



**HAL**  
open science

# Modèle multi-physique pour la simulation de l'infusion d'un fluide thermo-réactif dans un milieu poreux compressible

Pierre Celle, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau

► **To cite this version:**

Pierre Celle, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau. Modèle multi-physique pour la simulation de l'infusion d'un fluide thermo-réactif dans un milieu poreux compressible. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. pp.205-210. hal-01491069

**HAL Id: hal-01491069**

**<https://hal.science/hal-01491069v1>**

Submitted on 16 Mar 2017

**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.

Public Domain

---

# Modèle multi-physique pour la simulation de l'infusion d'un fluide thermo-réactif dans un milieu poreux compressible

Pierre Celle<sup>1</sup>, Sylvain Drapier<sup>2</sup>, Jean-Michel Bergheau<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ESI France SAS

70, rue Robert

F-69458 Lyon cedex 6

Pierre.celle@esi-group.com

<sup>2</sup> LTDS, UMR 5513 CNRS/ECL/ENIS/ENSMSE

École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

158, cours Fauriel

F-42023 Saint-Étienne cedex 2

drapier@emse.fr

<sup>3</sup> LTDS, UMR 5513 CNRS/ECL/ENISE/ENSMSE

58, rue Jean Parot

F-42100 Saint-Étienne cedex 2

bergheau@enise.fr

---

*RÉSUMÉ. Dans cette étude, un nouveau modèle pour l'étude de l'écoulement thermo-réactif d'un fluide à travers un milieu poreux fortement compressible est présenté et appliqué aux procédés d'élaboration des matériaux composites par infusion. Ces techniques consistent à réaliser le mélange, à travers leur épaisseur, des nappes de renforts et de la résine, par application d'une pression sur l'empilement nappes/résine. Ceci conduit à une réduction des coûts et évite l'apparition de zones sèches. L'intégration d'un modèle numérique d'infusion dans un code de calcul par éléments finis facilitera la diffusion de ces solutions en apportant une prévision fiable des épaisseurs et des fractions volumiques de fibres. Dans ce papier, on s'intéresse plus spécifiquement aux traitements numériques associés au film de résine.*

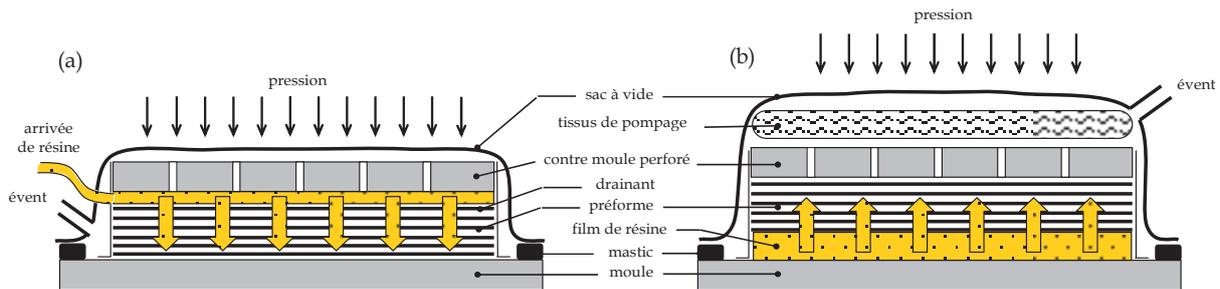
*ABSTRACT. In this study, a new model for a thermo-reactive flow across a highly compressible porous medium is proposed and employed to predict infusion-based manufacturing processes. These techniques consist in mixing the reinforcements and the resin in the transverse direction during the manufacturing cycle by applying a pressure on the resin/preform stacking. This yields cost reductions and avoid filling problems. The introduction of a numerical model in a finite element software to study infusion-based process will increase its diffusion by a reliable prediction of both part thickness and porosity. This paper deals mainly with the numerical treatments related to the resin layer.*

*MOTS-CLÉS : LRI (Liquid Resin Infusion), RFI (Resin Film Infusion), matériaux composites, méthode des éléments finis, milieux poreux, grandes déformations*

