



HAL
open science

Simulation de procédé pour matériaux composites - Couplage Stokes / Darcy / solide en grandes déformations

Arnaud Dereims, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau, Patrick de Luca

► **To cite this version:**

Arnaud Dereims, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau, Patrick de Luca. Simulation de procédé pour matériaux composites - Couplage Stokes / Darcy / solide en grandes déformations. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.63. hal-00597937

HAL Id: hal-00597937

<https://hal.science/hal-00597937>

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.

Simulation de procédé pour matériaux composites – Couplage Stokes / Darcy / solide en grandes déformations

Simulation of composite materials process – Coupling Stokes, Darcy and solid finite deformations

Arnaud Dereims^{1,2}, Sylvain Drapier², Jean-Michel Bergheau³ et Patrick de Luca⁴

1 : ESI Group
Le Récamier, 70 rue Robert, 69458 Lyon Cedex 6, France
e-mail : arnaud.dereims@esi-group.com

2 : Centre de Science des Matériaux et Structures & UMR CNRS 5146
École Nationale des Mines de Saint-Étienne – 158 cours Fauriel – 42023 Saint-Étienne CEDEX 2
e-mail : dereims@emse.fr, drapier@emse.fr

3 : Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes
École Nationale d'Ingénieur de Saint-Étienne – 59 rue Jean Parrot – 42023 Saint-Étienne CEDEX 2
e-mail : bergheau@enise.fr

4 : ESI Group
Aero Business Center - Aeroparc, 25 Rue Marcel Issartier, BP 20005, 33700 Mérignac, France
e-mail: patrick.de.luca@esi-group.com

Résumé

Les procédés d'infusion sont une alternative économique aux procédés classiques d'injection pour la réalisation de grandes pièces en composites. Cependant la mauvaise maîtrise des propriétés finales de la pièce moulée est un frein à leur démocratisation au niveau industriel. Nous présentons, ici, une méthode de modélisation avancée, couplant différents écoulements à la mécanique du solide en grandes déformations, afin d'anticiper au mieux les variations d'épaisseur de la pièce ainsi que le temps d'infusion.

Abstract

Infusion processes are a cheaper alternative to the usual injection process to realize big composite parts. However the bad control of the final properties of the molded part is a disincentive to their democratization at industrial level. We are presenting an advanced modeling method, coupling fluid flows with finite deformation solid mechanics, in order to anticipate as best as possible thickness variation of the part and infusion time.

Mots Clés : Infusion, LRI, Stokes, Darcy, Interaction Fluide/Structure

Keywords : Infusion, LRI, Stokes, Darcy, Fluid/Structure interaction

1. Introduction

Les procédés de mise en œuvre des matériaux composites par infusion sont développés depuis quelques années pour apporter des solutions économiques à la réalisation de grandes pièces. Ces procédés permettent une réduction des coûts de stockage des matières premières et de fabrication de moule, du temps d'infusion et limitent la formation de vides. Cependant, la mauvaise maîtrise des propriétés finales de la pièce, induisant une mise au point du procédé longue et coûteuse, réduit considérablement les avantages précités. Il apparaît donc nécessaire de développer des méthodes de simulation numérique permettant d'anticiper ces propriétés.

2. Description du procédé LRI

Le procédé LRI (Liquid Resin Infusion) compte parmi les procédés d'infusion les plus diffusés au niveau industriel. Dans ce procédé, une couche de résine liquide, recouvrant toute la surface de la

pièce à infuser, est formée à l'aide d'un tissu fortement perméable, le drainant, placé au-dessus de l'empilement de fibres. C'est ensuite la différence de pression entre l'entrée de résine (pression atmosphérique) et l'évent (pression nulle) qui provoque l'infusion de la résine dans le drainant puis à travers l'épaisseur des préformes (fig. 1(a)). Après remplissage, l'ensemble subit un cycle de cuisson qui conduit la résine dans un état solide.

La souplesse du sac à vide ne permet pas de maintenir une épaisseur constante pendant toute la durée de l'opération, or de cette épaisseur dépendent la qualité dimensionnelle et les propriétés mécaniques de la pièce fabriquée. Nous présentons dans la suite une approche isotherme pour simuler au mieux ce procédé.

