



**HAL**  
open science

# Modélisation numérique de la migration de porosités pendant la mise en œuvre des composites

Modesar Shakoor, Chung Hae Park

► **To cite this version:**

Modesar Shakoor, Chung Hae Park. Modélisation numérique de la migration de porosités pendant la mise en œuvre des composites. Journées Nationales sur les Composites (JNC 22), Jun 2021, Conférence virtuelle, France. hal-03273237

**HAL Id: hal-03273237**

**<https://hal.science/hal-03273237v1>**

Submitted on 29 Jun 2021

**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.

## Modélisation numérique de la migration de porosités pendant la mise en œuvre des composites

### NUMERICAL MODELING OF VOID MIGRATION DURING COMPOSITES PROCESSING

Modesar Shakoor\*, Chung Hae Park

Centre for Materials and Processes  
IMT Lille Douai, Institut Mines-Télécom, Univ. Lille  
F-59000 Lille, France  
e-mail : modesar.shakoor@imt-lille-douai.fr

#### 1. Introduction

À l'échelle de la fibre ou de la mèche, les procédés de mise en œuvre des composites comme le moulage par transfert de résine impliquent des écoulements diphasiques avec des obstacles imperméables ou perméables. La modélisation de ces écoulements est complexe en raison de la présence de deux phases, généralement une résine et de l'air, et de l'effet de la tension de surface [1]. Elle est néanmoins d'un grand intérêt puisque les bulles d'air formées pendant la mise en œuvre peuvent réduire drastiquement les performances mécaniques des pièces produites [2].

Dans un travail récent [3], [4], une approche numérique adaptative basée sur la méthode « Level-Set » (LS) a été développée pour modéliser les écoulements diphasiques avec tension de surface. L'interface liquide/gaz y est modélisée avec une fonction de distance signée interpolée quadratiquement, et les équations de l'écoulement y sont résolues avec une formulation éléments finis stabilisée.

Dans cette présentation, les équations gouvernant les écoulements diphasiques avec tension de surface et des obstacles imperméables seront d'abord présentées. Ensuite, les différentes composantes de l'approche numérique seront décrites. Enfin, le potentiel de cette approche pour la prédiction de la migration des porosités et leur évacuation ou piégeage sera démontré.

#### 2. Équations du modèle

##### 2.1 Équations de Navier-Stokes

Le domaine de calcul est noté  $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ ,  $d = 2,3$ . Les équations d'écoulement dans  $\Omega$  sont

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v - v_m) \cdot \nabla v \right) - \nabla \cdot \sigma(v, p) - f_g + f_s = 0,$$
$$\nabla \cdot v = 0.$$

Dans ces équations  $v$  est le vecteur vitesse d'écoulement,  $v_m$  est le vecteur vitesse du maillage,  $p$  est la pression,  $t$  le temps et  $\rho$  la masse volumique. Le tenseur des contraintes de Cauchy  $\sigma$  est défini par

$$\sigma(v, p) = \mu(\nabla v + \nabla^T v) - pI$$

où  $I$  est la matrice identité et  $\mu$  la viscosité. La force  $f_g = -\rho g e_y$  est la gravité, avec  $g$  l'accélération gravitationnelle. La force  $f_s$  est la tension de surface. Ces équations doivent être fermées avec des conditions aux limites de Dirichlet ou de Neumann.

---

## 2.2 Méthode Level-Set

Le domaine de calcul est séparé en deux parties  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$ , chacune occupée par un fluide différent. L'interface  $\Gamma_{1,2} = \Gamma_{1,2}(t)$  entre ces deux fluides est représentée par une fonction LS  $\phi$ , qui est la fonction de distance signée [5] à  $\Gamma_{1,2}$  :

$$\phi(x, t) = \begin{cases} +dist(x, \Gamma_{1,2}(t)), & x \in \Omega_1(t), \\ -dist(x, \Gamma_{1,2}(t)), & x \in \Omega_2(t), \\ 0, & x \in \Gamma_{1,2}(t). \end{cases}$$

Cette fonction LS est positive dans le liquide et négative dans le gaz. Elle est utilisée pour modéliser l'évolution de l'interface à travers l'équation d'advection

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (v - v_m) \cdot \nabla \phi = 0.$$

La fonction LS est aussi utilisée pour calculer la masse volumique et la viscosité près de l'interface. Le calcul de la tension de surface  $f_s$  fait également intervenir la fonction LS, et ce à travers le modèle « continuum surface force » [6].

