



**HAL**  
open science

## Influence de l'étape de préformage sur l'injection lors du procédé RTM

D. Soulat, A. Telmar, R. Agogue, G. Hivet, P. Ouagne

► **To cite this version:**

D. Soulat, A. Telmar, R. Agogue, G. Hivet, P. Ouagne. Influence de l'étape de préformage sur l'injection lors du procédé RTM. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.38. hal-00597910

**HAL Id: hal-00597910**

**<https://hal.science/hal-00597910>**

Submitted on 2 Jun 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Influence de l'étape de préformage sur l'injection lors du procédé RTM**

### ***Influence of the preforming stage on the resin injection step during the RTM Process***

**D.SOULAT, A.TELMAR, R.AGOGUE, G.HIVET, P. OUAGNE**

Laboratoire Prisme

Université d'Orléans – 8, rue Léonard de Vinci -45072 Orléans CEDEX

e-mail : damien.soulat@univ-orleans.fr, aurelie.telmar@univ-orleans.fr, romain.agogue@univ-orleans.fr, Gilles.hivet@univ-orleans.fr, pierre.ouagne@univ-orleans.fr

#### **Résumé**

Ce travail s'inscrit dans l'analyse de la réalisation de tubes creux en composites par le procédé RTM. L'influence de la phase de dépose du renfort, sous forme de gaines, sur l'étape d'injection est l'objectif de ce travail. La position et la déformation des renforts secs influent sur la perméabilité locale du milieu fibreux, paramètre clé pour l'étape d'imprégnation mais également sur les propriétés de la pièce finale. La démarche s'appuie sur une approche expérimentale couplée à des modèles analytiques afin de prédire et maîtriser, en fonction des paramètres procédés, la déformation de ces renforts. Ces modèles sont corrélés avec des tomographies réalisées sur des pièces injectées.

#### **Abstract**

The shear deformation and the evolution of the fiber volume fraction of carbon braided reinforcement are studied during the performing step of the RTM process. The determination of these quantities is necessary for their influence on the permeability component for the simulation of the resin injection step. During the performing the complex preform is studied at several scale with an analytical model based on fishnet approach. Numerical results in terms of shear angle, position of the reinforcement, fibre volume fraction, are compared to quantities extract from tomographies realized on composite piece after the resin injection. The model can optimize specific parameters of the braid reinforcement used for this application.

**Mots Clés :** RTM, renforts gainés, déformation de cisaillement, fraction volumique.

**Keywords :** RTM Process, Braid reinforcement, shear deformation, fraction volume fiber.

#### **1. Introduction.**

De nombreuses publications portent sur les structures composites à base de gaines, et ce, pour leurs applications dans différents secteurs industriels (aéronautique aérospatiale, marine, construction, et également en médical [1]). Les principaux avantages relèvent notamment du procédé de fabrication qui permet par tressage automatisé des renforts sur un mandrin (Fig.1.a), d'atteindre un taux important de dépose de renfort, mais également de réaliser des formes complexes, pour un faible coût du procédé pour des gaines bi-axiales [2]. Un des paramètres prédominants est l'angle entre les mèches de renfort et l'axe du mandrin (noté « Braid angle », Fig.1.b) qui influe de manière conséquente sur les caractéristiques mécaniques de la pièce finale [3]. Par conséquent de nombreuses études portent sur les procédés de tressage [4] avec le développement de modèles analytiques qui estiment cet angle, ainsi que le taux de dépose de renfort en fonction des paramètres procédés [5]. L'analyse du comportement mécanique des pièces réalisées en fonction de cet angle est également largement étudiée. Dans toutes ces études, les renforts sont tressés directement sur le mandrin, parfois sur plusieurs couches pour des pièces épaisses.

Dans l'étude proposée, un tube épais en composite le cahier des charges impose que les renforts doivent respecter un angle spécifique par rapport à l'axe du tube, les procédés décrits dans cette bibliographie, qui plaquent le renfort sur le mandrin, ne sont donc pas envisageables. Dans le cadre du procédé RTM utilisé pour réaliser cette pièce, on se propose dans la section 2 de détailler la phase spécifique de préformage mise en place afin, à partir du renfort sous forme de gaine bi-axiale,

de respecter cette orientation par rapport à l'axe du cylindre. Les déformations du renfort lors de cette phase ainsi que l'approche multi-échelle sont détaillées. Pour l'étape d'imprégnation de résine, qui suit cette phase de dépose, il est essentiel de connaître la position des renforts et la fraction volumique qui dépend de l'état de cisaillement du renfort [6]. Ces caractéristiques de la préforme sèche influent sur les composantes de perméabilité [7] et plus généralement sur les paramètres de simulation par éléments finis de cette étape d'injection. Dans l'objectif de maîtriser ces quantités, un modèle analytique prédictif du calcul de la déformation en cisaillement et de la fraction volumique dans l'épaisseur de la pièce est développé et présenté dans la section 3. Les corrélations du modèle avec des tomographies sont également présentées. Grâce à ce modèle prédictif l'influence des caractéristiques des gaines sur leur déformabilité lors du procédé est abordée à la section 4. Enfin l'impact de la déformabilité lors de cette étape de dépose, sur l'étape d'imprégnation est abordé dans la section 5, via l'incidence sur la perméabilité.