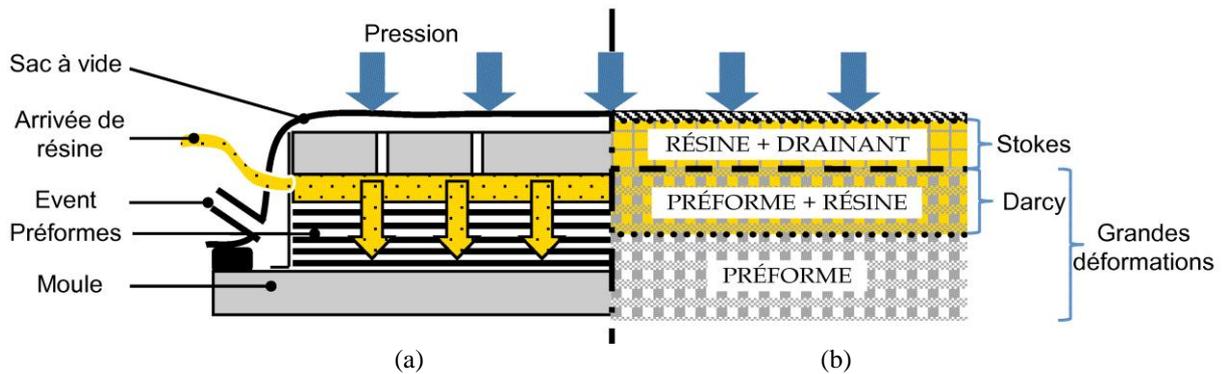


Fig.1. (a) Principe du procédé Liquid Resin Infusion (LRI). (b) Modèle proposé [1].

3. Modélisation

Le modèle retenue est celui proposé par P. Celle dans ses travaux de thèse [1-2]. Ce modèle dont la particularité réside dans la prise en compte du drainant, repose sur un découpage en trois zones (fig.1(b)) :

- la zone de Stokes : zone d'écoulement rapide constituée de la résine et du drainant,
- la zone de Darcy : écoulement incompressible de la résine dans les préformes en grandes déformations,
- la zone de préformes sèches : zone constitué de préformes non imprégnées de résine soumises à de grandes déformations.

De plus, le procédé LRI peut être partagé en quatre phases distinctes :

- le pré-remplissage : phase initiale de compaction des préformes sèches due à la mise sous vide du système,
- le remplissage,
- le post-filling : phase plus ou moins longue de « repos » ou de re-compaction permettant d'atteindre l'équilibre mécanique, nécessaire à la qualité dimensionnelle de la pièce finie,
- La cuisson (non considérée dans cet article).

Dans ce qui suit, nous allons nous attacher à décrire les différents modèles physiques retenus, ainsi que les méthodes de couplage mises en œuvre pour représenter ces phénomènes.

3.1 Pré-remplissage

Lors de la phase de pré-remplissage, la résine n'est pas encore présente dans le système, il n'y a donc que la zone de préformes sèches. Lorsque l'on fait le vide la pression atmosphérique s'applique directement sur l'empilement qui se déforme. Ainsi, en négligeant les forces de volumes, l'équation de la conservation de la quantité de mouvement associée aux préformes s'écrit sous la forme suivante :

$$\operatorname{div} \bar{\sigma} = 0 \quad (\text{Eq. 1})$$

où $\bar{\sigma}$ est le tenseur des contraintes. De plus, les préformes sont considérées comme un matériau déformable constitué de fibres indéformables, donc toute déformation, à l'échelle macroscopique, se traduit pas un réarrangement de fibres, à l'échelle microscopique. Ce qui nous permet de relier déformation à variation de porosité sans passer par des lois semi-empiriques, exprimant la pression appliquée en fonction de la porosité, comme cela est couramment proposé dans la littérature [3-4].

3.2 Remplissage

Lors de cette phase, la résine est d'abord absorbée par le drainant puis imprègne les préformes sous l'action du vide, jusqu'à saturation complète des fibres. Nous sommes donc en présence des trois zones décrites précédemment (fig. 1(b)), nécessitant le couplage de deux types d'écoulement et de la mécanique du solide.

