



HAL
open science

Contribution à l'étude de l'écoulement dans un milieu compressible Infusion de résine dans un composite déformable

Pierre Celle, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau

► **To cite this version:**

Pierre Celle, Sylvain Drapier, Jean-Michel Bergheau. Contribution à l'étude de l'écoulement dans un milieu compressible Infusion de résine dans un composite déformable. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01812895

HAL Id: hal-01812895

<https://hal.science/hal-01812895>

Submitted on 11 Jun 2018

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

Contribution à l'étude de l'écoulement dans un milieu compressible

Infusion de résine dans un composite déformable

Pierre CELLE*, Sylvain DRAPIER*, Jean-Michel BERGHEAU**

* *MeM / SMS (CELLE), BioMM / CIS (DRAPIER), ENSM-SE,
158, cours Fauriel
42023 Saint-Étienne cedex 2 – France
celle@emse.fr, drapier@emse.fr*

** *LTDS, UMR 5513, CNRS/ECL/ENISE,
58, rue Jean-Parot
42023 Saint-Étienne cedex 2 – France
bergheau@enise.fr*

RÉSUMÉ. L'engouement pour les techniques d'élaboration des matériaux composites par infusion est ralenti par l'absence de maîtrise des propriétés de la pièce finale. Ces procédés conduisent à des réductions importantes de coût de stockage et de mise en œuvre en reportant le mélange entre les renforts et la résine pendant la phase de mise en œuvre. L'infusion dans la direction transverse permet par ailleurs un meilleur contrôle de la formation de vides et une diminution des temps de cycle. La simulation de l'écoulement d'un fluide dans un milieu déformable devient incontournable afin de prévoir les caractéristiques finales de la structure composite, notamment les épaisseurs et les fractions volumiques de chaque constituant. Dans cet article, on s'intéresse aux couplages entre l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux et la déformation de ce milieu.

ABSTRACT. The efforts engaged in infusion processes for composite material manufacturing, are slowed down by the lack in controlling the final structure characteristics. Besides, the transverse infusion handles a better void formation control and fastest cycle times. These processes lead to high reduction in storage and manufacture costs as they shift the mixing of the fibers and resin during the curing cycle. The simulations of fluid flow in a deformable media becomes essential as they provide a model able to predict the thickness and the volumic fraction of each constituent. In this article, we introduce the coupling between fluid flow in a porous medium and the deformability of this medium.

MOTS-CLÉS : composites, infusion, RTM, LRI, Stokes, Darcy, éléments finis, méthode ALE

KEYWORDS: composites, infusion, RTM, LRI, Stokes, Darcy, finite element, ALE method

1. Introduction

Les procédés d'élaboration des matériaux composites par infusion consistent à remplacer l'injection longitudinale (RTM : Resin Transfer Molding) par une infusion dans la direction transverse. Une couche de résine liquide (LRI) ou solide (RFI) est recouverte par des nappes. L'infusion à travers l'épaisseur est provoquée par un cycle de pression appliqué sur ces renforts secs. Outre, des temps de cycle plus faibles, la qualité de l'imprégnation des renforts par la résine est bien meilleure. La création de bulles d'air est limitée par une meilleure séparation des phases d'infusion et de réticulation et les coûts de stockage, de mise en œuvre, et d'outillage sont fortement réduits. Cependant, la prédiction des épaisseurs et des fractions volumiques de fibres finales nécessite la mise en place de modèles analytiques et numériques.

2. Modélisation

Les notations suivantes sont utilisées : un exposant désigne la zone (nappes imprégnées ou sèches n ou résine r), un indice désigne le constituant (nappes n , résine r ou domaine dans lequel s'écoule la résine d). Nous désignons par x les coordonnées matérielles, X les coordonnées initiales, χ les coordonnées de références utilisées dans la méthode ALE.

3. Modélisation choisie

Le choix d'une modélisation macroscopique pour le comportement des nappes imprégnées est dicté par la forte hétérogénéité de la structure. Un découpage en trois zones (voir figure 1) connectées par le biais d'interfaces mobiles est effectué (la zone de résine seule et les zones de nappes sèches et imprégnées).

