CSMA 2011
10e Colloque National en Calcul des Structures
9-13 Mai 2011, Presqu'île de Giens (Var)

Simulation par éléments finis des procédés par infusion de résine

G. Pacquaut, J. Bruchon, N. Moulin, S. Drapier, L. Abouorm

SMS, Ecole des Mines de Saint-Étienne, France, {bruchon@emse.fr}

Résumé — Cet article expose un modèle numérique permettant de simuler par éléments finis les procédés par infusion de résine au travers de renforts fibreux. Ce modèle nécessite le couplage entre un écoulement dans un milieu poreux (Darcy), non poreux (Stokes) et la déformation élastique de préformes. Une méthode level-set permet de décrire les interfaces fixes ou mobiles de couplage.
Mots clés — Stokes - Darcy, matériaux composites, level-set.

1 Introduction

Les matériaux composites, obtenus par l'association d'une résine et de renforts fibreux, permettent de produire des structures allégées qui conservent une bonne tenue mécanique. Leur utilisation s'est ainsi répandue dans de nombreux secteurs industriels tels que le transport, le bâtiment, l'aérospatial. Ce travail vise à modéliser et simuler par éléments finis les procédés par infusion de résine utilisés pour élaborer des matériaux composites à matrice organique. Le mélange résine - fibres est réalisé au cours de l'élaboration des structures, réduisant ainsi les coûts de production [1]. Ces procédés, encore mal maîtrisés et posant des problèmes de modélisation, peuvent se schématiser comme suit (Figure 1) : le domaine considéré est constitué d'un drainant (milieu perméable, initialement non rempli) et de préformes sèches (milieu poreux, élastique non-linéaire). Sous l'effet d'une pression mécanique extérieure, les préformes sont d'abord compactées. La résine est alors libérée et s'écoule par différentiel de pression, préférentiellement dans le drainant, qualifié alors de milieu purement fluide, avant d'infuser au travers des préformes. Les préformes humides sont alors sujettes à un gonflement, provoqué par la contrainte exercée par la résine.

Cette modélisation fait intervenir un premier problème de mécanique des fluides - milieux poreux, avec un couplage entre un écoulement dans le drainant, régi par les équations de Stokes, et un écoulement dans les préformes, régi les équations de Darcy. Ce problème est abordé dans la Section 2 dans un cadre Eulérien : deux fonctions level-set permettent de réaliser le couplage Stokes - Darcy et résine - air lors de l'écoulement. Le second problème, étudié dans la Section 3 concerne la mécanique des solides, avec les grandes déformations subies par les préformes élastiques non linéaires, puis le gonflement de celles-ci sous l'action de la résine.

2 Ecoulement de la résine

La résine est supposée se comporter comme un fluide Newtonien incompressible, de viscosité η. Nous supposons ici que l'écoulement est isotherme. En négligeant les effets d'inertie (petit nombre de Reynolds), l'écoulement de la résine dans le drainant Ω_s, est décrit par le système de Stokes, formulé en vitesse $\mathbf{v}$ et pression p :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (2\eta \dot{\varepsilon}(\mathbf{v}) - pI) &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

où $\dot{\varepsilon}(\mathbf{v}) = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + {}^t\nabla \mathbf{v})$ est le tenseur des vitesses de déformation et I est l'identité. D'autre part, les préformes étant assimilées à un milieu poreux Ω_d, l'écoulement de la résine au travers de celles-ci est décrit par les équations de Darcy formulées en vitesse $\mathbf{v}$ et pression p :

$$\begin{aligned} \mathbf{v} + \frac{K(\phi)}{\eta} \nabla p &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

où K est la perméabilité du milieu, reliée comme nous le verrons à la porosité ϕ des préformes.