*KEY-WORDS: LRI (Liquid Resin Infusion), RFI (Resin Film Infusion), composites materials, finite element method, porous media, finite strains*

## 1. Introduction

Les procédés d'élaboration des matériaux composites par infusion de type *LRI* (Liquid Resin Infusion) et *RFI* (Resin Film Infusion) consistent à réaliser le mélange entre les renforts et la résine dans la direction transverse aux fibres pendant la phase d'élaboration (Figure 1). Quel que soit le procédé considéré, les préformes sont disposées au dessus d'un film de résine solide (*RFI*) ou en dessous d'un tissu drainant (*LRI*) dans un moule semi-rigide. L'empilement est éventuellement recouvert d'un contre moule perforé et enfermé dans un sac à vide. Sous l'action de la pression due au vide, la résine infuse à travers l'épaisseur des préformes.



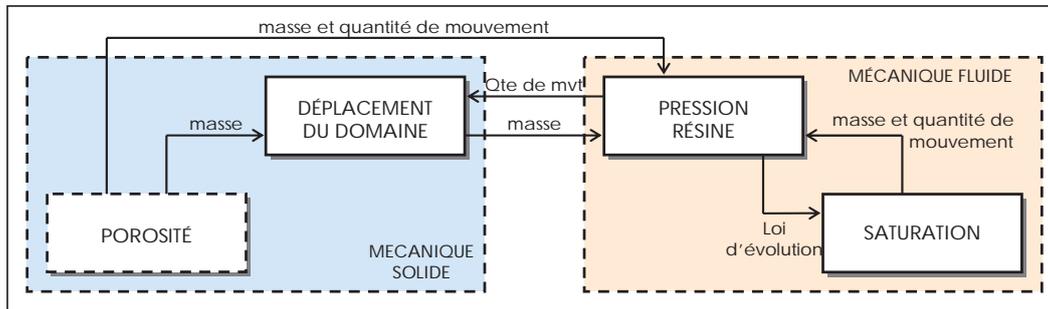
**Figure 1.** Les procédés d'élaboration par infusion : (a) *LRI* – (b) *RFI*.

Ces techniques prometteuses permettent d'améliorer la qualité de la pièce finale tout en réduisant les temps de cycles et les coûts. Les épaisseurs et les fractions volumiques de fibres restent néanmoins encore mal maîtrisées. Actuellement, les techniques de mise au point et les développements reposent principalement sur des phases de prototypage et d'essais extrêmement coûteuses.

## 2. Modèle proposé et prise en compte de la disparition de la zone de résine

Dans ce paragraphe nous proposons un bref résumé des principales caractéristiques du modèle développé dans le cadre de la simulation numérique des procédés d'élaboration des matériaux composites par infusion. Une approche macroscopique basée sur un découpage en trois zones (la résine, les préformes et les préformes saturées) est employée. Ces zones sont séparées par des frontières mobiles. L'écoulement de la résine est laminaire et les effets d'inertie sont négligés. Le mouvement de la résine dans le milieu poreux et à l'extérieur du milieu poreux sont modélisés respectivement à l'aide des équations de Darcy et de Stokes en régime stationnaire (Darcy, 1856). L'écoulement dans le milieu poreux tient compte de la déformation des renforts et de la variation des porosités au cours de l'infusion, via des modèles de perméabilités transverses et longitudinales, en attendant des mesures fiables qui posent de gros problèmes d'identification. Concernant la réponse mécanique des préformes, une formulation Lagrangienne Réactualisée associée à une loi élastique non-linéaire en grande déformation permet de suivre l'évolution de la géométrie de l'empilement de fibres. Dans le milieu saturé, un

modèle de Terzaghi permet de prendre en compte l'influence de la pression appliquée par la résine à l'intérieur des pores sur la déformation des préformes. La figure 2 synthétise les interactions entre le comportement mécanique des préformes et l'écoulement de la résine.



**Figure 2.** Synthèse des interactions entre le problème mécanique relatif à la déformation des préformes et l'écoulement dans le milieu poreux.