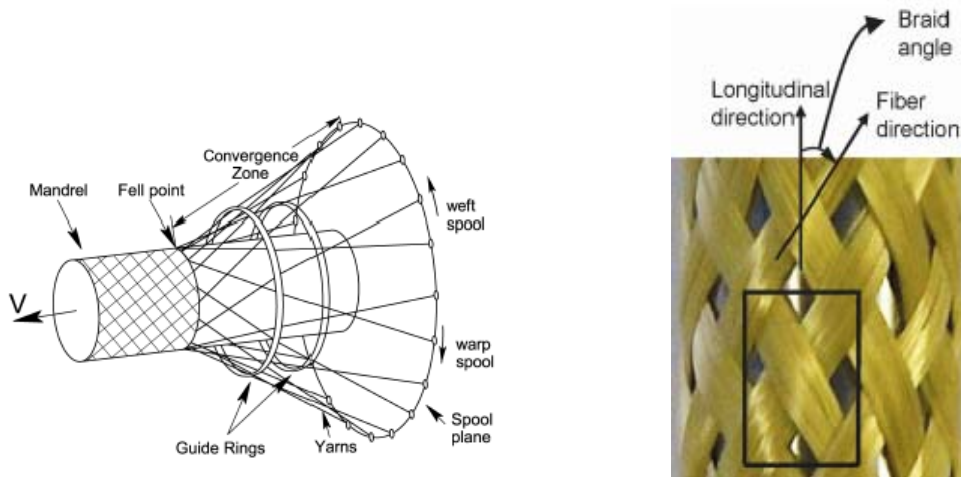


Fig. 1. (a) Procédé de gaine tressée sur un mandrin [16]. (b) Notion de « braid angle » [2]

## 2. Phase expérimentale de dépose de la gaine.

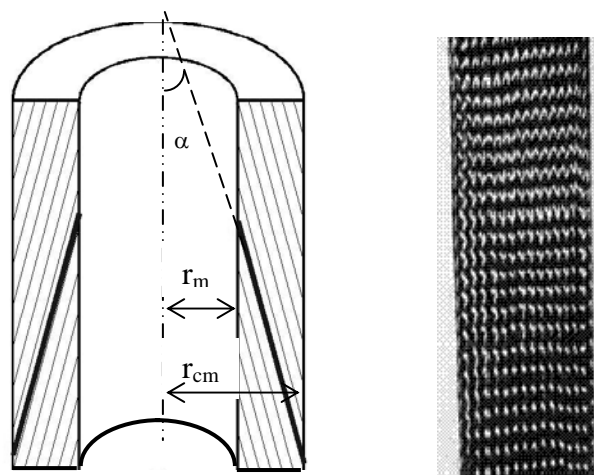


Fig. 2. (a) Schéma de la préforme 3D. (b) Gaine de carbone utilisée.

La préforme 3D est caractérisée (Fig.2.a) par un ensemble de plis d'angle spécifique (noté  $\alpha$ ) relativement à l'axe. On désigne respectivement par  $r_m$  et  $r_{cm}$  son rayon intérieur et extérieur. Le diamètre extérieur de la pièce doit être maîtrisé lors de la dépose car pour l'étape d'injection un

contre-moule est refermé autour de la préforme. Ces plis ne peuvent être discontinus entre eux, par conséquent le matériau de base est un renfort sous forme de gaine. Cette gaine bi-axiale en carbone (Fig. 2.b) est caractérisée par son diamètre nominal (notée  $D_N$ ) qui représente le diamètre pour lequel les mèches restent à  $\pm 45^\circ$  (sans cisaillement), son épaisseur ( $e$ ), la largeur ( $l$ ) et le nombre de ses mèches (noté  $N_m$ ) ainsi que la masse volumique du matériau constitutif ( $\rho_f$ ).

Cette gaine est enfilée sur le mandrin interne et repliée plusieurs fois sur elle-même pour obtenir la géométrie de la pièce (Fig.3.a) [8]. Au cours de son repli, la gaine est déformée pour prendre une forme conique (imposée par la base du mandrin) qui permet à la préforme d'avoir des plis à l'inclinaison souhaitée par rapport à l'axe du tube. Un dispositif de ligatures assure la tenue mécanique du repli lors du préformage, ces ligatures assurent un effort de serrage sur la gaine afin que les plis ne puissent plus se déplacer notamment lors de la phase d'injection. La distance entre les plis est le pas, noté  $p$ . En répétant ce protocole les différents plis sont empilés les uns sur les autres (Fig.3.b), on obtient alors une préforme épaisse contenant de l'ordre de 120 plis pour 200g de gaine de carbone introduite (Fig.3.c).