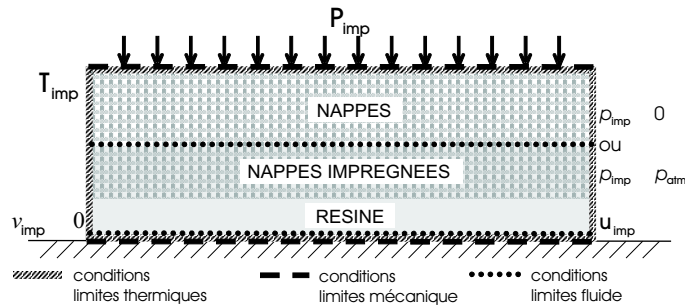


Figure 1. Modèle d'étude du procédé LRI : Liquid Resin Infusion.

Dans chacune de ces zones nous adoptons des modèles macroscopiques permettant de décrire le comportement de chaque constituant. La description des aspects mécaniques nécessite l'écriture des équations de conservation (conservation de la masse et de la quantité de mouvement). La principale difficulté levée par le modèle réside dans la prise en compte de la compressibilité des nappes pendant l'infusion.

3.1. Modélisation de l'écoulement de la résine

Dans ce modèle, l'écoulement de la résine est laminaire. La résine est considérée comme un fluide Newtonien incompressible [KAV 95] et les effets de capillarités sont négligés. Les deux zones concernées par l'écoulement de la résine évoluent en permanence au cours de l'infusion empêchant l'utilisation d'une formulation eulérienne.

3.1.1. Formulation ALE

La formulation ALE [BEL 00] (Arbitrary Lagrangian Eulerian) constitue une méthode efficace pour résoudre les problèmes d'interfaces mobiles. Elle combine les avantages des formulations Lagrangienne et Eulérienne en introduisant un domaine dit de « référence » permettant de suivre l'évolution du domaine dans lequel s'écoule le fluide (position $\vec{\chi}$). En pratique, la formulation de quasi-Euler est beaucoup plus utilisée. Elle utilise les contraintes vraies de Cauchy dans l'expression de la conservation de la quantité de mouvement et les dérivées sont effectuées sur la configuration matérielle. Elle fait intervenir la vitesse de déplacement du domaine dans lequel s'écoule la résine \vec{v}_d^r par l'intermédiaire de l'utilisation d'une vitesse convective $\vec{c}_r^r = \vec{v}_r^r - \vec{v}_d^r$.

3.1.2. Écoulement de résine dans les nappes

Dans l'approche utilisée, le matériau composite est considéré comme un milieu compressible à porosités variables. Un modèle d'écoulement macroscopique est utilisé (Brinkman ou Darcy [DAR 56]) afin de prendre en compte l'écoulement de la résine dans le matériau composite. Ce type de modèle introduit une grandeur essentielle, la perméabilité $\overline{\overline{K}}$ dont la qualité de détermination est primordiale. Les perméabilités utilisées dans ce modèle ont été obtenues par mesures transverses en régime stationnaire et instationnaire. Les équations de Darcy, exprimées à l'aide de l'approche ALE, s'écrivent (couplage vitesse v , pression p) :

$$\phi_s (\vec{v}_r^n - \vec{v}_d^n) = -\frac{\overline{\overline{K}}}{\eta} \cdot \overrightarrow{grad}(p_r^n) \quad [1]$$

$$\left. \frac{\partial \rho_r^n(\vec{\chi}, t)}{\partial t} \right|_{\chi} + \vec{c}_r^n \cdot \overrightarrow{grad}_x \rho_r^n + \rho_r^n \operatorname{div}_x \vec{v}_r^n = 0$$

avec η la viscosité de la résine et ρ_r^n la masse volumique dans la zone de nappes imprégnées (macroscopique).