3.2.1 Ecoulement de la résine

Comme décrit plus haut, la résine s'écoule dans un tissu drainant puis dans les préformes sous l'action du vide. Dans la zone dite de Stokes, la très forte perméabilité du drainant, relativement à celle des fibres, nous permet de considérer, en première approximation, un écoulement incompressible régi par les équations de Stokes (Eq. 2),

$$\left| \begin{array}{l} \operatorname{div} (\mu \bar{D}(\vec{v})) - \vec{\nabla} p = 0 \\ \operatorname{div} \vec{v} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{Eq. 2})$$

où μ est la viscosité de la résine, \vec{v} la vitesse de la résine, p la pression de la résine et $\bar{D}(\vec{v}) = \frac{1}{2} (\vec{\nabla} \vec{v} + \vec{\nabla}^T \vec{v})$ le tenseur des taux de déformation eulérien associé au champ de vitesse \vec{v} . Tandis que dans la zone de Darcy, on représente un fluide Newtonien incompressible s'écoulant dans un milieu poreux à faible perméabilité (inférieure à 10^{-9} m^2) régi par la loi de Darcy (Eq. 3),

$$\left| \begin{array}{l} \vec{v} = -\frac{1}{\mu} \bar{K} \vec{\nabla} p \\ \operatorname{div} \vec{v} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{Eq. 3})$$

avec \vec{v} la vitesse de Darcy ou la vitesse moyenne macroscopique de la résine par rapport aux préformes, \bar{K} le tenseur de perméabilité, μ la viscosité de la résine et p la pression interstitielle.

La mécanique du solide quant à elle reste inchangée mais est couplée à la mécanique des fluides afin de prendre en compte l'influence mutuelle de la résine sur les préformes et des préformes sur la résine, les méthodes de couplage sont décrites dans ce qui suit.

3.2.2 Couplages

3.2.2.1 Stokes / Darcy

Le couplage entre les deux zones d'écoulement (Darcy et Stokes) est réalisé en prenant en compte la continuité de la vitesse normale et de la contrainte normale à l'interface. Ainsi, la vitesse normale à l'interface, prise dans la zone de Darcy, est imposée comme condition limite des équations de Stokes, et la pression hydrostatique, prise dans la zone de Stokes, est imposée à Darcy (fig. 3). Le problème est ensuite résolu de manière itérative et la convergence vérifiée par un calcul d'erreur relative sur les champs de vitesse et de pression entre deux itérations.

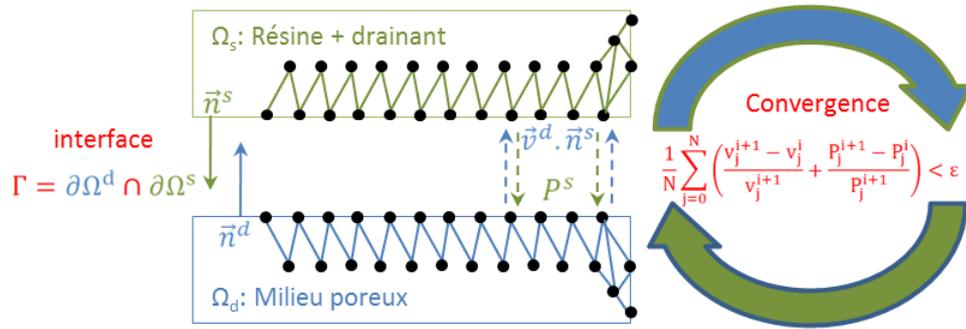


Fig. 3 : Schémas de principe du couplage Stokes/Darcy

3.2.2.2 Fluide / Structure

Le couplage fluide/structure est traité, dans une approche quasi-statique, par un couplage fort itératif. En effet, le problème fluide couplé Stokes/Darcy est résolu sur un maillage fixe (i.e. pour des préformes indéformables). L'influence de la résine sur les fibres est prise en compte à travers la pression hydrostatique selon la loi de Terzaghi (Eq. 4),