Ces interactions doivent être complétées par des conditions de continuités au niveau des interfaces mobiles. Celles-ci assurent la continuité du vecteur contrainte et la conservation de la masse. Entre le milieu poreux saturé et la zone de résine seule, elles sont plus connues sous le nom de Beaver-Joseph-Shaffman. L'écoulement tangentiel entre ces deux zones est dans un premier temps négligé. Dans ce papier nous nous intéressons plus spécifiquement au traitement de l'écoulement dans la zone de résine seule dans laquelle principalement trois difficultés apparaissent.

### 3. Prise en compte de la zone de résine seule

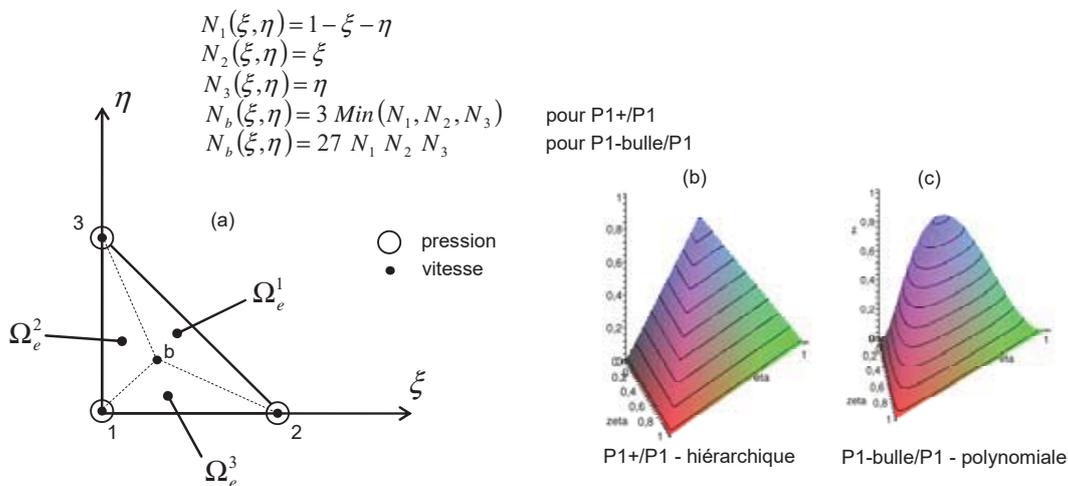
#### 3.1. Etude de l'écoulement

L'écoulement incompressible du fluide dans la zone de résine seule doit être traité au moyen d'une formulation particulière afin de satisfaire l'hypothèse d'incompressibilité (ou conservation de la masse). Ici nous proposons l'utilisation d'une méthode mixte basée sur une résolution simultanée des champs de vitesse et de pression de la résine par les éléments de type P1+/P1 ou P1-bulle/P1. Afin de satisfaire la condition de stabilité de Brezzi Babuska (Arnold *et al.*, 1984), un degré de liberté supplémentaire en vitesse est introduit au centre de chaque élément du maillage (triangle ou tétraèdre). La fonction de forme associée à ce nouveau degré de liberté est égale à un 1 au centre de l'élément et s'annule sur ses bords. La Figure 3 présente deux exemples de fonctions bulle. La fonction bulle polynomiale égale au produit des fonctions de forme de l'élément linéaire est la plus simple. Arnold *et al.*, 1984 montrent que la fonction hiérarchique égale à la partie inférieure des fonctions de formes du triangle linéaire donne rapidement d'excellents résultats.

Pour des fonctions bulle vérifiant la propriété d'orthogonalité le système élémentaire s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{rd}^l & \mathbf{K}_{in}^{lT} \\ \mathbf{K}_{in}^l & \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{v} \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad [1]$$

où  $\mathbf{K}_{rd}^l$  est la matrice de rigidité associée au champ de vitesse linéaire,  $\mathbf{K}_{in}^l$  est la matrice d'incompressibilité associée au champ de vitesse linéaire,  $\mathbf{v}$  est le vecteur contenant les vitesses nodales de l'élément,  $p$  contient les pressions nodales,  $\mathbf{F}$  contient les sollicitations extérieures et  $\mathbf{C}$  est défini par  $\mathbf{C} = \mathbf{K}_{in}^b \cdot \mathbf{K}_{rd}^{b-1} \cdot \mathbf{K}_{in}^{bT}$  où  $\mathbf{K}_{in}^b$  et  $\mathbf{K}_{rd}^b$  contiennent respectivement les matrices d'incompressibilité et de raideur associées au champ de vitesse bulle.



