

# Optimisation des paramètres d'estampage de renforts secs pour applications composites structuraux

J. POURTIER<sup>a, b</sup>, M. KOWALSKI<sup>a</sup>, X. LEGRAND<sup>b</sup>, P. WANG<sup>b</sup>, D. SOULAT<sup>b</sup>

a. IRT M2P, 4 Rue Augustin Fresnel, Bât. CIRAM, 57070 METZ ;

Jean.pourtier@irt-m2p.fr – Maxime.kowalski@irt-m2p.fr

b. GEMTEX, Université Lille 1 (ENSAIT), 2 Allée Louise et Victor Champier, 59056

ROUBAIX Cedex 1

Xavier.legrand@ensait.fr – Peng.wang@ensait.fr – Damien.soulat@ensait.fr

## Résumé

*Les procédés de type RTM (Resin tranfert Moulding) permettent la production de matériaux composites hautes performances en grande série tout en garantissant une bonne répétabilité. Habituellement, le procédé RTM est décomposé en deux étapes :*

- *Mise en forme de renforts fibreux (semi-produits textiles) ou préformage.*
- *Injection de la résine (ou imprégnation) dans la préforme.*

*Un des procédés de mise en forme privilégiés par l'industrie grand volume est l'estampage. Cependant, appliqué à des pièces de grandes dimensions et à géométries complexes, le procédé d'estampage « traditionnel » montre ses limites : des développements complémentaires ainsi qu'une montée en maturité se doivent d'être menés.*

*Dans cette communication, les différents maillons (briques technologiques ou scientifiques) nécessaires à la montée en maturité du procédé d'estampage sont présentés :*

- *Caractérisation des renforts (traction, flexion et cisaillement) afin de déterminer leurs lois de comportements : La caractérisation en flexion et en cisaillement sont simulés sous PAM FORM (ESI Group).*
- *Réalisation d'estampages d'une géométrie élémentaire (hémisphère). La corrélation expériences / simulations permet d'ajuster les cartes matériaux (lois de comportement).*
- *Application à une pièce complexe de grandes dimensions. Dans un premier temps, une corrélation expérience / simulation sera réalisé pour valider les résultats précédents.*

*Dans une seconde étape (non présentée dans ce document), un travail itératif du procédé via la simulation permettra de définir une configuration d'estampage optimale (forme des outils et leurs cinématiques). Ce travail débouche sur la conception et l'industrialisation du procédé.*

## Abstract

*RTM processes type can be used for manufacturing high performance composite materials with a high production rate and guaranteed the manufacturing repeatability. Usually, this kind of process is decomposed in two steps:*

- *Shaping the fibrous reinforcements (preforming)*
- *Injection of the resin (or impregnation) in the preform.*

*One of the shaping process envisaged by the high-volume industry is stamping. However, to shape a complex part with a large size, the "traditional" way shows limits, so complementary developments and growing this process in maturity are needed.*

In this paper, several steps of the research approach are presented:

- Material characterization (tensile, bend and shear): the bending and shear characterization tests are simulated on PAM FORM (ESI GROUP).
- Stamping of elementary geometry (hemisphere): the correlation experiments / simulation permit to adjust the numeric material law
- Application to a complex part with a large size. In a first step, a correlation experiment / simulation will validate the previous work.

In a second step (not presented in this paper), an iterative work by simulating the process will permit to define an optimal configuration for stamping (tools geometries, and their kinematic). The design and the industrialization of the process will be based on this work.

## Mots clefs : Estampage, Préforme, NCF, Simulation, PAM FORM, Caractérisation

### 1 Introduction

L'IRT M2P est un centre de recherche appuyé par un consortium de 15 industriels (Arkema, Chomarat, Compose, Composite Integrity, Coriolis, ESI, Faurecia, Hexion, Hutchinson, IPC, Owens Corning, PEI, PSA, Renault, SISE) dans le cadre du projet Fast FORM.

Ce projet collaboratif ambitionne de développer les méthodes et technologies nécessaires à la réalisation de préformes à destination de l'industrie automobile grand volume :

- Pour pièces structurales de grandes dimensions
- Temps de cycle de 2 min (équivalent à 500 000 pièces / an)
- Optimisation de l'engagement matière (0 pertes)
- Optimum technico-économique (rapport performance/cout)

L'étape de mise en forme de renforts secs selon la géométrie de la pièce influe directement sur les paramètres morphologiques de la préforme (orientation, densité et continuité des renforts) qui ont une incidence directe sur la perméabilité de la préforme et sur le comportement mécanique de la pièce composite finale [1].

