

Simulation de procédé pour matériaux composites - Interaction Fluide/structure en grandes déformations

A. Dereims^{1,2}, S. Drapier², J-M. Bergheau³

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

² École des Mines de Saint-Étienne, Structures and Materials Science division, LTDS-UMR CNRS 5513, 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne Cedex 02, France, drapier@emse.fr

³ École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, LTDS-UMR CNRS 5513, 59 rue Jean Parot, 42023 Saint-Étienne Cedex 02, France, bergheau@enise.fr

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 consistent à imprégner des préformes, initialement sèches, avec une résine liquide dans un demi-moule placé sous un sac à vide (voir figure 1(a)). Ils permettent, ainsi, une réduction des coût 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.

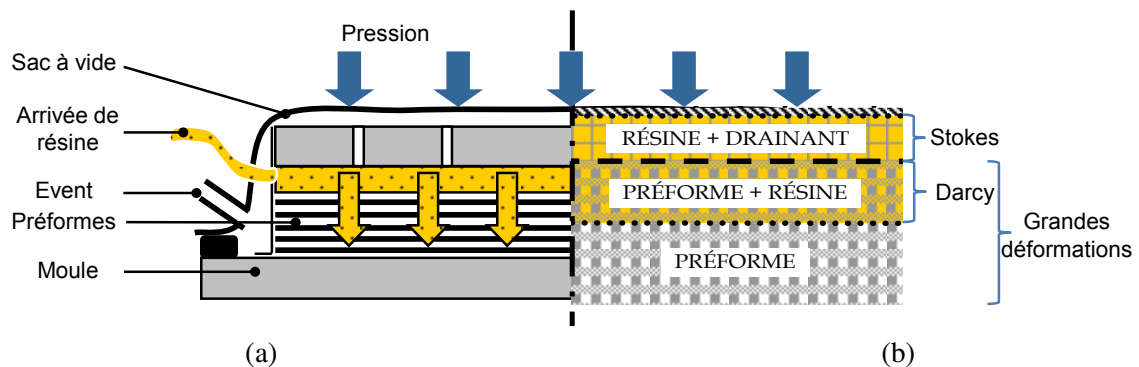


FIGURE 1 – (a) Principe du procédé Liquid Resin Infusion(LRI), (b) Modèle proposé [1]

Au cours de son travail de thèse [1], P. Celle a proposé un modèle complet pour la phase de remplissage des préformes. La force de son modèle réside dans l'approche globale du procédé. En effet, alors que les méthodes classiques de simulations se concentrent uniquement sur l'écoulement de la résine dans les préformes rigides, ce modèle prend en compte l'écoulement dans le drainant en même temps que l'écoulement dans les préformes subissant des déformations. S'appuyant sur un découpage du domaine en trois zones (voir figure 1(b)), son modèle consiste à coupler l'écoulement dans le drainant, régi par l'équation de Stokes (1) pour un fluide incompressible, à l'écoulement dans les préformes, régi par la loi de Darcy (2). De plus, le comportement des préformes, considérées comme un milieu poreux orthotrope en grandes déformations, est couplé fortement à la mécanique des fluides à travers la loi de Terzaghi (3).

$$\operatorname{div}(2\mu\underline{\underline{D}}(\underline{v})) - \nabla p = 0 \quad (1)$$

$$\underline{v} = -\frac{1}{\mu}\underline{\underline{K}}\nabla p \quad (2)$$

avec \underline{v} la vitesse de Darcy ou la vitesse moyenne de la résine par rapport aux préformes, $\underline{\underline{K}}$ le tenseur de perméabilité, μ la viscosité de la résine, p la pression de résine dans les pores et $\underline{\underline{D}}(\underline{v}) = \frac{1}{2}(\underline{\nabla}\underline{v} + \underline{\nabla}^T\underline{v})$ le tenseur des taux de déformation eulérien associé au champ de vitesse \underline{v} . De plus, le comportement des préformes, considérées comme un milieu poreux orthotrope en grandes déformations, est couplé

fortement à la mécanique des fluides à travers la loi de Terzaghi (3).