$$\overline{\overline{\sigma_{eff}}} = \overline{\overline{\sigma_{tot}}} - \overline{\overline{I}}p \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec $\overline{\overline{\sigma_{tot}}}$ la contrainte totale appliquée au système, $\overline{\overline{\sigma_{eff}}}$ la contrainte effective dans les préformes et $\overline{\overline{I}}$ le tenseur unité. Le problème non linéaire en grandes déformations est résolu pour un champ de pression fixé (et donc un comportement équivalent au sens de Terzaghi), puis, l'influence des déformations se traduit par l'évolution de la porosité qui influe sur la perméabilité du milieu, déterminée selon la loi de Carman-Kozeny (Eq. 5),

$$\overline{\overline{K}} = \frac{d_f^2}{16\overline{\overline{h_k}}} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

avec d_f le diamètre moyen de fibre, h_k constantes de Kozeny et ϕ la porosité. Finalement, la convergence est vérifiée par un calcul d'erreur relative sur les champs de pression, vitesse et déformations entre deux itérations.

3.2.3 Front de fluide

L'évolution du front de fluide est gérée par l'algorithme de remplissage de PAM-RTM™. Cet algorithme repose sur un découpage du phénomène transitoire en une succession d'états quasi-statiques. Les nouveaux éléments remplis entre deux états ou temps de remplissage sont déterminés à partir du champ de vitesse calculé au pas de temps précédent. Un facteur de remplissage compris entre 0 et 1 est associé à chaque élément.

3.3 Post-Filling

La phase de remplissage est immédiatement suivie d'une phase, plus ou moins longue, de mise à l'équilibre du système ; pouvant consister à recomacter, afin d'obtenir l'épaisseur et la fraction volumique de fibre voulues. La simulation de cette phase, citée dans la littérature sous le nom de post-filling [5], nécessite la transformation des conditions de pression en parois imperméables (Eq. 6), pour toutes les buses d'injection et tous les événements fermés.

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{Eq. 6})$$

Cette phase, peu décrite dans la littérature, est pourtant nécessaire à la bonne représentation des phénomènes physiques ayant lieu au cours de l'infusion. En effet, la simulation montre qu'à la fin

du remplissage un gradient de pression impliquant un gradient de fraction volumique de fibre est présent dans la pièce (fig. 4). Or les bonnes propriétés mécaniques de la pièce finie dépendent de l'homogénéité du taux de fibres, il est donc nécessaire d'atteindre un équilibre avant la cuisson. Ce temps d'équilibre peut être plus ou moins conséquent selon l'épaisseur de la pièce et la viscosité de la résine.

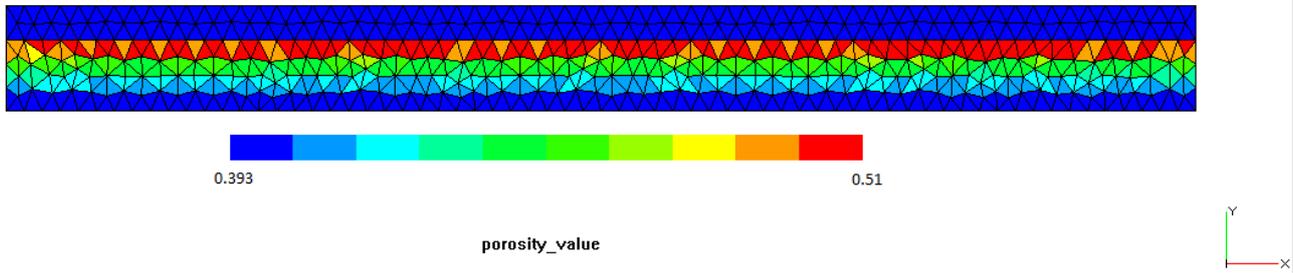
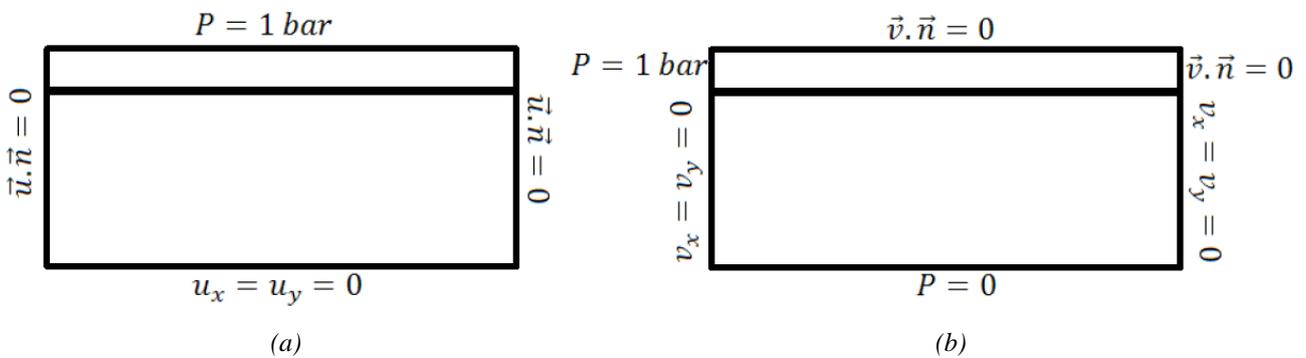