**Figure 3.** *Elément P1+/P1 et P1/bulle P1 – (a) discrétisation, (b) Elément P1+/P1 ; fonction hiérarchique et (c) Elément P1-bulle/P1 ; fonction polynomiale.*

La formulation bulle utilisée dans le cadre du traitement des équations de Stokes en régime stationnaire a également été employée dans le cadre du traitement des équations de Darcy dans le milieu poreux saturé. L'utilisation d'une même approche permet de simplifier le couplage entre les zones de Stokes et de Darcy et de proposer une même méthode pour la résolution de l'écoulement dans ces deux zones. Les résultats numériques fournis par ces méthodes ont été validés avec succès par comparaison avec des résultats analytiques

### 3.2. Prise en compte des effets de courbures

Les sections 2D et les modèles 3D associés aux pièces composites présentent généralement des effets de courbures. Ces courbures conduisent à des conditions aux limites normales en vitesse ou en déplacement qui traduisent généralement la présence de paroi imperméable, c'est-à-dire d'absence d'écoulement normal. Afin de prendre en compte ce type de condition nous avons proposé dans ce travail l'utilisation d'une méthode de traitement par pénalité. Cette méthode permet de

conserver une taille de système constante. Par la suite, cette méthode a été améliorée en proposant une résolution de la condition cinématique directement dans les repères locaux associés aux nœuds de la frontière. Dans ce cas des opérations de changement de repère supplémentaire sont nécessaires. Le système matricielle obtenu est néanmoins mieux conditionné et mieux adapté à l'utilisation de méthodes de résolution itératives en raison de la disparition des termes de pénalité croisés.

### 3.3. Remaillage

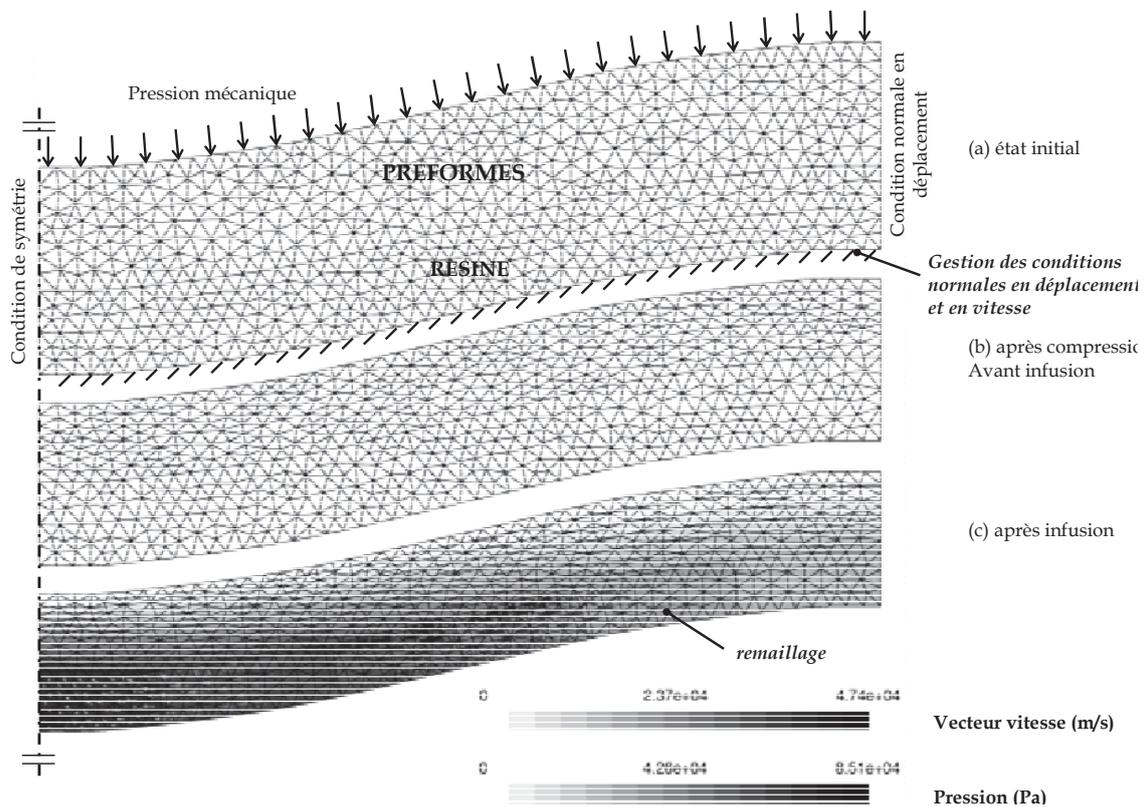
La disparition de la zone de résine dans le cas du procédé RFI doit être modélisée. Elle conduit à une modification conséquente de l'écoulement dans la zone de résine qui doit impérativement être intégrée afin d'obtenir les conditions aux limites permettant de décrire l'écoulement dans les préformes. Afin de gérer cette disparition une technique de remaillage est employée. Elle comporte trois étapes. La première consiste à définir un critère de remaillage  $Q_{maillage}$ . Ici nous avons choisi le critère angulaire suivant :