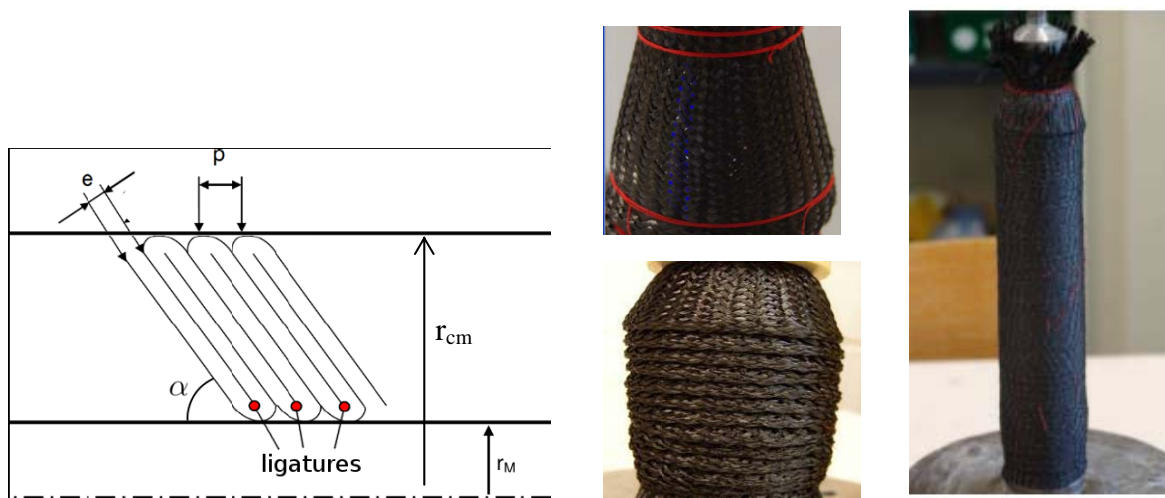


Fig. 3. (a) Schéma du procédé de dépose. (b) Formation par repli des différents plis. (c) Préforme finale

Comme décrit précédemment la phase expérimentale de préformage s'opère en deux phases et ce à deux échelles différentes. A l'échelle du pli, lorsque la gaine est enfilée autour du mandrin les mailles de renforts ne sont assujetties qu'à des déformations de cisaillement, qui permettent à la gaine à partir de son diamètre nominal d'épouser la forme du mandrin. Lors de cette phase les quantités mises en jeu sont la position des différentes mailles (constituant le pli), leur état de cisaillement, et par conséquent la fraction volumique locale. La seconde phase consiste à replier par empilement, les plis. Les déformations mises en jeu sont essentiellement de la compaction entre les plis. Cette échelle est considérée comme celle des plis vers la préforme. Cette étape de compaction va générer une modification de la forme des plis mais également une variation de l'épaisseur des plis.

La seconde étape du procédé RTM va consister à refermer la préforme dans un contre-moule de sorte à injecter une résine à débit ou à pression imposé [9]. Par l'orientation spécifique des renforts relativement à la direction axiale, qui est la direction du flux d'injection, cette phase d'imprégnation va solliciter les composantes planaires et transverses du tenseur de perméabilité [7]. Pour leurs influences sur ces composantes de perméabilité [1,6] il est nécessaire de connaître après cette étape de préformage les paramètres suivants : la position des renforts ainsi que les fractions volumiques de renforts localement (à l'échelle du pli) et globalement (à l'échelle de la préforme). Par ailleurs les états de déformations, cités lors de l'étape de dépose tel que le cisaillement ou la compaction, modifie la fraction volumique de renfort initiale, par conséquent il est essentiel

d'estimer, à l'issue de cette étape de préformage quelles sont les déformations mises en jeu. Associée à cette démarche expérimentale, un modèle analytique prédictif a donc été développé et est présenté dans la section suivante.

### 3. Modèle analytique prédictif du cisaillement et de la fraction volumique

Ce modèle est basé sur les approches géométriques de la méthode du filet largement utilisée dans la simulation du préformage de renforts tissés [10]. Dans ces approches, les mèches constituant la maille sont considérées comme inextensibles et il n'y a pas de glissement aux intersections des mèches. On se positionne à l'échelle d'un pli, et plus spécifiquement à celle des mailles élémentaires de renforts positionnées sur ce pli (Fig.4.a). Chaque cellule élémentaire de renfort est définie par 4 barres de longueur constante notée  $d$  (associées aux mèches), l'angle entre les mèches, noté  $\theta$ , change en fonction de la position sur le pli afin d'avoir une forme conique pour le pli (Fig.4.b). L'algorithme couvre itérativement l'ensemble du pli du rayon interne (noté  $r_m$ ) au rayon externe de la pièce ( $r_{cm}$ ) et calcule la position des points de la cellule ainsi que l'angle de cisaillement (Eq.1).