## 3. Méthode numérique

### 3.1 Solveur d'écoulements diphasiques

La méthode des Éléments Finis (EF) est utilisée pour discrétiser et résoudre toutes les équations du modèle, et ce avec une interpolation quadratique pour toutes les variables. La présence de termes d'advection dans les équations de Navier-Stokes et dans l'équation d'advection de la fonction LS nécessite une stabilisation. Celle-ci est fournie par l'approche variationnelle multiéchelles basée sur les résidus [7]. Cette approche permet également de traiter la contrainte d'incompressibilité malgré l'utilisation d'une interpolation de même ordre pour les champs de vitesse et de pression.

Selon le cas d'application, deux stratégies complémentaires sont possibles pour régler la vitesse du maillage  $v_m$  : soit le maillage est Lagrangien et  $v_m = v$ , soit il est Eulérien et  $v_m = 0$ . Dans le cas Lagrangien, il n'y a aucun terme d'advection dans les équations de Navier-Stokes, et il n'y a aucune équation d'advection à résoudre pour la fonction LS. Cette flexibilité de l'approche numérique est exploitée selon les applications.

Dans les deux stratégies, la fonction LS perd une de ses propriétés fondamentales au cours de la simulation. En effet, elle correspond en général de moins en moins à une fonction distance au fur et à mesure du temps. Afin de pouvoir continuer à utiliser cette fonction LS pour calculer les propriétés d'écoulement et la tension de surface à l'interface, il est nécessaire de restaurer cette propriété de distance. Cela est réalisé à l'aide d'une méthode de réinitialisation de LS géométrique avec un traitement spécifique pour l'interpolation quadratique [8].

### 3.2 Adaptation de maillage

Dans la stratégie Lagrangienne tout comme dans l'Eulérienne, l'adaptation de maillage est utilisée pour maintenir une taille de maille assez petite près de l'interface. Cela permet d'assurer la précision du modèle « continuum surface force » pour la tension de surface ainsi que celle de la transition des propriétés d'écoulement entre les deux phases. La taille de maille prescrite en chaque point du domaine est solution d'un problème d'optimisation visant à distribuer uniformément l'erreur d'interpolation tout en maintenant une complexité de calcul constante pour la simulation. Cette approche fonctionne pour une interpolation linéaire ou quadratique, et est utilisée dynamiquement et automatiquement pendant la simulation.

Par ailleurs, dans la stratégie Lagrangienne, un algorithme de mouvement de maillage avancé est employé [9]. L'adaptation de maillage est automatiquement déclenchée par cet algorithme pour maintenir la qualité de la discrétisation.

---

#### 4. Résultats et discussions

Les méthodes numériques de pointe permettent la simulation de phénomènes physiques d'intérêt pour l'industrie. Cela sera démontré dans cette présentation pour le moulage par transfert de résine de composites textiles. L'effet de différents paramètres comme l'architecture des composites sur la migration des porosités à l'intérieur et entre les mèches sera étudié.

Comme illustration, la migration d'une porosité dans un canal entre deux mèches est étudiée en deux dimensions dans la (Fig. 1). On compare le cas où les mèches sont imperméables au cas où elles sont perméables avec une fraction surfacique de fibre de 65% pour des fibres de  $8\mu\text{m}$  de diamètre. La hauteur du canal est dans les deux cas de  $140\mu\text{m}$ . Le coefficient de tension de surface est fixé à  $31.7\text{g}\cdot\text{s}^{-2}$  pour une résine de viscosité  $150\text{mPa}\cdot\text{s}$  de sorte que le nombre capillaire est proche de 0.005. On observe en imposant le même gradient de pression que la forme de la bulle n'est pas significativement affectée mais que la bulle migre plus vite dans le cas perméable. Sa progression est en effet facilitée par la circulation de la résine dans la mèche.