### 2 Matériau

Dans les travaux présentés, le renfort utilisé est un Non-Crimp Fabric (NCF) produit par Chomarat. Il s'agit d'un NCF de verre bi-axial  $\pm 45^\circ$  (2 plis de  $300 \text{ g/m}^2$  \_  $600 \text{ tex}$  (Figure 1)). Ce NCF est maintenu par une couture à  $0^\circ$  en point tricoté type chaînette de longueur 3.3 mm. Le matériau composant le fil de couture est du PES (PolyEtherSulfone de 76 dtex). La valeur de la jauge est de 10 suivant la laize (Figure 1). L'épaisseur nominale d'un pli de ce NCF ( $e_0$ , mm) utilisée dans ce travail est de 0,6 mm pour un taux volumique de fibre de 30%.

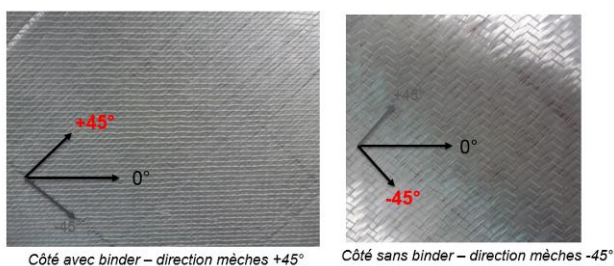


Figure 1 : Présentation du NCF utilisé (face côté lignes tricot à gauche et face côté ZZ à droite)

Un binder, ou liant chimique, de type poudre déposée et flashée sur la face des lignes de coutures ( $12 \text{ g/m}^2$  soit un ajout de 2% en masse). Il s'agit d'une poudre d'époxyde ayant une température d'activation comprise entre  $100^\circ\text{C}$  et  $180^\circ\text{C}$ .

### 3 Caractérisations de renforts secs et carte matériau sous PAM FORM

Le logiciel PAM FORM, commercialisé par ESI Group, modélise les renforts secs avec des éléments de type coque associés à un matériau de modèle 140 [2] [3]. Cet élément permet notamment de décrire le comportement macroscopique de NCF bi-axiaux à partir de la description de comportements mécaniques :

- Comportement en traction dans les deux directions mèche
- Comportement en flexion dans les deux directions mèche
- Comportement en cisaillement plan
- Comportement visco-élastique (négligé dans le cadre de cette étude)

Ces lois de comportements sont issues d'essais de caractérisation et des méthodes de normalisation des mesures choisies. La normalisation des mesures doit conduire à une expression des quantités associées à ces modèles, qui doivent être fournies en unités de contraintes. Ces essais et leurs résultats sont présentés dans les sous-chapitres suivants.

#### 3.1 Caractérisation en traction

Le comportement en traction uni-axiale a été identifié selon le protocole de la norme EN ISO 13934-1. Ce test consiste à imposer un déplacement à une éprouvette d'une largeur ( $l_0$ , mm) de 50 mm et une longueur utile de ( $L_0$ , mm) de 200 mm, la longueur étant dans la direction mèches caractérisées. Des talons métalliques de 50 mm x 50 mm sont collés aux extrémités de l'éprouvette (hors zone utile) pour éviter des déchirements et des glissements du renfort au niveau des mors.

A partir des mesures de la force de réaction ( $F$ , N) et du déplacement imposé, on calcule la déformation vraie (Équation 1) et la contrainte vraie (Équation 2).

La caractérisation en traction de ce NCF a permis d'identifier un module d'Young de 12 GPa dans les deux directions.

Cette valeur a été vérifiée par approximation du module d'Young ( $E_r$ , GPa) à l'aide du module d'Young des mèches ( $E_m = 80$  GPa) du renfort et du taux volumique de fibres ( $V_f = 30$  %) [4] (Équation 3).

$$\bar{\varepsilon} = \int_{L_0}^{L_0 + \Delta L} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) \quad \bar{\sigma} = F \cdot \frac{1 + \frac{\Delta L}{L_0}}{S_t} \cdot 10^{-3} \quad E_r = \frac{E_m \cdot V_f}{2} = \frac{80 \cdot 30}{2} = 12 \text{ GPa}$$

Équation 1 : Définition de la déformation vraie      Équation 2 : Définition de la contrainte vraie      Équation 3 : Approximation du module d'Young

Nous avons pu conclure que le comportement identifié est celui des mèches orientées dans la direction de sollicitation.

#### 3.2 Caractérisation en flexion

Le comportement en flexion a été identifié selon le protocole de la norme ASTM 1388-2008. La norme impose des éprouvettes de dimension 25 mm par 200 mm, la longueur étant dans la direction d'avancement de l'éprouvette sur le plan incliné. On mesure la longueur suspendue ( $L$ , m) lorsque l'extrémité de l'éprouvette touche le plan incliné à 41.5°.