$$\underline{\underline{\sigma_{tot}}} = \underline{\underline{\sigma_{eff}}} + p\underline{\underline{I}} \quad (3)$$

avec $\underline{\underline{\sigma_{tot}}}$ la contrainte totale appliquée au système, $\underline{\underline{\sigma_{eff}}}$ la contrainte effective dans les préformes et $\underline{\underline{I}}$ le tenseur unité. D'un point de vue numérique, le système d'équation est approximé par la méthode des éléments finis. La mécanique du solide est gérée par une approche lagrangienne réactualisée et la mécanique des fluides par une approche quasi-eulérienne. Un algorithme de remaillage a été développé afin de palier aux grandes déformations des éléments dues à la formulation lagrangienne[2].

Cette approche innovante, que P. Wang a comparé avec succès dans le cas de l'infusion d'une plaque [3], permet aujourd'hui de simuler de nombreux cas d'infusion et d'injection en une et deux dimensions (voir figure 2).

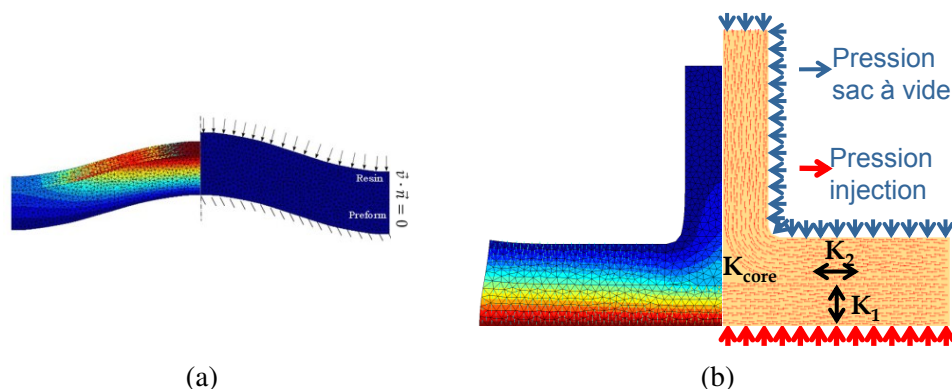


FIGURE 2 – Exemples de simulation : (a) Infusion pièce courbe, (b) Injection d'un T

Cependant, cette approche isotherme doit être complétée par un couplage thermo-physico-chimique nécessaire pour mieux approcher les temps d'infusion et prévoir les états de contraintes résiduelles de fabrication. En effet, au cours des différentes phases (remplissage, cuisson) les propriétés intrinsèques (viscosité, masse volumique...) de la résine changent en fonction des conditions de température et influent sur l'écoulement. Enfin, pour complètement modéliser les procédés d'infusion, on ne peut pas s'arrêter au simple remplissage des préformes. En effet, après cette phase et avant la cuisson, le système peut être recompacté pour obtenir l'épaisseur voulue, puis, est laissé au repos afin d'avoir une fraction volumique de fibre homogène dans la pièce. Cette phase, citée dans la littérature sous le nom de « post-filling » [4], se traduit par un écoulement soumis à de nouvelles conditions aux limites. Or ces conditions ne sont pas triviales. Les préformes étant complètement saturées, la force de réaction du moule et du contre moule doit être distribuée entre les deux phases. Les modèles existants ne permettent pas de gérer ce type de conditions aux limites, car la mécanique des fluides et la mécanique du solide sont dissociées lors des simulations.

Notre travail porte donc sur le développement des points d'amélioration cités ici, et plus particulièrement, à court terme, sur la modélisation de la phase de « post-filling » qui sera plus précisément exposée ultérieurement.

Références

- [1] 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.
- [2] P. Celle, S. Drapier, J-M. Bergheau. *Numerical modelling of liquid infusion into fibrous media undergoing compaction*, European Journal of Mechanics - A/Solids, 27(4) : 647-661, 2008.
- [3] 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.
- [4] P. Šimáček, D. Heider, J.W. Gillespie Jr., and 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.