

Simulation numérique des phénomènes capillaires et de mouillage pour l'étude de la formation de macro/micro-porosités dans les procédés d'élaboration par infusion

Yujie Liu, Nicolas Moulin, Julien Bruchon, Pierre-Jacques Liotier, Sylvain Drapier

▶ **To cite this version:**

Yujie Liu, Nicolas Moulin, Julien Bruchon, Pierre-Jacques Liotier, Sylvain Drapier. Simulation numérique des phénomènes capillaires et de mouillage pour l'étude de la formation de macro/micro-porosités dans les procédés d'élaboration par infusion. 12e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01514282

HAL Id: hal-01514282
https://hal.science/hal-01514282

Submitted on 26 Apr 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

CSMA 2015
12e Colloque National en Calcul des Structures
18-22 Mai 2015, Presqu'île de Giens (Var)

Simulation numérique des phénomènes capillaires et de mouillage pour l'étude de la formation de macro/micro-porosités dans les procédés d'élaboration par infusion

Y. Liu[1], N. Moulin[1], J. Bruchon[1], P.-J. Liotier[1], S. Drapier[1]

[1] *LGF UMR CNRS 5307, École des Mines de Saint-Étienne,*
CS 62362, 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Étienne cedex 2, France
{yujie.liu,nicolas.moulin,bruchon,liotier,drapier}@emse.fr

Résumé — Cet article présente une stratégie numérique, basée sur une approche éléments finis pour la simulation du contact entre deux fluides et un solide, impliquant des effets capillaires et de mouillage, appliquée à la formation de macro/micro-porosités au cours des procédés d'élaboration des matériaux composites par infusion. Ce modèle s'appuie sur une description eulérienne des deux fluides non miscibles (la résine et l'air) avec des conditions aux bords qui décrivent les phénomènes de mouillage aux interfaces fluides/fibres. L'interface entre les deux fluides est décrite par une méthode *level set*, sur laquelle est prise en compte la force capillaire.
Mots clés — Angle de contact, *level set*, mouillage, capillarité, Stokes bifluide.

1 Introduction

Développés depuis les années 90, les procédés d'élaboration de matériaux composites par infusion de résine (Liquid Composite Moulding : LCM) offrent une solution pour mettre en œuvre des structures composites hautes performances, en particulier des pièces de grandes dimensions pour le domaine de l'aéronautique. Ces procédés consistent à infuser une résine liquide dans un empilement de préformes fibreuses sur lequel un champ de pression est appliqué. L'un des principaux problèmes rencontrés est la formation de macro/micro-porosités, qui peut affecter de manière significative la qualité de la pièce finale. L'objectif de ce travail est de pouvoir fournir une modélisation de ces phénomènes par la simulation numérique des écoulements et de leurs interactions avec les fibres à l'échelle micro/mésoscopique. Un modèle de contact bifluide-solide prenant en compte les effets capillaires et le phénomène de mouillage, essentiels dans la formation et l'évolution des porosités, a été développé dans le code éléments finis Zset [1]. La modélisation est basée sur une approche eulérienne du domaine fluide, où l'interface entre les deux fluides décrite par une méthode *level set*, permet de simuler l'évolution des interfaces ainsi que les changements topologiques (bulles d'air) susceptibles d'apparaître dans ce contexte. Une attention particulière est portée sur l'imposition de la force de tension de surface aux niveaux des interfaces, qui est connue pour être un point délicat dans une représentation eulérienne. Différentes méthodes ont été développées et comparées pour améliorer cette précision. Des conditions limites qui permettent de prendre en compte les phénomènes de mouillage ont aussi été étudiées.

2 Modélisation

Nous considérons ici un domaine Ω occupé par deux fluides non miscibles : Ω_A (air) et Ω_R (résine), et un ensemble de fibres Ω_F immergées dans le domaine fluide. L'interface entre les deux fluides, notée Γ, est décrite par une fonction de *level set* φ, ses bords $\partial\Gamma$ sont les points triples (interfaces résine/air/fibre). L'écoulement des deux fluides est décrit par un seul système de Stokes :

$$\begin{cases} -\nabla\cdot(2\eta\dot{\varepsilon}(\mathbf{v}))+\nabla p=\gamma\kappa\mathbf{n}\delta(\Gamma)+\rho\mathbf{g} \\ \nabla\cdot\mathbf{v}=\mathbf{0} \end{cases} \tag{1}$$

où $\mathbf{v}$ est la vitesse, p est la pression, $\dot{\varepsilon}(\mathbf{v})=(\nabla\mathbf{v}+{}^t\nabla\mathbf{v})/2$ est le tenseur des taux de déformation, $\eta=H\eta_A+(1-H)\eta_R$ est la viscosité dynamique, $\rho=H\rho_A+(1-H)\rho_R$ est la densité, où $\eta_{A/R}$, $\rho_{A/R}$ sont