Le module de flexion est déduit par méthode inverse. L'essai de cantilever est simulé sous le logiciel PAM FORM avec des éprouvettes ayant des longueurs suspendues moyennes issues des mesures expérimentales (3 essais par configuration). Le module de flexion est ajusté jusqu'à ce que les

éprouvettes aient un angle de déflexion de  $41,5^\circ$ . Les résultats expérimentaux et les modules de flexions correspondant sont présentés ci-dessous (Tableau 1).

Tableau 1 : Mesures expérimentales en flexion et normalisation

Direction mèches testées	Moyennes longueurs suspendues	Module de flexion correspondant sous PAM FORM
Mèches côté lignes tricots	L = 122 mm	B = 0.071 GPa
Mèches côté ZZ	L = 120 mm	B = 0.069 GPa

### 3.3 Caractérisation en cisaillement

Le cisaillement plan est reconnu comme le mode de déformation principal des renforts secs lors de mise en forme de type estampage (Figure 2) [5][6]. Par définition la déformation en cisaillement correspond à la rotation des mèches selon la direction de sollicitation [5]–[7]. Elle s'exprime en fonction de l'angle de cisaillement ( $\gamma$ , rad) (Équation 4).

$$\gamma_{ij} = \tan(\gamma)$$

Équation 4 : Définition de la déformation en cisaillement

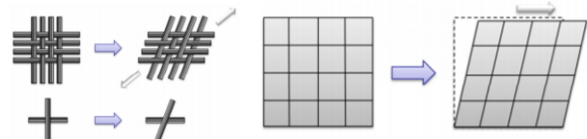


Figure 2 : Cisaillement de textiles bi-axiaux et d'éléments type coques sec [8]

Deux types d'essais peuvent être utilisés pour caractériser les renforts secs bi-axiaux en cisaillement, le "picture frame" et le "bias extension test"[6], [9]. Le bias test a été choisi dans le cadre de la caractérisation de ce NCF car il est moins sensible à l'état initial de déformation du renfort et aux conditions aux limites imposées [10]. Ce test consiste à mettre le renfort sous tension selon la direction à  $45^\circ$  par rapport à la direction des mèches. L'éprouvette doit avoir une longueur utile supérieure ou égale à deux fois sa largeur [9], [10].

Dans ces travaux, les éprouvettes ont une longueur utile de 140 mm pour une largeur 70 mm. On observe alors différents modes de déformation sur l'éprouvette, pouvant être découpée en 3 types de zones théoriques [6] (Figure 3).

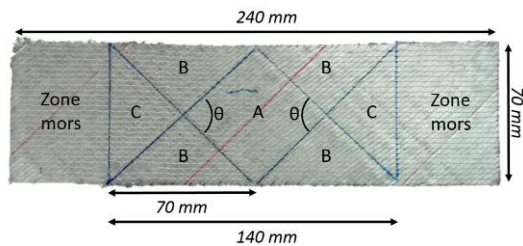


Figure 3 : Description de l'éprouvette utilisée pour le Bias test

La zone A correspond à un cisaillement pur. Par définition pour un renfort bi-axial orthogonal, l'angle de cisaillement est fonction de l'angle entre les deux directions mèches ( $\theta$ , rad) (Équation 5) [4], [9], [11], [12]. Une analyse géométrique de l'essai permet de calculer l'angle de cisaillement ( $\gamma$ , rad) [9], [13] en fonction du déplacement des mors ( $d$ , mm), de la longueur initiale de l'éprouvette ( $L_0$ , mm) et de sa largeur initiale ( $l_0$ , mm) (Équation 5).

Bel [14] Härtel et Harrison [15] montrent que cette formule théorique n'est vérifiée que pour des petits angles dans le cas des NCF bi-axiaux. Bel [14] explique que cette différence entre la théorie et l'expérience est due à des glissements relatifs des réseaux de mèches. La liaison par couture des deux réseaux de mèches est dite faible. Les exploitations classiques du bias test ne prennent pas en compte les glissements : nous avons donc choisi de normaliser les mesures avec la contrainte de traction simplifiée ( $\sigma_y$ , GPa) comme proposé dans les travaux de Cao et al. [9] (Équation 6). Ce choix propose

ainsi une description macroscopique du comportement du NCF, mais n'identifie pas formellement la contrainte de cisaillement dans le renfort.

$$\gamma(d) = \frac{\pi}{2} - \theta = \frac{\pi}{2} - 2 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left( 1 + \frac{d}{(L_0 - l_0)} \right) \right)$$

