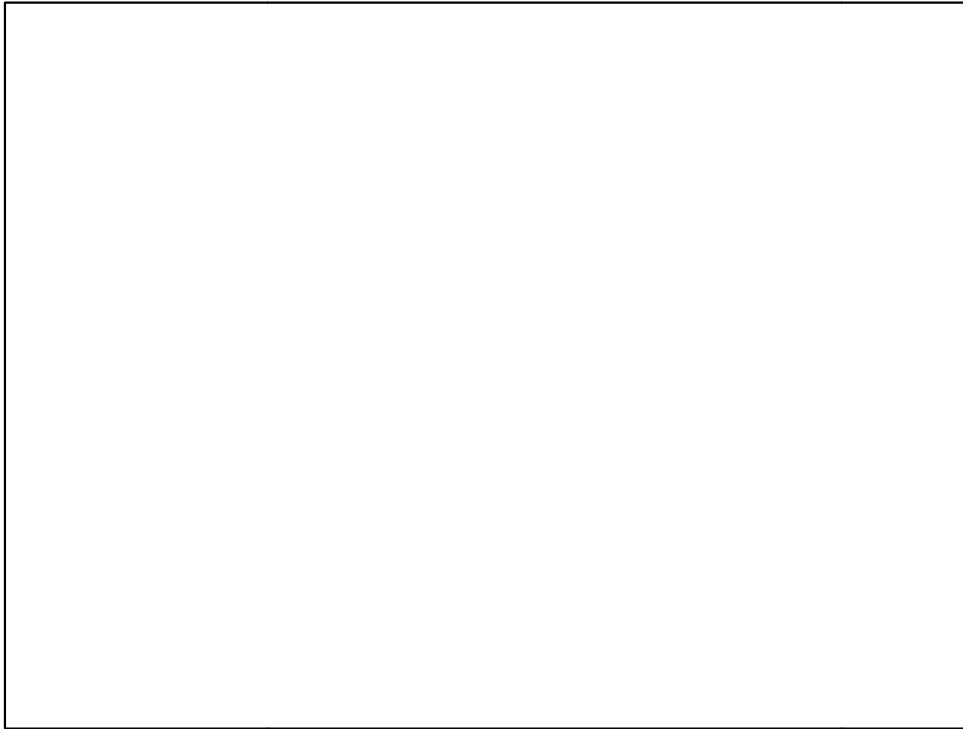


Figure 13 : Vue inférieure du démonstrateur

Cadre de pré-tension

Un autre élément important du banc d'essai est le cadre de pré-tension. Sa fonction est maintenir tendu le tissu lors de la montée des serres-flancs. Il est constitué par une structure métallique articulée horizontale située autour du démonstrateur qui possède différentes petites poulies déplaçables lesquelles font passer une corde qui soutient un poids en un extrême et en l'autre dispose d'une pince qui est accroché au tissu.



Figure 14 : Cadre de pré-tension

Etude de préformes en fibre de lin.

3.3.2 Partie optique

Le démonstrateur dispose de deux caméras situées sur la partie haute du cadre. Elles peuvent être orientés facilement grâce à un système de barres articulées qui les relie à la structure externe de la machine. Elles nous permettent d'obtenir les images de chaque état constituant l'ensemble du procédé de mise en forme. Ces images nous permettent de déduire toutes les informations nécessaires relatives au renfort testé, et notamment les déformations caractérisant la déformabilité. Il est essentiel de régler de manière adéquate la position et les focales de ces caméras pour avoir dans leur champ la préforme et que les points soient nets et clairs tout au long de l'essai

Le principe de fonctionnement et le suivante :

La stéréovision permet à partir de deux images numériques, de mesurer les déplacements tridimensionnels d'un objet, puis d'en déduire éventuellement les déformations. Notre système est composé de deux caméras reliées à une carte d'acquisition. A chaque point (M) de l'objet observé, repéré par ses coordonnées d'espace $M(x,y,z)$, correspond sur l'image de chaque caméra un point $M_c (U_i, V_i, W_i)$. Ces deux points sont reliés par des relations faisant apparaître les paramètres du système optique. Le logiciel Deftec 3D détermine au cours du temps, la position d'une série de marqueurs disposés sur la pièce étudiée (ou une série de taches de diffraction) et permet ainsi de visualiser les trajectoires. Après un étalonnage du système permettant de déterminer ses paramètres géométriques, le logiciel calcule automatiquement, par comparaison avec l'état initial, la position des marqueurs et en déduit par dérivation le tenseur des déformations à la surface de la pièce étudiée. Les composantes du tenseur des déformations sont calculées dans un repère Lagrangien ou Eulérien pour une approche en petites ou grandes déformations.

Les marqueurs sont constitués de points de peinture blanche ici sur le fond noir du tissu (carbone) ou de points noirs sur le tissu en lin. Pour obtenir le tenseur de déformation dans le plan on utilise trois ou quatre marqueurs disposés en croix. Plusieurs séries de quatre marqueurs peuvent être définies afin d'analyser différentes zones de la pièce



Figure 15 : Caméra gauche

Etude de préformes en fibre de lin.

Les logiciels associés au démonstrateur.

Il y a deux logiciels qui travaillent sous Windows, Drive et Deftac 3D, qui servent respectivement à faire l'étalonnage et contrôler les paramètres du vérin électrique (qui commande le poinçon) pour Drive et à réaliser les post-traitements à partir des images filmées par les caméras pour Deftac 3D. Ces logiciels seront décrits plus en détail dans le point 4.1, lors du protocole de déroulement d'un essai.

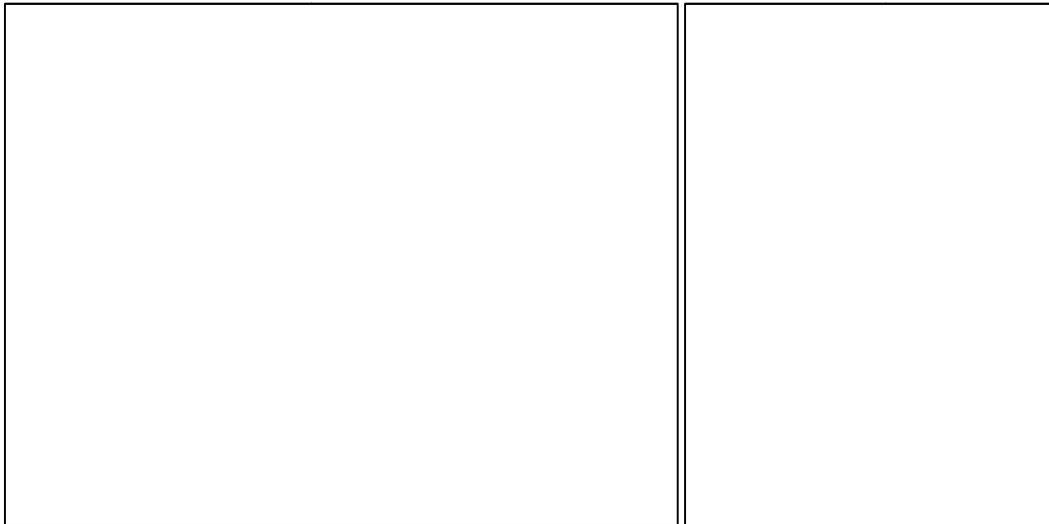


Figure 16 : Ordinateurs associés au banc d'essai

Etude de préformes en fibre de lin.

4. Le renfort

Le démonstrateur, a été toujours utilisé pour analyser la déformabilité et la faisabilité de mettre en forme, de renforts synthétiques comme la fibre de carbone, très utilisée dans le domaine de l'aéronautique pour des formes complexes. L'objectif de mon stage est d'étudier sur ce banc d'essai la déformabilité de renforts à base de fibres d'origines naturelles et plus particulièrement à base de lin.



Figure 17 : Préformes de carbone

Les renforts tissés de lin sont à analyser sur les 3 échelles. L'échelle du tissu constitué d'un assemblage de mèches. Chaque mèche étant elle-même constituées spécifiques de fibres. Chaque fibre est constituée, en même temps, d'un grand nombre de micro fibrilles. La spécificité de cette fibre, contrairement au carbone, est que l'origine de celle-ci est végétale donc issue d'une plante.

4.1 De la plante à la fibre de lin

4.1.1 Composition de la fibre

Le lin est une plante de la famille des Linacées et du genre *Linum*, qui comporte plus de deux cents espèces. Cette plante est constituée d'une tige dont l'extrémité est formée de plusieurs petites fleurs bleues. Elle contient sur toute sa hauteur de longues fibres qui lui confèrent sa rigidité. Sont précisément ces fibres qui ont des bonnes caractéristiques physiques et mécaniques comparables à celles de quelques fibres synthétiques, qui font du lin un renfort envisageable de matrices polymère.



Figure 18 : La plante de lin

Etude de préformes en fibre de lin.

Une tige de lin, qui à maturité mesure entre 80 et 120 cm, est composée de plusieurs parts. Dans sa section, du centre vers la périphérie, on peut trouver : la lacune, le xylème, le cambium, le phloème (qui est la part que nous va intéresser plus parce que il contient les faisceaux fibreux), le cortex et l'épiderme.

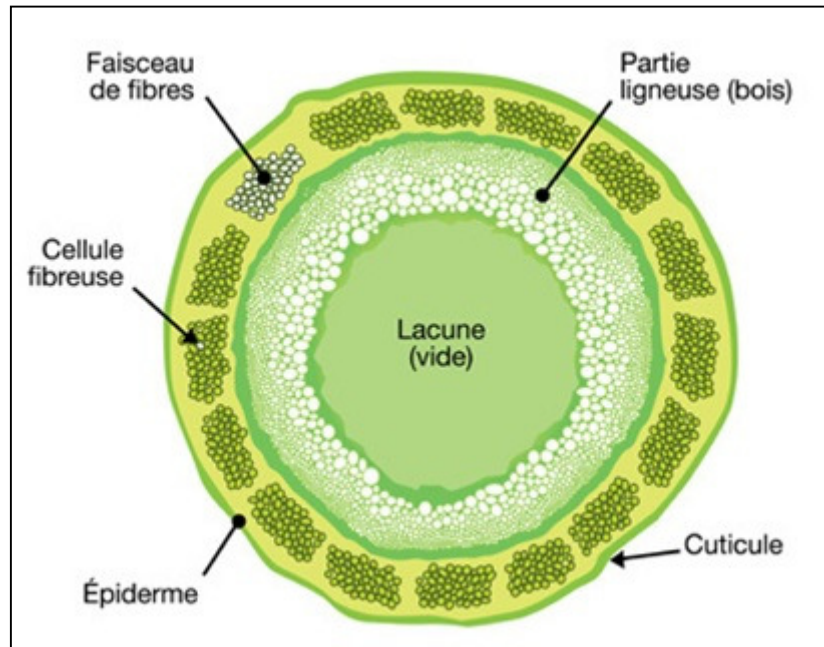


Figure 19 : Section transversale de la tige de lin

Les faisceaux sont à l'intérieur du phloème et ils ont une longueur de plusieurs dizaines de centimètres et regroupent jusqu'à une quarantaine de fibres collées entre elles par une interphase à base de pectines que s'appelle lamelle mitoyenne.

La fibre a une longueur de l'ordre du centimètre et un diamètre de quelques dizaines de microns, ce qui fait un ratio d'un ordre de magnitude de $L/d \approx 10^3$. Sa section peut être polygonale, avec 5 à 7 cotés, ou elliptique, et est composée de parois cylindriques concentriques.

En son centre elle possède une cavité appelée lumen qui contribue à la circulation de l'eau et sa taille permet de déterminer la qualité et le degré de maturité de la fibre. L'influence du lumen au centre de la fibre est importante mais souvent négligée. Quand le diamètre du lumen est important par rapport à celui de la fibre, la section réelle des parois de la fibre est plus faible, ce qui conduit à une diminution de ses propriétés.

Autour de lumen se trouve la paroi secondaire qui constitue la majorité du volume de la fibre et qui peut être divisée en 3 couches différentes (S1, S2 et S3). La couche S2 est la plus épaisse et est constituée de lamelles concentriques de cellulose parallèles entre elles dans une matrice de pectines. L'interphase matrice-lamelles est d'hémicellulose. Dans ces lamelles il y a des micro-fibrilles qui possèdent des bonnes propriétés mécaniques.

Etude de préformes en fibre de lin.

Finalement, la paroi plus externe de la fibre est la paroi primaire d'épaisseur d'environ $0,2 \mu\text{m}$. Elle est très poreuse, élastique et continue. Ses constituants principaux sont des pectines mais elle contient aussi quelque micro-fibrilles de cellulose orientées aléatoirement.

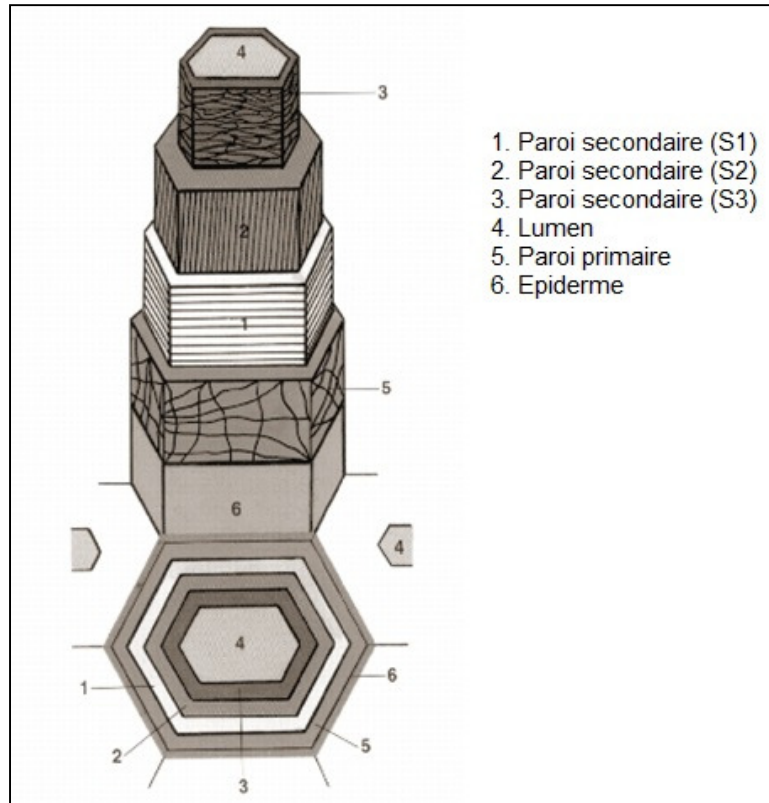


Figure 20 : Les parois cellulaires d'une fibre de lin

Les micro-fibrilles sont situées à l'intérieur de la paroi secondaire de la fibre, elles sont regroupées en macro-fibrilles enroulées en spirale dans les lamelles concentriques. Chaque micro-fibrille est composée d'environ vingt fibres élémentaires appelées micelles, lesquelles ont de 50 à 100 molécules de cellulose.

En ce qui concerne le développement des fibres, on peut dire que la taux de remplissage de chaque fibre par ces différentes couches et la proportion des différents polymères matriciels dépendent non seulement de la variété de lin, mais aussi de son environnement et de la position de la fibre dans la tige, puisque chaque zone de la tige a une histoire météorologique particulière.

4.1.2 Caractéristiques et propriétés de la fibre de lin.

La composition biochimique des fibres de lin varie selon les différents auteurs et dépend notamment de la variété considérée, des conditions climatiques durant sa croissance et encore de la qualité du sol où a été cultivée la plante. Les méthodes

Etude de préformes en fibre de lin.

d'extraction de la fibre unitaire à partir de la tige (arrachage, rouissage, teillage, peignage et traitements finaux) modifient également ces caractéristiques.

Les différents composants sont :

- Cellulose : elle est le principal constituant de la fibre de lin. C'est un polymère dont le taux de cristallinité est élevé, ce qui confère à lui une rigidité importante, avec un module d'élasticité particulièrement élevé pour un polymère (estimé à 137GPa). La teneur en cellulose est de l'ordre de 64-74%
- Hémicelluloses : ce sont des polymères non linéaires responsables de l'absorption d'eau. Leur module d'élasticité varie beaucoup en fonction de l'humidité relative. Elles constituent l'interphase entre le ciment pectique et les micros fibrilles. Sa teneur est entre 10 et 20%.
- Pectines : elles assurent la cohésion du faisceau et sont présentes notamment dans les jonctions entre cellules et dans la paroi primaire. Elles contrôlent la porosité des parois et la croissance de la plante, car le ralentissement de l'élongation de la plante correspond à une abondance de pectines acides. Sa teneur est environ 2%.
- Lignine : Par rapport aux autres fibres végétales, la lignine n'est présente qu'en faible proportion (2%) dans la fibre de lin.
- Eau : L'eau représente environ 8 à 10% de la masse d'une fibre de lin et est principalement liée aux groupes hydroxyles des pectines.

Nous pouvons conclure que son fort taux massique de cellulose et sa faible teneur en lignine, fait du lin un végétal à tenir compte comme un renfort pour les composites, puisque ses fibres sont particulièrement rigides.

Propriétés physiques.

- Densité : Elle varie peu d'une espèce de fibre végétale à une autre et elle est de l'ordre de 1,5 Kg/l concrètement pour la fibre de lin, elle vaut 1,54 Kg/l (Il a été estimé que la porosité de la fibre de lin était de l'ordre de 10%, par conséquent sa densité apparente valait 1,38)
- Dimensions . Une fibre de lin a une longueur comprise entre 5 et 80 mm et sa moyenne est située autour de 30mm. Son diamètre peut atteindre plusieurs dizaines de microns, avec une moyenne de 20 μ m. Les fibres de lin, par comparaison avec d'autres fibres végétales, sont parmi les plus fines et les plus longues. En fait leur rapport L/d = 1500 est élevé et capital lorsqu'il s'agit de fabriquer un composite unidirectionnel, car le renfort doit être le plus continu possible et la surface de contact entre la matrice et les fibres suffisante pour assurer le transfert de charge.

Etude de préformes en fibre de lin.

- Angle micro-fibrillaire : Il est un point de différenciation très déterminant en les propriétés physiques d'une fibre. La fibre de lin possède des micro-fibrilles orientées majoritairement à 10° de l'axe de la fibre dans la couche S2 de la paroi secondaire, et cette désorientation est minimale. Les bonnes propriétés mécaniques de la fibre de lin peuvent s'expliquer en partie sur la base de cette organisation micro-fibrillaire, car, par exemple, par rapport à la fibre de coton, qui n'a pas un angle micro-fibrillaire constante ($1-45^\circ$) mais des bonnes proportions de teneur en cellulose (83-90%) et en lignine (méprisable), la fibre de lin a des meilleurs propriétés mécaniques.
- Défauts : C'est le principal point faible de la fibre de lin. Certains d'entre eux sont produits irréversiblement pendant la croissance de la plante. Le procédé de décortication peut engendrer également des défauts, et finalement il existe aussi des défauts micro-structuraux. Les défauts sont une importante cause de la dispersion des résultats qu'on verra après.

Propriétés mécaniques.

La fibre de lin se situe parmi les fibres végétales le plus résistantes avec un module d'élasticité d'environ 50 GPa et une contrainte à la rupture généralement supérieur à 1000 MPa. En revanche, son allongement à la rupture est particulièrement faible.

- En traction : Les essais mécaniques sont délicats à mettre en place. La plupart provient d'essais réalisés avec une cellule de faible charge et des mors adaptés. Les données bibliographiques nous révélant ces propriétés :
 - ❖ Contrainte à rupture : σ_r (MPa) = 600 – 2000
 - ❖ Déformation à rupture : ϵ_r (%) = 1 - 4
 - ❖ Module d'élasticité : E (GPa) = 12 – 85
- En compression : Elles peuvent être estimées grâce au test de la boucle élastique, que on ne va pas expliquer, mais qui nous apporte un valeur de contrainte de rupture en compression de 1200 MPa \pm 370 MPa
- Propriétés mécaniques des composants de la fibre : La fibre de lin peut être assimilée à un composite dont les micro fibrilles de cellulose sont les éléments renforçants et les polymères pectiques la matrice incrustante. A partir des modules d'élasticité et des fractions massiques moyennes de chacun des constituants, il est, possible, par la loi des mélanges d'estimer le module de la fibre de lin par :

$$E_{\text{fibre}} = \sum_i \text{constituants } X_i E_i$$

Etude de préformes en fibre de lin.

Où E_i est le module de la phase i et x_i sa fraction massique.

	cellulose	hémicelluloses	lignine	pectines	autres
E_i (GPa)	137	8	4	?	0
x_i (%)	69	15	4	2	10

Table 1. Propriétés mécaniques et fraction massiques des constituants de parois de fibres

Cette estimation conduit à un module d'élasticité pour la fibre d'environ 96GPa.

Dispersion de résultats.

La forte dispersion des propriétés mécaniques des fibres de lin sont dues notamment à l'existence des défauts. Il y a suivantes causes qui produisent ces défauts :

- Ils'agit d'un matériau naturel : Sa variété, son mode de culture et le climat pendant sa croissance, influent notablement ses propriétés intrinsèques.
- Les traitements mécaniques infligés aux tiges après leur maturité.

Il est par ailleurs complexe d'estimer l'impact des défauts car certains se situent dans le volume de la fibre et ne sont pas visibles extérieurement.

Ceci justifie les traitements statistiques appliqués aux résultats des essais mécaniques.

Facteurs influents.

L'influence du lumen sur les propriétés mécaniques des fibres de lin a déjà été abordée. D'autres facteurs très importants relèvent de la présence d'eau et la température.

Il existe des différentes auteurs qui ont fait suivants études où on peut voir que :

- La rigidité d'une fibre diminuait avec l'absorption d'eau. L'eau absorbée s'infiltre dans les pores et les régions amorphes des fibres, réduit alors la cohésion entre les micro-fibrilles et agit comme un plastifiant en transformant la matrice pectique en un gel presque fluide. En plus, l'humidité provoque la formation de champignons à la surface de la fibre après seulement 3 jours d'exposition.
- L'augmentation de la température a pour effet de diminuer les propriétés mécaniques des fibres, d'une part parce que l'eau de la fibre se vaporise, ce qui réduit la cohésion de sa structure, d'autre part parce que des déformations thermiques apparaissent et créent des fissures et des endommagements irréversibles.

Etude de préformes en fibre de lin.

Modes de déformation et rupture d'une fibre de lin.

Les fibres de lin ont un comportement typiquement viscoélastique mais, au-delà d'un certain seuil, elles présentent un comportement Hookéen.

La déformation d'une fibre commence par une augmentation de la longueur des fibrilles et des régions non-cristallines entre elles, suivie par un déroulement des microfibrilles, en même temps qu'une réduction : du volume des fibrilles, de la matrice interfibrillaire, et des espaces vides. S'ensuit alors un cisaillement de régions non-cristallines, l'enchevêtrement des chaînes de polymères, l'apparition de fissures et finalement le délaminage et la rupture de la fibre.

Comportement de la fibre de lin à la fatigue : Les essais de fatigue à charge maximale constante sur la fibre de lin confirment l'augmentation de la rigidité à chaque cycle. Encore, ils valident l'hypothèse de réorientation des microfibrilles en le sens des efforts.

La rupture des fibres végétales en traction est contrôlée principalement par la teneur en cellulose et par l'angle microfibrillaire. La résistance optimum de la matrice végétale est un compromis entre le transfert de contrainte et la déviation des fissures. La rupture peut se produire soit par l'éclatement de la matrice, soit par l'initiation de fissures qui traversent les fibrilles.

En ce qui concerne la rupture des parois de la fibre de lin, elles ne se cassent pas de la même façon, du fait de leurs différences de composition chimique et de morphologie. La paroi primaire se fracturerait d'une manière fragile et la rupture de la paroi secondaire, beaucoup plus cristalline et orientée, est plutôt, de nature plastique et s'initierait dans la direction latérale à partir de regroupement de fissures.

Pour quoi travailler avec la fibre de lin?

L'intérêt porté aux fibres de lin comme renfort dans des composites unidirectionnels à matrice organique, est motivé par plusieurs raisons :

La première raison est environnementale et géographique. Tout d'abord la fibre de lin est un matériau naturel dont la culture est relativement neutre vis-à-vis de l'environnement, donc il semble pouvoir répondre à la préservation de la nature tout en fournissant des matériaux industrialisables compétitifs. De plus, en termes de production, le lin est parmi les plantes les plus cultivées au monde et en France c'est un produit largement cultivé.

Autre raison est sa densité, significativement inférieure à celle des fibres de verre. Cette différence conduit à des propriétés spécifiques comparables ou même supérieures, ce qui serait un avantage dans le domaine des transports (Les fibres de lin sont déjà utilisées dans le domaine de l'automobile)

Etude de préformes en fibre de lin.

De plus, son grand rapport longueur/diamètre, son faible angle microfibrillaire et sa forte teneur en cellulose, vaut à la fibre de lin d'être envisageable comme renfort de composites unidirectionnels.

Pour conclure, le lin à également un avantage économique par rapport aux fibres synthétiques, bien que c'est vrai qu'il existe des fortes écarts pour le même genre de fibres puisque les prix dépendent surtout de la qualité des fibres (longueur, finesse, résistance, traitement...)

Constitution des mèches

Les mèches sont constitués de une grande quantité de fibres. Les fibres de lin ont un diamètre de quelques dizaines de micros. Pour créer une mèche les fibres sont jointés entre elles. N'est pas évident calculer le nombre de fibres que peuvent être trouves dans en large d'une mèche, mais en faisant le ratio entre la largeur d'une mèche et le diamètre d'une fibre c'est possible trouver un ordre de magnitude valide. Ainsi par exemple, par les tissus utilisés qui seront vues en détail après, la largeur moyenne est de l'ordre de 1 cm, pendant que l'épaisseur est d'environ 100 μm . Par rapport au diamètre d'une fibre, on peut conclure qu'il y a 1000 fibres pour unité de longueur d'une fibre au long la largeur d'une mèche.