3.1.3. Écoulement de résine seule

La résine suit toujours le comportement d'un fluide Newtonien incompressible. Les effets d'inerties étant négligés, nous considérons directement les équations de Stokes exprimées sous forme « quasi-Eulérienne » :

$$\rho_r^r \vec{c}_r^r \cdot \overrightarrow{grad}_x (\vec{v}_r^r) = -\overrightarrow{grad}_x (p_r^r) + \eta_r \vec{\Delta} (\vec{v}_r^r) \quad [2]$$

$$\left. \frac{\partial \rho_r^r(\vec{\chi}, t)}{\partial t} \right|_{\chi} + \vec{c}_r^r \cdot \overrightarrow{grad}_x \rho_r^r + \rho_r^r \operatorname{div}_x \vec{v}_r^r = 0$$

3.2. Modélisation de la compression des nappes

L'originalité du modèle développé réside dans la prise en compte du comportement des nappes durant la phase d'infusion. La déformation des nappes est due à la présence combinée de la pression imposée par le sac à vide et celle engendrée par la résine à l'intérieur des pores. Son comportement est très bien représenté par une approche Lagrangienne (position \vec{X}).

3.2.1. Conservation de la masse

La conservation de la masse de résine nous permet de suivre l'évolution de la densité des nappes au cours du temps. Sous forme intégrale, elle relie directement la variation de densité entre deux instants ρ_n^n par l'intermédiaire du jacobien de la transformation J . En supposant incompressibles les fibres constituant les nappes, on obtient une relation entre la porosité ϕ et le jacobien :

$$J(\vec{X}, t + \Delta t) \rho_n^n(t + \Delta t) = J(\vec{X}, t) \rho_n^n(t) \quad [3]$$

3.2.2. Conservation de la quantité de mouvement

Les mesures de lois de comportement en régime saturés sont difficiles à mettre en œuvre et à exploiter. Nous avons choisi dans cette approche d'utiliser un modèle de Kelvin Voigt intégrant la rigidité effective des nappes sèches (contrainte due aux nappes seules $\bar{\sigma}_{e_n}^n$), la pression hydrostatique de la résine p_r^n et le niveau de remplissage des nappes ou saturation s : hypothèse de Terzaghi [TER 67]. Cette approche présente l'avantage de fournir un modèle continu entre les nappes sèches et imprégnées. La conservation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\vec{div}_x \bar{\sigma}_n^n(\vec{X}, t) = 0 \quad \text{où} \quad \begin{cases} \bar{\sigma}_n^n = \bar{\sigma}_{e_n}^n - s p_r^n \bar{I} & \text{zone nappes imprégnées} \\ \bar{\sigma}_n^n = \bar{\sigma}_{e_n}^n & \text{zone nappes sèches.} \end{cases} \quad [4]$$

3.2.3. Évolution de la saturation

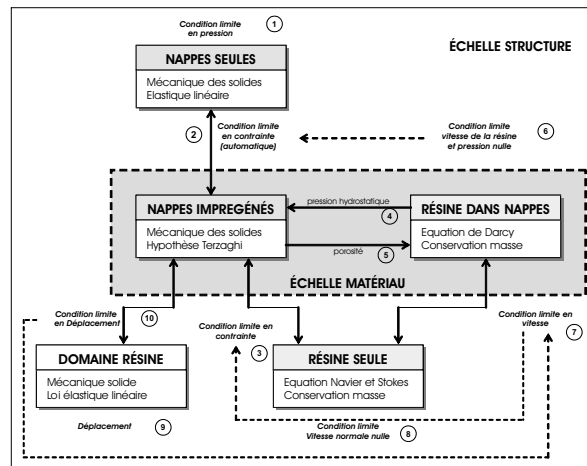
L'hypothèse de Terzaghi fait intervenir un paramètre supplémentaire la saturation s qu'il est nécessaire de définir. Bien qu'il existe des approches continues reposant sur des mesures expérimentales de la saturation s , nous préférons utiliser ici une approche « slug-flow » reliant la saturation à la pression hydrostatique à l'aide d'une loi binaire :

$$s(\vec{x}, t) = 1 \text{ pour } p(\vec{x}, t) \neq 0 \text{ et } s(\vec{x}, t) = 0 \text{ pour } p(\vec{x}, t) = 0 \quad [5]$$

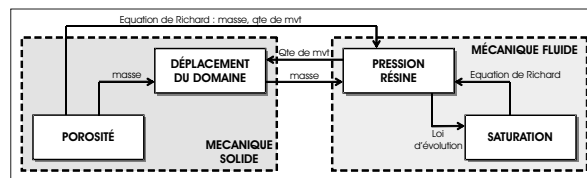
3.3. Conditions aux limites et conclusions

Le schéma de la figure 2-b montre la complexité du problème modélisé. A cette complexité, nous devons ajouter une difficulté dans la détermination des conditions

aux limites relatives aux problèmes mécaniques (voir figure 2-a). Celles-ci se trouvent à deux échelles : une échelle matériaux regroupant les conditions aux limites directement intégrées au niveau des équations de conservation. Une échelle structure intégrant notamment les conditions aux limites au niveau des interfaces mobiles.