Équation 5 : Expressions de l'angle de cisaillement

$$\sigma_y = \frac{F}{e_0 \cdot l_0}$$

Équation 6 : Expression simplifiée de la contrainte de traction

Deux études ont donc été menées :

- Etude de l'angle de cisaillement en fonction du déplacement des mors
- Identification de la loi de comportement en cisaillement du NCF

- *Etude 1 : Etude de l'angle de cisaillement en fonction du déplacement des mors*

Nous avons étudié la validité de la formule théorique de l'angle de cisaillement pour ce renfort (Équation 5). Pour cela, des photos sont prises au cours des essais de bias test. A chaque photo, les deux angles entre les mèches ( $\theta$ , rad) sont ainsi mesurés grâce au marquage (Figure 3). La moyenne des deux angles mesurés est retenue pour calculer l'angle de cisaillement correspondant. Les résultats de cette étude sont présentés ci-dessous (Figure 4)

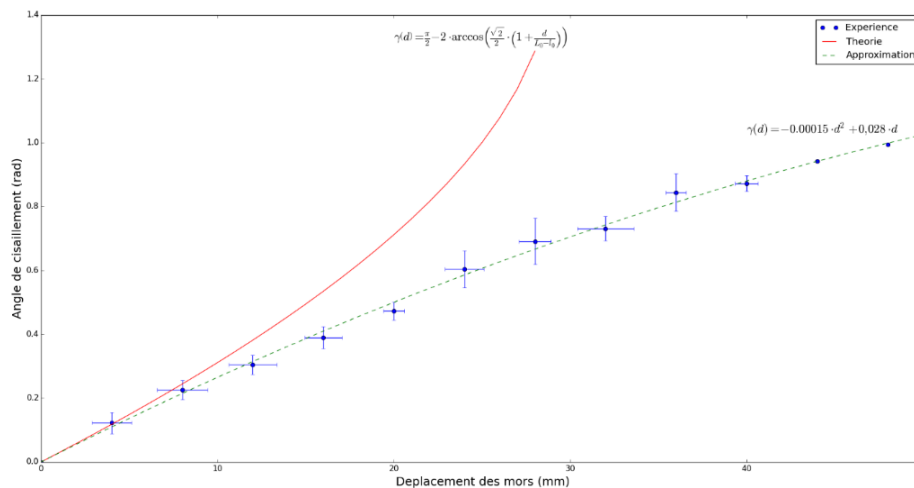


Figure 4 : Comparaison entre l'angle de cisaillement théorique et expérimental

Cette étude montre que, dans le cas de ce renfort, l'expression de l'angle de cisaillement théorique diverge des mesures effectuées. Par exemple, pour un déplacement mors de 30 mm théoriquement impossible, l'angle de cisaillement mesuré est de  $43^\circ \pm 5^\circ$ . L'apparition de glissements relatifs de réseaux a été constaté dès le début de l'essai, comme dans les travaux de Bel [14]. Une approximation de l'angle de cisaillement basée sur les résultats expérimentaux sera donc utilisée dans l'identification de la loi de comportement en cisaillement.

- *Etude 2 : Identification de la loi de comportement en cisaillement du NCF*

Cette étude a pour objectif de définir une loi de comportement en cisaillement représentative du renfort sous PAM FORM. Elle est décomposée en deux parties :

- Une partie de caractérisation expérimentale qui est la réalisation du bias test et la normalisation de l'essai
- Une partie numérique qui simule l'essai de bias test. Cette partie a pour objectif de vérifier la représentativité de la loi issue de la caractérisation expérimentale