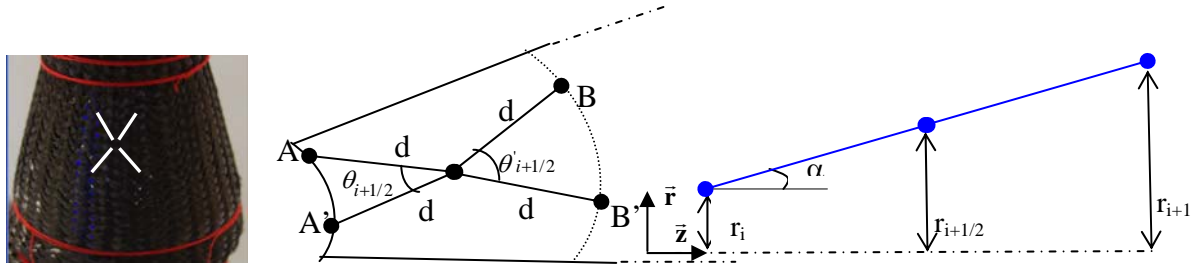


Fig. 4. Maille élémentaire (a) Localisation sur le pli. (b) Schéma de la maille (c) Position des points vis-à-vis de l'axe.

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{i+1/2} = r_i + \sin \alpha \sqrt{d^2 - \left(\frac{2r_i \pi}{N_m}\right)^2}; \quad \gamma_{i+1/2} = \frac{\pi}{2} - 2 \arcsin \left( \frac{\sqrt{2} \cdot r_i}{D_N} \right) \\ r_{i+1} = \frac{r_{i+1/2} + d \cdot \sin \alpha \sqrt{1 + \frac{(2\pi)^2}{N_m^2} \left[ \sin^2 \alpha - \left(\frac{r_{i+1/2}}{d}\right)^2 \right]}}{1 + \frac{(2\pi)^2}{N_m^2} \cdot \sin^2 \alpha}; \quad \gamma'_{i+1/2} = \frac{\pi}{2} - 2 \arcsin \left( \frac{\sqrt{2} \cdot r_{i+1}}{D_N} \right) \end{array} \right. \quad (\text{Eq. 1})$$

Ces formules prennent en compte les caractéristiques de la gaine définies dans la section 2, et que celles-ci influent sur la déformabilité (angle de cisaillement) lors de la dépose. Des corrélations avec des mesures expérimentales réalisées sur la gaine, lors du protocole mais également indépendamment du procédé [8] ont montré la bonne adéquation de ce modèle analytique concernant les angles.

Dans un second temps pour chaque cellule élémentaire, définie par sa position ( $r_i$ ) calculée par l'équation 1, il est nécessaire d'estimer sa fraction volumique locale de renfort, dénotée  $V_f(i)$ . Pour ce faire, la surface  $S_i$  et le volume  $V_i$  de renforts présents dans la cellule sont tout d'abord calculés (Eq.2), la fraction volumique locale est alors déduite de ces quantités et du volume de renfort total introduit dans la préforme,  $V_0$  (Eq.3).  $V_0$  est déterminé à partir des caractéristiques citées de la gaine ainsi que de la masse linéique ( $m_f$ ) et de la longueur ( $d$ ) d'une mèche.

$$S_i = \left( \frac{2\pi}{N_m \sin \alpha} \right) (r_{i+1}^2 - r_i^2); \quad V_i = S_i * e \quad (\text{Eq.2})$$

$$V_0 = \frac{4dm_f}{\rho_f} = \frac{4\sqrt{2}\pi D_n m_f}{\rho_f N_m}; \quad V_f(i) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{4\sqrt{2}\pi D_n m_f}{\rho_f N_m S_i e} \quad (\text{Eq.3})$$

Dans les équations précédentes (Eq. 2 et Eq.3) l'épaisseur du renfort ( $e$ ) peut-être calculée à partir du pas entre les plis et de l'angle avec l'axe du tube (Fig.3.a). On représente (Fig.5) l'évolution de la fraction volumique en fonction de l'angle de cisaillement des mailles de renforts situées sur un pli. Cette évolution est comparée avec un modèle utilisé classiquement dans la littérature [6] pour estimer la fraction volumique de renforts cisailée à partir de cet angle de cisaillement et de la fraction volumique initiale ( $V_{f0}$ ). La bonne corrélation entre les deux approches montre que l'estimation de la fraction volumique locale par le modèle est cohérente.