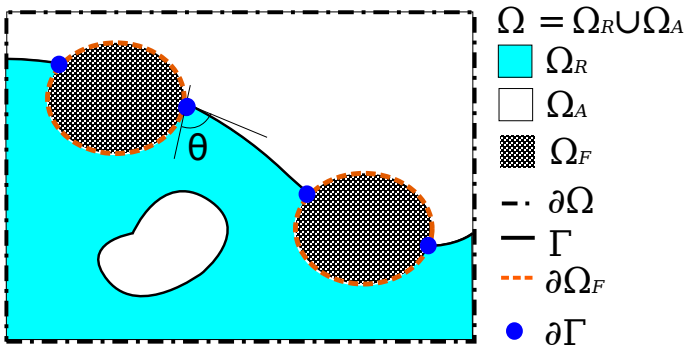


FIGURE 1 – Domaine de modélisation.

respectivement les viscosités, densités des deux fluides, et H la fonction de Heaviside, qui permet de décrire les deux fluides. Les forces associées à la gravité $F_g = \rho \mathbf{g}$ et à la tension de surface $F_\Gamma = \gamma\kappa\mathbf{n}\delta(\Gamma)$ sont aussi considérées, avec $\delta(\Gamma)$ la fonction de delta de Dirac, γ le coefficient de tension de surface, κ la courbure de l'interface, et $\mathbf{n}$ le vecteur normal à l'interface. En ce qui concerne les conditions aux bords pour la prise en compte des phénomènes de mouillage, une méthode itérative [4], présentée dans la section 3 : Méthodes numériques, a été utilisée pour tenir compte de l'angle de contact statique et une condition de Navier contrôle le déplacement de la ligne de contact aux points triples.

3 Méthodes numériques

La formulation mixte en vitesse pression est résolue à l'aide d'éléments linéaires en vitesse et en pression. La condition de stabilité de Brezzi - Babuska est contournée par l'utilisation d'une méthode de stabilisation de type *Variational Multi-Scale* (*Algebraic Sub-Grid Scale* : ASGS) [2]. L'imposition de la force tension de surface consiste à calculer l'intégrale de surface ci-dessous :

$$\int_\Gamma \gamma\kappa\mathbf{n} \cdot \mathbf{w}\, dS \tag{2}$$

La courbure κ, définie comme $\kappa = \nabla \cdot \mathbf{n}$, ne peut être calculée directement, parce que la fonction *level set* est linéaire par morceaux, et les normales, définies comme $\mathbf{n} = \frac{\nabla\varphi}{||\nabla\varphi||}$ sont constantes par morceaux. Par conséquent, cette normale doit être re-projetée aux nœuds avant d'en calculer sa divergence. Cependant, l'interpolation de la normale avec cette première méthode peut être une source d'erreurs numériques. Ainsi, une méthode tensorielle [3] a été développée. Nous remarquons que cette méthode est valable uniquement dans le cas où l'interface est fermée. Deux méthodes : la méthode *Continuum Surface Force* (CSF), qui consiste à approcher la fonction delta de Dirac afin de transformer l'intégrale surfacique par une intégrale volumique, et la méthode *Surface Local Reconstruction* (SLR) où le terme de tension de surface est explicitement calculée sur une interface reconstruite localement, ont été considérées pour calculer l'intégrale surfacique.

La méthode permettant d'imposer l'angle de contact est illustrée sur la figure 2. Nous remplaçons d'abord le vecteur normal $\mathbf{n}_\Gamma$ (gradient de la fonction *level set*) à l'interface solide/fluide, par le vecteur $\mathbf{n}_\theta$, calculé avec l'angle désiré. Cette modification introduit une modification locale de la courbure, ce qui engendre naturellement une force permettant de modifier l'interface jusqu'à obtention de l'angle que l'on chercher à imposer.