Fig. 4 : Fraction volumique de résine à la fin du remplissage d'une plaque [6]

4. Validation Expérimentale – Cas d'une plaque

Le modèle, présenté dans la partie précédente, a été implémenté dans un code élément fini basé sur la librairie C++ Pro-FlotTM¹. Les résultats de simulation ont été comparés avec succès à l'expérience dans le cas d'une plaque, lors d'une première validation, par P. Wang [6]. Le cas considéré ici est celui d'une plaque de dimension 335 mm x 335 mm, composée de 24 plis [90,0] [6]. L'épaisseur initiale mesurée à l'aide d'un vernier est de 9,8 mm. Suite la compaction initiale du système P. Wang [6] a mesuré une épaisseur moyenne de 6,18 mm, alors que la simulation donnait une épaisseur de 6,17mm. Après la phase de remplissage, le gonflement simulé était de 0,63 mm tandis que la mesure expérimentale était de 0,59 mm. La figure 5 montre les conditions initiales ainsi que les résultats obtenus lors du calcul.



¹ Librairie commerciale appartenant à ESI Group (<http://www.esi-group.com>) à la base de PAM-RTMTM.

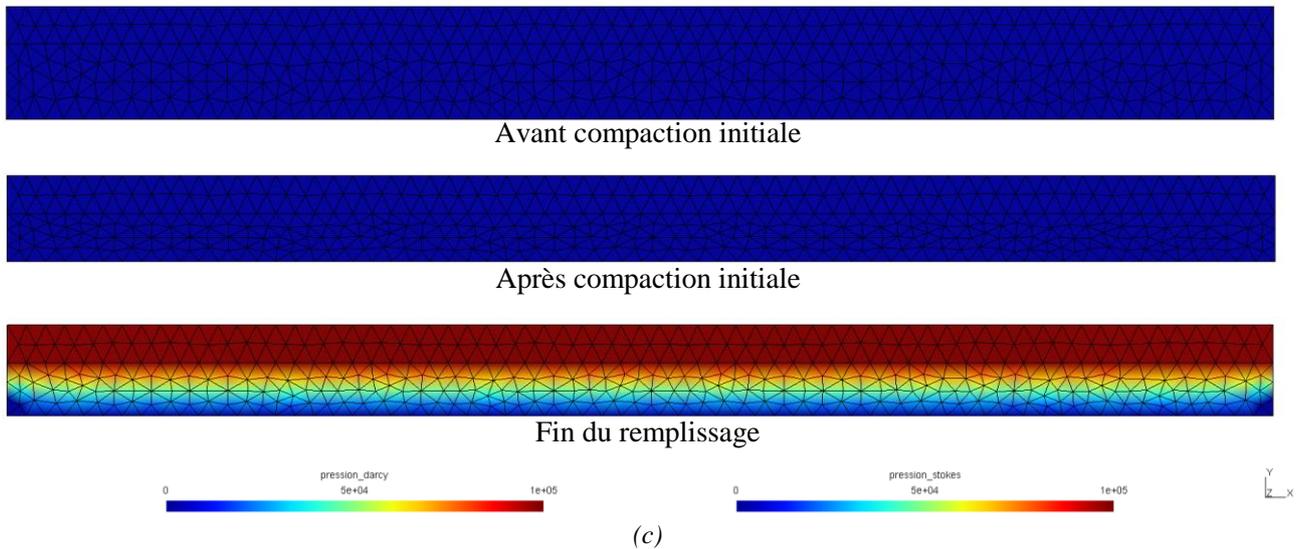


Fig. 5 : Exemple de simulation : (a) Conditions limites mécanique du solide, (b) Conditions limites mécanique des fluides, (c) Champs de pression et géométrie obtenus après compaction et après remplissage

5. Développement et perspectives

Ce modèle innovant, bien que validé dans le cas simple d'une plaque par P. Wang [6], nécessite certaines améliorations en vue de son industrialisation.