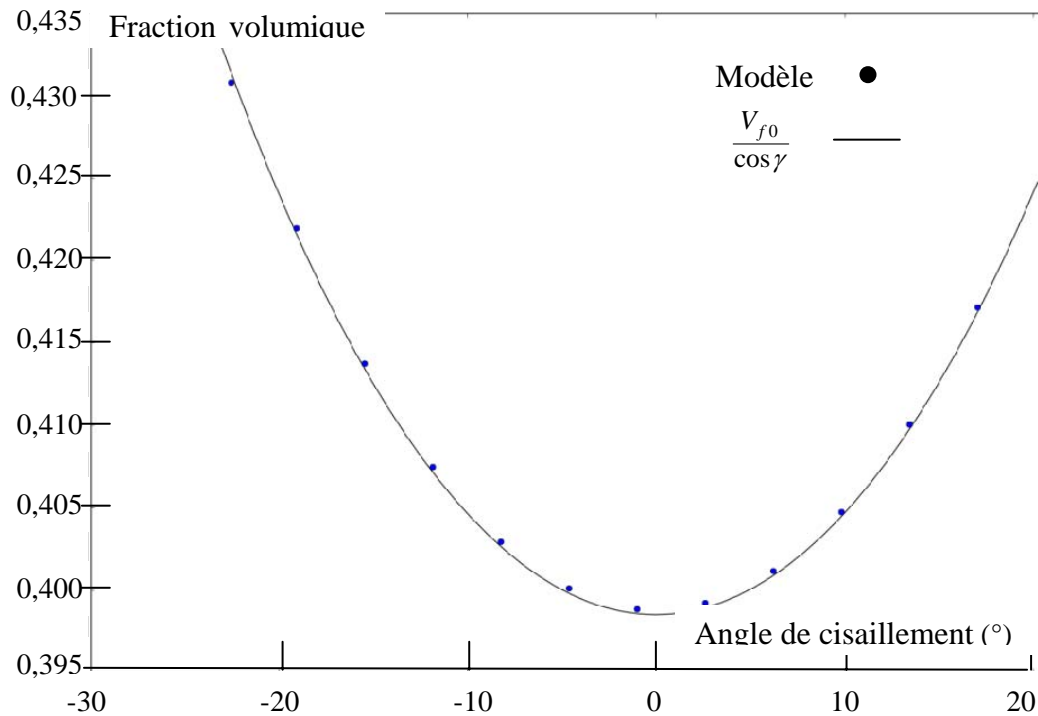


Fig. 5. Evolution de la fraction volumique en fonction de l'angle de cisaillement.

Des tomographies à rayons X, à une résolution de 31  $\mu\text{m}$ , sont réalisées sur pièce injectée, à différentes hauteurs de la préforme (Fig.6). Les images sont traitées et corrigées sur les niveaux de gris. Sur des coupes transversales on peut ainsi post-traiter la fraction volumique dans l'épaisseur de la préforme et la comparer avec les valeurs fournies par le modèle (Fig.7). Notons que la tomographie présente un pic de matière provenant de la présence des ligatures proches du mandrin. Quantitativement, le modèle surestime la fraction volumique de fibres mais en cœur de pièce, l'approximation de cette fraction volumique calculée par le modèle est satisfaisante.

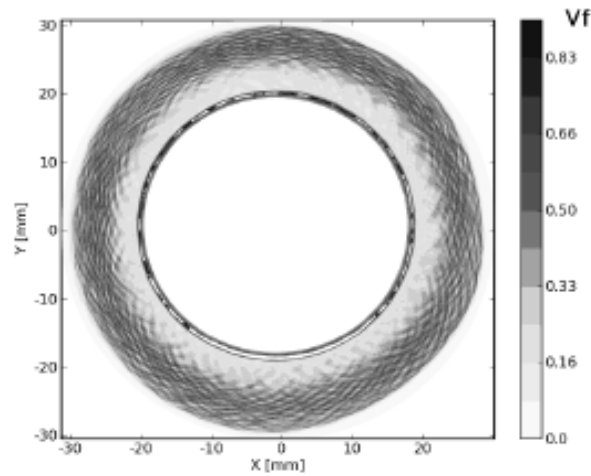


Fig. 6. Répartition de la fraction volumique de fibre obtenue par tomographie

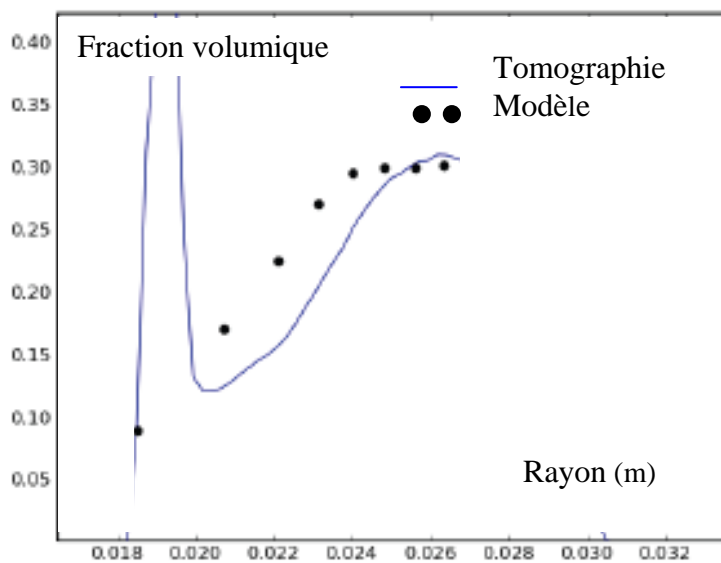


Fig. 7. Comparaison tomographie – modèle en cœur de pièces.