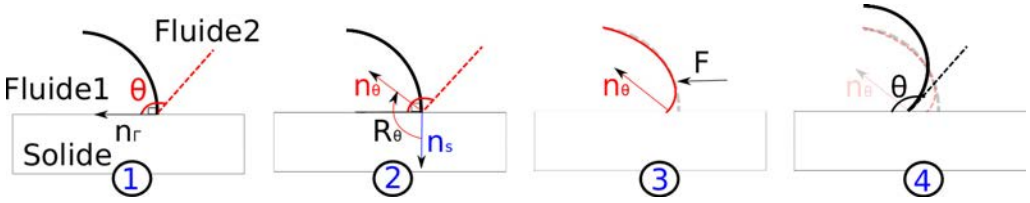


FIGURE 2 – Calcul de l'angle de contact statique.

4 Simulations numériques

Le modèle développé a été d'abord vérifié sur un cas de bulle statique sous l'effet de tension de surface, et a été ensuite utilisé pour la simulation numérique de l'étalement d'une goutte avec prise en compte des effets de mouillage et pour la simulation de montées capillaires.

Le cas de la bulle statique (Figure. 3) a été largement utilisé dans la littérature pour vérifier différentes méthodes de calcul du terme de tension de surface. Les deux méthodes pour l'intégration surfacique : CSF et SLR, ont été comparées sur ce cas. L'analyse de l'erreur sur la pression en norme L^2 et sur la vitesse en norme H^1 montrent un taux de convergence de $1/2$ pour les deux méthodes (Figure 4), ce qui est la valeur attendue lorsque le champ de pression est discontinu. Les deux méthodes ont quasiment la même précision pour l'approximation de la pression, tandis que la méthode SLR est plus précise que la méthode CSF pour la vitesse, ce qui se vérifie également sur d'autres cas étudiés.

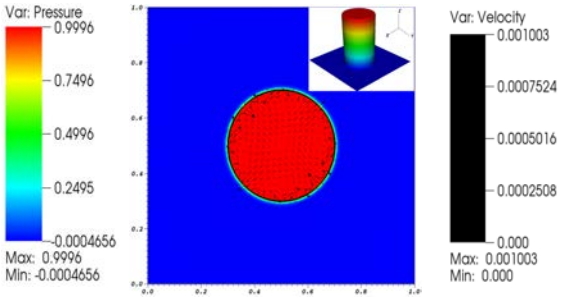


FIGURE 3 – Champs de pression et de vitesse d'un bulle statique 2D, valeurs théoriques : $p = 1$, $\mathbf{v} = \mathbf{0}$.

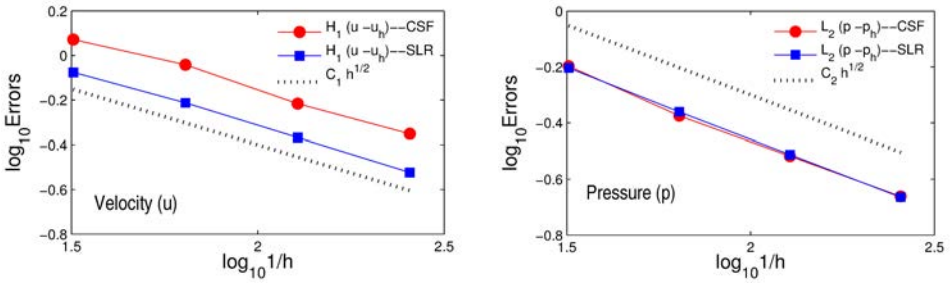


FIGURE 4 – Courbes de convergence pour les méthodes CSF et SLR en norme H^1 de la vitesse et norme L^2 de la pression pour le cas de la bulle statique.

L'évolution d'une goutte de fluide (Figure 5), formant initialement une demi sphère en contact avec une surface plane est modélisée. A partir d'un angle de contact initial de 90°, l'évolution des champs de vitesse et de pression est calculée jusqu'à obtenir un état d'équilibre pour deux valeurs de l'angle de contact : 60°et 120°. Les valeurs de l'angle convergent vers la valeur imposée (60°ou 120°) au bout d'un temps t = 6 *ms*.

Une expérience de montée capillaire (Figure 6) permet de mettre en évidence l'ascension d'un fluide dans un tube sous l'effet de forces capillaires. Dans ce travail nous nous intéressons à l'état d'équilibre du fluide dans un premier temps. Les résultats des hauteurs du fluide à l'équilibre obtenus par simulation numérique, expérimentalement et analytiquement (loi de Jurin) sont donnés dans le tableau ci-dessous (Table 1). On peut noter une différence de 5% entre la simulation numérique et la solution analytique et de $7,5\%$ avec l'expérience. Les solutions numériques et analytiques sont obtenues avec un angle de contact d'une valeur de 67°[5], valeur de l'angle de contact mesurée sur l'image obtenu expérimentalement.