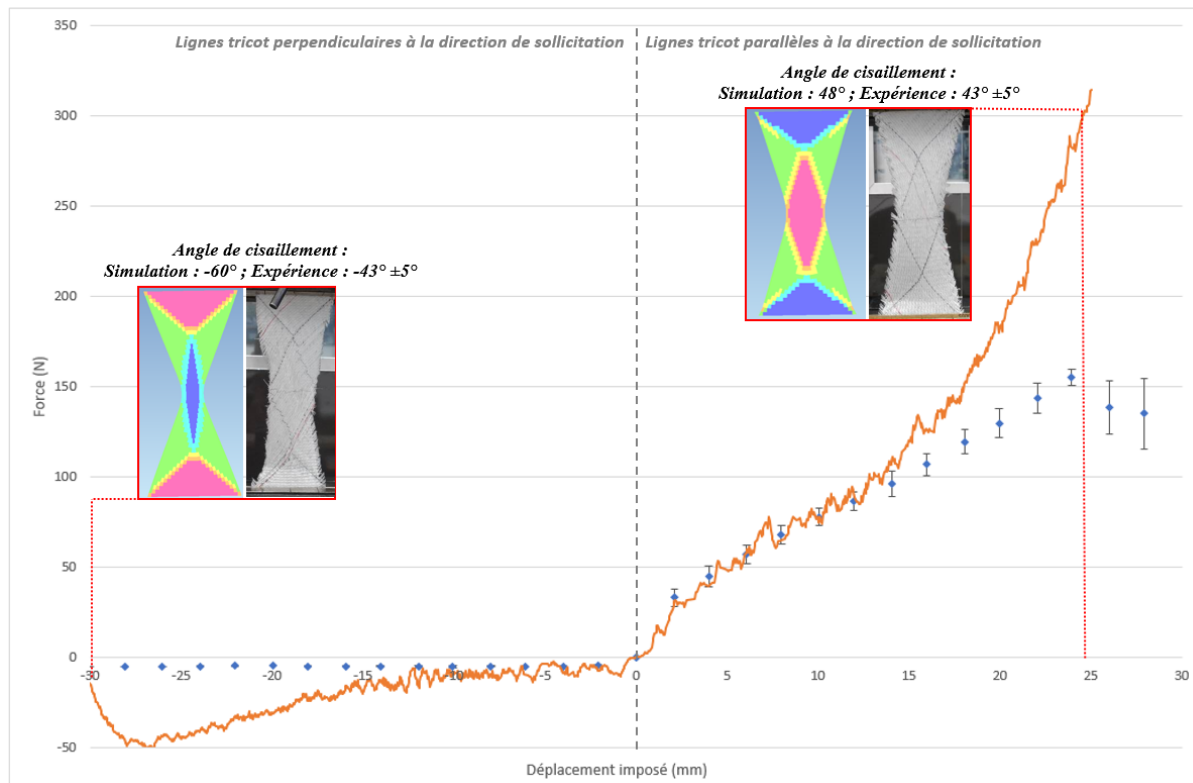


Figure 5 : Comparaison expérience (bleu) – simulation (orange) de l'essai de bias extension test

Dans le cas d'un bias test avec une sollicitation dans la direction des lignes tricot, cette étude permet de conclure que la simulation est bien représentative de l'expérience jusqu'à des angles de cisaillement de  $48^\circ$  (Figure 5). Pour la direction perpendiculaire, la loi matériaux identifiée n'est pas représentative. La déformée et les angles de cisaillement sont très différents entre la simulation et les essais expérimentaux (Figure 5). Le bias test n'est donc pas suffisant pour décrire le comportement cisaillement de ce NCF. Une étude basée sur l'emboutissage d'un hémisphère est donc proposée pour corriger la loi matériaux en cisaillement.

## 4 Réalisation d'estampages d'un hémisphère

### 4.1 Banc de préformage du GEMTEX

La machine développée au GEMTEX est composée de (Figure 6) :

- Un poinçon d'emboutissage de forme hémisphérique actionné par un vérin pneumatique.
- Une matrice ouverte en plexiglas transparente à la forme du poinçon
- Un cadre métallique de forme carré permet une répartition homogène de la pression appliquée par quatre vérins sur la matrice. L'effort de serre flan de cette machine est réglable.
- Une webcam permet de filmer l'essai vue du dessus à travers la matrice transparente

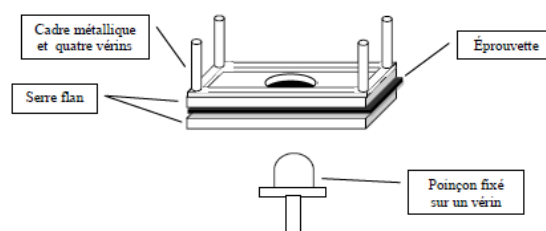


Figure 6 : Présentation du banc de préformage du GEMTEX [16]



## 4.2 Résultats expérimentaux

L'emboutissage de l'hémisphère de diamètre 150 mm a été réalisé sur 5 éprouvettes. Un quadrillage est tracé sur les éprouvettes pour suivre l'orientation des mèches et mesurer les angles de cisaillement. Les éprouvettes sont des carrés de côté 280 mm avec les mèches selon les diagonales. Elles sont maintenues dans le serre-flanc avec une pression vérin fixée à 0.3 MPa. Les mesures d'angles ont été réalisées après l'emboutissage dans les zones serre-flanc où le cisaillement est le plus fort (Figure 7). Un angle de cisaillement moyen est ainsi calculé. Les résultats sont présentés ci-dessous (Tableau 2). Nous avons également constaté la présence de glissement de réseaux de mèches, concernant majoritairement les mèches du côté ZZ (sans binder) suivant le diamètre de l'hémisphère, quelle que soit la configuration testée.