#### 4. Prise en compte des caractéristiques de la gaine

Comme précisé précédemment les gaines utilisées dans notre application sont caractérisées par leur diamètre nominal (notée  $D_N$ ), le nombre de mèche (noté  $N_m$ ) et leur largeur, notée  $l$ . Pour une préforme spécifique (de rayon interne 18,5 mm et de rayon externe 27 mm), l'influence de ces caractéristiques sur la déformabilité et sur la fraction volumique de fibre localement peut être estimée par le modèle prédictif.

Pour un même nombre de mèches ( $N_m=135$ ), on représente (Fig.8) l'évolution de l'angle de cisaillement dans l'épaisseur de la pièce pour 3 valeurs de diamètres nominaux différents.

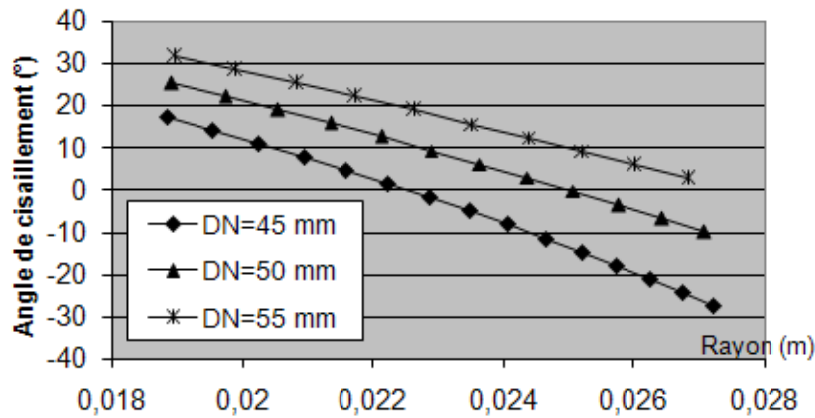


Fig. 8. Evolution de l'angle de cisaillement dans l'épaisseur de la pièce pour 3 diamètres différents

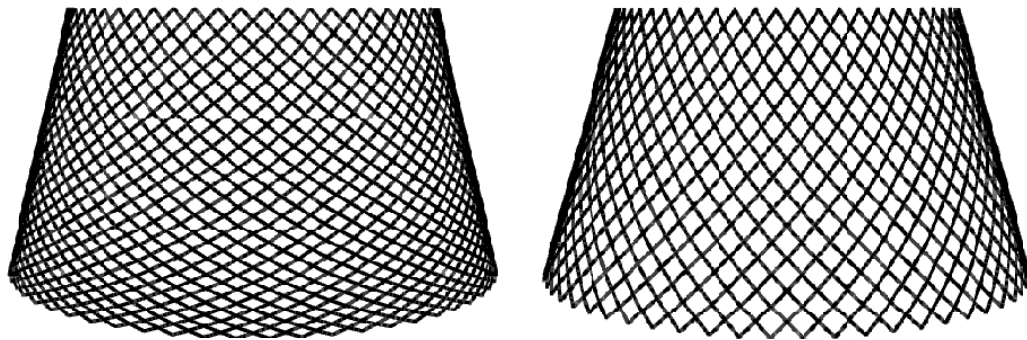


Fig. 9. Influence du diamètre nominal sur l'allure du pli. ( $D_N=35$  mm, à gauche ;  $D_N=50$  mm, à droite)

Cette différence de déformabilité est visualisée sur les allures de plis reconstruites et post-traitées (Fig.9). Chaque barre représente, à l'instar du modèle prédictif les mèches des mailles élémentaires constituant les plis. Le diamètre nominal, comme représenté sur ces graphiques, influe sur l'angle entre les mèches et donc sur le cisaillement à l'échelle du pli. A une même position dans le pli, on constate qu'avec un plus faible diamètre nominal, l'angle entre les mèches est plus élevé que celui atteint pour un plus grand diamètre nominal. D'autres résultats montrent qu'à diamètre nominal constant le nombre de mèches influe sur la densité et non sur la déformabilité. La déformabilité obtenue pour la gaine doit être estimée relativement à celle acceptable, c'est-à-dire de manière similaire aux travaux sur le cisaillement limite des renforts tissés, à un angle de blocage au-delà duquel des défauts de type plissements peuvent subvenir. L'angle de blocage, (noté  $\gamma_b$ ) est défini (Eq.4) à partir des caractéristiques géométriques de la maille élémentaire,  $d$  la distance entre les mèches et  $l$  la largeur d'une mèche par :

$$\gamma_b = \frac{\pi}{2} - \text{Arc sin}\left(\frac{l}{d}\right) \quad (\text{Eq.4})$$

Par conséquent la largeur des mèches est également, comme le diamètre nominal et le nombre de mèches, une caractéristique des gaines importante pour définir la faisabilité d'obtenir une préforme sans défaut à partir d'une gaine donnée et ainsi définir un domaine de processabilité.