Figure 21 : Mèche de lin et fibres qui la constituent

En ça qui concerne à la largeur de chaque mèche la largeur dépendra de si s'agit d'une trame o d'une chaine. Les trames s'ajustent à la largeur du tissu, dans notre cas 1m, pendant que les trames peuvent avoir une largeur de plusieurs mètres.

4.2 Le tissu

Les essais de déformabilité et d'analyse de la faisabilité de la mise en forme ont été conduits sur des renforts tissés, en fibre de lin mais avec des structures d'assemblage de mèches distinctes, tissés et non-tissés. Pour des formes non développables, comme celles envisagées il est essentiel de disposer de renfort bidirectionnel alors que pour des formes développables une seule direction de renfort est suffisante.

Etude de préformes en fibre de lin.

4.2.1 Les tissages

Le tissage consiste à entrecroiser deux séries de mèches en général perpendiculaires, les mèches dans le sens longitudinal sont qualifiées de chaîne et celles dans le sens transversal de trame.

En fonction de la largeur des mèches dans les directions trames et chaînes on aura un tissu équilibré ou un tissu non-équilibré. Si les trames et les chaînes ont la même largeur il s'agit d'un tissu équilibré, mais si les trames sont plus larges il sera non-équilibré.

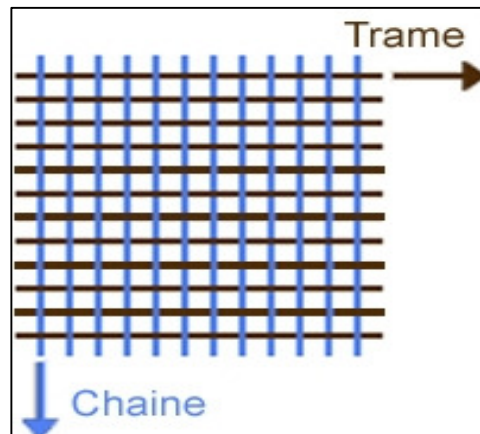


Figure 22 : Les trames et les chaînes

Le tissage se fait sur un métier à tisser et les tissus obtenus se définissent par leur armure. Il existe trois armures fondamentales :

- La Toile
- Le Sergé
- Le Satin

La Toile ou Le Taffetas

C'est l'armure la plus simple. Le fil de trame passe une fois au-dessus du fil de chaîne et une fois en dessous, avec décalage d'un fil à chaque passage. Le rythme est dit « un pris », ou « un sauté ». On a un pris quand le fil de chaîne passe au-dessus du fil de trame, et « un sauté » quand le fil de chaîne est en dessous du fil de trame.

La toile n'a ni endroit ni envers et présente un aspect uni. Des tissus très différents peuvent être obtenus en fonction :

- De la nature de fils employés
- De la grosseur de fils
- Du degré de torsion des fils
- Du nombre de fils disposés en chaîne et en trame

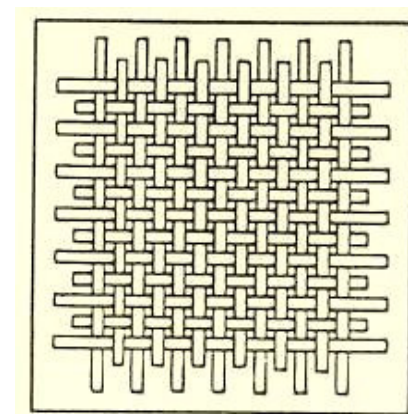


Figure 22 : Le Taffetas

Selon les matières et les titrages utilisés, on obtiendra des toiles d'aspect, de toucher et d'épaisseur très différentes. Il existe de nombreux dérivés de la toile qui ont des appellations spécifiques. Le taffetas est une toile fine avec des files serrés en chaîne à l'origine en soie teinte en fil, c'est le nom le plus commun qui s'utilise avec toutes les toiles en général.

Etude de préformes en fibre de lin.

Le Sergé

C'est une armure qui présente sur l'endroit en diagonale des côtes et des sillons de largeur variée.

Les armures dérivées son obtenues en augmentant le nombre de « sautés » dans le sens de la chaîne et/ou dans le sens de la trame ou en inversant leur sens.

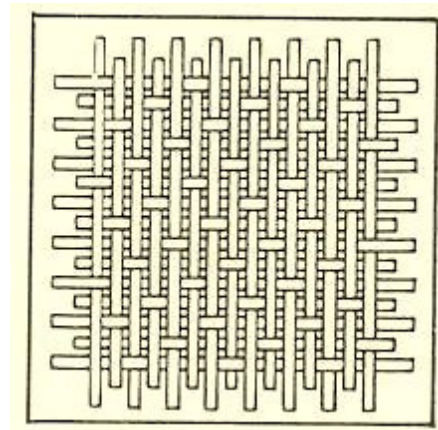


Figure 23 : Le Sergé

Le Satin.

L'armure satin a une surface constituée de flottés dans le sens chaîne ou trame qui permet d'obtenir un effet brillant et lisse. Les deux faces sont lisses et brillantes et produites soit par des flottés chaîne, soit par des flottés trame

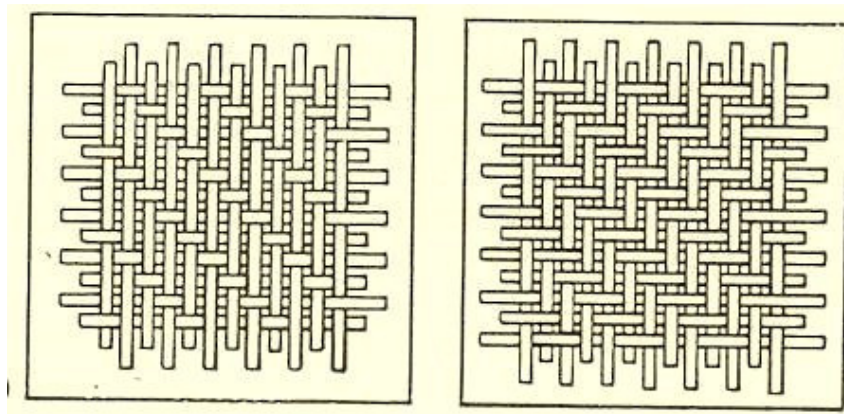


Figure 24 : Le Satin

Il existe d'autres formes d'assemblage de mèches pour constituer des renforts bidimensionnels mais également tridimensionnels comme par exemple le « 2,5D Carbon/Carbon ».

4.2.2 Descriptif des renforts utilisés.

Au cours de mon stage différents renforts, tous à base de fibres de lin, ont été utilisés. Notons que les premiers essais nécessaires à la prise en main du démonstrateur ont été réalisés avec un renfort bidirectionnel mais non tissé, de type « Non-Crimp » (superposition de 2 couches d'unidirectionnels reliées par un fil de piquage). L'étude et l'analyse des résultats présentés dans ce rapport sont relatives à deux taffetas de différentes dimensions, nommés respectivement renfort A et renfort B

Etude de préformes en fibre de lin.

Le critère utilisé pour différencier les deux types de mèches des tissus est le suivant : les chaines sont les mèches parallèles aux coutures des extrêmes du tissu pendant que les trames sont perpendiculaires à ces coutures.

Renfort	Tissage	Équilibré/ Non équilibré	Largeur de trames	Distance entre trames	Largeur de chaines	Distance entre chaines
A	Taffetas	Non	8mm	1.5mm	10mm	0.5mm
B	Taffetas	Non	4mm	2mm	2.8mm	0

Table. Caractéristiques des renforts.

Renfort A :

Les mèches horizontales (trames) sont plus minces que les mèches verticales (chaines). Les trames ont une largeur d'environ 7 à 8 mm et elles sont séparées entre elles d'une distance d'environ 1,5 à 2 mm, pendant que les chaines sont plus homogènes, plus larges (de 10 à 11 mm) la distance entre deux mèches consécutives est très faible (0.5 mm).

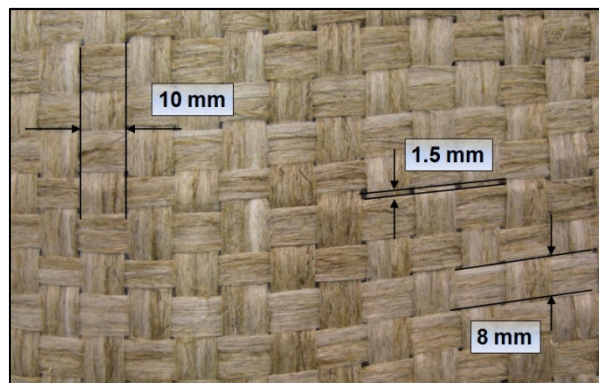


Figure 25 : Caractéristiques Renfort A

Renfort B :

Il est aussi un tissu non équilibré parce que les trames et les chaines n'ont pas la même largeur. Les trames ont une largeur environ 3 ou 4 mm et elles sont séparées entre elles de 2 à 3 mm, pendant que les chaines sont plus étroites, vers les 2,8 mm de largeur et il n'y a pas d'espace entre elles (la mesure de dix chaines consécutives est de 28 mm).

Etude de préformes en fibre de lin.

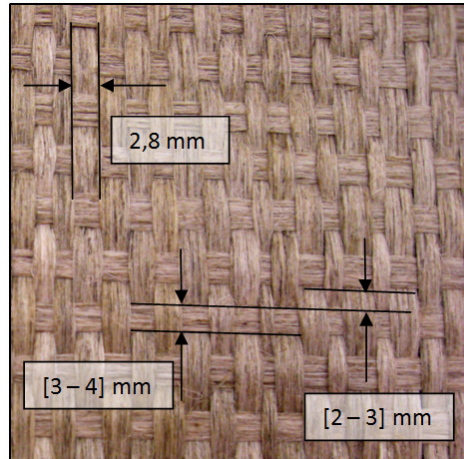


Figure 26 : Caractéristiques Renfort B

Après examen de la structure de ces renforts, et comparativement avec d'autres renforts, de type carbone, on peut constater qu'ils contiennent un certain nombre de défauts (espacement entre les mèches, dé tissage, etc.) et qu'ils ne sont pas parfaitement homogènes. C'est une des grosses difficultés de ces renforts associées à la disparité de la qualité de l'approvisionnement.



Figure 27 : Défauts en tissus de lin

5. Démarche expérimentale

5.1 Procédure d'essai

Pour faire un essai il faut suivre une procédure qui est divisée en cinq parties : la préparation du tissu, la préparation du démonstrateur et l'étalonnage, l'emboutissage, le post traitement des données et ainsi que l'analyse et la présentation des résultats.

5.1.1 Préparation du tissu

Il est important que le renfort dans lequel l'échantillon va être découpé n'ait pas de défauts. Ce tissu doit être bien conservé, c'est-à-dire correctement enroulé autour d'un cylindre rigide.

Le tissu doit être découpé selon le gabarit de la machine d'emboutissage. Dans les essais réalisés lors de cette étude les échantillons ont été choisis de forme rectangulaire (de 900 x 1000 mm). L'orientation initiale des mèches a été également choisie à 0/90°. Les mèches dans les directions chaînes et trames sont parallèles à aux cotés de ce rectangle.

Notons que ces 2 paramètres (forme initiale du flan et orientation initiale des mèches) vont influencer sur la forme finale ainsi que sur les défauts de la préforme quelque soit la forme du poinçon utilisée.

5.1.2 Préparation pour le suivi de marqueurs

Comme indiqué précédemment au cours de l'essai les différents états de la préforme sont imagés par le biais des caméras. Ces images permettent de suivre et de quantifier l'état de déformation du renfort lors du procédé. Il est nécessaire avant chaque essai d'imprimer en différentes zones du renfort des points de peintures (dits marqueurs) sur lesquels le suivi de la position va s'effectuer. Ces points de peinture sont dessinés sur les mèches du tissu dans les directions chaînes et trames. Ces points ronds doivent être les plus claires et homogènes possible et d'une taille similaire pour que les caméras puissent suivre ses déplacements sans problèmes. Ils doivent se situer au sommet (du tissage) de la mèche pour éviter au cours de la déformation de se dégrader (avec la mèche). Il faut également faire attention à ce que chaque point soit situé sur une seule et même mèche et ne pas déborder sur une autre.

Au moins deux points sont nécessaires par mèche dont on cherche à étudier le comportement. L'ensemble du « maillage » des marqueurs doit bien couvrir la totalité de la face (ou de la zone) que l'on veut étudier. Enfin pour l'étude du cisaillement

Etude de préformes en fibre de lin.

(évolution de l'angle entre les mèches au cours du procédé), il est nécessaire d'appliquer des marqueurs sur les mèches sens chaîne et trame.

En ce qui concerne à la peinture, on peut utiliser de la peinture à huile, mais qui nécessite un temps de séchage de 72 h mais également de la peinture acrylique qui sèche plus rapidement (en 24h). Selon le renfort utilisé il faut trouver le bon contraste entre la couleur du renfort et celle de la peinture, les positions de ces points étant filmées il est nécessaire que ce soit bien détectable par les caméras. Jusqu'à présent seuls des essais sur du carbone (de couleur noire) avaient été réalisés, de la peinture blanche était alors utilisée pour les marqueurs. Pour les renforts de fibre de lin (de couleur marron) j'ai préconisé plutôt l'utilisation de peinture de couleur noire.

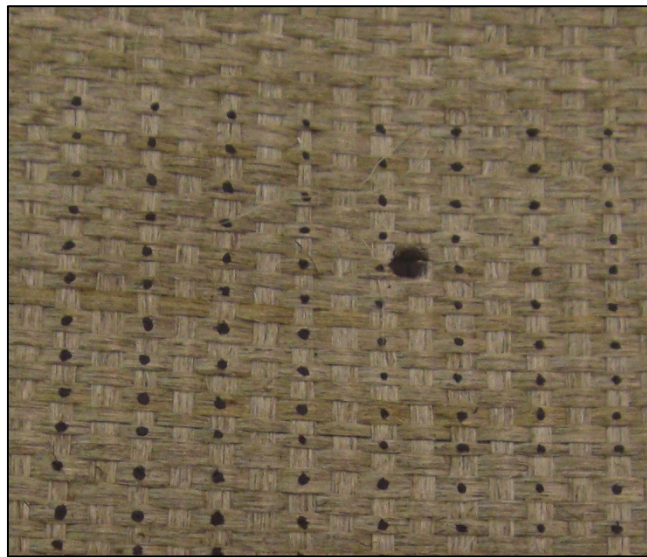


Figure 28 : Marqueurs sur le tissu

5.1.3 La préparation du démonstrateur et l'étalonnage

Tout d'abord il faut installer le dispositif composé de la matrice, du poinçon et les serres flancs associés à la forme souhaitée.

Ensuite il est nécessaire de faire l'étalonnage pour le suivi de marqueurs, par le biais du logiciel Deftac3D. Un nouveau dossier est créé sur le PC (dans E:/ESSAI) associé à l'utilisateur et dans lequel tous les essais vont être sauvegardés, chacun dans un sous-dossier. La terminologie associée à ces noms de dossiers est pour le dossier principal d'indiquer le nom de l'utilisateur. Pour chaque sous-dossier le nom doit comprendre le renfort, la forme utilisée et la date de l'essai, par exemple pour un tissu taffetas en fibre de lin le premier avril en utilisant avec le poinçon prismatique : « Lin_taffetas_tente_1_5_2010 ».

Etude de préformes en fibre de lin.

Dans chaque sous-dossier (associé à chaque essai) 2 dossiers sont créés : « Données » et « Etalonnage ». Dans le sous-dossier étalonnage seront enregistrées les images des conditions initiales (avant emboutissage). Dans le sous-dossier « Données » l'ensemble des images au cours de l'essai.

L'étalonnage s'effectue en lançant le logiciel Deftac3D, il faut créer une nouvelle application: le logiciel nous demande créer un nouveau fichier extension « .ima » qui doit être sauvegardé dans le dossier étalonnage.:

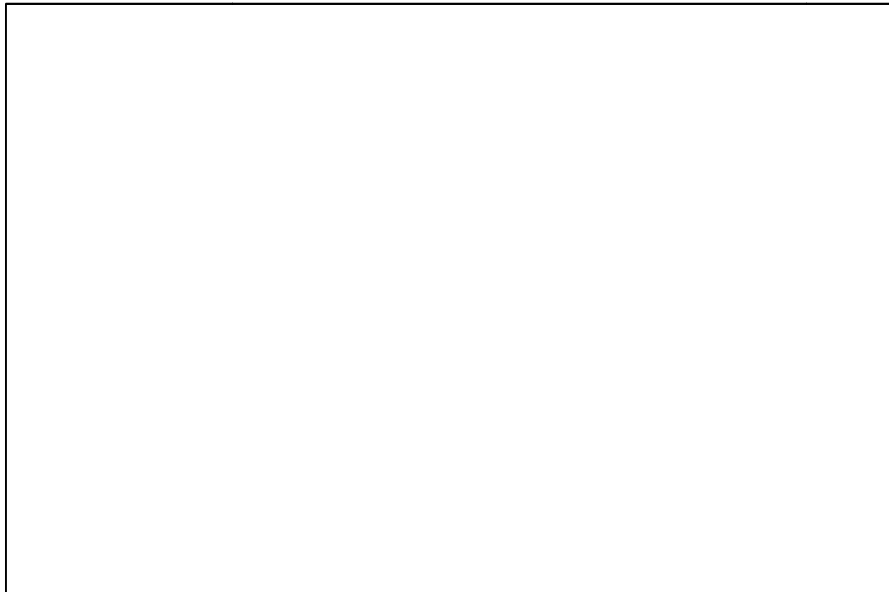


Figure 29: Nouvelle Application Deftac 3D

A chaque nouvelle application créée, une fenêtre « Visualisation » s'ouvre et affiche les images des caméras. Les opérations suivantes consistent à régler la position et la focale de chaque caméra et de vérifier à l'aide des images sur l'écran du PC. Les caméras ont plusieurs degrés de liberté pour les orienter manuellement et les diriger au point désiré.



Figure 15 : Caméra gauche

Etude de préformes en fibre de lin.

En sélectionnant l'onglet caméra on peut crocher « acquisition continue » pour visualiser en temps réel les images sur l'écran. Ça permet de trouver la position désirée, qui devra contenir la préforme dans le champ des cameras. Aussi, en cochant « 1(G) » ou « 2(D) » on visualise respectivement les images de la camera gauche ou de la droite.

Les focales des caméras doivent être réglées pour que les points soient nets et clairs tout au long de l'essai. Il faut trouver un compromis entre l'état initial du renfort et l'état final non encore obtenu, parce que il est possible obtenir une focale claire quand le tissu est à plat mais des focales déformées quand il est préformé. Pour réaliser cette opération il est nécessaire de régler les caméras sur le renfort mis à plat mais également à l'aide d'une préforme déjà emboutie sur la forme souhaitée.

Quand les caméras sont bien positionnées et réglées, on met en place la plaque de référence en position comme indiquée dans l'image suivante, et en cliquant sur acquisition on acquiert deux images qui sont sauvegardées dans le répertoire créé précédemment. Cette plaque contient des marqueurs dont la position, avec la position des caméras servira d'étalonnage.

Il faut maintenant déterminer les paramètres de l'étalonnage correspondant à cette position de caméras, on y accède par « Modification de l'Application », et dans l'onglet Mode de Calcul, après nous être assuré que l'option étalonnage est bien cochée, on chargera le fichier de référence associée aux marqueurs de la plaque en cliquant sur Parcourir: « E:\ESSAIS\Référence\mire25_2mm_esp_5mm.ref ». Cette plaque contient 25 marqueurs (5 lignes de 5 colonnes) espacés de 2,5 mm.

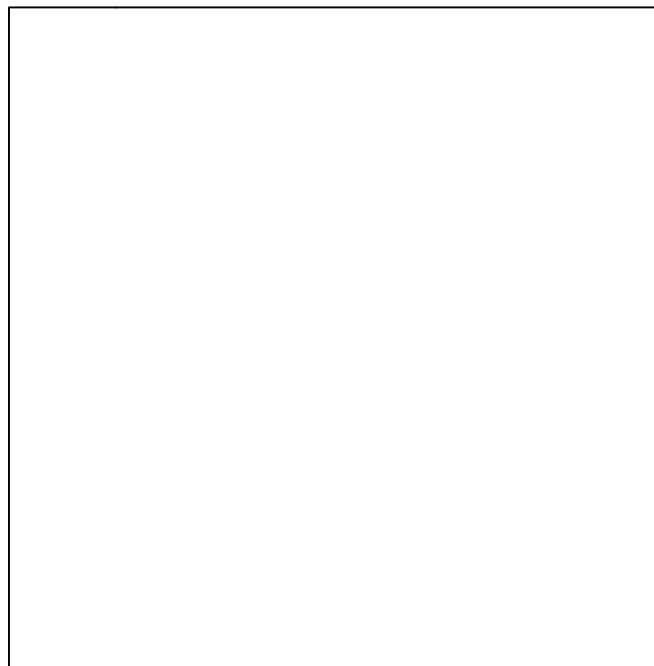
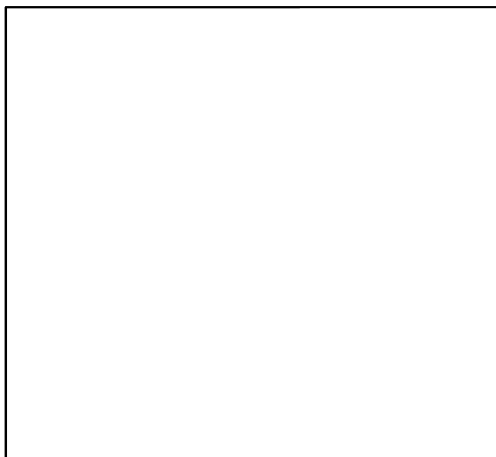


Figure 30 : Nouvelle Application Deftac 3D

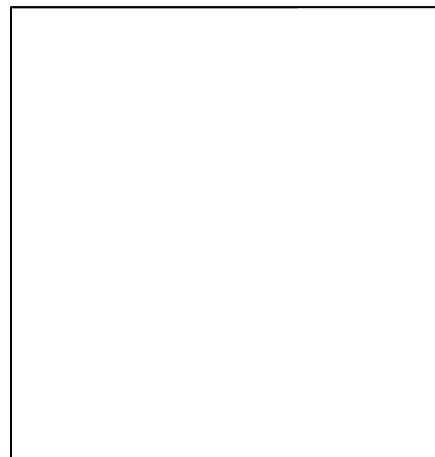
Etude de préformes en fibre de lin.

Dans le Mode de Sauvegarde des déformations on cochera uniquement l'option Sauvegarde Temporelle pour ne garde pas plus que un fichier pour l'essai complet.

Pour le suivi des marqueurs avec Deftac 3D il faut créer des mires sur chaque marqueur. C'est sur ces mires que lors de cette phase d'étalonnage que la position initiale des points sera calculée (toujours en fonction de la position des caméras).



zones créés



sur tous les points

Chacun des marqueurs de la plaque va être entourée d'une zone dont il faut régler le contraste de ces marqueurs (sombre) et le seuil de gris à l'aide du bouton droit de la souris lorsque celle-ci est positionnée sur un marqueur. Le seuil doit être réglé de façon à ce que la zone grise (entourant le marqueur) soit uniforme et entourent chaque point de la plaque



Figure 33 : Réglage du contraste des marqueurs

Chaque zone doit être visible par les 2 caméras, cette opération est à répéter pour les images des 2 caméras. La démarche consiste à faire ces réglages sur un point (intensité, contraste) et à le dupliquer aux points de la mire puis de le faire aussi sur l'autre caméra. Dans l'onglet « Zones » de l'option « Modification de l'application », le nombre de marqueurs sur chaque ligne et colonne doit être indiqué (5 x 5).

Etude de préformes en fibre de lin.

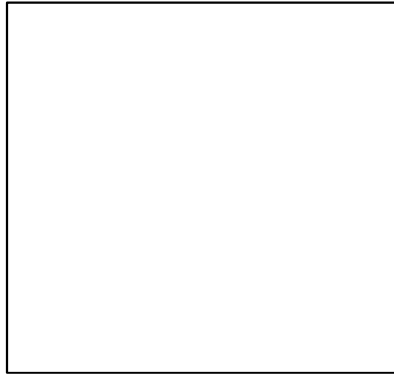


Figure 34 : 25 duplications de Marqueurs

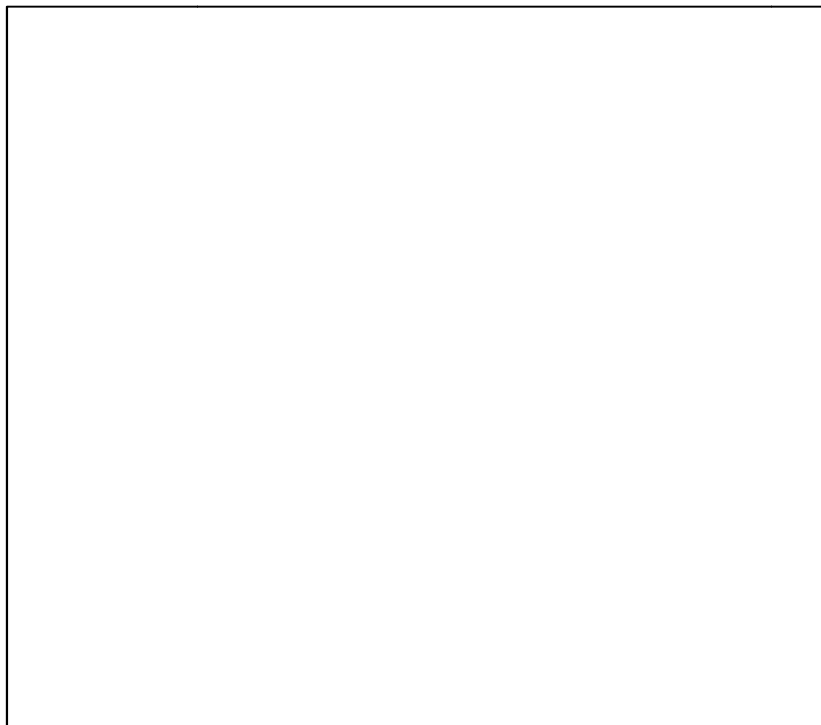


Figure35 : Nombre de marqueurs horizontales et verticales

Une fois les mires des marqueurs définis, dans cette étape d'étalonnage, dans l'option « modification de l'application », il faut spécifier des valeurs initiales aux caractéristiques de la position des caméras, qu'on peut trouver dans l'onglet « Montage », avec les valeurs conseillés suivantes :

- Distance caméra-référence : 600 – 600
- Grandissement : 10 – 10
- Orientation d'axe verticale : Gauche = -30° , Droite = 20°
- Orientation d'axe horizontal : Gauche = -40° , Droite = -40°

Etude de préformes en fibre de lin.