Ces simulations sont permises par l'adaptation de maillage, qui permet d'avoir une taille de maille assez petite près des mèches tout en maintenant une taille raisonnable dans le canal, comme montré pour le cas perméable dans la (Fig. 1).

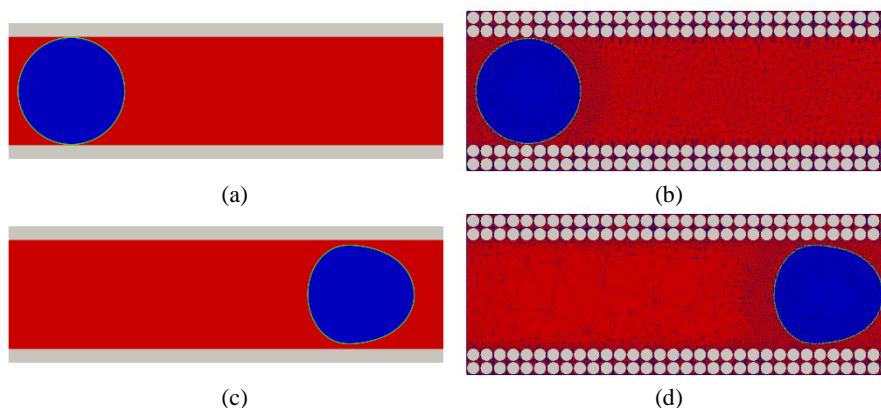


Fig. 1. Migration d'une porosité dans un canal entre deux mèches imperméables à (a)  $t = 0\text{s}$  et (b)  $t = 0.05\text{s}$ , puis perméables à  $t = 0\text{s}$  et (c)  $t = 0.05\text{s}$ . Le maillage éléments finis est présenté pour le cas perméable.

#### Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour le financement du projet "COMP3DRE" (ANR-16-CE08-0042).

#### Références

- [1] Chung Hae Park and L. Woo, "Modeling void formation and unsaturated flow in liquid composite molding processes: a survey and review," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 30, no. 11, pp. 957–977, Jun. 2011, doi: 10.1177/0731684411411338.
- [2] M. Mehdikhani, L. Gorbatikh, I. Verpoest, and S. V Lomov, "Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance," *J. Compos. Mater.*, vol. 53, no. 12, pp. 1579–1669, May 2019, doi: 10.1177/0021998318772152.

- [3] M. Shakoor and C. H. Park, “A higher-order finite element method with unstructured anisotropic mesh adaption for two phase flows with surface tension,” pp. 1–29, Oct. 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2010.13716>.
  - [4] M. Shakoor, “FEMS – A Mechanics-oriented Finite Element Modeling Software,” *Comput. Phys. Commun.*, vol. 260, p. 107729, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.cpc.2020.107729.
  - [5] S. Osher and J. A. Sethian, “Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations,” *J. Comput. Phys.*, vol. 79, no. 1, pp. 12–49, Nov. 1988, doi: 10.1016/0021-9991(88)90002-2.
  - [6] J. . Brackbill, D. . Kothe, and C. Zemach, “A continuum method for modeling surface tension,” *J. Comput. Phys.*, vol. 100, no. 2, pp. 335–354, Jun. 1992, doi: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.
  - [7] J. Yan, S. Lin, Y. Bazilevs, and G. J. Wagner, “Isogeometric analysis of multi-phase flows with surface tension and with application to dynamics of rising bubbles,” *Comput. Fluids*, vol. 179, pp. 777–789, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.compfluid.2018.04.017.
  - [8] E. Marchandise, P. Geuzaine, N. Chevaugéon, and J.-F. Remacle, “A stabilized finite element method using a discontinuous level set approach for the computation of bubble dynamics,” *J. Comput. Phys.*, vol. 225, no. 1, pp. 949–974, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.jcp.2007.01.005.
  - [9] M. Shakoor, P.-O. Bouchard, and M. Bernacki, “An adaptive level-set method with enhanced volume conservation for simulations in multiphase domains,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 109, no. 4, pp. 555–576, Jan. 2017, doi: 10.1002/nme.5297.
-