Le système (1) - (2) est couplé en considérant sur l'interface Stokes - Darcy la continuité de la vitesse normale, de la contrainte normale et une condition de type Beaver - Joseph - Saffman [2]. Ce système est résolu par une méthode élément fini mixte. La caractéristique de notre approche est d'utiliser un seul maillage fixe et non structuré, formé de simplexes. La vitesse et la pression sont approchées par des fonctions continues et linéaires par élément. Dans le domaine Stokes, cette formulation est stabilisée par un terme bulle en vitesse (MINI-élément), tandis qu'une stabilisation de type "Hughes variationnal multiscale" est considérée pour Darcy. L'interface Stokes - Darcy est alors décrite par l'isovaleur 0 d'une fonction distance signée α_{sd} fixe. Enfin, la propagation du front de résine, dans le drainant comme dans les préformes est également décrite grâce à une fonction level-set α transportée par la vitesse $\mathbf{v}$. En aval du front de résine, le système (1) - (2) est prolongé en considérant l'air comme un fluide Newtonien faiblement visqueux.

3 Déformation des préformes

La déformation des préformes, due soit à la pression mécanique appliquée, soit à la pression de la résine, est calculée dans le cadre de la mécanique des solides en grandes transformations, traitée en Lagrangien réactualisé, en résolvant l'équation donnée par la conservation de la quantité de mouvement et le modèle de Terzaghi :

$$\nabla \cdot (\sigma_{eff}(\mathbf{u}) - pH_s I) = 0 \tag{3}$$

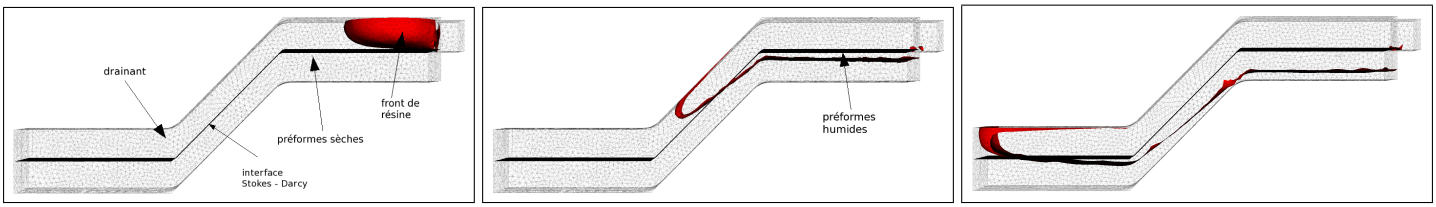
où H_s est la fonction caractéristique du fluide dans les préformes, σ_{eff} le tenseur de Cauchy donné par la loi de comportement des préformes sèches et $\mathbf{u}$ le déplacement. Dans nos simulations, une loi élastique obtenue dans le sens transverse à partir de données expérimentales est utilisée. L'évolution de la porosité ϕ avec la déformation des préformes découle de l'incompressibilité de chaque fibre et de la conservation de la masse d'un élément de volume fibres - fluide :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - (1-\phi)\nabla \cdot \mathbf{v}_{pref} = 0 \tag{4}$$

où $\mathbf{v}_{pref}$ est la vitesse de déformation des préformes déduite de (3). Enfin, la perméabilité K est reliée à la porosité ϕ via un modèle de Carman - Kozeny.

4 Simulations numériques

Le modèle précédent a été implémenté dans le logiciel Zébulon, développé entre autres par le Centre des Matériaux (MinesParitech). La Figure 1 montre différentes étapes de l'infusion de résine dans une pièce coudée.



(a) (b) (c)

FIG. 1 – Infusion de résine.

Références

[1] S.G. Advani, E.M. Sozer. *Process Modeling in Composites Manufacturing*, Marcel Dekker, Inc. : New York, 2002.

[2] G. Pacquaut, J. Bruchon, N. Moulin, S. Drapier. *Combining a level set method and a mixed stabilized P1/P1 formulation for coupling Stokes-Darcy flows*, IJNMF, Wiley, accépté pour publication.