Figure 36 : valeurs initiales aux caractéristiques de la position des caméras

Pour finaliser l'étalonnage on clique sur Quitter et après sur Enregistrer, et ainsi lancer le calcul.

Ce calcul correspond à la position tridimensionnelle initiale (et enregistrée par les caméras) des marqueurs. Pour ce calcul le logiciel utilise les valeurs introduites comme valeurs initiales. Si ce calcul ne converge pas ça veut dire que les valeurs de départ, notamment des angles d'orientation des caméras, ne sont pas correctes et on doit les changer. Dans ce cas le logiciel affiche sur l'écran un message d'erreur : « pivot nul » et des valeurs initiales plus approximés aux adéquats que celles prises.



Figure 37 : Message d'erreur : pivot nul

Etude de préformes en fibre de lin.

Quand le calcul converge on doit quitter la fenêtre et sauvegarder. Les paramètres sont sauvegardés dans un fichier « .eta » dans le répertoire créé. Ces valeurs seront utilisés dans les post traitement des essais à faire et seront automatiquement implémentés en chargeant le fichier étalonnage « .eta » en début de chaque nouveau post traitement (et ne devons bien évidemment pas être modifiées).

5.1.4 Placement du tissu et emboutissage

Avant de commencer l'emboutissage il faut placer le tissu entre la matrice et la plaque de maintien, en le positionnant de façon à avoir les marqueurs (points de peinture) aux endroits désirés. Une fois que le tissu est placé on essaiera faire coïncider le centre du flan initial au sommet du poinçon, et par conséquent, les bords du tissu qui dépassent des côtés de la plaque doivent être de dimension similaire.

Quand la position du tissu est correcte, on doit le tendre avec le système de tension des renforts, qui empêche la formation de plis avant d'appliquer la pression grâce aux serres flancs. Ces serres flancs sont réglés à une pression déterminée, grâce aux neufs valves décrites précédemment. Attention toutefois puisqu'ils sont libres en rotation ils peuvent mal se positionner et ainsi gêner la montée du poinçon lors de l'emboutissage.



Figure 38 : Système de pré-tension

Quand les serre-flancs sont en place et la pression appliquée, si le cadre (contenant la matrice ouverte) n'est pas en position, il faut le descendre le cadre à la hauteur désirée, puis retirer le système de pré-tension, puisque le flan est tenu par les serres flancs. Pour les marqueurs sur les bords de la matrice, il peut y avoir un contraste de couleur .On peut dans ce cas, positionner un support amovible afin de réduire ce contraste.

Les données acquises pendant tout l'emboutissage (les images prises par les caméras) iront dans le sous-dossier « Données » créé précédemment.

Etude de préformes en fibre de lin.

Il faut aller dans le menu Application et choisir l'option « nouveau » pour créer un fichier extension « .ima » Lorsque ce fichier est créé, il faut retourner sous Deflac 3D et cliquer sur acquisition d'image, cocher mode « Auto » et régler la fréquence d'acquisition d'images. L'acquisition des images doit être déterminée par rapport à la vitesse du poinçon. Normalement, pour une vitesse du poinçon de 500 $\mu\text{m/s}$, le temps d'acquisition est d'une image toutes les deux secondes. Ce sont les valeurs les plus communément utilisées, notons qu'au delà de 350 images il faudra diminuer la fréquence d'acquisition.

Pour déterminer les paramètres relatives au vérin électrique, on doit allumer l'ordinateur que le commande, lancer le logiciel Drive et en cliquant sur COM1 et ouvrir le boucle de position. Postérieurement, en cliquant sur Prise d'origine, on doit vérifier la vitesse d'ascension du poinçon et leur sens. Il faut cocher sens de déplacement négatif pour que le poinçon monte.

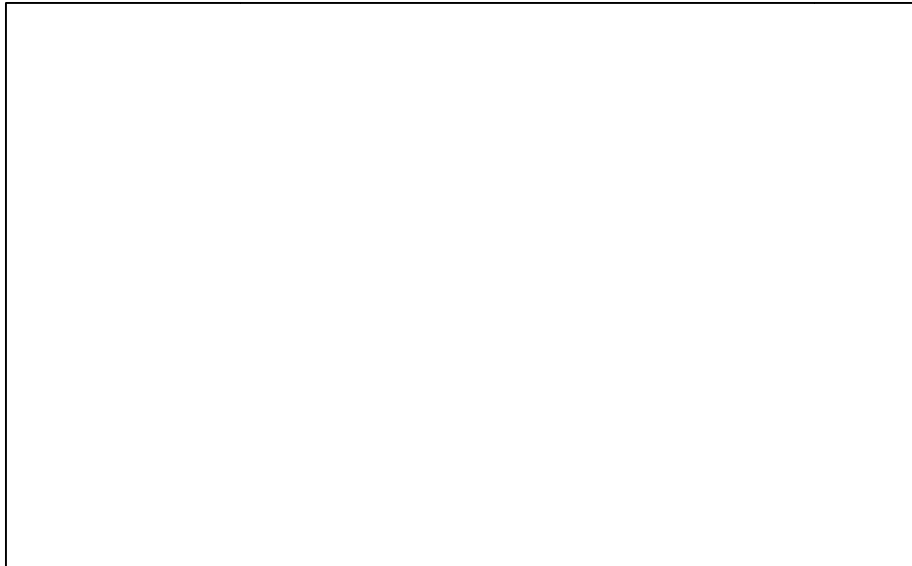


Figure 39 : Variateur 0 « Drive0 »



Figure 40 : Prise d'origine « Drive0 »

Etude de préformes en fibre de lin.

Lorsque tout est prêt et « acquisition continue » (dans Deftac) est sélectionnée, le vérin du poinçon sera mis en marche en cliquant sur « Démarrer ». Pour arrêter le poinçon à la fin de sa course, il faut cliquer sur « Arrêt » (dans Drive).

En plus de l'ensemble des données sauvegardées et associées aux caméras. A l'issue de l'essai il convient de prendre des photos à l'aide de l'appareil numérique. A l'aide de la corrélation nous aurons des informations locales aux zones analysées (où il y a des marqueurs). Des photos de la préforme globale, des défauts, de l'avalement, de la position des boucles permettront de compléter l'analyse. Attention à bien référencer les côtés où sont prises les photos afin de ne pas mélanger les données récoltées.

La dernière étape consiste à figer la préforme pour la démouler.

Pour que le tissu ne perde pas la préforme, il faut appliquer de la résine époxye. Il faut se munir de gants, de lunettes et d'un masque respiratoire. Afin d'accélérer la polymérisation de cette résine, un séchoir électrique est utilisé à une température suffisante. Il est nécessaire de bien laisser sécher sinon le démoulage de la préforme du poinçon ne pourra s'effectuer correctement.

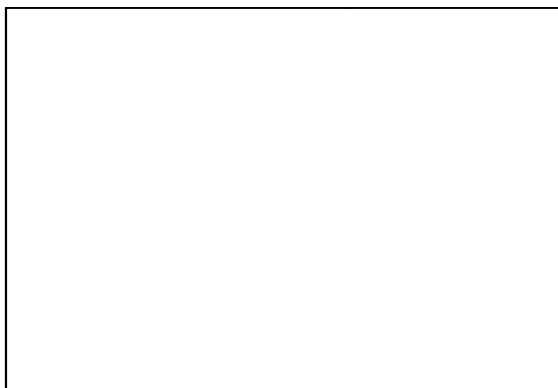


Figure 41 : séchoir électrique

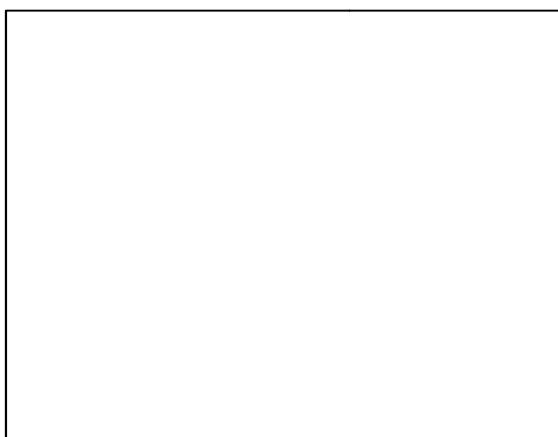


Figure 42 : Masque respiratoire



Figure 43 : résine époxy

Etude de préformes en fibre de lin.

Une fois la préforme bien figée, il faut la retirer du poinçon. Pour cela il faut remonter le cadre, en ayant bien dévissé avant les quatre vis, et également re-descendre les serres flancs en descendant la pression pneumatique des valves. La préforme doit être retirée avec soin du poinçon. Puis à l'aide du logiciel Drive, il faut redescendre le poinçon en position basse. Attention au passage des serres flancs.

La résine époxy déposée sur la préforme laisse des traces sur les outils après polymérisation il est nécessaire de nettoyer soigneusement ces traces de résines. Notamment à l'entrée de la matrice, dans les rayons de courbure. Cette opération de nettoyage s'effectue avec de l'acétone. Enfin il faut redescendre le cadre et bien revisser les 4 vis.

5.1.5 Post-Traitement des données

Avant de post traiter il est convenait copier les fichiers obtenus avec Deftac 3D lors de l'essai pour avoir une copie de sécurité. Dans le dossier général de post-traitement il sera créé un répertoire qui contiendra la copie des données originaux et autant fichiers comme quantité de post-traitements soient faits.

Il est important invertir les données pour réaliser le calcul à l'envers, de la fin au debut de l'essai parce que la majorité des marqueurs dessinés sur le tissu qui ont un intérêt d'analyse ne sont pas visibles au debut de l'essai quand il est à plat. Pour cette inversion de photos un macro d'Excel à été créé.

Après, dans Deftac 3D, on doit aller dans modification de l'application et activer « Calcul des positions et des déformations » en sélectionnant le « mode de calcul en L ». Il faut ne pas oublier cocher les bords pour avoir en compte des effets de bord pour le calcul des déformations et non plus désactiver l'étalonnage. Dans parcourir, charger le fichier « .eta » qui implémentera les caractéristiques du montage obtenues lors de l'étalonnage.

En fonction des résultats désirés un certain nombre de points seront étudiés. Une fois de plus le niveau et le seuil de gris seront modifiés et adaptés aux nécessités. Ces points doivent être sur les mêmes trames et chaînes en formant un angle de 90° parce que l'angle initial θ_0 doit être connu et car c'est le tenseur de déformation des mèches que va calculer le logiciel.



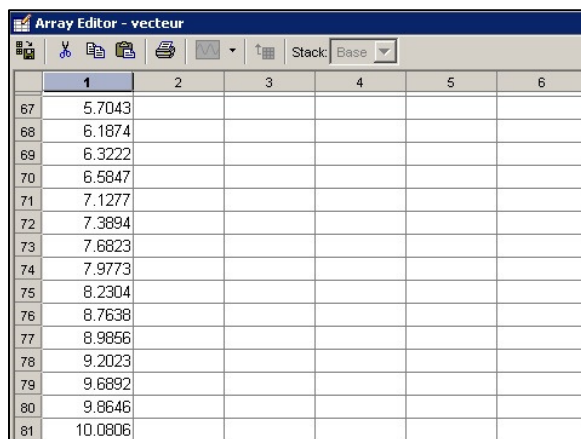
rs pour le post-
és

Etude de préformes en fibre de lin.

Quand les marqueurs sont choisis et réglés le calcul de la position de marqueurs sera lancé (Menu / Calcul / Lancer) et on doit vérifier que le logiciel suit correctement les marqueurs pendant tout le post-traitement quand ils sont visibles (sino il faut réajuster le seuil, le niveau et l'encadrement des marqueurs qui sont en jeu). Quand les marqueurs commencent à se cacher au de sous de la matrice et le logiciel n'arrive pas à suivre un point on notera ce moment. Donc, l'expérimentateur aura de données pendant le logiciel arrive à suivre tous les points, pour le reste d'instantes, après, Matlab considérera que les points analyses –et donc les mèches sur lesquelles il sont dessinés- maintiennent son état initiale.

Finalement les fichiers doivent être enregistrés dans le dossier concerné, pour lequel le « Calcul final » sera lancé. On doit récupérer les fichiers dans le dossier créé précédemment (par exemple « Post-traitement A ») pour pouvoir les traiter.

Le dernier étape consiste en le traitement de données sous Matlab. Pour ça, il est créé un program sous cet logiciel qui nous permet, en le donnant les références appropriées (essai entier ou non entier, nombre de lignes dans le fichier data et nombre d'états dans ce fichier), obtenir l'évolution de l'angle de cisaillement vers le temps, graphiquement et en forme de vecteur.



	1	2	3	4	5	6
67	5.7043					
68	6.1874					
69	6.3222					
70	6.5847					
71	7.1277					
72	7.3894					
73	7.6823					
74	7.9773					
75	8.2304					
76	8.7638					
77	8.9856					
78	9.2023					
79	9.6892					
80	9.8646					
81	10.0806					

Figure 45 : Vecteur de déformation anguler de Matlab

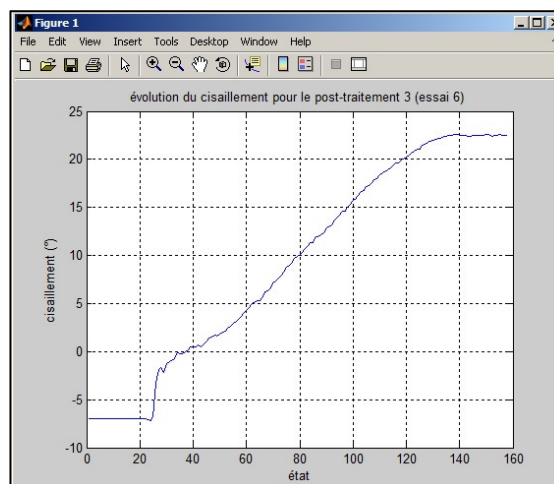


Figure 46 : Graphique d'évolution de l'angle de cisaillement de Matlab

Etude de préformes en fibre de lin.

Généralement, les post-traitement ne son pas complet et ont une répercussion sur les résultats : cela se voit sur la courbe ce qui permet de la tronquer à l'aide d'Excel pour améliorer la courbe moyenne.

5.2 Résultats de la campagne d'essais

Pour décrire les essais faites une procédure comme la suivante sera suivi :

Tout d'abord les conditions initiales seront montrées : Conditions d'essai, propriétés du tissu, géométrie du tissu et des outils utilisés. Après autre deux aspects vont être analysées. Le premier à l'échelle de la préforme (dimensions, forme et défauts de type boucle et plis). L'autre qui se repose sur les angles de cisaillement entre les mèches les défauts

5.2.1 Essai avec le renfort A : Poinçon Prismatique

Conditions initiales.

Tout d'abord il sera montré un petit schéma de la préforme pour connaître l'orientation de chaque côté et ses dimensions.

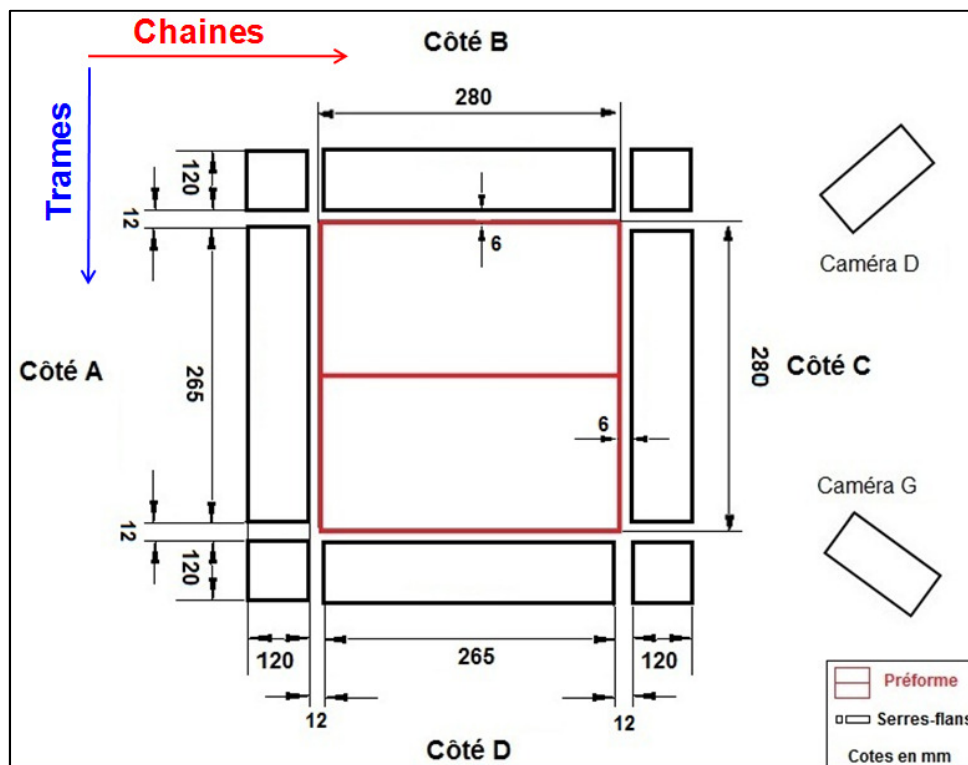


Figure 47 : Schéma de la préforme prismatique.

Etude de préformes en fibre de lin.

Des autres conditions initiales de l'essai sont les suivants :

- Nombre de pli de tissu : 1
- Pression des serre-flancs : 1 bar
- Vitesse du poinçon : 500 $\mu\text{m/s}$
- Fréquence d'acquisition des images : 1 image tous les deux secondes

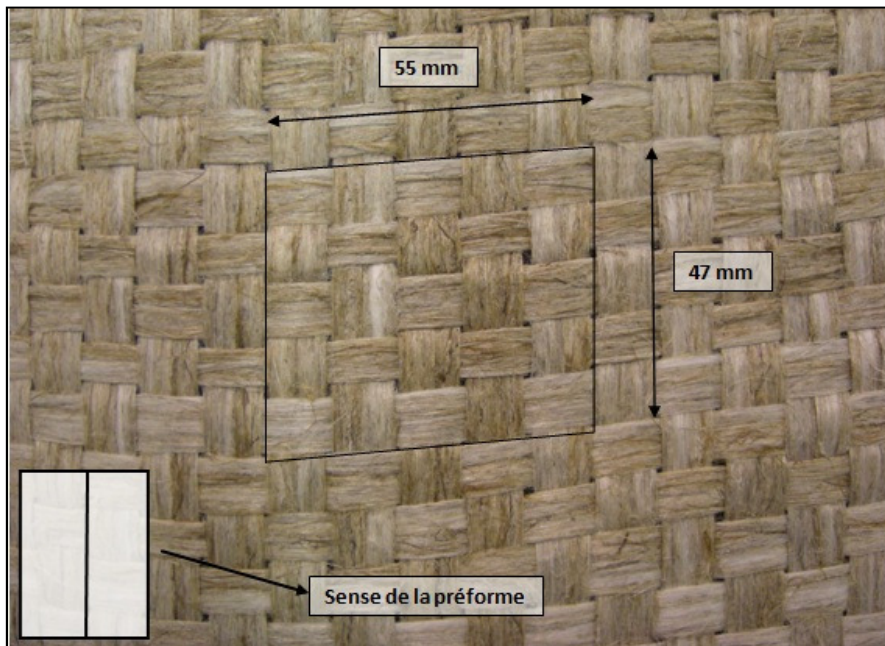


Figure 48 : Disposition originale du tissu et la retourner

Géométrie et défauts à l'échelle de la préforme

L'image suivante montre la préforme obtenue après l'emboutissage du renfort :

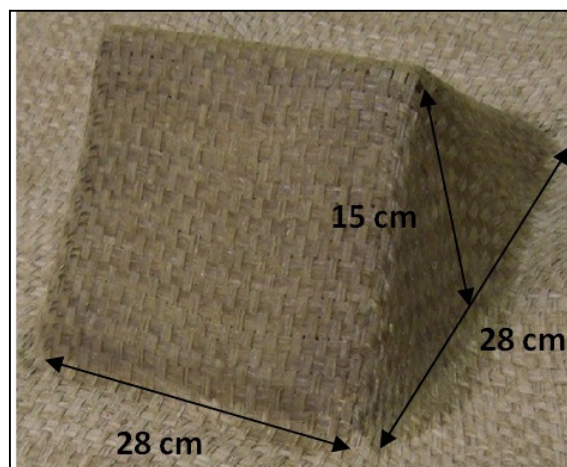


Figure 49 : Les dimensions de la préforme (Essai 1)

Etude de préformes en fibre de lin.

Les boucles

Le phénomène de la formation de boucles est une conséquence de l'emboutissage. Ce sont des défauts conséquents car une direction du renfort sort du plan et génère par conséquent une surépaisseur de matière. Ce phénomène provient d'une tension conséquente des mèches dans une direction (pour épouser la forme souhaitée) qui entraîne, par le tissage un effet de compression des mèches dans l'autre direction. La rigidité de compression des mèches étant quasi-nulle, ces mèches flambent et sortent du plan de la préforme. Cette surépaisseur perturbe l'écoulement de résine lors de la phase d'injection et par ailleurs rend la pièce totalement inacceptable.

Les zones où des boucles se forment sont :

- Les arêtes diagonales du prisme triangulé (Rouge)
- Autour des points triples. (Bleu)
- En long de l'axe de symétrie (Vert)

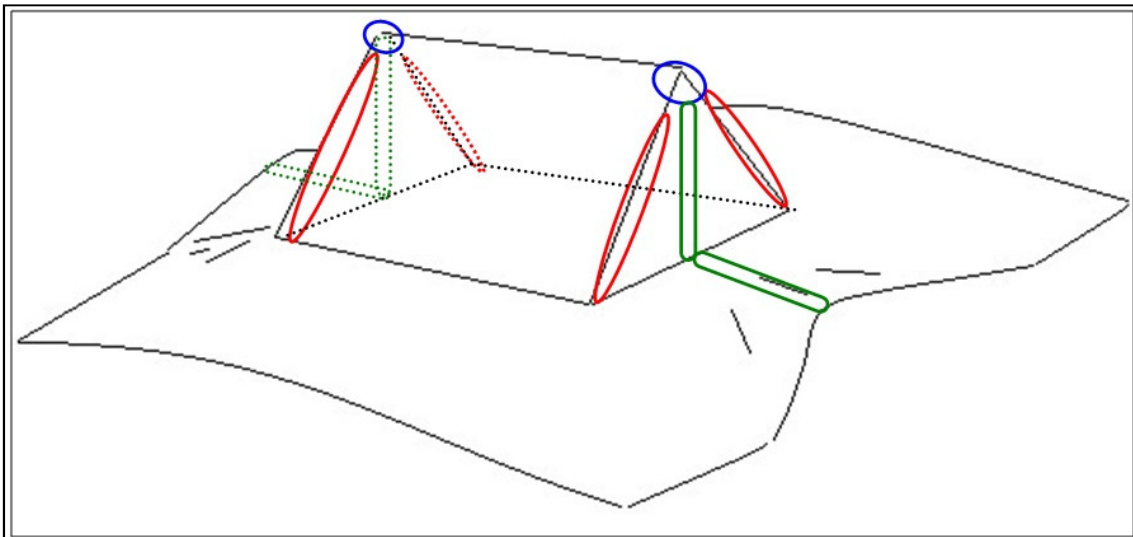


Figure 50 : Schéma avec positionnement des boucles

Boucles sur les arêtes diagonales du prisme triangulaire.

Ils sont les boucles plus prononcées, avec une hauteur moyenne de 3 mm, même il y a plusieurs boucles de 4mm. Ils sont distribués d'une forme homogène sur toute l'arête.

Après d'emboutissage il y a des différences entre les arrêtes du côté A et côté C. Quand on a mesuré les mêmes groupes de 5 mèches consécutives on a obtenu les suivants résultats : On a passé de 47 mm à 40 mm de longueur pour group sur les arrêtes AB et DA. C'est



Figure 51 : Boucles sur l'arête

Etude de préformes en fibre de lin.

parce que les mèches sont comprimés et même sournoisés entre si, ce qui fait que l'espace original de 1,5 mm entre deux mèches consécutives désapeure. En revanche ca n'arrive pas dans l'autre côté. Sur les arrêtes BC et CD, l'effet est plus doux, il passe de 47 mm à 45 mm.