$$Q_{maillage} = \min(Q_{elt}) = \min\left(\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}\right) \quad [2]$$

où  $\alpha_{\min}$  et  $\alpha_{\max}$  sont respectivement le plus petit angle et le plus grand angle de l'élément considéré. Plus le facteur de forme de l'élément  $Q_{elt}$  sera proche de 1, meilleur sera la qualité de l'élément. La seconde étape est le remaillage proprement dit. Pour ce faire, le contour associé à l'ancien maillage est exporté depuis les librairies élément finis PRO-FLOT, remaillé dans le mailleur libre GMSH<sup>®</sup> puis le nouveau maillage est réimporté. La dernière étape consiste à transporter les valeurs nodales depuis l'ancien maillage vers le nouveau maillage. Chaque degré de liberté du nouveau maillage est projeté dans l'ancien maillage et les fonctions de forme sont utilisées afin de recalculer les nouvelles valeurs nodales.

## 4. Application

Un exemple de simulation par RFI de l'infusion d'une plaque mince est présenté sur la Figure 4. Il illustre les différents outils présentés dans le cadre du traitement de la zone de résine et de sa disparition. Au cours de la phase initiale de compression, nous observons une forte déformation des préformes. Lorsque la résine est suffisamment fluide, elle commence à s'écouler à l'intérieur du réseau de fibres. La présence de courbure dans les préformes conduit à une répartition non homogène de la pression dans le film de résine. Les relations cinématiques entre les degrés de libertés permettent de modéliser l'absence d'écoulement à travers la paroi du moule. Au cours de l'infusion on observe une disparition progressive de la zone de résine.



**Figure 4.** Simulation numérique de l'infusion d'une plaque par procédé RFI.

## 5. Conclusion

Dans ce travail un modèle multi-physique complet a été proposé pour l'étude des procédés d'élaboration des matériaux composites par infusion (Celle, 2006). En particulier, nous avons présenté dans ce papier les aspects numériques relatifs au traitement de la zone de résine et à sa disparition. Ce modèle peut être employé dans de nombreux domaines notamment en biomécanique et géo-mécanique. *Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre ESI Group, Hexcel Reinforcements et l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.*

## 6. Bibliographie

- Arnold D. N., Brezzi F., et Fortin M., « A stable finite element for the Stokes equations », *Estratto da Calcolo*, vol. 21, pp. 337-344, 1984.
- Celle P., « Couplage fluide / milieu poreux en grandes déformation pour la modélisation des procédés d'élaboration des matériaux composites par infusion ». *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*, 2006.
- Darcy H., « Les fontaines publiques de la ville de Dijon », *Dalmont*, 1856.
- Drapier S., Monnatte J., O. Elbouazzaoui, et P. Henrat. « Characterization of transient through thickness permeabilities of Non Crimp New Concept (NC2) multiaxial fabrics », *Composites/A*, vol. 36, pp. 877-892, 2005.