5 Conclusion

Un modèle de contact bifluide-solide, impliquant des effets capillaires et de mouillage a été développé. Des méthodes pour la prise en compte de la tension de surface ont été étudiées dans un premier temps. Une stratégie permettant de modéliser les phénomènes de mouillage en imposant un angle de

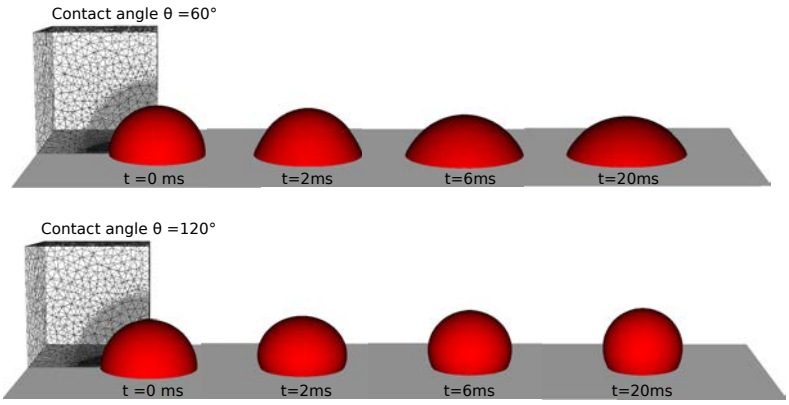
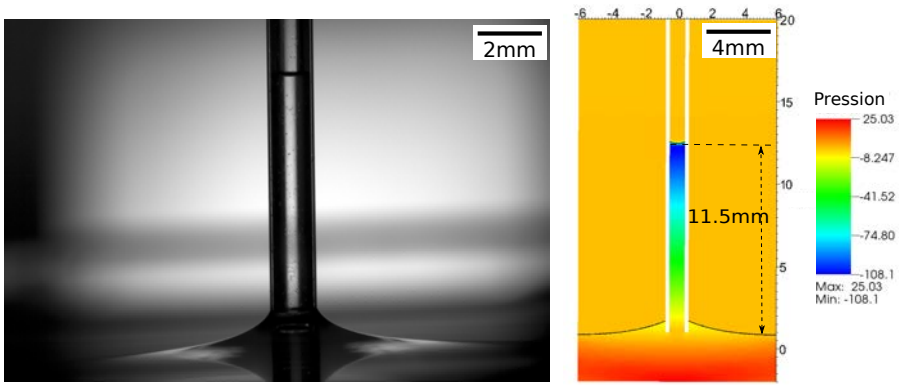


FIGURE 5 – Étalement d'une goutte sur une surface plane pour différentes valeurs de l'angle de contact ($\theta = 60^{\circ}$et $\theta = 120^{\circ}$).

TABLE 1 – Hauteurs de front de fluide obtenues lors d'une montée capillaire obtenue expérimentalement, analytiquement et numériquement.

Expérimentale	Analytique	Numérique
10.7 *mm*	12.1 *mm*	11.5 *mm*



(a) (b)

FIGURE 6 – Montée capillaire : image expérience (a) [5] et état final numérique (b).

contact a ensuite été étudiée et validée sur l'étalement d'une goutte avec prise en compte des effets de mouillage et sur les montées capillaires. Les résultats sont en bon accord avec les solutions analytiques et expérimentales. Des cas plus complexes (imprégnation de paquets de fibres) seront étudiés à l'avenir.

Références

[1] J. Besson, R. Foerch. *Large scale object-oriented finite element code design.*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Elsevier, Vol. 142(1), pp. 165-187, 1997.

[2] L. Abouorm, R. Troian, S. Drapier, J. Bruchon, N. Moulin. *Stokes–Darcy coupling in severe regimes using multiscale stabilisation for mixed finite elements : monolithic approach versus decoupled approach.*, European Journal of Computational Mechanics, Elsevier, Vol. 23 (3-4), pp. 113-137, 2014.

[3] D. Pino Muñoz, J. Bruchon, S. Drapier, F. Valdivieso. *A finite element-based level set method for fluid–elastic solid interaction with surface tension.*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Wiley Online Library, Vol. 93, pp. 919-941, 2013.

[4] G. Puaux. *Simulation numérique des écoulements aux échelles microscopique et mésoscopique dans le procédé RTM*, Thèse École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011.

[5] M. Pucci, P.-J. Liotier, S. Drapier. *Capillary effects on flax fibres reinforcements ; comparison of chemical and morphological effects on the local wetting dynamics.*, FPCM12, University of Twente, The Netherlands, 2014.