## 5. Influence de la dépose sur l'injection

Les simulations macroscopiques (Fig.10) de la phase d'injection de résine à l'échelle des pièces et utilisées classiquement [11,12] dans les logiciels industriels et de laboratoire, sont basées sur la loi de Darcy et nécessite la connaissance de la perméabilité des gaines. Les informations sur la perméabilité des gaines sont peu abondantes dans la littérature, contrairement à la perméabilité des renforts tissés. Par ailleurs les quelques références traitent des seules perméabilités planaires de gaines biaxiales ou triaxiales [13,14, 15]. La complexité de l'application traitée, relativement à la phase d'imprégnation est relative à l'orientation des plis, dans une phase d'injection axiale. En effet dans ce cas les composantes planaires et transverses des gaines sont essentielles dans la compréhension (et la simulation) de l'écoulement.

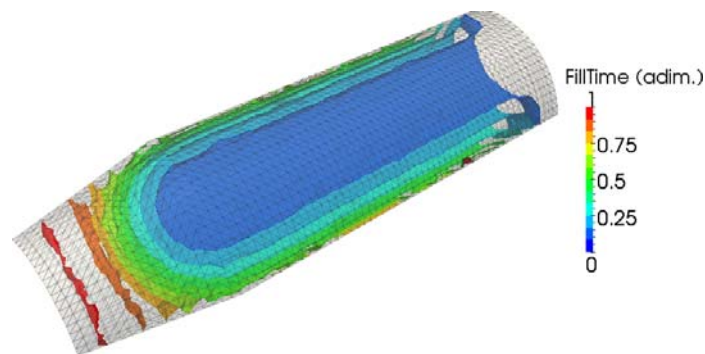


Fig. 10. Position du front lors de la simulation de l'imprégnation (Ref thèse romain)

En collaboration avec l'Université du Havre, une campagne expérimentale d'identification de ces composantes de perméabilité a été réalisée [7, 9]. Ces quantités dépendent classiquement de la fraction volumique de renfort, qui dans notre application est estimée par le modèle prédictif présentée ci-dessus. L'influence de l'étape de dépose, par les déformations de cisaillement générées modifie les fractions volumiques locales qui elles-mêmes influent sur les valeurs de perméabilités entrées dans le code de simulation numérique.

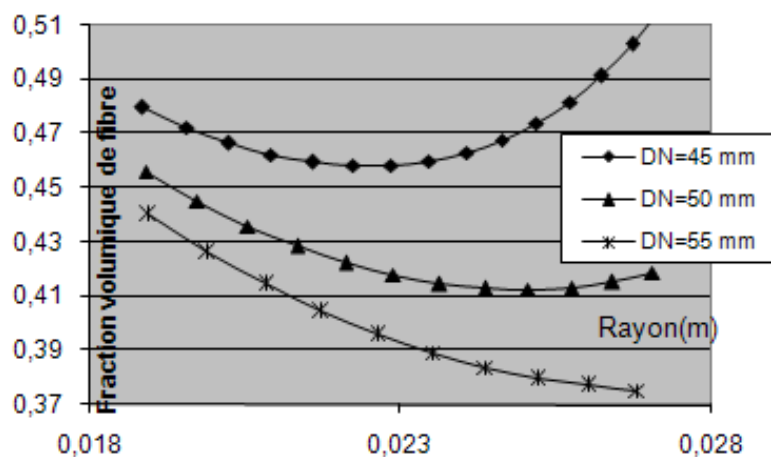


Fig. 11. Evolution de la fraction volumique de fibre le long des plis

De manière similaire à l'influence du diamètre nominal des gaines sur la déformabilité (Fig.8), on représente (Fig.11) grâce au modèle prédictif, l'évolution de la fraction volumique de renfort le long d'un pli, soit dans l'épaisseur de la pièce, pour 3 valeurs de diamètres nominaux différents. On constate que l'évolution locale de densité de renfort dépend fortement des caractéristiques des gaines utilisées. Notons que, sur cette figure, on représente l'évolution de ces fractions volumiques en différents points du pli, alors que le comparatif avec la tomographie (Fig.7) était réalisé sur une coupe radiale de la pièce.

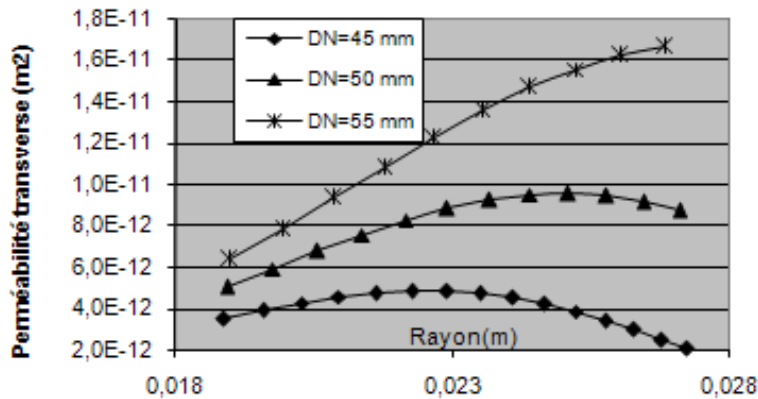


Fig. 12. Evolution de la perméabilité transverse le long des plis

Ces évolutions de fraction volumique sont répercutées (Fig.12) sur les valeurs de perméabilité transverses de la gaine, également en tout point des plis, et ce grâce aux identifications expérimentales. On constate des variations importantes qui vont modifier l'écoulement de résine lors des simulations d'imprégnations. Notons que ces variations, à un ordre de grandeur près, sont identiques pour la composante planaire de la perméabilité.