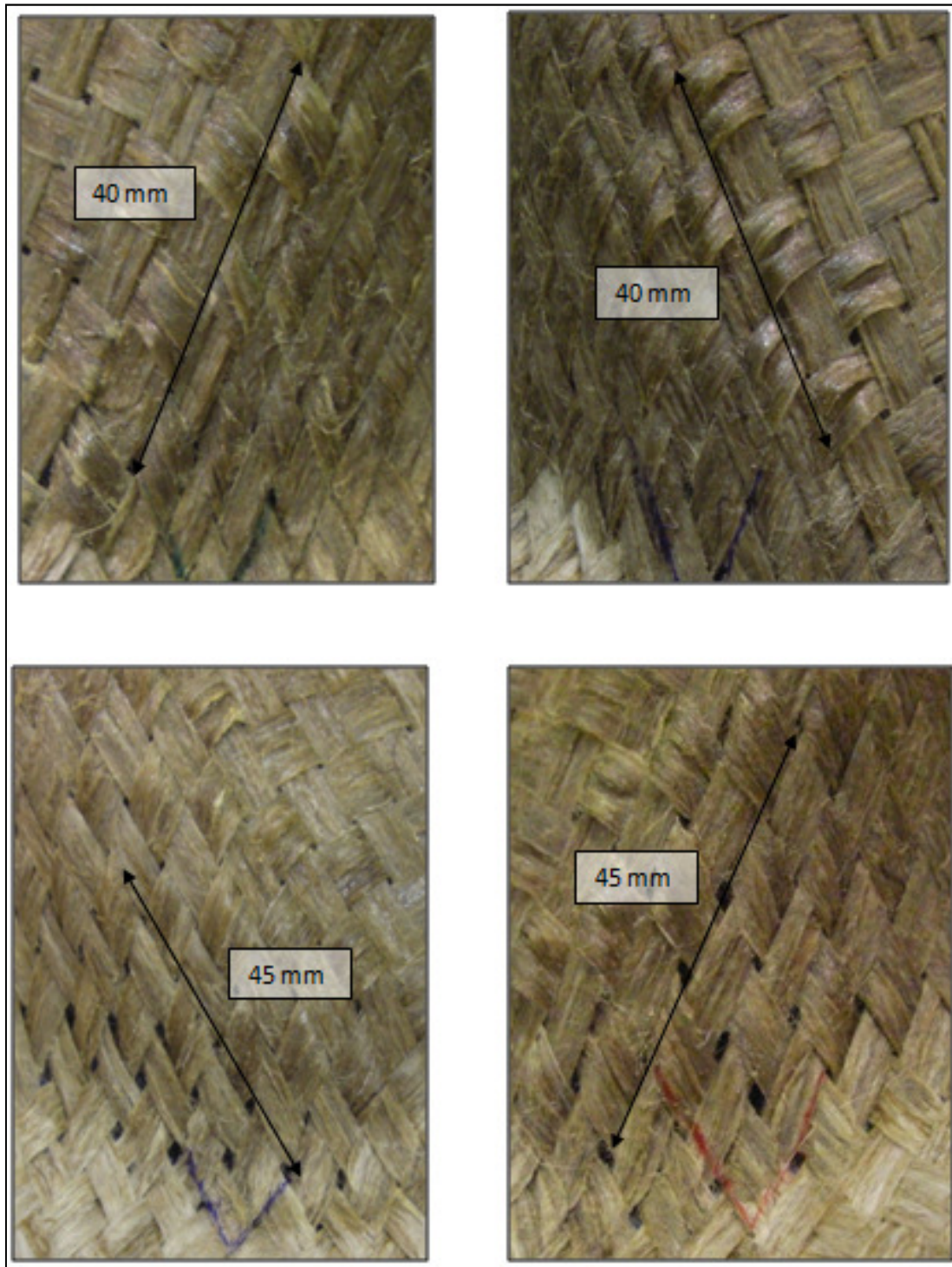


Figure 52 : Compression des mèches des arrêtes



Figure 53 : Boucles sur l'arête AB



Figure 54 : Boucles sur l'arête BC



Figure 55 : Boucles sur l'arête CD



Figure 56 : Boucles sur l'arête DA

Etude de préformes en fibre de lin.

Boucles en long de l'axe de symétrie de la préforme

L'emplacement de ces boucles spécifiquement à ces endroits, pour cette géométrie de préforme, avaient déjà été constatées et analysées lors d'essais préalables réalisés avec un renfort de carbone.

On constate sur ces faces et de part et autre de ces axes une courbure conséquente des mèches dans une des direction. Les boucles se forment sur les axes (milieu de ces faces, pour cette préforme) à l'endroit où les courbures sont les plus importantes. Comme pour les arêtes la sollicitation en traction est quantitativement différente dans une direction du réseau. Le fait qu'il y ait peu ou pas de glissements aux intersections provoque une courbure des mèches. Plus le réseau est proche du point triple, plus la courbure est importante, pour épouser la forme donner par les arêtes.



Figure 57 : Boucles en long de l'axe de symétrie

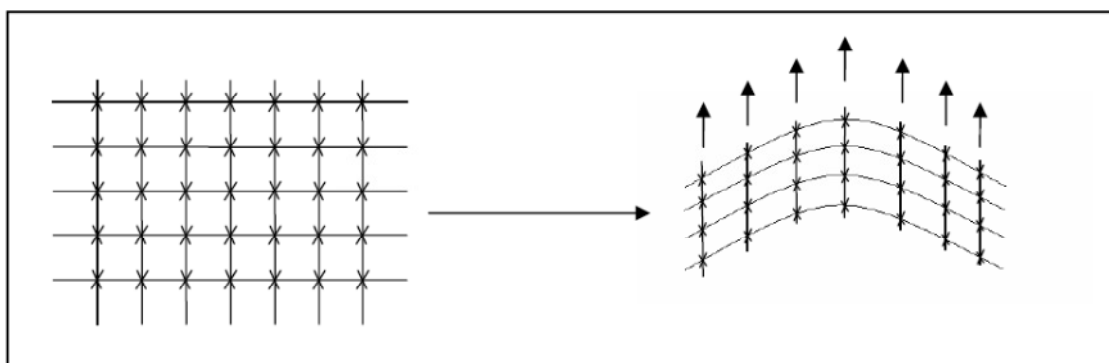


Figure 58 : Phénomène de boucles

Etude de préformes en fibre de lin.



Figure 59 : Boucles en long de l'axe de symétrie

Le long de ces axes de symétrie l'espacement entre ces mèches varie entre le bas de la zone utile et le point triple (haut de la préforme). C'est une conséquence de la modification du réseau due à la courbure. Plus on converge vers le point triple, point de convergence de l'axe plus la distance entre les mèches augmente. Le réseau se réorganise, mais pas, dans le cas de ce renfort pas forcément de manière symétrique.

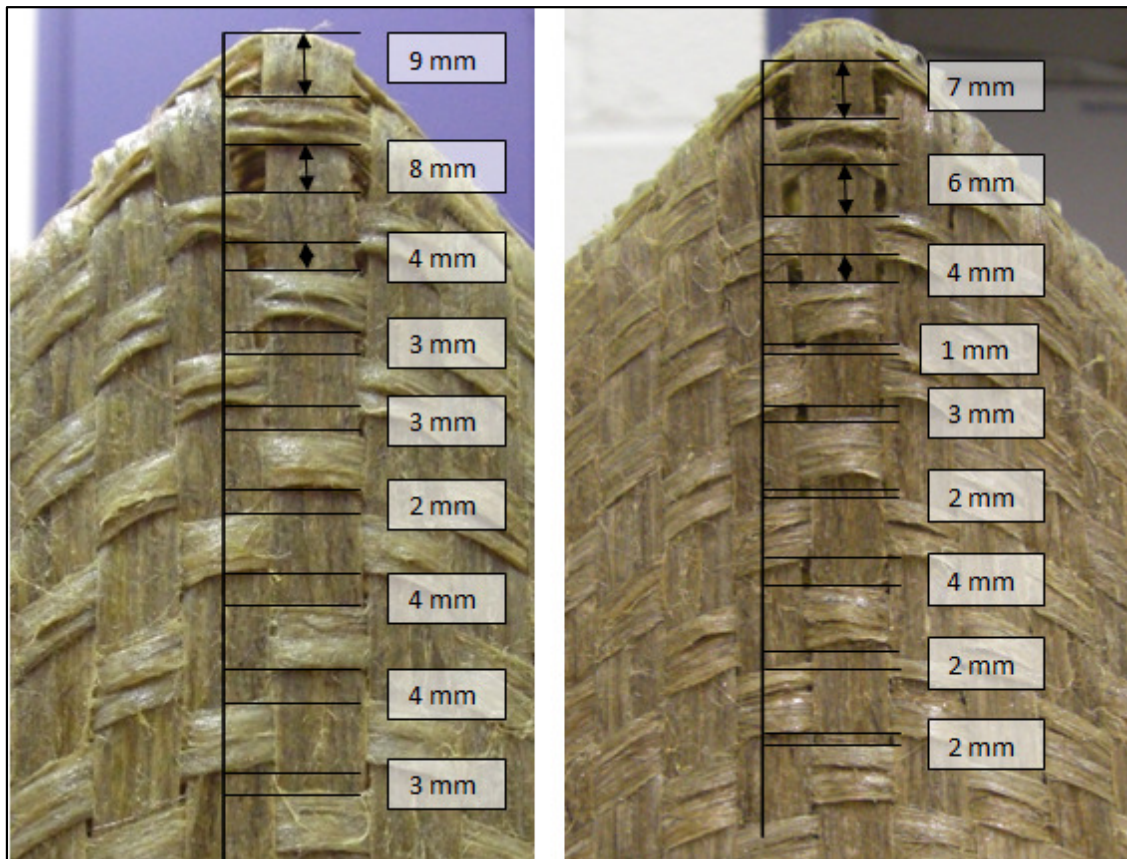


Figure 60 : Épaisseur des mèches des côtés A y C

Etude de préformes en fibre de lin.

Boucles et défauts autour des points triples

Autour des points triples, points de convergence entre les arêtes mais également des axes de symétrie, les défauts sont les plus visibles et se caractérisent sous formes de boucles mais également sous forme de trous. En effet les distances entre les mèches s'accroissent (distance de 8 mm à la place de 1mm initialement) et laissent des espaces (sans renforts) qui lorsqu'ils seront comblés par la résine modifieront les fractions volumiques locales. La non homogénéité de cette fraction volumique à ces endroits, les plus sollicités, rend la pièce non acceptable.



Figure 61 : Boucles autour des points triples

Conclusions sur les boucles. Suite aux études précédentes menées sur un renfort de carbone ; les boucles sont une conséquence de la forme utilisée (pour leur emplacement) du tissage du renfort mais également de la pression serre flan utilisée (ainsi une pression plus importante aurait tendance à tendre plus les mèches et à aplatir les boucles).

Ce qui est spécifique à ce renfort de lin c'est la dissociation des 2 rubans. Le tissage qui génère des défauts trop importants notamment aux points triples

Les plis

A l'échelle de la préforme, les autres défauts visibles, mais pas forcément dans la zone utile de la préforme, relèvent de la présence de plis. Ces plis apparaissent dans les zones entre les serres flancs. Ils sont la conséquence, comme pour les boucles, d'une tension importante dans une direction qui implique un retrait du tissu (dans cette direction) comme montré sur la figure suivante. Cette tension génère dans l'autre direction du réseau une courbure donc la formation, mais à l'échelle du renfort, d'une zone hors plan. Les plis sont situés au centre de chaque côté du tissu, dans le prolongement de l'axe de symétrie de ces faces. Le retrait ainsi que la hauteur du pli sont alors mesurés. On peut constater que pour les faces A et C, ces plis sont dans la continuité de l'endroit où les boucles apparaissent, ils sont par conséquent, quantitativement plus importants. (hauteur, retrait du tissu) que sur les cotés B et D.

Etude de préformes en fibre de lin.

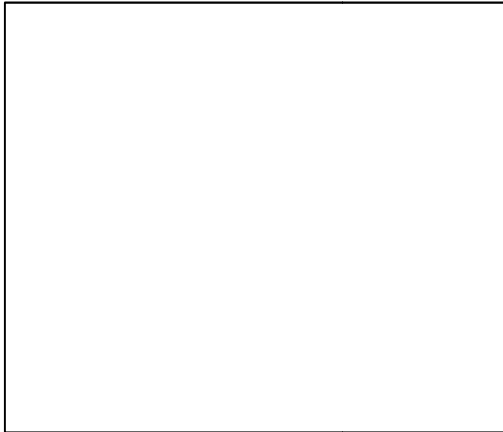


Figure 62 a) : Pli Côté A

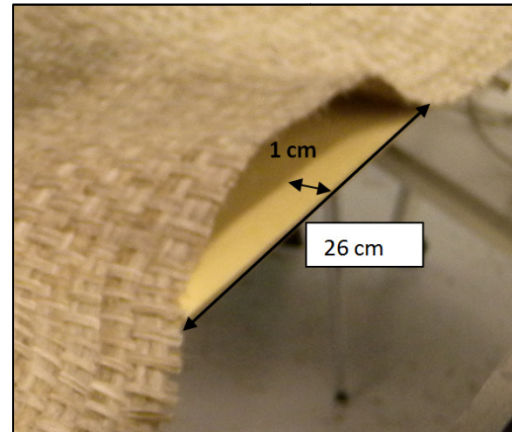


Figure 62 b) : Pli Côté B



Figure 62 c) : Pli Côté C

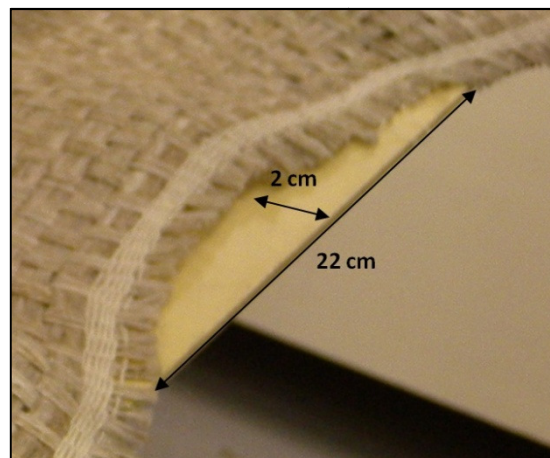


Figure 62 d) : Pli Côté D

Évaluation du cisaillement

Lors de l'emboutissage les mèches qui composent le renfort sec se réorientent pour permettre au renfort de s'adapter à la forme du poinçon. Cette réorientation génère le mode de déformation par cisaillement dans le plan. C'est du cisaillement intra-pli qui se caractérise essentiellement en une rotation des mèches au niveau des intersections. Ce comportement est spécifique à chaque renfort et peut-être identifié par des essais au cadre de cisaillement ou de « Bias-Test ». Une courbe comportement en cisaillement (effort de cisaillement en fonction de l'angle) est caractérisée par 3 zones. Une première phase au cours de laquelle l'angle augmente pratiquement sans effort. Aucune rigidité n'empêche les mèches du renfort de tourner. Une seconde phase où les mèches viennent en compression latérale et qui est marquée par une forte augmentation de l'effort de cisaillement. Il n'y a plus de rotation possible, cette phase est caractérisée par la valeur de l'angle dit « angle de blocage ». Enfin si l'effort se poursuit un blocage en cisaillement qui se traduit par l'apparition de plis. La mesure de l'angle entre les mèches, localement en certaines zones de la préforme, est donc un indicateur du comportement en cisaillement lors du procédé, et donc de la faisabilité du renfort à se préformer.

Etude de préformes en fibre de lin.

L'angle entre les mèches est analysé grâce au suivi de marqueurs. Pour cette préforme, cette analyse a été réalisée manuellement, une fois la préforme figée.

Mesures des angles aux coins de la préforme

Ces zones sont sollicitées car elles se situent à l'entrée matrice entre la zone utile et le reste du renfort.

Aux quatre coins de la zone utile de la préforme les angles entre les mèches, dont on déduit les angles de cisaillement ont été mesurés à l'aide de feuilles transparentes sur lesquelles le réseau des mèches a été redessinée. Ces mesures ont été réalisées deux fois en 9 intersections de mèches de chaque zone, puis la moyenne de ces 9 mesures a été calculée. L'angle entre les mèches est désigné par (θ_i). L'angle de cisaillement (γ) :

$$\gamma = \theta_0 - \theta_f = 90^\circ - \theta_f$$

On a obtenu les résultats suivants pour les quatre coins ::

	Coin A-B		Coin B-C		Coin C-D		Coin D-A	
	1 ^{er} mes.	2 ^{de} mes.	1 ^{er} mes.	2 ^{de} mes.	1 ^{er} mes.	2 ^{de} mes.	1 ^{er} mes.	2 ^{de} mes.
	θ	θ	θ	θ	θ	θ	θ	θ
1	42	44	53	52	53	54	45	48
2	44	47	53	53	53	52	45	47
3	42	46	55	53	54	53	45	47
4	42	43	52	54	55	54	46	47
5	43	42	54	53	52	52	43	46
6	42	45	56	52	53	53	44	46
7	43	46	53	51	54	54	43	48
8	44	44	54	52	55	53	44	47
9	43	45	56	52	54	54	44	47
$\sum \theta_i / n$	42,8	44,7	54,0	52,4	53,7	53,2	44,3	47,0
θ	43,7		53,2		53,4		45,7	
γ	46,3		36,8		36,6		44,3	

On constate une certaine homogénéité aux quatre coins de la préforme. Les coins du côté A étant plus sollicités, les mèches étant plus comprimées le cisaillement est plus important.

Etude de préformes en fibre de lin.

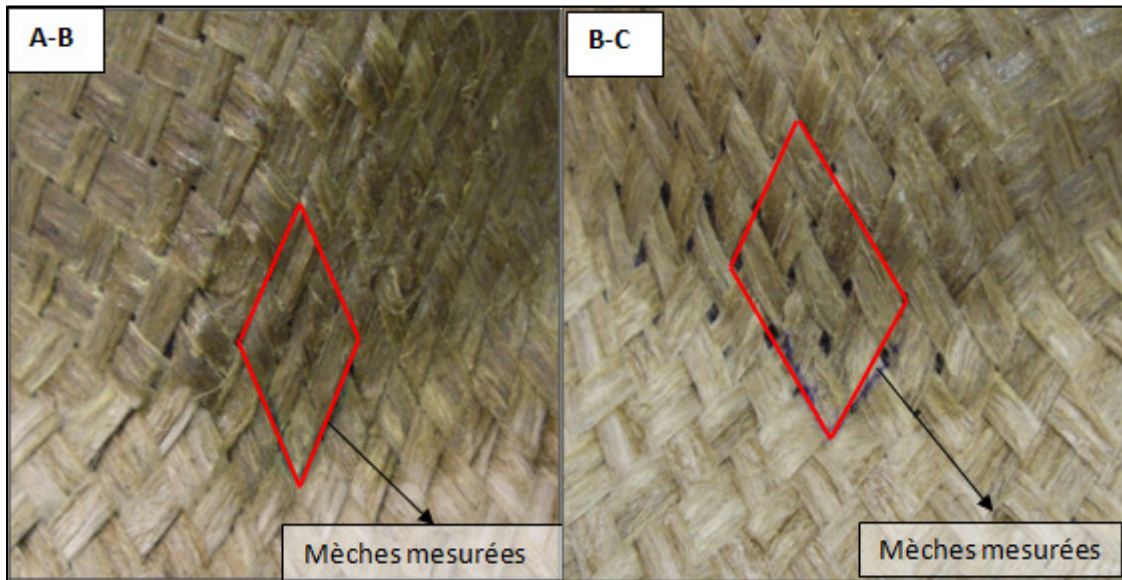


Figure 63 : Coins A-B et B-C

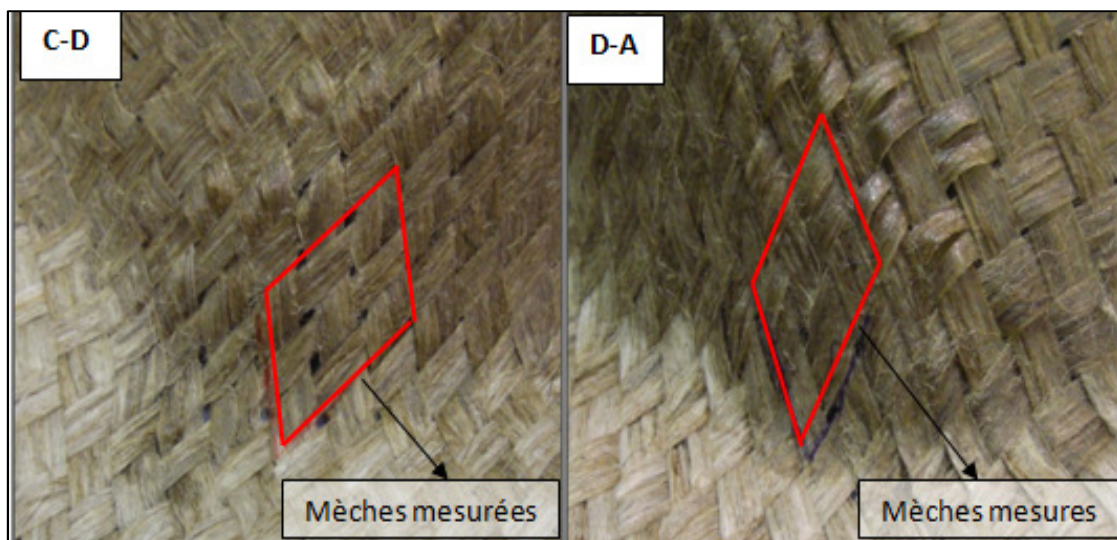


Figure 64 : Coins C-D et D-A

Comme on le voit dans les images, les mèches des coins du côté A, ça veut dire, les coins A-B y D-A, sont plus comprimés, plus près les unes des autres ; alors que les mèches des coins du côté C (coins B-C et C-D), malgré le cisaillement, elles gardent, plus o moins, sa disposition original. Ce sont précisément les coins du côté A celles qui subissent un plus grand cisaillement.

Etude de préformes en fibre de lin.

Mesures des angles sur les faces de la préforme

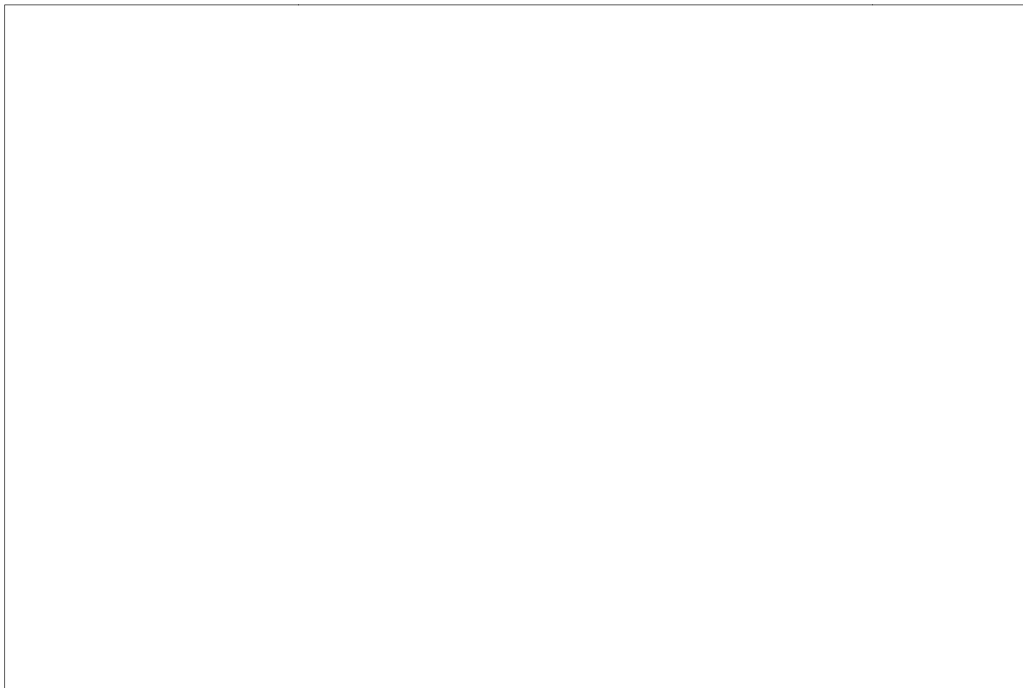


Figure 65 : Angles côté A

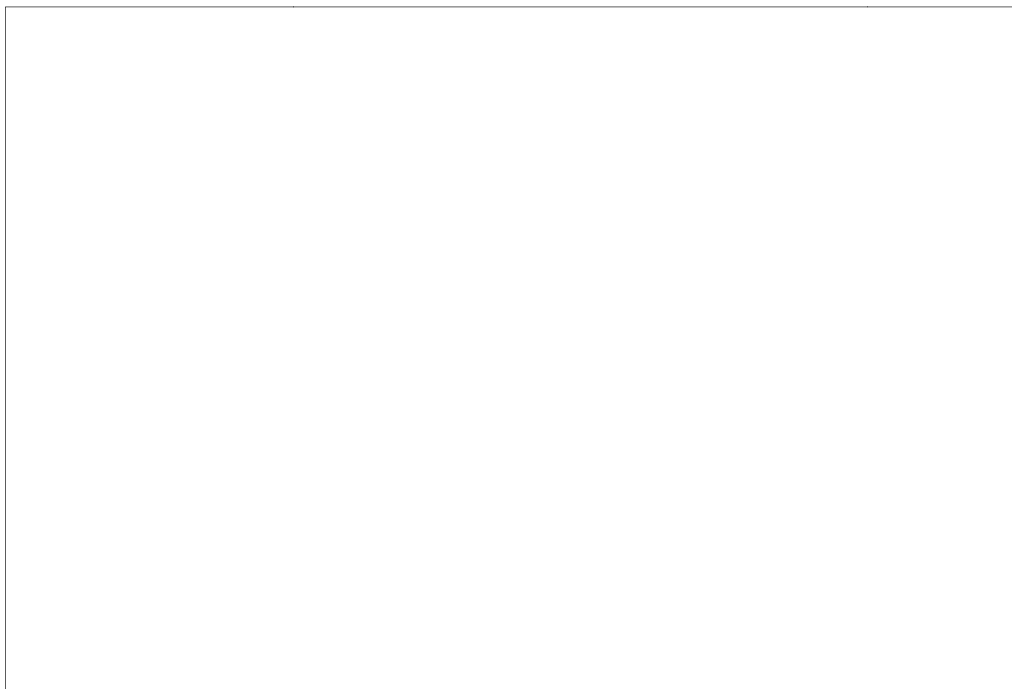


Figure 66 : Angles côté B

La mesure des angles sur les deux (petites) faces notées A et C de la préforme, conforte l'analyse sur les boucles. On constate sur ces faces l'évolution de part et d'autre de l'axe (centre de la face) de l'angle entre les mèches, ce qui traduit la

Etude de préformes en fibre de lin.

courbure décrite. Les angles augmentent en s'approchant de l'axe. Puis ré augmentent à l'approche des coins de la zone utile. Les deux faces sont relativement similaires.