Tableau 2 : Mesures des angles de cisaillement moyens après emboutissage

	Expérience
Zone 1	$26^\circ \pm 5^\circ$
Zone 2	$38^\circ \pm 5^\circ$
Zone 3	$42^\circ \pm 6^\circ$
Zone 4	$44^\circ \pm 6^\circ$

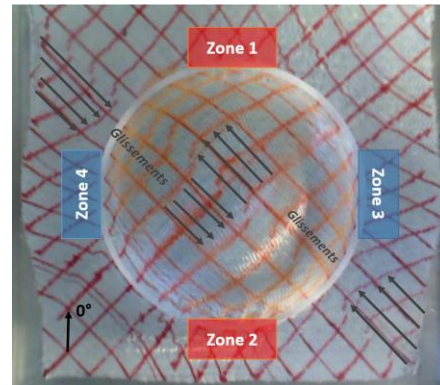


Figure 7 : Emboutissage d'un hémisphère et zones de mesures des angles de cisaillement

## 4.3 Etude numérique et corrélation

Un modèle sous PAM FORM est proposé, reprenant les surfaces en contact avec l'éprouvette :

- Un support rigide fixe
- Un serre flanc rigide maintenu par une pression répartie de 0.082 MPa (280 mm x 280 mm, avec perçage de diamètre 160 mm en son centre))
- Poinçon hémisphérique piloté en déplacement (décentré de 1mm en x et y)

L'éprouvette est modélisée par 3136 éléments coque. Le coefficient de frottement est fixé à 0.15 entre le pli et le serre-flanc (plexiglas), et à 0.3 entre le pli et le poinçon (métallique).

Une démarche itérative a permis d'ajuster la loi de comportement en cisaillement pour des angles négatifs. Cet ajustement consiste à reprendre le comportement identifié pour des angles positifs et à le réduire par un facteur. Les itérations permettent d'ajuster le facteur jusqu'à ce que la corrélation entre l'expérience et la simulation soit jugée satisfaisante.

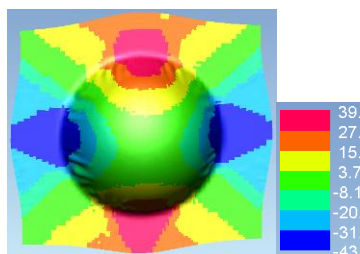


Figure 8 : Répartition des angles de cisaillement (simulation)

Avec l'ajustement de la loi de comportement, la simulation devient représentative de l'expérience sur le point de vue des angles de cisaillement (Figure 8). Nous avons constaté, une différence d'avalement (bien que minimisée) de l'ordre du centimètre dans les angles de l'éprouvette demeure. Cette différence s'explique en partie par la présence de glissements de mèches qui ne sont pas pris en compte dans la simulation et qui conduisent à une modification du profil d'avalement expérimental. Il s'agit d'une limite de la représentativité des lois de comportement macroscopiques qui négligent les modes de déformation mésoscopique des renforts.

## 5 Estampage d'une pièce à géométrie complexe de grande dimension

Pour valider la loi de comportement du matériaux établi grâce aux étapes de caractérisation et d'emboutissage de géométries élémentaires, nous avons procédé à la corrélation expérience / simulation d'un estampage d'une pièce de grande dimension ( $\sim 1 \text{ m}^2$ ) à géométries complexes (Figure 9) déjà existante.

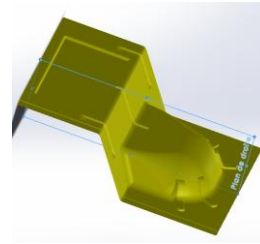


Figure 9 : Géométrie de la pièce complexe utilisée pour la validation des lois de comportement

### 5.1 Procédé expérimental

Ce préformage est réalisé par estampage utilisant un système moule / matrice et un cadre régulateur de tension. Le cadre a pour fonctions de contrôler l'avalement et les modes de déformations du renfort lors de la mise en forme. Il maintient l'empilement grâce à deux types de systèmes :

- Rouleaux sous pression pour réguler l'avalement
- Mors serré qui encastre la matière pour contrôler des zones de tension

L'empilement est composé de 4 plis de NCF de même orientation. La découpe de ces plis a été définie pour réguler la tension par l'intermédiaire du cadre de serrage, au cours de la mise en forme. Au niveau des mors d'encastrement, le textile se déchire complètement. Des fils traceurs rouges sont présents dans le matériau pour suivre les déformations du textile. La pièce de référence a été imprégnée, ce qui rend la fibre de verre translucide. Cela permet de pouvoir suivre le chemin des mèches, et d'en déduire les déformations en cisaillement pour les 4 plis. L'impact sur l'orientation des mèches dû à l'imprégnation est négligé.