5.1 Redécoupage du domaine

Dans la partie précédente, nous avons proposé un découpage en trois zones (fig. 1(b)), faisant l'hypothèse d'un écoulement de Stokes dans le drainant. Cette hypothèse peut être remise en cause. En effet, le drainant est un milieu poreux ayant une perméabilité généralement comprise entre 10^{-4} et 10^{-6} m², or, un écoulement de Darcy pourrait être plus approprié pour représenter au mieux le phénomène. Le couplage Stokes/Darcy reste cependant nécessaire pour simuler les écoulements dans les canaux d'injection, ainsi que dans les zones d'écoulement préférentiel ne comportant pas de fibres (phénomène de race-tracking). Cette nouvelle approche doit nous permettre d'obtenir un modèle au plus proche de la réalité afin de mieux évaluer les temps de remplissage encore difficiles à anticiper avec les modèles actuels.

6.1 Thermo-physico-chimie

Un autre point primordial pour mieux évaluer les temps de remplissage est la prise en compte de la thermique et de la chimie dans les phases d'écoulement. En effet, la viscosité peut varier au cours du remplissage en fonction de la température et du degré de réticulation dans le cas des procédés non-isothermes. Il faut donc envisager un quatrième couplage en intégrant les équations de l'énergie et du transport chimiques à notre modèle pour la phase de remplissage. On peut de plus imaginer une dépendance thermique de la loi de comportement des préformes.

6. Conclusion

Nous avons présenté un modèle innovant, de par son approche globale, pour la simulation du procédé de fabrication de pièces composites par infusion de résine. Soucieux de fournir aux professionnels un outil de simulation au plus proche de la réalité, nous avons cherché à représenter tous les phénomènes connus. Pour cela nous avons implémenté un couplage entre les équations de Stokes, de Darcy et la mécanique du solide en grandes déformations, que nous avons comparé avec succès à l'expérience. Cette approche nécessite, cependant, encore des développements afin d'apporter des résultats encore plus proches des besoins des industriels. Ainsi, nous avons proposé

des points d'amélioration comme le redécoupage du modèle et le couplage thermo-physico-chimique.

Remerciements

Les auteurs remercient l'union européenne pour le soutien du projet INFUCOMP (European Community's Seventh Framework Program FP7/2009-2013 under grant agreement n°233926) qui finance une partie des recherches présentées ici.

Références

- [1] P. Celle, S. Drapier, J-M. Bergheau. « Numerical modeling of liquid infusion into fibrous media undergoing compaction », *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 27(4) : 647-661, 2008.
- [2] P. Celle, « Couplage fluide / milieu poreux en grandes déformations pour la modélisation des procédés d'élaboration par infusion », Thèse de doctorat, École Nationale des Mines de Saint-Étienne, 2006.
- [3] T. Gutowsky, T. Morigaki. « The Consolidation of laminate composites », *Journal of Composite Materials*, 21(2), 172-188, 1987.
- [4] T. Ouahbi, A. Souad, J. Bréard, P. Ouagne, S. Chatel. « Modeling of hydro-mechanical coupling in infusion processes », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 38(7), 1646-1654, 2007.
- [5] P. Šimáček, D. Heider, J.W. Gillespie Jr. et S.G. Advani. « Post-filling flow in vacuum assisted resin transfer molding processes : Theoretical analysis », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 40(6-7) : 913-924, 2009.
- [6] P. Wang, S. Drapier, J. Molimard, A. Vautrin, and J-C. Minni. « Characterization of Liquid Resin Infusion (LRI) filling by fringe pattern projection and in situ thermocouples », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 41(1) : 36-44, 2010.