Les mesures faites dans la continuité de ces faces dans la zone non utile montre la même variation d'orientation (de courbure) des mèches

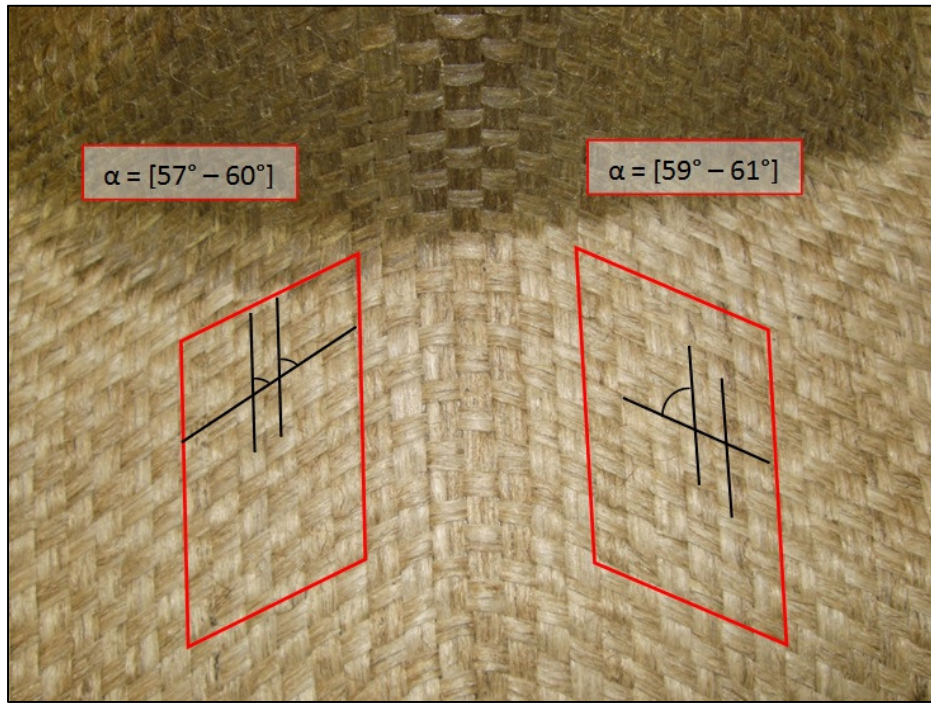


Figure 67 : Angles de zone de non emboutissage côte A

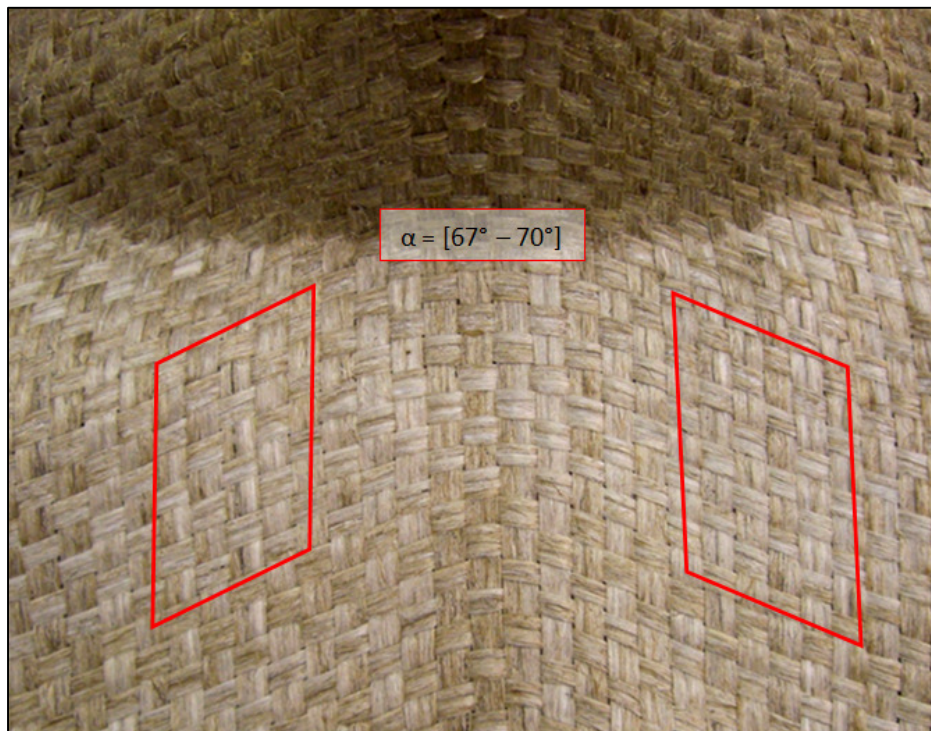


Figure 68 : Angles de zone de non emboutissage côte B

Etude de préformes en fibre de lin.

Sur les deux grandes faces (cotés B et D) de la préforme, faces quasiment sans défaut, sur lesquelles le renfort est bien plaqué, l'orientation des mèches n'a quasiment pas évoluée par rapport à l'orientation initiale. Le rapport de tension sur ces faces dans les 2 directions du réseau n'est tout de même pas identique. Certaines mèches évoluent dans leur orientation, dans la continuité des compressions subies sur els autres faces.

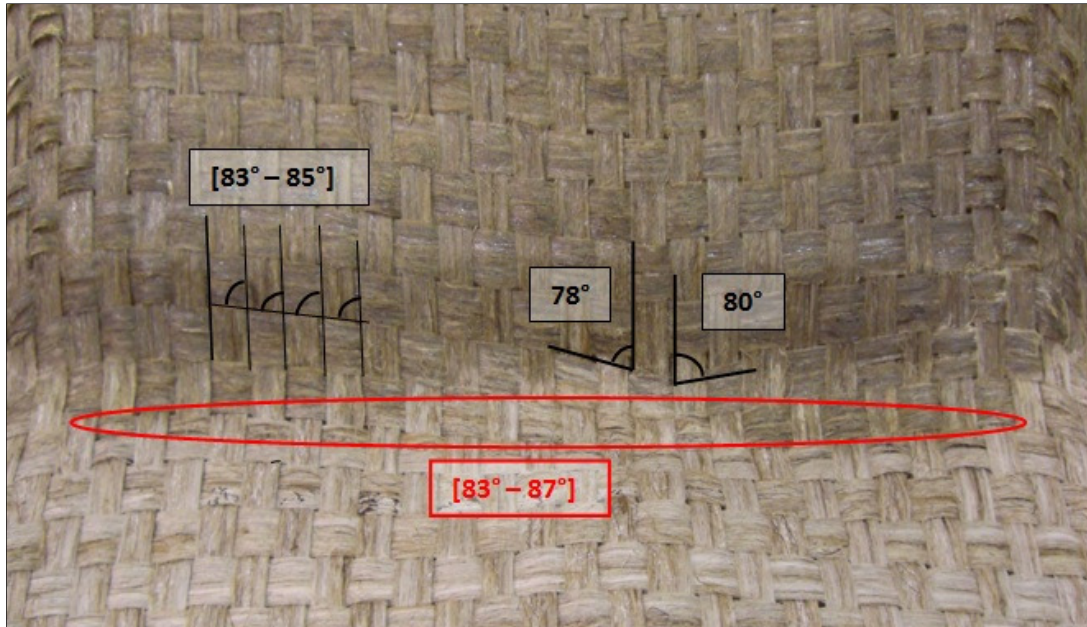


Figure 69 : Angles en bas du côté B

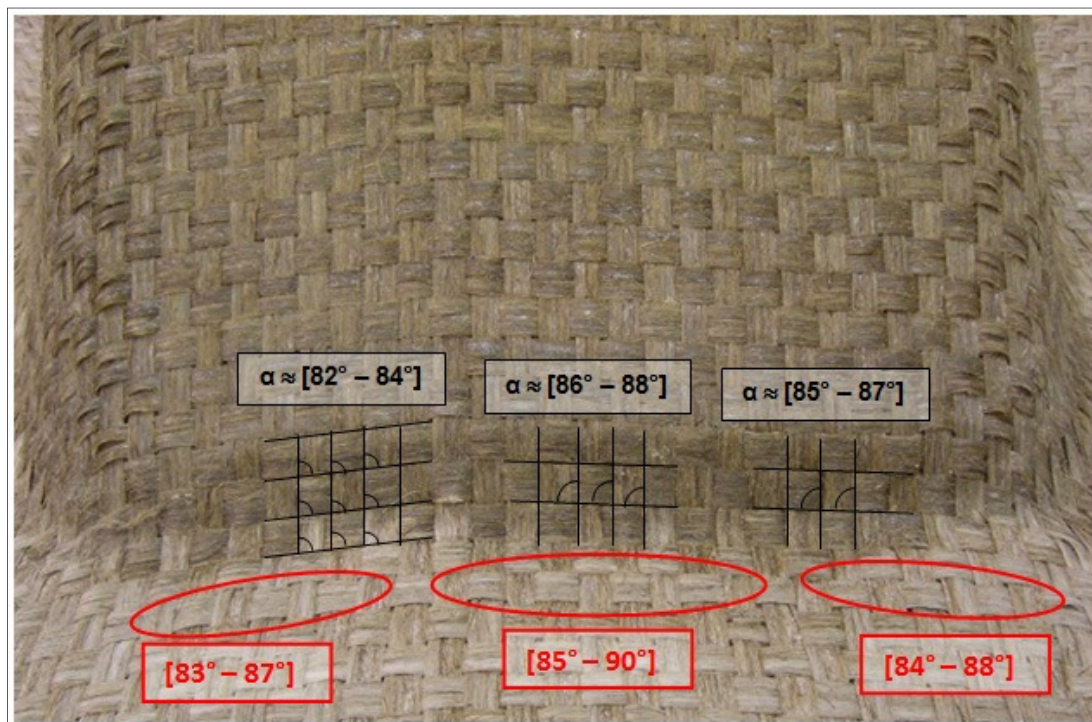


Figure 70 : Angles en bas du côté D

Etude de préformes en fibre de lin.

5.2.2 Essai avec le renfort B : Poinçon tétraédrique

L'utilisation du poinçon tétraédrique entraîne une configuration différente des composantes du démonstrateur notamment concernant le nombre et la disposition des serre-flancs. Voilà un schéma de cette disposition qui nous servira de référence en long de tout l'essai.

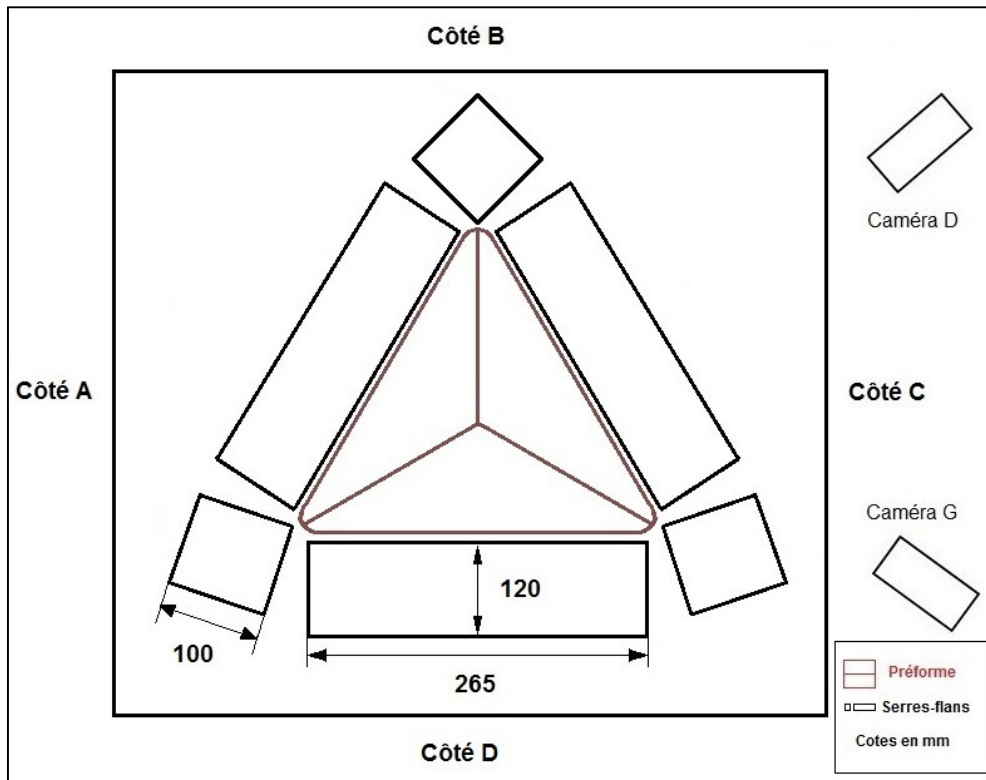


Figure 71 : Vue en plan de poinçon et serre-flancs en disposition tétraédrique

Conditions initiales

Ce deuxième essai a été développé avec le tissu qui on a classifié comme tissu B, dont ses caractéristiques étaient les suivantes :

- Tissu taffetas.
- Tissu non-équilibré.
- Largeur moyenne des chaînes : 2.9mm
- Distance moyenne entre chaînes : 0 mm
- Largeur moyenne des trames : 3.4 mm
- Distance moyenne entre trames : 2.8 mm

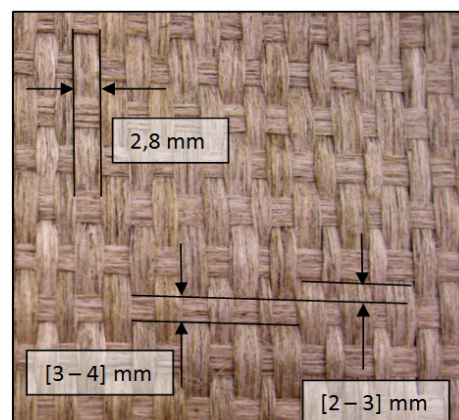


Figure 26 : Caractéristiques Renfort B

Etude de préformes en fibre de lin.

Pour cet essai, le suivi de marqueurs est utilisé et notamment le suivi logiciel avec Matlab et Deftac 3D. Des marqueurs sont ainsi positionnés sur les mèches, comme la procédure a été décrite précédemment.

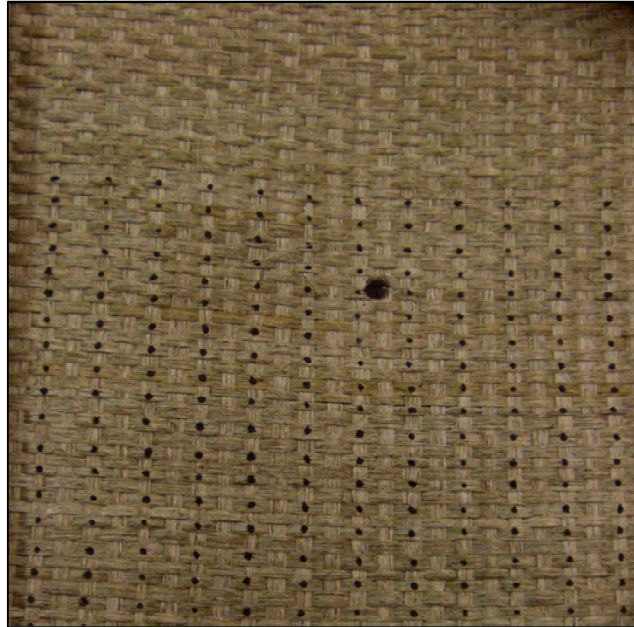


Figure 72 : Marqueurs sur le tissu B (Essai tétraédrique)

Dans les suivantes images il peut être vues les conditions initiales du tissu en ça que concerne à la géométrie et placement initiale du tissu par rapport au profile.



Figure 73 : Situation initiale du tissu

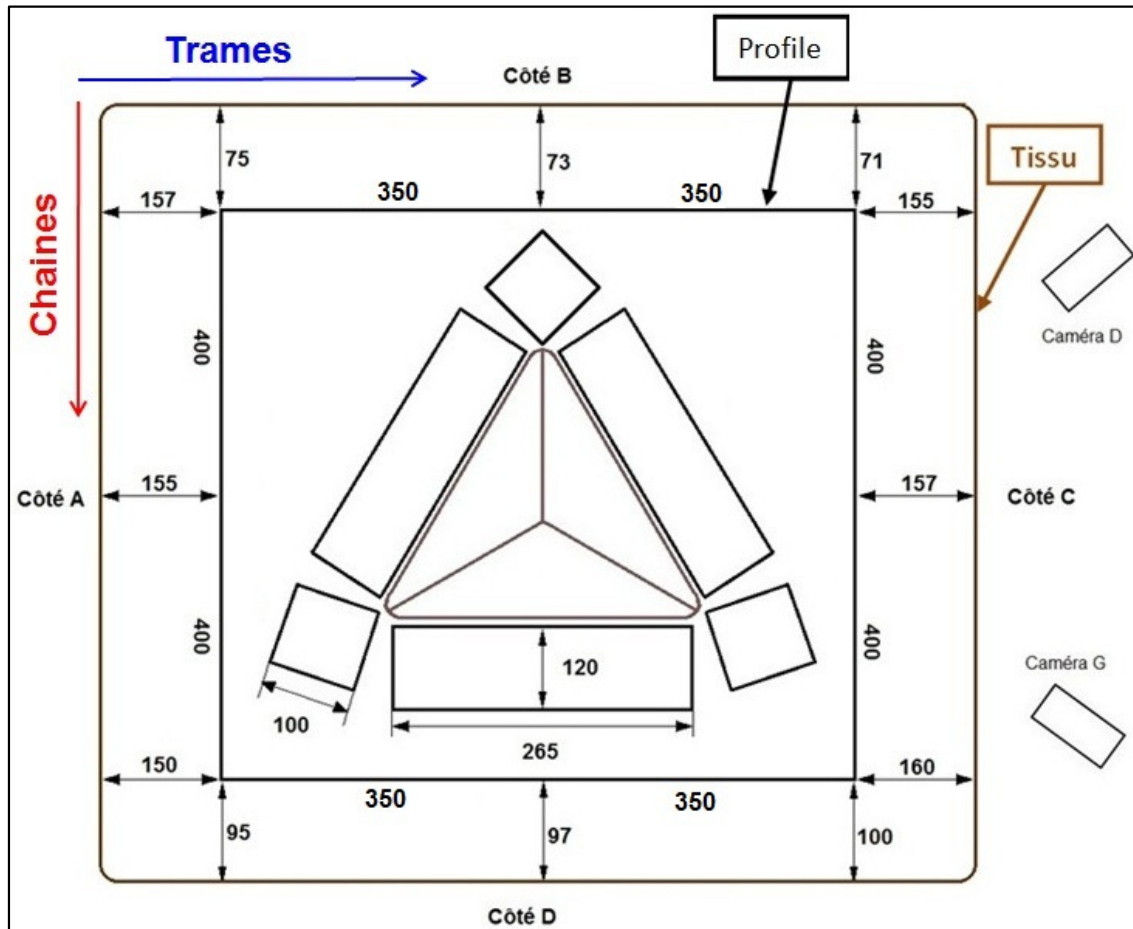


Figure 74 : Géométrie initiale du tissu

Un autre paramètre important est l'hauteur entre la plaque de maintien et la matrice qui a été établi en 1 cm pour tout le périmètre.

Des autres conditions initiales de l'essai sont les suivants :

- Nombre de plis de tissu : 1
- Pression des serre-flancs : 1 bar
- Vitesse du poinçon : 500 $\mu\text{m/s}$
- Fréquence d'acquisition des images : 1 image tous les deux secondes.
- Course du poinçon : 140 mm

Géométrie et défauts à l'échelle de la préforme.

De manière similaire à la forme pyramidale les défauts se répartissent en terme de boucles et de plis. L'avalement (forme finale) est représenté sur le schéma ci-dessous

Etude de préformes en fibre de lin.

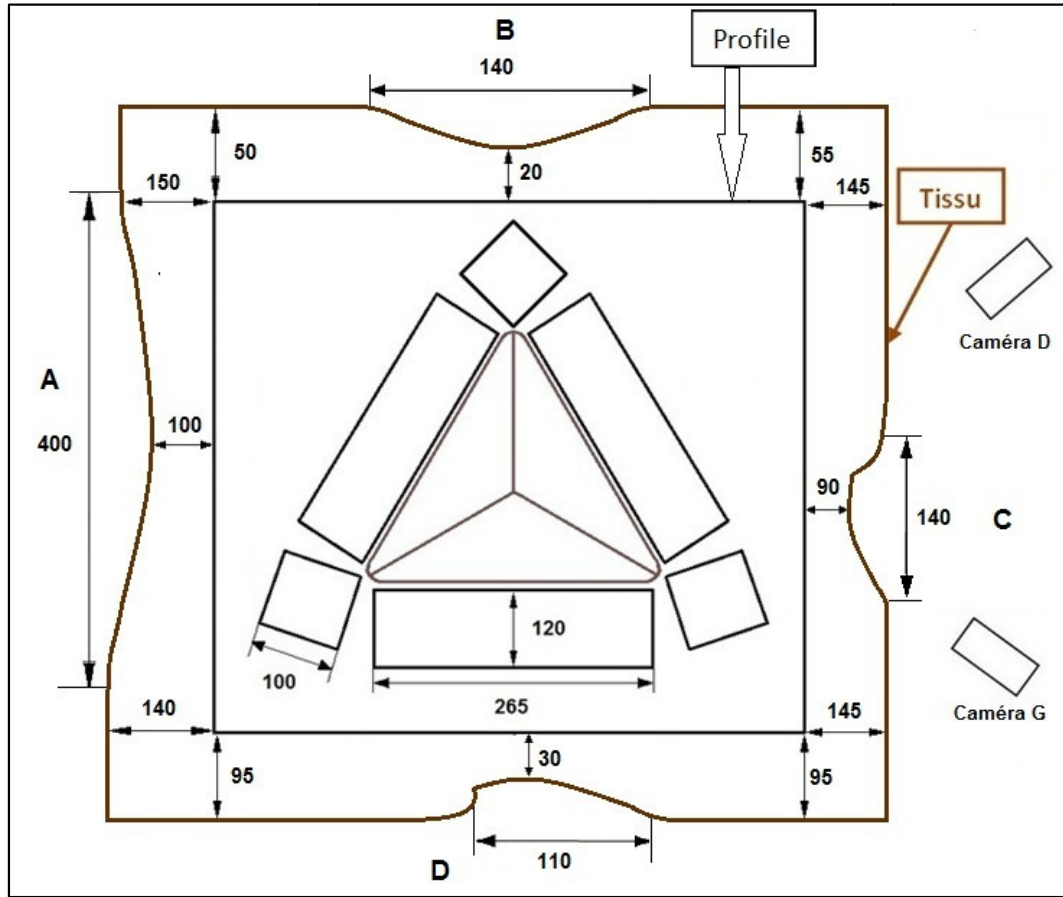


Figure 75 : Géométrie finale du tissu



Figure 76 : Tissu préformé

Etude de préformes en fibre de lin.

Les plis :

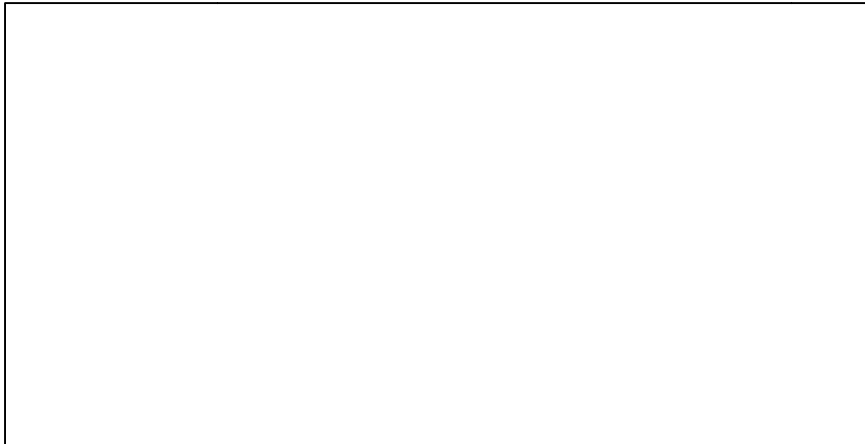


Figure 77 Hauteur du pli du côté A

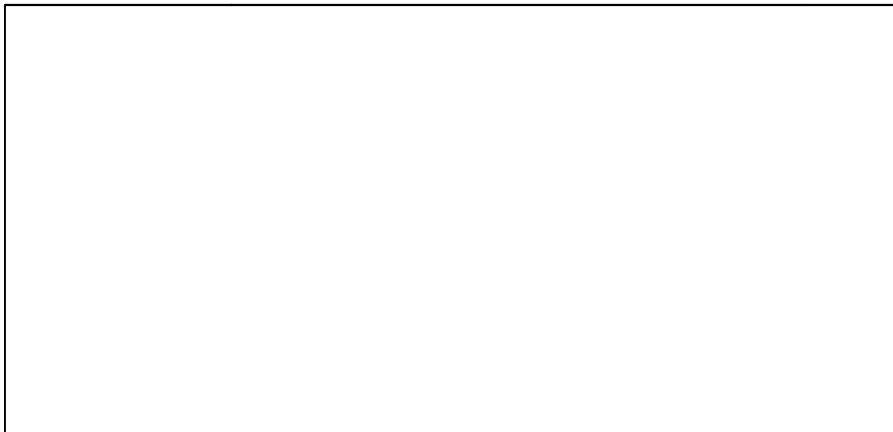


Figure 78 : Hauteur du pli du côté B



Figure 79 : Hauteur du pli du côté C

Etude de préformes en fibre de lin.