(a)



(b)

Figure 2. (a) Conditions aux limites relatives au problème mécanique, (b) couplage entre les différentes grandeurs mécaniques.

Le modèle développé présente un fort niveau de couplage (figure 2-b). Aux dépendances prises en compte à travers les équations de conservations, on doit ajouter une dépendance supplémentaire entre la pression et la saturation via une loi d'évolution (slug flow ou régime transitoire).

4. Aspects numériques

Ce modèle est actuellement en cours d'intégration dans le logiciel PAM RTM[©]. La principale difficulté réside dans la mise en place des formulations Lagrangiennes et quasi-Eulériennes dans un code purement eulérien. Nous allons décrire ici les travaux actuellement en cours de réalisation.

4.1. Détermination de la saturation

L'approche « slug flow » permet la suppression d'une variable puisqu'il existe une relation directe entre la pression p et la saturation s . Il est alors possible de résoudre explicitement les équations de Darcy. Dans le cadre d'une approche plus précise (calcul du degré de saturation) des techniques basées sur la construction de cellules de Voronoi sont utilisées (FE/CV, éléments non conforme, ...).

4.2. Comportement des nappes et formulation Lagrangienne

Les travaux menés sur des nappes sèches montrent un comportement élastique non-linéaire en grande déformations. L'utilisation d'une formulation incrémentale de type Lagrangienne Réactualisée ou Totale est nécessaire.

4.3. Comportement de la résine et formulation ALE

La formulation ALE nécessite la définition d'une loi gérant l'évolution du domaine dans lequel s'écoule la résine. Classiquement, une loi élastique est utilisée. Elle présente l'avantage de fournir un champ de déplacement uniforme. La formulation ALE n'est en revanche pas capable de gérer une modification de la quantité d'éléments. Une procédure de remaillage parallèle va être nécessaire dans la zone de résine seule.

5. Conclusions

Le niveau de couplage atteint est relativement complexe (voir figure 2-b), alors que seuls les aspects mécaniques ont été pris en compte. Actuellement, le couplage fort entre les mécanismes relatifs à l'écoulement de la résine et à la compression des nappes est en cours d'intégration dans PAM RTM[©].

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (<http://www.emse.fr>), ESI group (<http://www.esi-group.com>) et Hexcel Reinforcement (<http://www.hexcel.com>).

6. Bibliographie

- [BEL 00] BELYTSCHKO T., LIU W., MORAN B., *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, John Wiley & Sons, Ltd, 2000.
- [DAR 56] DARCY H., *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Dalmont, 1856.
- [KAV 95] KAVIANY M., *Principles of heat Transfer in Porous Media*, Springer New York, LLC 233 Spring Street New York, NY 10013 USA, 1995.
- [TER 67] TERZAGHI K., PECK R., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, New York, 1967.

Annexe pour le service de fabrication

Article pour les actes :

Giens 2005

Auteurs :

*Pierre CELLE**, *Sylvain DRAPIER**, *Jean-Michel BERGHEAU***

Titre de l'article :

Contribution à l'étude de l'écoulement dans un milieu compressible

Titre abrégé :

Écoulement milieu compressible

Traduction du titre :

Contribution in the study of fluid flow in compressible medium

Date de cette version :

24 mars 2005

Coordonnées des auteurs :

- téléphone : +33.64.77.42.00.79
- télécopie : +33.64.77.42.02.49
- Email : drapier@emse.fr

Logiciel utilisé pour la préparation de cet article :

\LaTeX , avec le fichier de style `article-hermes.cls`,
version 1.10 du 17/09/2001.

Formulaire de copyright :

Joindre le formulaire de copyright signé, récupéré sur le web à l'adresse
<http://www.hermes-science.com>