### 5.2 Mise en données et simulation

Un modèle numérique a été développé avec les différents organes du procédé (Figure 10) :

- 4 plis découpés et empilés présentant les mêmes directions privilégiées que l'expérience (44 084 éléments / pli)
- Une matrice fixe
- Un moule
- Le système de cadre de serrage

Le cadre est lui-même composé d'une base fixe et de six rouleaux contrôlés en déplacement selon la verticale qui régulent la pression appliquée au renfort. Les coefficients de frottement sont fixés à 0.15 pour les interfaces pli – outils et à 0.3 pour les interface pli – pli.

La simulation de ce procédé est effectuée en trois étapes :

- Placement du renfort dans le cadre, et application des conditions de serrage
- Début de la descente du moule supérieur avec maintien des encastremments
- Fin de la descente du moule supérieur de la pièce avec libération de l'encastrement. La libération de l'encastrement représente la rupture du renfort dans ces zones. On considère ici que cette rupture est brutale, ce qui n'est pas vérifié dans l'expérience.



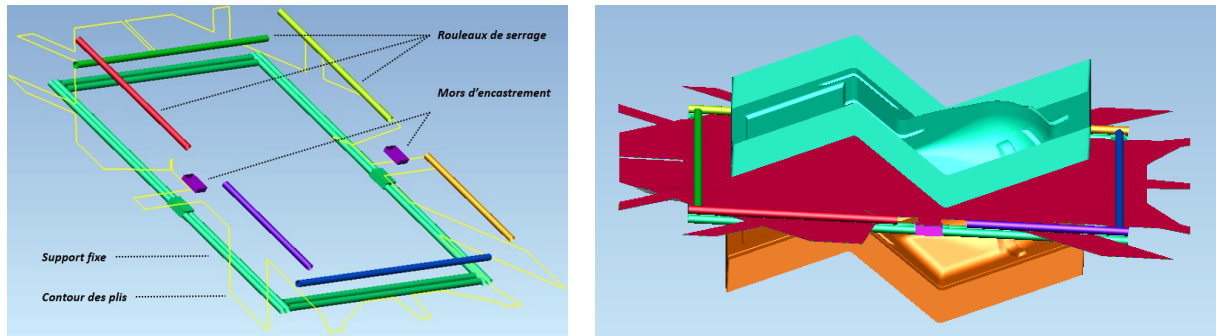


Figure 10 : Présentation des éléments du modèle numérique du procédé d'estampage réalisé

L'analyse de la répartition des angles de cisaillement met en évidence que la mise en forme est difficile au niveau des petits rayons et sous les deux des raidisseurs (Figure 11) (angles de cisaillement =  $40^\circ$ ). Cette zone sera donc étudiée dans le cadre de l'étape de corrélation avec l'expérience.

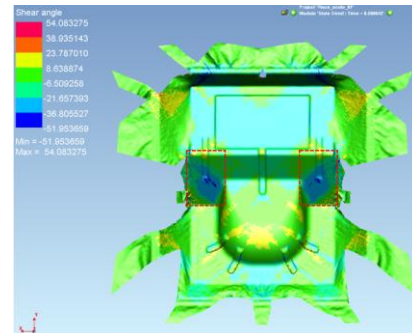


Figure 11 : Répartition des angles de cisaillement et zone étudiée pour la corrélation

### 5.3 Corrélation

La corrélation expérience-simulation est basée sur le chemin suivi par une mèche dans des zones choisies sur la pièce. Des comparaisons sont ensuite effectuées par rapport à des repères géométriques singuliers sur la pièce (Figure 12). Cette comparaison est notamment effectuée entre le dôme de la pièce et les raidisseurs extérieurs car il s'agit de la zone plane où la simulation a mis en évidence de fortes variations des directions des mèches à travers l'analyse des angles de cisaillement.