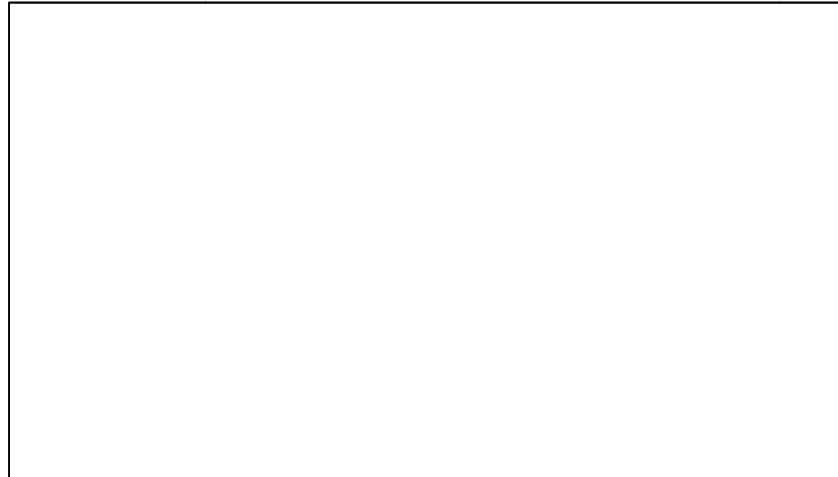


Figure 80 : Hauteur du pli du côté D

Les boucles :

Pour cette forme tétraédrique l'emplacement des boucles diffère de la forme pyramidale. A partir du seul point triple elles se situent (en bleue) d'une part sur une arête du poinçon et se prolongent au milieu de la face opposée (coté A). Pour les deux autres cotés (B et C) à partir du point triple les boucles se situent sur les face de la préforme (en rouge sur le schéma). Ces boucles suivent l'orientation du renfort positionné à 0-90° initialement.

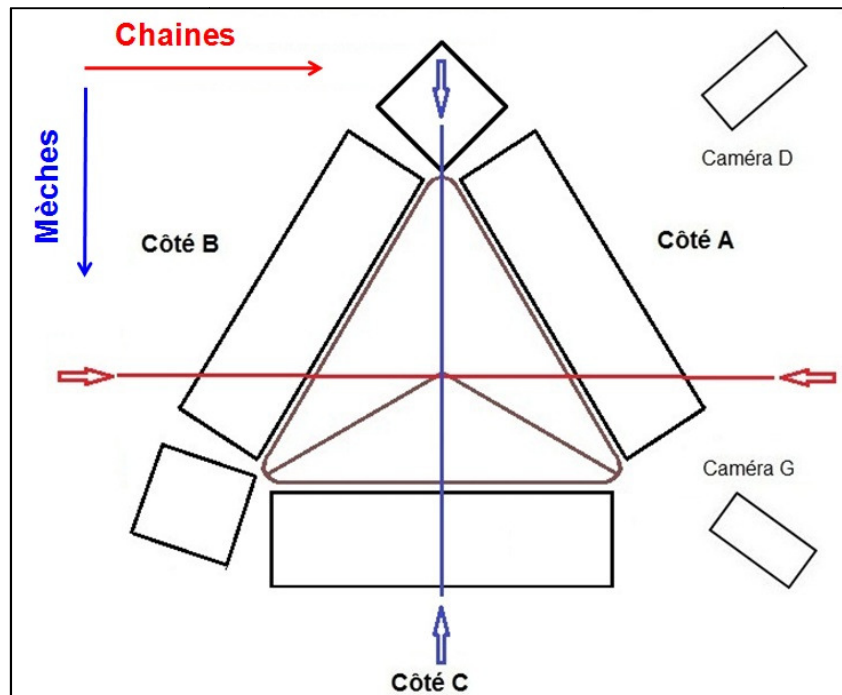


Figure 81 : Schéma de trois côtés avec les directions de formation de boucles

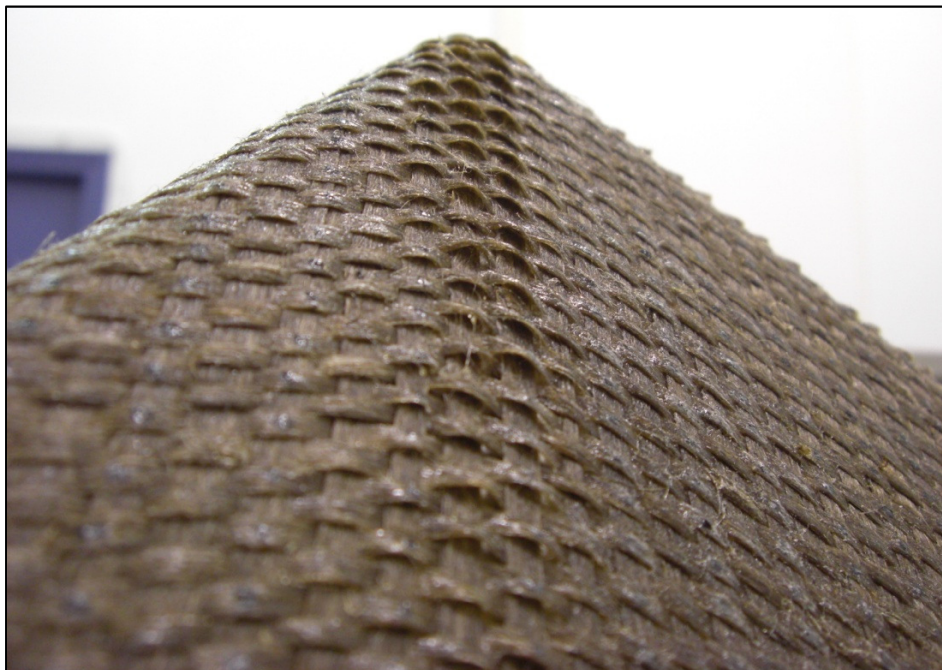


Figure 83 : Boucles sur le côté des cameras de la préforme (Coté A)

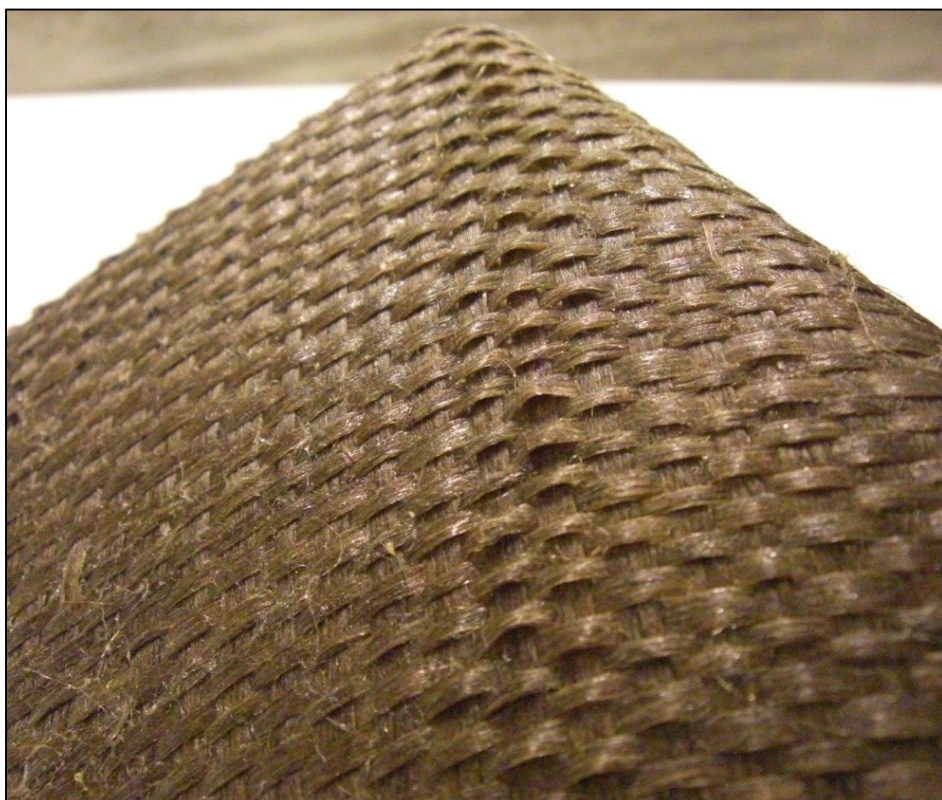


Figure 84 : Boucles sur le coté B

Etude de préformes en fibre de lin.

Ensuite il est montré une image avec la seule arête avec des boucles, parce que c'est l'unique qui se rencontre en direction des mèches ou chaînes (dans ce cas en direction des chaînes)



Figure 85 : Boucles sur l'arête (opposé au côté A)

La hauteur des boucles varie de 1 à 3 mm, les plus prononcées étant proches du point triple et sur l'arête. Quantitativement même s'il est difficile de comparer avec l'essai précédent car les formes et surtout le renfort ne sont pas identiques on peut constater que ces boucles sont moins importantes.

Evaluation de l'angle de cisaillement :

Pour mesurer l'angle entre les mèches et l'angle de cisaillement deux méthodes sont utilisées. La première est manuelle, comme pour l'essai précédent. L'autre utilise les données acquises par les caméras et le logiciel Deftac 3D pour calculer la position des marqueurs et les fonctions associées programmées sous Matlab. Afin de comparer les 2 approches ces mesures ont été effectuées sur un des 3 faces, celle qui contenait les marqueurs, la face A

Cette face a été divisée en plusieurs zones entourant notamment la zone des boucles se propageant sur cette face. Dans chaque zone le relevé des angles a été réalisé sur 12 intersections de mèches, seule la moyenne de ces relevés est indiquée dans le tableau ci-dessous.

Etude de préformes en fibre de lin.

Mesure manuelle

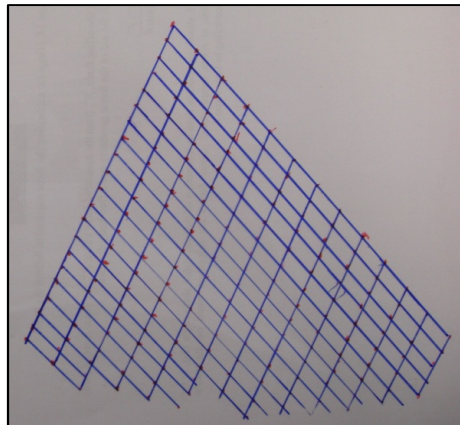


Figure 86 : Feuille transparente avec les angles entre mèches:

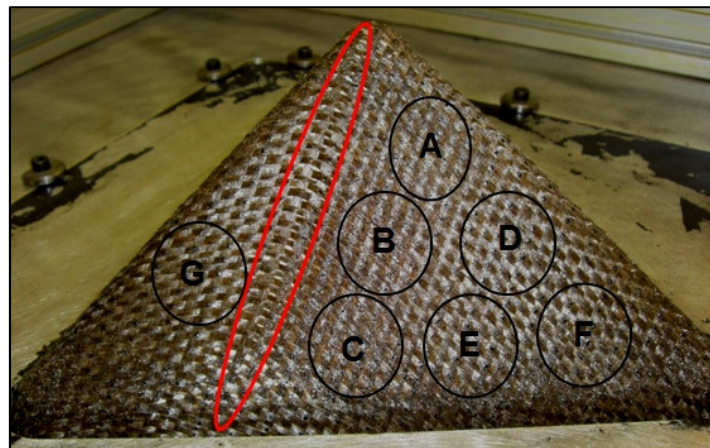


Figure 87 : Divisions du coté analysé

	A	B	C	D	E	F	G
θ_1	67	67	68	67	67	68	68
θ_2	67	67	69	66	68	69	67
θ_3	68	68	68	67	68	68	67
θ_4	68	67	68	67	67	68	68
θ_5	68	67	68	67	67	68	67
θ_6	68	67	67	67	66	69	67
θ_7	67	68	67	67	67	68	67
θ_8	67	67	68	67	67	68	68
θ_9	68	67	67	67	67	68	67
θ_{10}	67	67	68	67	66	69	68
θ_{11}	68	66	68	67	67	68	67
θ_{12}	67	67	69	67	67	70	68
$\frac{\sum \theta_i}{n}$	67,5	67,1	67,9	66,9	67,0	68,4	67,4
γ	22,5	22,9	22,1	23,1	23	21,6	22,6

Table d'angles du cisaillement préforme pyramidal

Etude de préformes en fibre de lin.

On constate que c'est relativement homogène sur cette face les mèches tournent assez peu pour épouser cette forme.

La même analyse est faite à l'aide du suivi de marqueurs et sur cette même face (Coté A). Les marqueurs sont positionnés comme indiqué sur la figure ci-dessous :

Post-traitement de donnés

Ensuite il est montré le même analyse fait pour les logiciels disponibles. Ils sont fait de pos-traitement pour connaitre l'évolution de l'angle de cisaillement vers le temps. La même division du coté analysé de forme manuel a été utilisé pour l'analyse informatique. Ainsi, pour chaque zone entouré par un cercle ils sont pris quatre points en la forme suivante :

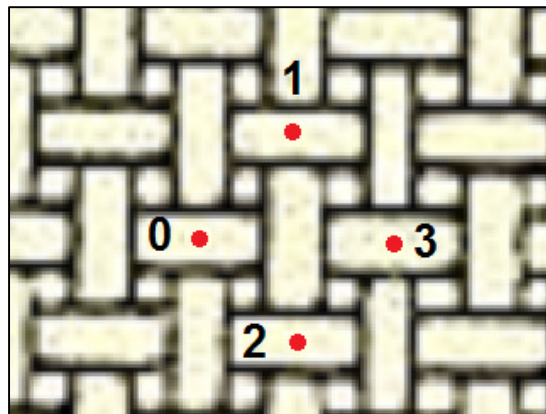


Figure 88 : Disposition des marqueurs pris pour Deftac3D

Les images suivantes montrent la disposition de marqueurs pour la zone A : 4 marqueurs qui doivent être les mêmes dans l'image droite que l'image gauche.

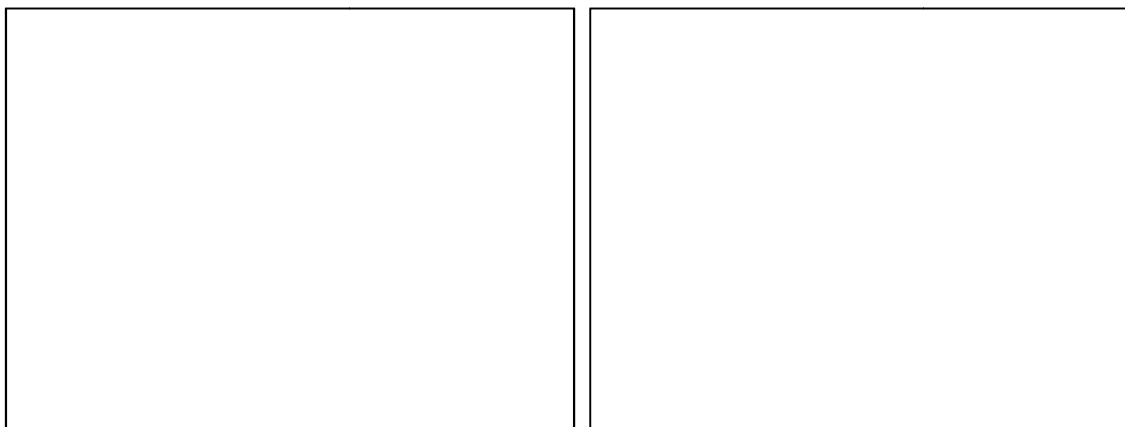


Figure 89 : Marqueurs « zone A » (Caméras droite et gauche)

Etude de préformes en fibre de lin.

Cette méthode suivi de marqueurs permet non seulement d'avoir la valeur de l'angle à un instant donné, par exemple à l'état final, mais également l'évolution de cet angle tout au long du procédé (soit pour l'ensemble des états de la préforme). Deftac 3D fait le suivi de la position des marqueurs choisis, qui sont ensuite post-traitées sous Matlab. Finalement, avec Excel, des graphiques sont permettant de représenter cette évolution de l'angle de cisaillement vers le temps.

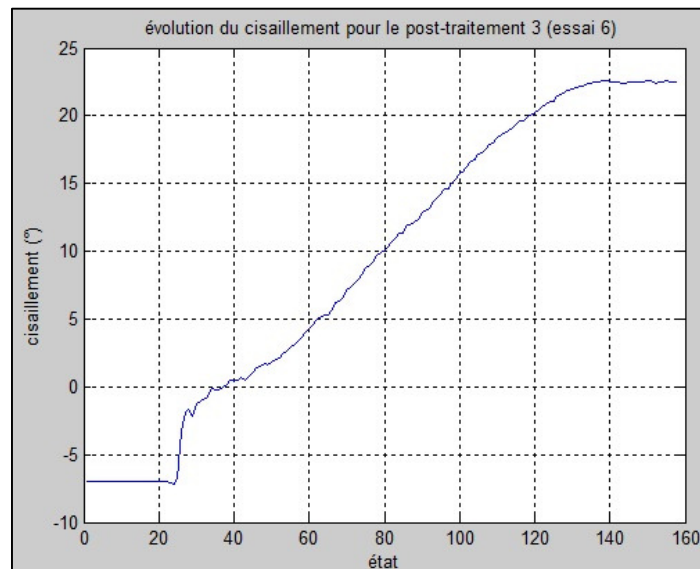


Figure 90 : Évolution du cisaillement (Zone A)

L'angle final de cisaillement pour cette zone est compris entre 22° et 23° valeur qui est très proche de celle estimée manuellement.

Il faut remarquer que l'analyse est faite de manière inverse, ça veut dire que Matlab commence l'analyse par l'état final de la préforme pour remonter à l'état initial. Si des marqueurs disparaissent du champ de vision des cameras, le logiciel fait l'hypothèse que la position de ces points n'a pas été modifiée (pas de déplacements). Suivant les zones analysées, les graphiques seront plus ou moins complets. Les graphiques des autres zones peuvent être observés dans l'annexe A

5.2.3 Essai avec le renfort B : Poinçon prismatique.

Conditions initiales

Le troisième et dernier essai a été emmené a bien avec le renfort B et le poinçon prismatique dans les suivantes conditions initiales :

Etude de préformes en fibre de lin.

- Tissu utilisé : Renfort B
- Nombre de plis de tissu : 1
- Pression des serre-flancs : 1,2 bar
- Vitesse du poinçon : 500 $\mu\text{m/s}$
- Fréquence d'acquisition des images : 1 image tous les deux secondes.
- Course du poinçon : 170 mm

La situation initial du tissu est montré en l'image suivante :

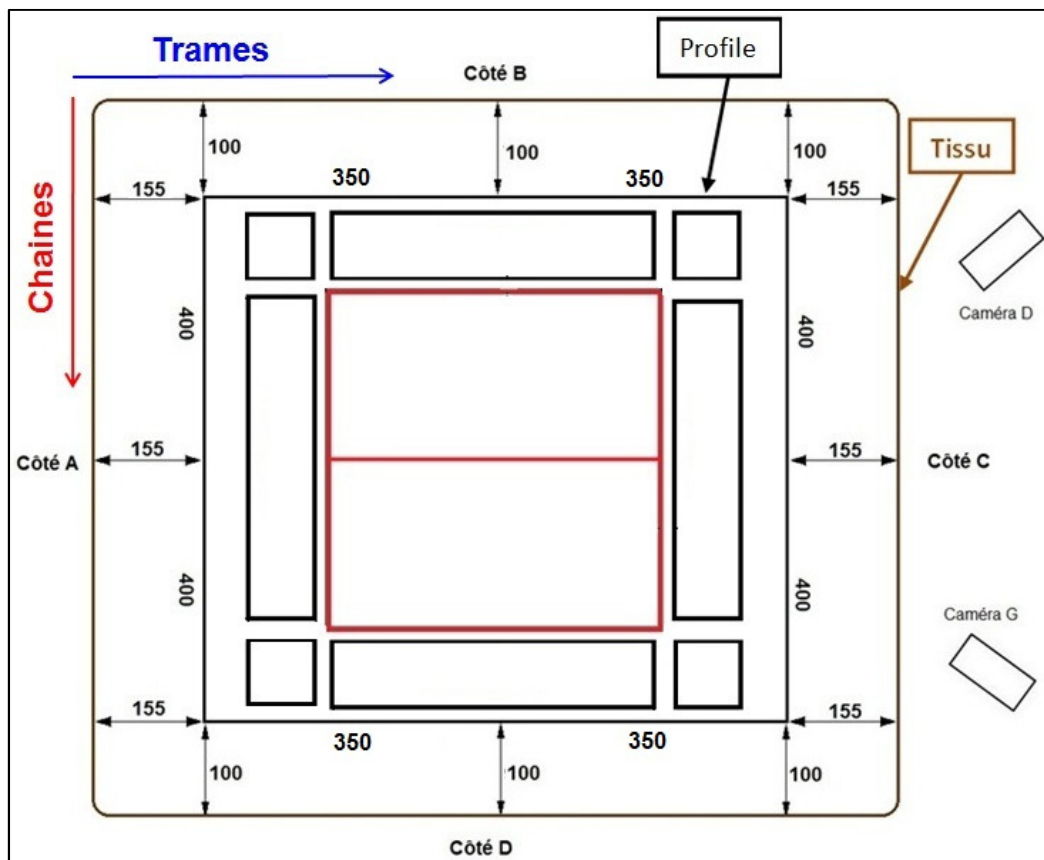


Figure 91 : Géométrie initiale du tissu

Etude de préformes en fibre de lin.

Evolution de la préforme lors de l'essai

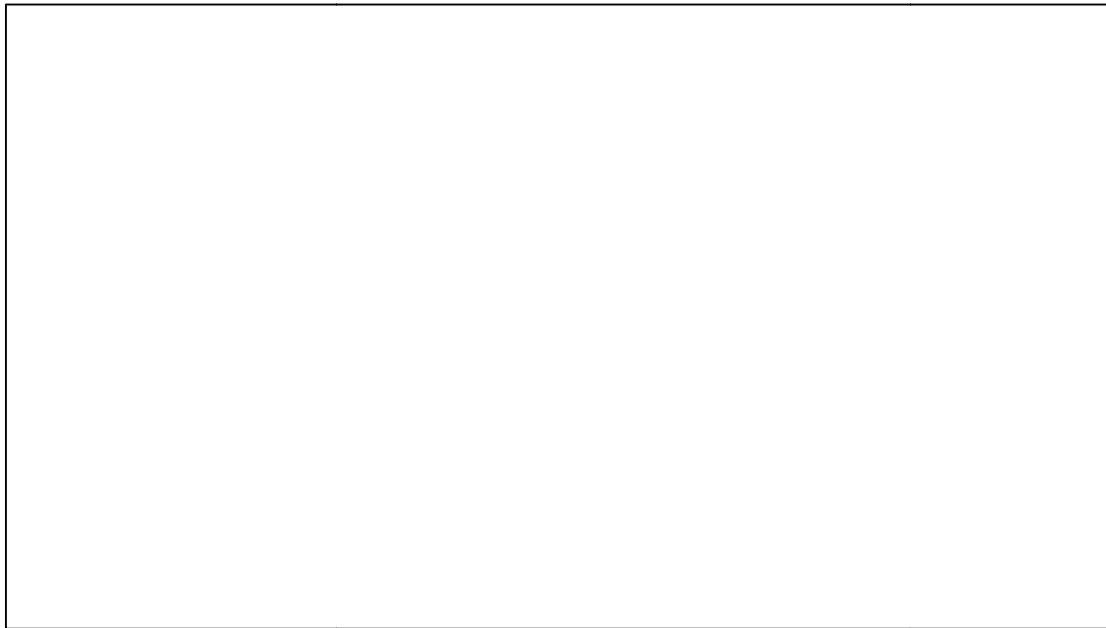


Figure 92 : Evolution de la préforme lors de l'emboutissage

Géométrie et défauts à l'échelle de la préforme.

On peut distinguer les différences entre les côtés A et C de la préforme. Certains mèches du côté A ne sont pas tendues, pendant que les mèches du côté C présentent le comportement espéré.



Figure 93 : Face A de la préforme

Etude de préformes en fibre de lin.

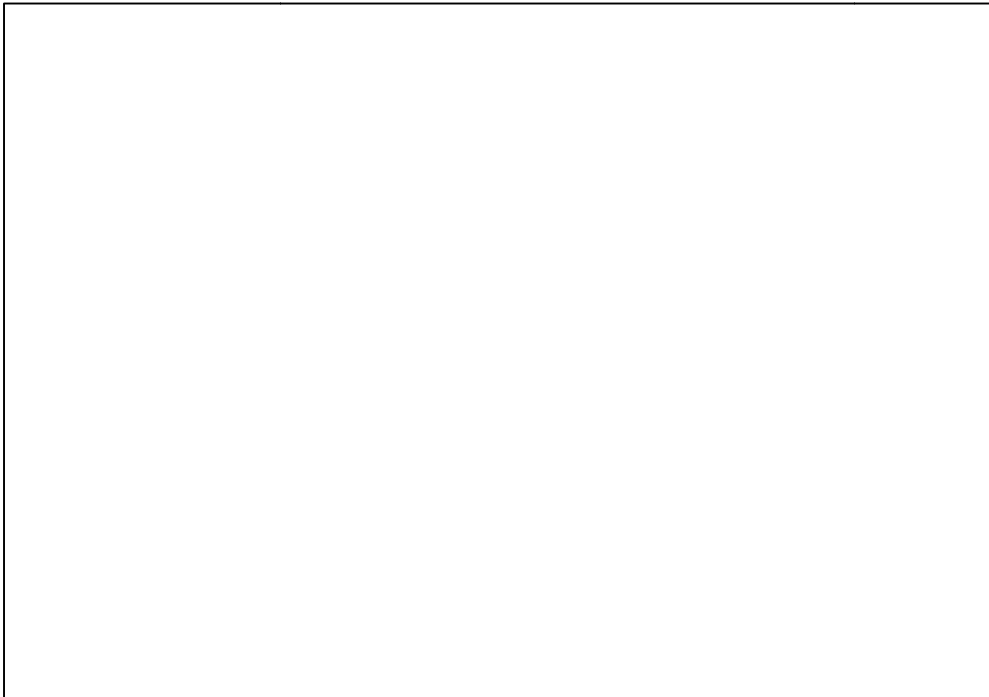


Figure 94 : Face C de la préforme

Les boucles :

Ensuite on peut voir quelques images des boucles formés sur les mèches.