## 6. Conclusions

Les simulations numériques de l'étape d'injection ont besoin de la connaissance de la position des renforts, mais également de l'état de déformation pour son influence sur les fractions volumiques, afin d'associer pour le calcul les bonnes valeurs de perméabilité. Ces travaux ont montré la nécessité de maîtriser ces paramètres, et de les prédire, lors l'étape de dépose du renfort sec. L'approche expérimentale associée à des tomographies permet d'accéder à ces quantités, mais reste coûteuse, notamment lorsque l'on souhaite atteindre des petites échelles. Le développement de modèles analytiques prédictifs s'inscrit donc dans cet objectif. Ces modèles ont par ailleurs l'avantage de prendre en compte les caractéristiques du matériau utilisé. Dans la continuité de ces travaux, les tomographies ont montré que l'étape de dépose génère une courbure des plis, par la présence des ligatures, non encore prise en compte dans les résultats exposés. Par ailleurs l'épaisseur des plis a été considérée comme constante dans tous les plis. Or celle-ci est reliée aux paramètres procédés de dépose. Le phénomène de compaction pourrait ainsi être pris en compte.

## Remerciements

Cette étude a bénéficié du support du programme ANR « LCM3M », de la société Roxel et du Conseil Général du Loiret

## Références

- [1] Wu X., Li J., Sheno R.A., "Measurement of braided preform permeability", *Composites Science and Technology*, vol. 66, 2006, p. 3064-3069.
- [2] Ayranci C., Carey J. "2D braided composites: A review for stiffness critical applications", *Composite Structures*, vol. 85, p. 43-58, 2008.

- [3] Fouinneteau M.R.C., Pickett A.K., “Shear mechanism modelling of heavy tow braided composites using a meso-mechanical damage model”, *Composites Part A*, vol. 38, 2007, p. 2294-2306.
- [4] Du G.W., Popper P., “Analysis of a circular braiding process for complex shapes”, *Journal of Textile Institute*, vol. 85, n° 3, 1994, p. 316-337.
- [5] Potluri P. Rawal A., Rivaldi M., Porat I., “Geometrical modelling and control of a triaxial braiding machine for producing 3D performs”, *Composites Part A*, vol. 34, 2003, p. 481-492.
- [6] Long A.C. “Process modelling for liquid moulding of braided performs”, *Composites Part A*, vol. 32, 2001, p. 941-953.
- [7] Ouagne P., Soulat D., Agogue R., Park C.H., Bizet L., Breard J., Zanelli D., “Injection of a Complex Preform by RTM. Process Parameters and Quality of the Part”, FPCM 10, 11-15 Juillet 2010, Ascona (Suisse).
- [8] Telmar A., Agogu e R., Soulat D., Hivet G., Zanelli D., “Prediction of braid deformability during RTM Process”, *International Journal of Material Forming*, vol. 3, Suppl. 1, 2010, p. 676-678.
- [9] R.Agogu e. “Analyse expérimentale et numérique de la fabrication de pièces composites par le procédé RTM“. Phd Thesis of the University of Orleans. Mars 2011 (in French).
- [10] S. Bickerton, P. Simacek, S.E. Guglielmi, S.G. Advani. “Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of a compound curved composite part“. *Composites Part A* , 28: 801 – 816, (1997).
- [11] R. Gauvin, F. Trochu, Y. Lemenn, and L. Diallo. Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement. *Polymer Composites*, 17(1) :34–42, 1996.
- [12] W. D. Brouwer, E. C. F. C. van Herpt, and M. Labordus. Vacuum injection moulding for large structural applications. *Composites Part A*, 34(6) :551 – 558, 2003.
- [13] A. Endruweit , A.C. Long. A model for the in-plane permeability of triaxially braided reinforcements. *Composites Part A*, 42: 165-172, 2011.
- [14] Charlebois KM, Boukhili R, Zebdi O, Trochu F, Gasmi A. Evaluation of the physical and mechanical properties of braided fabrics and their composites. *J. of Reinf Plast Compos* 2005;24(14):1539–54.
- [15] Antonucci V, Giordano M, Nicolais L, Calabro A, Cusano A, Cutolo A, et al. Resin flow monitoring in resin film infusion process. *J Mater Process Tech* 2003;143– 144:687–92.
- [16] J.F.A. Kessels, R. Akkerman. Prediction of the yarn trajectories on complex braided preforms. *Composites: Part A* 33 (2002) 1073–1081