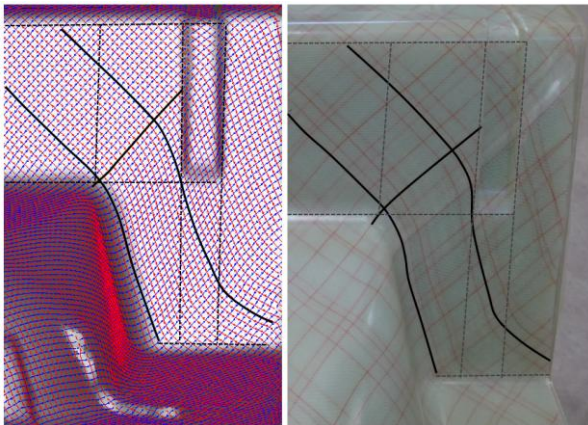


Figure 12 : Corrélation expérience / simulation : Suivi du parcours des mèches par rapport à des singularité géométrique de la pièce

Dans le cas expérimental nous avons constaté la présence de décrochements de quelques millimètres des mèches, correspondant à des glissements de réseaux fibreux le long de certaines mèches. Mis à part ces décrochements, les parcours des mèches issus du calcul numérique sont très représentatifs de l'expérience. Puisque, pour cette simulation, la loi de comportement du matériau n'a pas été modifiée, nous considérons cette dernière comme validée.

## 6 Conclusion

Ce document présente une démarche permettant d'établir, d'optimiser et de valider une loi de comportement représentative d'un NCF bi-axial à l'échelle macroscopique. Cette démarche comporte trois étapes :

- Caractérisation du renfort : pour définir une première loi de comportement
- Emboutissage d'une géométrie élémentaire : pour ajuster la loi de comportement
- Estampage d'une pièce de grandes dimensions à géométrie complexe : pour valider la loi de comportement à l'échelle de notre utilisation

Chacune de ces étapes a permis d'identifier des limites de la modélisation macroscopique des renforts secs très déformables, comme la non prise en compte de glissements de mèches intra-pli. Cependant, ces modes de déformation tendent à devenir négligeables avec l'augmentation de la dimension des géométries mises en forme. Grâce à cette loi matériau, une optimisation du procédé basée sur la simulation sera effectuée. Cette optimisation conduira à la conception et à l'industrialisation du procédé d'estampage.

## Références

- [1] P. Smith, C. D. Rudd, and A. C. Long, "The effect of shear deformation on the processing and mechanical properties of textile composites," in *Plast. Rubbers compos.*, 1997, pp. 57–327.
- [2] M. Youssef, "Milieux fibreux tissés : modélisation et simulation de la mise en forme des CFRTP à géométrie non développable," Thèse, Université d'Orléans, 2005.
- [3] P. Böhrer, F. Härtel, and P. Middendorf, "Identification of forming limits for unidirectional carbon textiles in reality and mesoscopic simulation," *Key Eng. Mater.*, vol. 554–557, pp. 423–432, 2013.
- [4] P. Harrison, "Modelling the forming mechanics of engineering fabrics using a mutually constrained pantographic beam and membrane mesh," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 81, pp. 145–157, Feb. 2016.
- [5] G. B. McGuinness and C. M. O Bradaigh, "Development of rheological models for forming flows and picture-frame shear testing of fabric reinforced thermoplastic sheets," Galway, 1997.
- [6] P. Harrison and M. J. Clifford, "Shear characterisation of woven textile composites," in *10th European Conference on Composite Materials*, 2002, pp. 3–7.
- [7] S. V. Lomov *et al.*, "Full-field strain measurements in textile deformability studies," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 8, pp. 1232–1244, Aug. 2008.
- [8] D. Leutz, "Forming simulation of AFP materials layups material characterization simulation and validation," These, Technische Universität München, 2015.
- [9] J. Cao *et al.*, "A Cooperative Benchmark Effort on Testing of Woven Composites," in *In Proceedings of the 7th ESAFORM Conference on Material Forming*, 2004, pp. 305–308.
- [10] P. Boisse, N. Hamila, E. Guzman-Maldonado, A. Madeo, G. Hivet, and F. Dell'Isola, "The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and prepregs: a review.," *Int. J. Mater. Form.*, p. 20, 2016.
- [11] S. Dridi, "Essais de Caractérisation des Structures Tissées," Thèse, INSA Lyon, 2010.
- [12] S. Bel, N. Hamila, and P. Boisse, "Characterisation of Non-Crimp Fabric deformation mechanisms during preforming," in *18th International Conference on Composite Materials*, 2011.
- [13] E. De Luycker, "Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks," Thèse, INSA Lyon, 2009.
- [14] S. Bel, "Analyse et simulation de la mise en forme des renforts de composites NCF," Thèse, INSA Lyon, 2011.
- [15] F. Härtel and P. Harrison, "Evaluation of Normalisation Methods for Uniaxial Bias Extension Tests on Engineering Fabrics," *Compos. PART A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, pp. 61–69, 2014.
- [16] C. Dufour, F. Boussu, P. Wang, D. Soulat, and X. Legrand, "Analyse du comportement de renforts tissés interlock lors du procédé de préformage," in *21ème Congrès Français de Mécanique*, 2013, pp. 5–6.