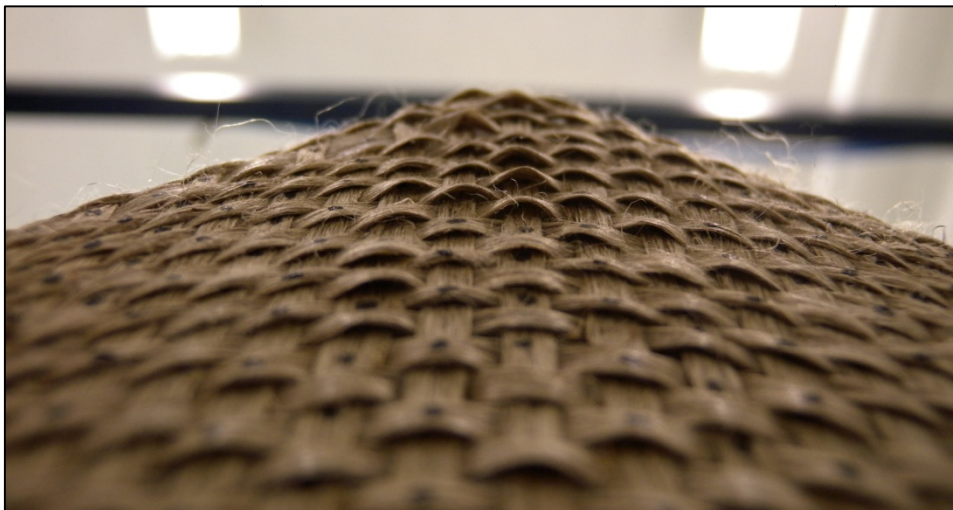


Figure 95 : Boucles sur la face C de la préforme

Etude de préformes en fibre de lin.



Figure 96 : Boucles sur la face A de la préforme

Les plis

Les images suivantes montrent l'aspect des plis de chaque côté



Figure 97 : Plis du côté A

Etude de préformes en fibre de lin.

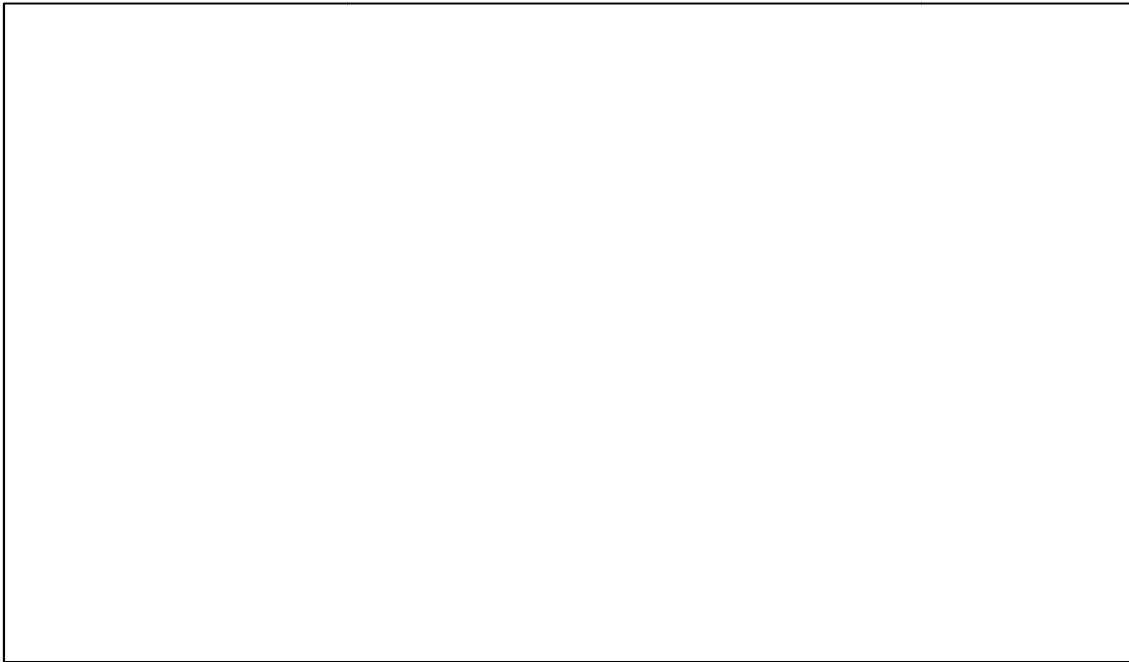


Figure 98 : Plis du côté B



Figure 99 : Plis du côté C

Etude de préformes en fibre de lin.



Figure 100 : Plis du côté D

L'angle de cisaillement :

Mesure manuelle

Pour connaître l'angle de cisaillement (γ) on part de l'hypothèse de un angle initiale (θ_0) de 90° entre les trames et les mèches.

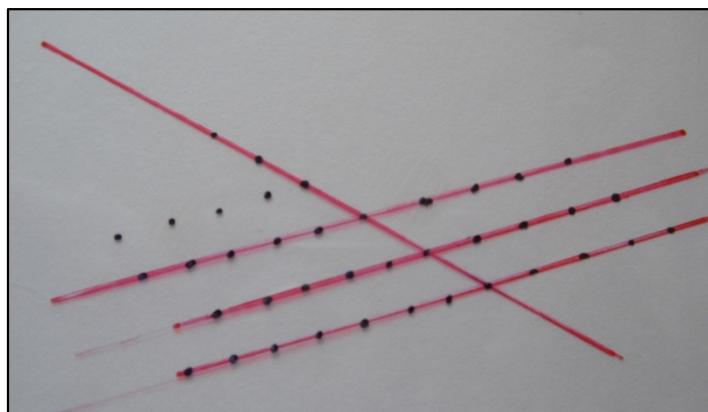


Figure 101 : Angles entre mèches sur le coin B-C

$$\gamma = \theta_0 - \theta_f = 90^\circ - \theta_f = 90^\circ - 45^\circ = 45^\circ$$

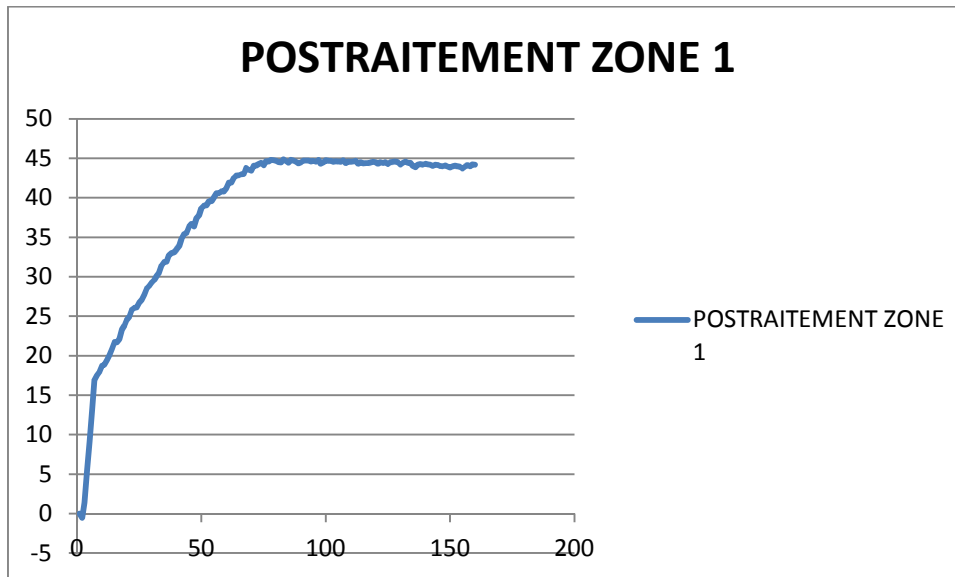


Figure 102 : Évolution du cisaillement (Zone 1)

L'angle final de cisaillement pour cette zone est compris entre 43° et 45° valeur qui est très proche de celle estimée manuellement.

Etude de préformes en fibre de lin.

6. Conclusion

6.1 Conclusion technique

Le but de ce projet qui m'a été confié était d'optimiser le système de tension des renforts sur le démonstrateur et la réalisation de deux préformes en long de trois essais.

Les principaux objectifs ont été atteints, les systèmes de serrage et de tension du renfort ont été conçus et utilisés. Les deux préformes cubiques et pyramidales ont été mises en œuvre. Toujours dans l'amélioration du démonstrateur, j'ai fait peindre le bord des matrices prismatique et tétraédrique.

Dans le cadre de l'optimisation de l'utilisation du démonstrateur, j'ai établi une procédure de sauvegarde et de suivi des données recueillies par Deftac 3D. J'ai également mis en place une procédure d'utilisation de Deftac 3D et du Drive.exe pour faciliter leurs utilisations.

6.2 Conclusion personnelle

La réalisation de ce projet m'a permis de finaliser mon cursus de Diplôme Universitaire au sein de la filière Science et Génie des Matériaux suite à quoi j'espère obtenir après ma soutenance. J'ai pu mettre en œuvre mes compétences en matériaux et conception.

Ce projet m'a permis de découvrir le domaine de la recherche à travers les travaux menés au LMSP. J'ai également eu le privilège de travailler sur le seul démonstrateur fonctionnel en France et sur un tissu de nouvelle technologie. Cela m'a permis d'élargir mes connaissances au niveau de la mise en œuvre des matériaux composites.

Annexe 1

Le procédé RTM

L'injection des résines thermodurcissables sur des renforts permet de fabriquer des pièces moulées de petite ou de grande taille. Les différents procédés développés ont pris dans les années quatre-vingt le nom de RTM (Resin Transfer Moulding).

Le moulage par injection de résine liquide RTM (Resin Transfert Molding) est un procédé manuel ou semi-automatisé qui s'effectue entre moule et contre moule rigides.

Les renforts, sous forme de mats, tissus ou préforme sont placés dans l'entrefer du moule. Le moule est alors solidement fermé et la résine catalysée injectée à l'intérieur sous faible pression (1.5 à 4 bars).

Dans le procédé RTM, une résine de faible viscosité à température ambiante est injectée par une pompe basse pression dans un moule fermé, chauffé, dans lequel préalablement des renforts appropriés, des inserts et des noyaux en mousse (si nécessaire), ont été disposés convenablement. Une fois l'injection des réactifs terminée, le processus de polymérisation peut commencer et dure entre 2 et 30 min, selon la nature des constituants et la géométrie de la pièce. Récemment est apparu un nouveau procédé dérivé du RTM : le HS-RTM (*High Speed Resin Transfer Molding*), c'est-à-dire moulage par injection de résine à grande vitesse : ce procédé est identique au RTM si ce n'est que les temps de cycle sont plus courts (voisins de 2 min).

Systèmes Réactifs

Les principaux systèmes réactifs utilisés sont évidemment des résines thermodurcissables :

- résines de polyesters insaturés, catalysées et accélérées ;
- résines vinylesters, catalysées et accélérées ;
- résines époxydes avec leurs durcisseurs ;
- résines acryliques.

Limites d'utilisation du procédé

Le principal avantage du RTM réside dans la grande diversité des pièces qu'il permet de réaliser.

On peut réaliser une pièce de 0,1 m² comme une pièce de 10 m². Il suffit de construire le moule et d'adapter la machine d'injection et la formulation de la résine en conséquence. On peut citer comme exemples des pièces moulées en RTM les cadres de vélos, les capots de camions américains, les baies de wagons ferroviaires.

Les masses des pièces varient de quelques grammes à cinquante kilogrammes. Et il est possible de fabriquer de nombreux types de pièces, soit planes, soit cylindriques, soit de formes plus complexes.

Etude de préformes en fibre de lin.

Les épaisseurs que l'on peut réaliser en RTM sont diverses : de 2 à 10 mm. Cependant, si l'on veut obtenir des épaisseurs supérieures à 5 mm, il est nécessaire, pour des raisons d'économie, d'envisager des **structures sandwiches** : le noyau central est composé d'une **mousse**. On peut ainsi avoir des *peaux* en polyester de 2 à 3 mm et un *noyau* de 10 mm au centre de la pièce. La rigidité et la résistance à la compression sont alors très élevées.

Défauts et remèdes

Cassures, faïençage : Ces défauts sont dus soit à un rayon de courbure de la pièce trop faible (3 mm), ce qui entraîne un manque du renfort, soit à une réactivité trop élevée du système chimique (dans le cas des résines insaturées, polyesters et vinylesters), soit à une température de moulage inadaptée. Une étude de la cinétique de polymérisation est alors à faire.

Plis, déformations : Ils peuvent être causés par une tension insuffisante du mat de renfort ou par un défaut du moule lors de sa fabrication. Dans la première hypothèse, il faut revoir la taille et la disposition des renforts dans le moule.

Bulles : Elles peuvent être dues soit à une entrée d'air dans la machine d'injection, en particulier au niveau de la canne d'injection, soit à une fermeture incomplète du moule. En particulier, à la conception du moule comme durant le moulage, l'entrefer doit être très régulier pour assurer une épaisseur constante.

Manque de matière : Il peut se produire ce que l'on peut appeler « de mauvais mouillages », la fibre apparaît alors nue ou mal revêtue de résine. Il est nécessaire alors de revoir soit la réactivité du système chimique, soit l'habillage du moule. En effet, il faut que la résine puisse cheminer à travers le moule, tout en restant à l'état liquide. La gélification ne doit intervenir que lorsque le moule est rempli.

Machine d'injection

Bien évidemment, le matériel le plus important est la machine d'injection. Elle est, en général, constituée de deux pompes volumétriques permettant de régler les débits de résine et de catalyseur. Les pompes refoulent dans une tête de mélange statique ou dynamique supportant le cône d'injection. Les commandes sont, en général, pneumatiques. Le rinçage peut se faire à l'air comprimé ou avec un solvant. La pression d'injection est inférieure à 2 MPa. Le débit est discontinu et peut être supérieur à 10 kg/min.

La caractéristique importante des pompes est leur **fiabilité** en ce qui concerne la masse (contrôlée par pesée) de résine injectée dans le moule (de même pour le catalyseur), ce qui nécessite une très bonne étanchéité au niveau des joints.

Toute variation de la quantité de catalyseur dans la résine entraîne des différences de temps de gel qui sont néfastes pour la pièce : un excès de catalyseur empêche le remplissage complet du moule ; un défaut retarde le durcissement de la pièce. Le rapport de mélange résine/catalyseur doit rester parfaitement constant.

Etude de préformes en fibre de lin.

Annexe 2

Programmes MATLAB

Premier programme MATLAB qui a été élaboré pour calculer le cisaillement à partir du fichier.DEF généré par DEFTAC :

```
%On demande si l'essai est entier ou pas:
disp(['essai entier ?'])
reponse=input('    si oui tapez: "1" sinon "0" : ')

%On demande le nombre de lignes du tableau "data":
lignes=input(' combien le fichier "data" a-t-il de lignes en tout? ')
tot=lignes-4;

%On demande le nombre d'états:
etats=input('combien il y a d etats?')
a=etats;

%Si la réponse est "1" alors on a la boucle suivante
    if reponse == 1

        for k=0:4:(tot)

            U1=data((k+4),7)-data((k+1),7); %calcul de la composante U1 du
            vecteur U
            U2=data((k+4),8)-data((k+1),8); %calcul de la composante U2 du
            vecteur U
            U3=data((k+4),9)-data((k+1),9); %calcul de la composante U2 du
            vecteur U
            normeU=sqrt((U1^2)+(U2^2)+(U3^2));          %calcul de la norme du
            vecteur U

            V1=data((k+2),7)-data((k+3),7); %calcul de la composante V1 du
            vecteur V
            V2=data((k+2),8)-data((k+3),8); %calcul de la composante V2 du
            vecteur V
            V3=data((k+2),9)-data((k+3),9); %calcul de la composante V2 du
            vecteur V
            normeV=sqrt((V1^2)+(V2^2)+(V3^2));          %calcul de la norme du
            vecteur V

            teta=((U1*V1)+(U2*V2)+(U3*V3))/((normeU)*(normeV));
            alpha=acos(teta); %calcul de l'angle entre le vecteur U et le
            vecteur V

            U1ini=data((tot+4),7)-data((tot+1),7); %calcul de la composante U1 du
            vecteur U initial
            U2ini=data((tot+4),8)-data((tot+1),8); %calcul de la composante U2 du
            vecteur U initial
            U3ini=data((tot+4),9)-data((tot+1),9); %calcul de la composante U3 du
            vecteur U initial
```

Etude de préformes en fibre de lin.

```

normeUini=sqrt((U1ini^2)+(U2ini^2)+(U3ini^2)); %calcul de la norme du
vecteur U initial

V1ini=data((tot+2),7)-data((tot+3),7); %calcul de la composante V1
du vecteur V initial
V2ini=data((tot+2),8)-data((tot+3),8); %calcul de la composante V2
du vecteur V initial
V3ini=data((tot+2),9)-data((tot+3),9); %calcul de la composante V3
du vecteur V initial
normeVini=sqrt((V1ini^2)+(V2ini^2)+(V3ini^2)); %calcul de la norme
du vecteur V initial

tetaini=((U1ini*V1ini)+(U2ini*V2ini)+(U3ini*V3ini))/((normeUini)*(norm
eVini));
alphaini=acos(tetaini); %calcul de l'angle entre le vecteur U
initial et le vecteur V initial

gamlrاد=alpha-alphaini; %calcul de l'angle de cisaillement entre
l'angle final et l'angle initial (radian)
gamldeg=(gamlrاد*180)/pi; %calcul de l'angle de cisaillement entre
l'angle final et l'angle initial (degré)

%mat((k+1),1)=gamldeg; %enregistrement des résultats
vecteur(a,1)=gamldeg; %enregistrement des résultats dans un vecteur
colonne

    a=a-1;

end

%Si l'essai n'est pas entier c'est à dire "0":
else
    for k=0:4:(tot)

        U1=data((k+4),7)-data((k+1),7);
        U2=data((k+4),8)-data((k+1),8);
        U3=data((k+4),9)-data((k+1),9);
        normeU=sqrt((U1^2)+(U2^2)+(U3^2));

        V1=data((k+2),7)-data((k+3),7);
        V2=data((k+2),8)-data((k+3),8);
        V3=data((k+2),9)-data((k+3),9);
        normeV=sqrt((V1^2)+(V2^2)+(V3^2));

        teta=((U1*V1)+(U2*V2)+(U3*V3))/((normeU)*(normeV));
        alpha=acos(teta);

        gamrad=alpha-(pi/2); %calcul de l'angle de cisaillement
entre l'angle final et l'angle initial imposé à 90° (radian)
        gamdeg=(gamrad*180)/pi; %calcul de l'angle de cisaillement
entre l'angle final et l'angle initial imposé à 90° (degré)

        %mat((k+1),1)=gamdeg;
        vecteur(a,1)=gamdeg;
        a=a-1;
    end
end

```

Etude de préformes en fibre de lin.

```

        end

    end

    %mat((1:4:(tot)),1);
    %a;

    vecteur((2:1:etats),1);

%On trace chaque l'évolution du cisaillemnt au cours du temps:

    plot(vecteur((2:1:etats),1)) %trace le graphe
    xlabel('état') %on nomme l'axe des abscisses
    ylabel('cisaillement (°)') %on nomme l'axe des ordonnées
    title('évolution du cisaillement pour le post-traitement 3
(essai 6) ') %on donne un titre au graphe
    grid on %on donne une grille au graphe

```

Deuxième programme MATLAB élaboré pour calculer le cisaillement à partir du fichier.DEF généré par DEFTAC :

```

nc=input(' Quel est le nombre de mires sur une meme ligne? ')
nl=input(' Combien il y a de lignes? ')
netat=input(' Combien d états il y a? ')
nll=nl-1;
nt=nl*nc;
p=nc;
q=nl;
ntot=netat*nt;
nf=ntot-nt;
a=0;

for w=1:1:nll
    p=w*nc

    for t=0:nt:nf

        for k=(p-nc):1:(p-2)

            u1=data((k+2+t),7)-data((k+1+t),7); %calcul de U1
            u2=data((k+2+t),8)-data((k+1+t),8); %calcul de U2
            u3=data((k+2+t),9)-data((k+1+t),9); %calcul de U3
            normeU=sqrt((u1^2)+(u2^2)+(u3^2)); %calcul de la norme de U

            v1=data((k+6+t),7)-data((k+1+t),7); %calcul de V1
            v2=data((k+6+t),8)-data((k+1+t),8); %calcul de V2
            v3=data((k+6+t),9)-data((k+1+t),9); %calcul de V3
            normeV=sqrt((v1^2)+(v2^2)+(v3^2)); %calcul de la norme de V

```

Etude de préformes en fibre de lin.

```

zeta=((u1*v1)+(u2*v2)+(u3*v3))/((normeU)*(normeV));

tetarad=acos(zeta); %calcul de l'angle final

gamrad=tetarad-(pi/2); %calcul du cisaillement en radian
gam=(gamrad);
gamdeg=(gam*180)/pi; %calcul du cisaillement en degré
a=a+1;
vecteur(a,1)=gamdeg; %enregistrement des résultats dans un
vecteur colonne
end

end

end

vecteur((1:1:a),1);

%On trace chaque l'évolution du cisaillement au cours du temps:

plot(vecteur((1:1:(netat+1)),1)) %trace le graphe
xlabel('état') %on nomme l'axe des abscisses
ylabel('cisaillement (°)') %on nomme l'axe des ordonnées
title('évolution du cisaillement ') %on donne un titre au graphe
grid on %on donne une grille au graphe

```

Annexe 3

Données et graphiques de la campagne d'essais

Essai avec le renfort B : Poinçon tétraédrique

TEMPS (s)	CISAILLEMENT γ (°)						
	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone E	Zone F	Zone G
0	-6,987	3,934	-16,535	-3,511	-7,467	-10,270	9,690
2	-6,987	4,037	-16,535	-3,561	-7,467	-9,804	9,622
4	-6,987	3,889	-16,535	-3,507	-7,467	-9,754	9,693
6	-6,987	3,823	-16,535	-3,627	-7,467	-9,984	9,865
8	-6,987	3,961	-16,535	-3,340	-7,467	-10,078	9,959
10	-6,987	3,916	-16,535	-3,497	-7,467	-10,377	9,917
12	-6,987	3,893	-16,535	-3,402	-7,467	-10,057	9,777
14	-6,987	3,895	-16,535	-3,406	-7,467	-10,159	9,817
16	-6,987	3,867	-16,535	-3,551	-7,467	-10,140	9,886
18	-6,987	3,897	-16,535	-3,648	-7,467	-10,128	9,580
20	-6,987	3,994	-16,535	-3,619	-7,467	-10,023	9,702
22	-6,987	3,996	-16,535	-3,508	-7,467	-10,382	9,883
24	-6,987	3,963	-16,535	-3,386	-7,467	-10,161	9,706
26	-6,987	3,868	-16,535	-3,638	-7,467	-10,426	9,967
28	-6,987	3,865	-16,535	-3,766	-7,467	-10,764	10,008
30	-6,987	3,926	-16,535	-3,856	-7,467	-10,648	10,071
32	-6,987	3,913	-16,535	-3,908	-7,467	-10,988	10,507
34	-6,987	4,011	-16,535	-3,685	-7,467	-10,644	10,450
36	-6,987	3,971	-16,535	-3,364	-7,467	-10,976	10,842
38	-6,987	3,904	-16,535	-3,080	-7,467	-10,598	10,927
40	-6,987	4,014	-16,535	-2,603	-7,467	-9,278	10,756
42	-6,987	4,397	-16,535	-2,378	-7,467	-9,921	10,719
44	-6,987	7,626	-16,535	-3,355	-7,467	-7,330	5,291
46	-7,079	7,626	-16,535	-3,355	-7,467	-7,330	5,283
48	-7,189	7,690	-16,535	-2,873	-7,889	-7,846	5,129
50	-6,823	6,865	-16,535	-4,225	-7,501	-8,121	5,472
52	-3,325	5,960	-16,535	-2,491	-6,712	-7,866	5,423
54	-1,832	5,605	-16,535	-3,089	-6,535	-8,756	5,786
56	-1,615	4,591	-16,535	-1,949	-5,996	-8,183	6,272
58	-2,198	3,734	-16,535	-1,833	-6,739	-8,614	6,158
60	-1,237	4,297	-16,535	-1,317	-8,314	-8,671	-0,156
62	-1,037	3,138	-16,535	-1,270	-8,564	-8,113	0,140
64	-0,962	3,654	-16,535	-0,599	-8,526	-7,896	0,124

Etude de préformes en fibre de lin.

66	-0,703	3,528	-16,535	-0,710	-7,849	-7,813	0,385
68	-0,168	4,179	-16,535	-0,902	-6,995	-7,605	0,489
70	-0,264	4,563	-16,535	0,121	-6,275	-7,818	0,717
72	-0,259	4,941	-16,535	-1,272	-5,806	-7,048	0,441
74	0,015	4,791	-16,535	-0,854	-5,433	-6,976	0,690
76	0,152	5,421	-16,535	-0,672	-4,853	-6,272	6,432
78	0,440	5,368	-16,535	-0,380	-4,603	-5,942	-0,648
80	0,497	5,691	-16,535	-0,119	-4,128	-5,988	-0,659
82	0,439	5,839	-16,535	-0,256	-3,778	-5,532	-0,566
84	0,683	5,933	-16,535	0,121	-3,434	-5,357	-0,400
86	0,509	5,778	-16,535	0,274	-2,933	-4,920	-0,414
88	0,787	5,690	-16,535	0,269	-2,541	-4,412	-0,272
90	1,084	6,001	-16,535	0,726	-1,695	-4,249	-0,338
92	1,420	5,832	-16,535	1,274	-1,327	-4,146	-0,497
94	1,553	5,404	-16,535	1,034	-0,720	-3,970	0,260
96	1,689	-0,708	-16,535	1,546	-0,262	-3,774	6,938
98	1,640	8,387	-16,535	1,766	0,440	-3,281	9,188
100	1,816	10,170	-16,535	2,016	1,208	-2,860	10,262
102	2,048	8,894	-16,535	1,987	2,016	-1,426	9,662
104	2,111	10,057	-16,535	2,371	2,010	-1,441	10,944
106	2,478	9,421	-16,535	2,565	1,882	-0,223	4,881
108	2,653	9,571	-16,535	2,754	1,933	0,180	3,523
110	2,947	9,158	-16,535	2,952	2,115	0,981	-0,691
112	3,095	9,336	-16,535	3,348	2,358	0,472	-2,171
114	3,373	9,074	-16,535	3,487	2,628	1,627	-2,419
116	3,694	8,679	-16,535	4,263	2,822	1,987	-2,555
118	4,109	9,128	-16,535	4,165	3,260	1,696	-2,882
120	4,317	7,480	-16,535	4,667	3,534	2,427	-2,896
122	4,596	7,315	-16,535	4,561	3,689	2,634	-3,446
124	4,944	6,167	-16,535	5,330	3,732	2,880	-3,605
126	5,101	5,680	-16,535	5,354	4,181	3,118	-4,245
128	5,317	4,883	-16,535	5,845	4,449	3,434	-4,369
130	5,339	4,567	-16,535	6,186	4,749	3,781	-4,410
132	5,704	4,237	-16,535	6,315	5,151	4,308	-4,759
134	6,187	4,019	-16,535	6,804	5,462	4,673	-5,111
136	6,322	4,087	-16,535	6,961	5,736	5,162	-5,397
138	6,585	4,092	-16,535	7,490	6,047	5,124	-5,612
140	7,128	4,336	-16,535	7,779	6,335	5,588	-5,788
142	7,389	4,428	-16,535	7,655	6,629	5,705	-6,172
144	7,682	4,785	-17,329	8,092	7,019	6,296	-6,401
146	7,977	5,002	-18,048	8,838	7,606	6,698	-6,354
148	8,230	5,323	-18,512	9,116	7,835	7,076	-6,842
150	8,764	5,208	-18,998	9,553	8,111	7,245	-6,866

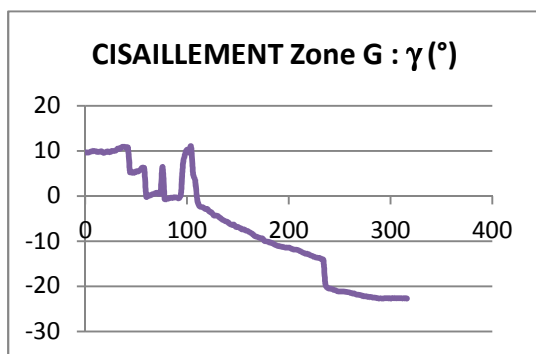
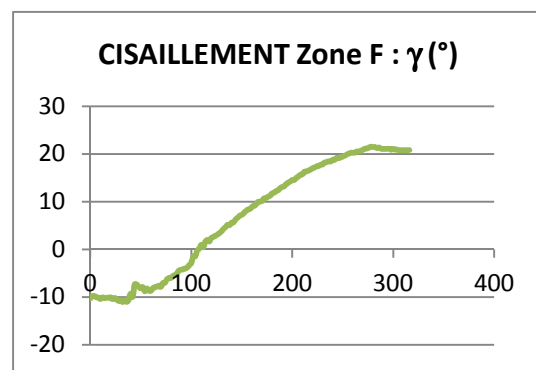
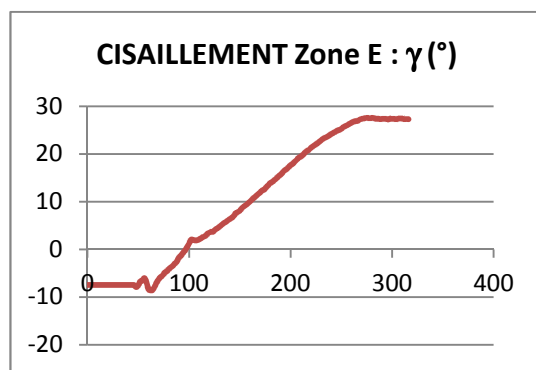
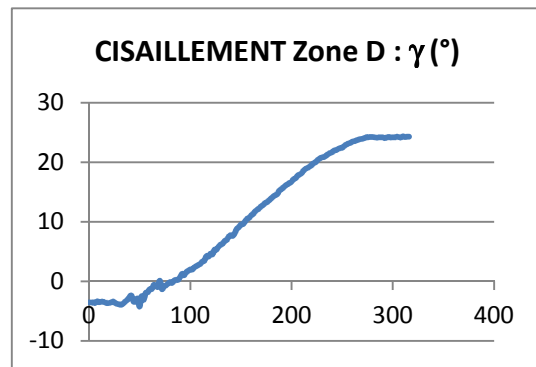
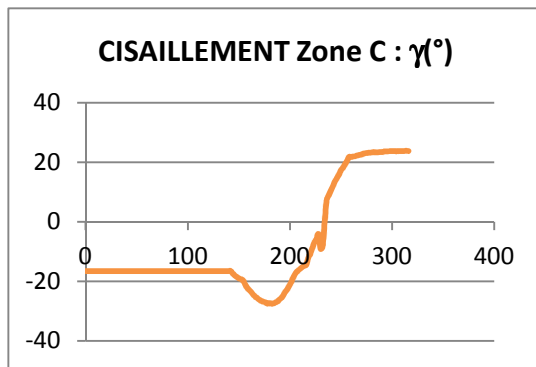
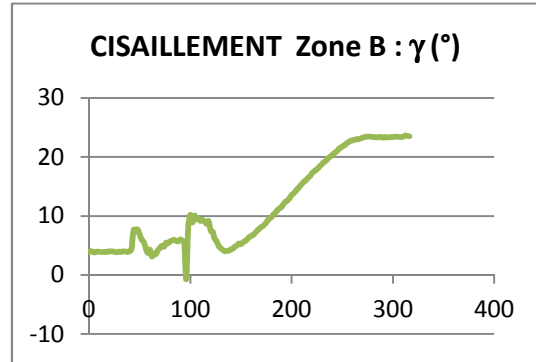
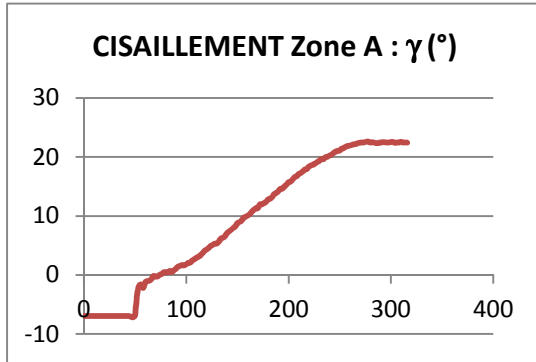
Etude de préformes en fibre de lin.

152	8,986	5,528	-19,278	9,609	8,653	7,604	-7,104
154	9,202	5,735	-19,651	10,021	8,992	8,034	-7,383
156	9,689	6,002	-20,867	10,513	9,325	8,357	-7,416
158	9,865	6,392	-22,058	10,654	9,648	8,476	-7,678
160	10,081	6,601	-22,832	11,072	10,035	8,866	-7,817
162	10,299	6,762	-23,613	11,302	10,449	9,138	-8,075
164	10,692	7,173	-24,391	11,762	10,855	9,378	-8,354
166	11,040	7,521	-25,087	12,013	11,196	9,939	-8,780
168	11,332	7,810	-25,629	12,271	11,569	10,016	-9,012
170	11,346	8,123	-26,173	12,599	11,951	10,151	-9,155
172	11,975	8,330	-26,598	12,856	12,369	10,690	-9,348
174	11,984	8,705	-26,861	13,172	12,512	10,792	-9,401
176	12,203	9,187	-27,052	13,324	13,031	11,053	-9,932
178	12,406	9,558	-27,508	13,651	13,439	11,240	-10,055
180	12,827	9,786	-27,330	13,975	13,934	11,724	-10,175
182	12,937	10,236	-27,510	14,257	14,125	11,897	-10,305
184	13,222	10,567	-27,446	14,471	14,534	12,211	-10,498
186	13,722	10,990	-27,063	14,682	14,871	12,410	-10,742
188	13,921	11,308	-26,771	15,258	15,302	12,816	-10,961
190	14,217	11,512	-26,081	15,478	15,658	13,067	-11,090
192	14,623	12,051	-25,449	15,807	16,087	13,221	-11,210
194	14,654	12,405	-24,434	16,100	16,567	13,664	-11,290
196	15,010	12,667	-23,294	16,314	16,829	14,000	-11,420
198	15,338	13,060	-22,261	16,550	17,249	14,236	-11,474
200	15,740	13,546	-21,154	16,753	17,670	14,552	-11,415
202	15,834	13,859	-19,708	17,185	17,926	14,551	-11,596
204	16,205	14,261	-18,253	17,331	18,368	14,995	-11,826
206	16,618	14,611	-17,129	17,779	18,784	15,281	-11,905
208	16,753	15,053	-16,386	17,950	19,216	15,647	-11,910
210	17,146	15,434	-15,840	18,198	19,462	15,746	-12,084
212	17,309	15,771	-15,323	18,619	19,779	16,275	-12,335
214	17,574	16,045	-14,752	18,928	20,250	16,353	-12,560
216	17,896	16,442	-14,492	19,112	20,601	16,513	-12,762
218	17,990	16,705	-12,072	19,301	20,863	16,708	-12,792
220	18,402	17,256	-10,739	19,589	21,282	17,001	-13,007
222	18,604	17,573	-8,867	19,882	21,616	17,170	-13,207
224	18,707	17,808	-6,897	20,049	21,897	17,412	-13,363
226	18,935	18,099	-5,769	20,432	22,183	17,478	-13,561
228	19,137	18,458	-4,205	20,657	22,553	17,734	-13,671
230	19,371	18,803	-9,094	20,831	22,885	17,815	-13,730
232	19,676	19,156	-8,377	20,887	23,202	18,213	-13,972
234	19,642	19,367	-0,177	21,094	23,424	18,281	-14,181
236	19,968	19,759	7,323	21,383	23,640	18,456	-19,612

Etude de préformes en fibre de lin.

238	20,074	20,051	8,907	21,552	23,895	18,435	-20,323
240	20,236	20,307	10,447	21,704	24,177	18,784	-20,520
242	20,413	20,646	11,968	21,991	24,417	18,765	-20,576
244	20,680	20,865	13,531	22,055	24,638	19,202	-20,797
246	20,905	21,280	14,680	22,267	24,901	19,131	-20,921
248	21,074	21,510	15,858	22,396	25,082	19,326	-21,114
250	21,110	21,764	17,304	22,447	25,296	19,450	-21,191
252	21,444	21,965	18,192	22,734	25,652	19,654	-21,169
254	21,529	22,297	19,404	22,984	25,866	19,908	-21,189
256	21,775	22,506	20,533	23,152	26,053	20,093	-21,253
258	21,881	22,710	21,786	23,253	26,332	20,227	-21,303
260	21,977	22,798	21,755	23,474	26,572	20,272	-21,394
262	22,076	22,896	21,928	23,554	26,776	20,284	-21,563
264	22,185	23,012	22,026	23,685	26,895	20,539	-21,586
266	22,221	22,986	22,287	23,816	26,930	20,568	-21,826
268	22,386	23,114	22,427	23,908	27,181	20,657	-21,880
270	22,431	23,279	22,662	23,956	27,361	20,919	-21,965
272	22,501	23,346	22,884	24,072	27,444	21,116	-22,086
274	22,508	23,433	23,054	24,229	27,538	21,162	-22,209
276	22,609	23,455	23,131	24,220	27,561	21,348	-22,212
278	22,625	23,411	23,235	24,249	27,472	21,525	-22,368
280	22,476	23,337	23,267	24,236	27,554	21,452	-22,355
282	22,532	23,379	23,384	24,207	27,516	21,465	-22,480
284	22,467	23,301	23,285	24,165	27,348	21,244	-22,537
286	22,370	23,370	23,355	24,184	27,408	21,368	-22,604
288	22,384	23,368	23,389	24,213	27,324	21,125	-22,688
290	22,491	23,254	23,390	24,202	27,360	21,051	-22,678
292	22,533	23,342	23,604	24,066	27,340	21,076	-22,713
294	22,514	23,304	23,630	24,181	27,341	21,082	-22,661
296	22,484	23,315	23,639	24,267	27,249	21,098	-22,631
298	22,503	23,338	23,737	24,176	27,409	20,906	-22,635
300	22,549	23,375	23,766	24,192	27,341	21,080	-22,698
302	22,568	23,394	23,752	24,197	27,347	20,908	-22,613
304	22,437	23,424	23,669	24,307	27,294	20,917	-22,670
306	22,483	23,380	23,765	24,216	27,413	20,800	-22,621
308	22,494	23,361	23,726	24,178	27,440	20,819	-22,647
310	22,593	23,415	23,766	24,349	27,419	20,833	-22,668
312	22,477	23,604	23,788	24,270	27,288	20,830	-22,691
314	22,488	23,544	23,842	24,308	27,333	20,801	-22,637
316	22,469	23,492	23,745	24,307	27,281	20,835	-22,722

Etude de préformes en fibre de lin.



Essai avec le renfort B : Poinçon prismatique

TEMPS (s)	CISAILLEMENT					
	ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3	ZONE 4	ZONE 5	ZONE 6
0	-0,527	-39,787	-78,949	71,835	-0,032	-81,541
2	1,399	-39,787	-78,949	71,835	-0,032	-81,462
4	5,451	-39,787	-78,949	72,010	-0,032	-81,326
6	9,128	-39,787	-78,949	72,074	-0,032	-81,403
8	13,195	-39,787	-78,949	72,305	-0,032	-81,145
10	16,922	-39,787	-78,949	72,419	-0,032	-82,203
12	17,516	-39,787	-78,949	72,571	-0,032	-82,108
14	17,957	-42,301	-78,949	72,597	-0,032	-82,063
16	18,727	-41,171	-78,949	72,727	-0,032	-82,153
18	18,848	-27,998	-78,949	72,473	-0,032	-82,287
20	19,416	-18,152	-78,949	72,377	-0,032	-82,358
22	20,073	-12,703	-78,949	72,019	-0,032	-82,273
24	20,839	-6,428	-78,949	71,771	-0,032	-81,925
26	21,720	-2,097	-78,949	71,563	-0,032	-82,778
28	21,688	-0,323	-78,949	69,434	-0,032	-81,697
30	22,115	3,555	-78,949	67,953	-0,032	-80,134
32	23,298	8,586	-78,949	71,046	-0,032	-80,289
34	23,832	12,880	-78,949	71,439	-0,032	-78,583
36	24,523	17,752	-78,949	73,705	-0,032	-76,300
38	24,948	20,876	-78,949	72,785	-0,032	-78,046
40	25,812	24,083	-78,949	72,391	-0,032	-81,212
42	26,050	24,245	-78,949	70,865	-0,032	-84,865
44	26,093	24,794	-78,949	70,583	-0,032	-84,399
46	26,728	25,186	-78,949	71,418	-0,032	-84,041
48	27,074	25,718	-78,949	70,793	-0,032	-85,419
50	27,729	25,981	-78,949	71,770	-0,032	-85,894
52	28,539	27,068	-78,949	72,965	-0,032	-86,059
54	28,818	26,965	-78,949	72,311	-0,032	-70,734
56	29,291	27,604	-78,949	70,539	-0,032	-78,348
58	29,581	28,359	-78,949	70,746	-0,032	-80,092
60	30,143	28,508	-78,949	70,091	-0,032	-78,945
62	30,506	28,718	-78,949	70,725	-0,032	-87,293
64	31,401	29,508	-78,949	66,238	-0,032	-88,299
66	31,884	29,802	-79,340	65,855	-0,032	-84,163
68	31,899	30,813	-79,083	67,377	-0,032	-72,298
70	32,725	31,391	-79,177	62,486	-0,032	-74,626
72	33,011	31,548	-79,707	59,112	-0,032	-71,524
74	33,073	32,247	-79,757	41,981	-0,032	-60,916
76	33,480	32,365	-75,455	36,915	1,293	-70,747

Etude de préformes en fibre de lin.

78	33,911	32,502	-64,607	35,828	3,166	-71,927
80	34,798	32,951	-51,816	36,471	4,776	-70,265
82	35,390	33,504	-36,670	0,877	7,669	-67,194
84	35,551	33,616	-22,269	-4,100	12,427	-57,647
86	36,370	34,355	-11,499	-0,734	16,159	-42,060
88	36,674	34,342	-0,056	-0,435	0,750	-58,757
90	36,347	35,031	-5,479	-0,649	2,442	-54,585
92	37,440	34,907	-7,661	5,133	8,787	-49,816
94	37,791	35,268	-0,891	12,775	12,670	-54,328
96	38,695	35,156	4,535	5,933	16,209	-52,678
98	39,015	35,101	8,561	-2,970	17,947	-50,307
100	39,040	35,640	13,878	0,521	19,776	-40,313
102	39,554	35,856	15,832	1,891	22,202	-31,269
104	39,574	35,844	17,848	4,475	25,094	-43,507
106	40,023	36,255	20,337	17,537	27,813	-37,727
108	40,562	36,336	22,366	6,709	29,632	-32,560
110	40,602	36,737	25,606	10,224	19,628	-30,135
112	40,827	37,074	27,445	14,865	19,581	-31,291
114	40,778	37,427	33,346	0,882	-5,461	-23,921
116	41,173	37,638	34,289	-3,102	5,349	-21,292
118	41,912	37,830	35,267	-3,608	-54,808	-27,069
120	41,907	38,108	36,203	-13,335	11,187	-24,829
122	42,472	38,761	36,673	-15,897	2,388	-24,890
124	42,825	38,792	36,677	-29,842	-13,498	-21,472
126	42,844	39,178	36,521	-29,092	-15,560	-8,233
128	42,979	39,606	37,022	-32,093	-3,528	1,872
130	43,005	39,973	36,769	-35,471	32,306	-7,488
132	43,775	40,031	37,039	-36,089	8,637	-8,757
134	43,552	40,282	36,986	-33,637	-6,489	-12,622
136	43,409	40,692	37,367	-31,262	-28,565	-19,276
138	44,054	40,926	37,471	-31,161	-16,347	-24,621
140	44,071	41,180	37,456	-31,882	-13,996	-16,194
142	44,268	41,426	37,601	-32,097	-13,899	-20,189
144	44,450	41,752	37,458	-32,279	-11,800	-18,879
146	44,088	41,753	37,738	-32,434	-42,223	-21,614
148	44,629	42,372	38,113	-32,824	-29,297	-17,030
150	44,579	42,694	38,212	-32,626	-16,722	-35,214
152	44,792	42,667	38,377	-32,791	-57,193	-20,829
154	44,772	43,007	38,340	-32,673	-46,502	-20,882
156	44,670	42,996	38,620	-32,778	-13,430	-27,880
158	44,514	43,190	39,260	-32,976	-21,406	-27,563
160	44,492	43,498	39,285	-32,759	-63,739	-55,889
162	44,859	43,265	39,150	-33,270	-45,641	-50,967

Etude de préformes en fibre de lin.

164	44,635	43,680	39,406	-33,181	-70,006	-71,936
166	44,452	43,464	39,549	-33,439	-10,515	-68,056
168	44,806	43,540	39,727	-33,355	-9,282	-78,138
170	44,730	43,728	39,835	-33,290	-42,775	-68,941
172	44,554	44,051	40,004	-33,302	-37,684	-32,492
174	44,335	44,244	40,270	-33,356	-51,534	13,886
176	44,485	44,181	40,407	-33,482	-87,096	27,068
178	44,728	44,545	40,324	-33,495	-88,781	27,953
180	44,700	44,988	40,691	-33,668	-71,391	21,616
182	44,702	44,966	40,451	-33,926	-44,374	22,661
184	44,612	45,082	41,116	-34,057	-9,064	22,659
186	44,678	45,088	41,152	-33,940	9,770	21,959
188	44,539	45,288	41,484	-34,011	3,986	21,768
190	44,802	45,362	41,424	-34,194	4,299	21,847
192	44,305	45,375	41,486	-34,308	4,916	22,037
194	44,471	45,696	41,747	-34,001	16,744	22,091
196	44,773	45,811	42,135	-34,072	17,530	22,278
198	44,695	45,834	42,524	-34,450	16,594	22,120
200	44,678	45,860	42,533	-34,229	44,817	22,753
202	44,535	46,192	42,931	-34,334	47,628	22,862
204	44,639	46,029	43,007	-34,397	47,731	22,734
206	44,582	46,117	43,202	-34,399	48,159	22,493
208	44,555	46,318	43,359	-34,487	46,721	22,453
210	44,773	46,482	43,800	-34,694	46,345	22,525
212	44,385	46,471	43,745	-34,663	46,548	22,566
214	44,611	46,471	43,874	-34,653	46,889	22,516
216	44,566	46,456	44,066	-34,555	47,205	22,389
218	44,607	46,797	44,188	-34,388	47,395	22,370
220	44,683	46,640	44,358	-34,578	47,755	22,515
222	44,322	46,715	44,683	-34,476	47,971	22,677
224	44,521	46,615	44,864	-34,743	48,470	22,917
226	44,341	46,607	44,982	-34,759	48,179	23,167
228	44,408	46,695	45,057	-34,572	48,275	22,918
230	44,404	46,839	45,388	-34,595	48,598	23,212
232	44,465	47,026	45,468	-34,906	48,554	23,300
234	44,542	46,643	45,498	-34,693	48,818	22,746
236	44,507	46,707	45,468	-34,628	48,845	23,011
238	44,319	46,803	45,972	-34,949	48,804	23,034
240	44,506	46,939	45,959	-34,791	49,055	23,026
242	44,392	46,952	45,969	-34,877	49,213	22,754
244	44,519	47,095	46,327	-35,012	49,301	22,819
246	44,281	46,710	46,482	-34,974	49,456	22,889
248	44,511	46,936	46,698	-35,058	49,743	22,821

Etude de préformes en fibre de lin.

250	44,535	47,109	47,116	-34,989	49,831	23,191
252	44,589	47,045	47,197	-34,973	49,966	23,094
254	44,508	47,134	47,440	-35,079	50,109	23,271
256	44,202	47,008	47,509	-34,886	50,121	23,012
258	44,436	47,074	47,808	-35,109	50,606	23,230
260	44,591	46,883	47,894	-34,977	50,342	23,094
262	44,442	47,033	47,882	-34,994	50,605	23,071
264	44,424	46,968	48,009	-34,756	50,591	23,009
266	44,019	46,860	48,290	-34,849	50,738	23,035
268	43,863	47,140	48,317	-35,431	50,642	23,125
270	44,199	47,048	48,291	-34,798	50,818	23,036
272	44,250	47,329	48,464	-34,730	50,692	23,029
274	44,179	47,009	48,369	-34,787	50,905	22,932
276	44,308	47,005	48,454	-35,404	50,997	22,770
278	44,227	47,084	48,777	-34,971	51,047	23,523
280	44,171	47,044	48,899	-34,854	51,055	23,484
282	44,032	47,021	48,600	-34,846	50,836	23,304
284	44,180	47,086	48,559	-34,797	51,005	22,958
286	44,153	46,968	48,653	-34,855	51,053	23,282
288	44,022	47,056	48,874	-34,951	51,115	23,521
290	43,990	47,037	48,719	-34,707	50,925	23,126
292	44,093	47,059	48,766	-34,872	51,065	23,584
294	43,948	47,036	48,921	-34,728	51,241	23,277
296	43,815	47,130	48,889	-34,584	51,200	22,942
298	43,976	47,185	48,809	-34,624	51,311	23,327
300	44,071	47,105	48,780	-34,897	51,304	23,192
302	43,989	47,094	48,820	-34,885	51,334	23,076
304	43,907	47,213	49,037	-34,815	51,091	23,168
306	43,694	47,158	48,966	-34,680	51,244	22,880
308	43,941	47,041	48,642	-34,669	51,523	22,911
310	44,144	47,120	48,777	-34,905	50,988	23,088
312	43,967	47,017	48,791	-34,813	51,027	23,134
314	44,241	47,079	48,645	-34,522	51,195	24,025
316	44,205	47,027	48,954	-34,604	51,208	24,136

Etude de préformes en fibre de lin.

Bibliographie

Information general

Introduction: E.R.M.II (Universidad Carlos III de Madrid)

<http://www.librecours.org/cgi-bin/course?callback=info&elt=8752> : Cours materiaux composites (Université de Versailles, Saint-Quentin-En-Yvelines)

Maurice REYNE, Editions Hermès, 1995 : « Technologie des composites ».

<http://www.compositec.com/compositec-promotion/moulage-par-injection-rtm>

Fibre de lin

(Section_fibre_lin2)

https://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/nrc-cnrc/images/photos/091007_fibres_f.jpg

Figure1. Section transversale de la tige de lin

<http://plantes-a-fibres.goum.info/images/stories/toutsur/coupe.jpg>

Figure 2. Les parois cellulaires d'une fibre de lin

http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/images/content/186p_3.jpg

Tableau 1. « Propriétés mécaniques et fraction massiques des constituants de parois de fibres » : Chapitre 1 : Eléments bibliographiques sur la fibre de lin

Daniel Weidmann, Editions Dunod, 2009 : Technologies des textiles : De la fibre à l'article.

Procédé RTM

Moulage par injection de résine à basse pression ou procédé RTM par François Boinot et Alain Gurliat.

Logiciels

J. C DUPRE, V. VALLE, P. DOUMALIN et F. BREMAND (Université de Poitiers) : « Mode d'emploi du Logiciel DEFTAC 3D »

Jean-Thierry LAPRESTE, Editions Ellipses, 2005 : « Introduction à MATLAB »

M.MOKHTARI, Editions Springer, 2000 : « MATLAB 5.2& 5.3 et SIMULINK 2 & 3 pour étudiants et ingénieurs »