

# Couplages Stokes/Darcy dans des milieux déformables pour la modélisation des procédés par infusion

S. Drapier<sup>1</sup>, J. Bruchon<sup>1</sup>, J.-M. Bergheau<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *École des Mines de Saint-Étienne, centre SMS et LTDS UMR CNRS 5513, F-42023 Saint-Étienne cedex 02, {drapier,bruchon}@emse.fr*  
<sup>2</sup> *ENISE, LTDS UMR CNRS 5513, F-42023 Saint-Étienne cedex 02, bergheau@enise.fr*

## 1 Introduction

Les procédés LCM (Liquid Composite Molding) permettent d'élaborer des structures composites de grande taille à moindre coût tout en garantissant des propriétés finales élevées. Si le principe sur lequel s'appuient ces procédés est basique, leur maîtrise passe actuellement presque uniquement par des campagnes essais-erreurs très coûteuses, notamment par manque de modèles numériques fiables de ces procédés.

Schématiquement on peut modéliser ces procédés comme suit : sous l'action d'une pression mécanique appliquée sur un empilement de nappes de renforts fibreux secs et de résine liquide, la résine infuse à travers les préformes en cours de déformation. La modélisation de ces procédés est classiquement parcelaire et très simplifiée, la difficulté étant de coupler les phénomènes mécaniques transitoires de type mécanique des fluides, mécanique des solides, mécanique des milieux poreux, en plus de la thermo-physico-chimie de la résine. Le premier modèle global de procédés LCM a été proposé dans un cadre isotherme par P. Celle [1]. Ce travail, aujourd'hui repris dans un cadre industriel par ESI Software est en cours de validation. Dans le même temps, des travaux ont été menés en parallèle par G. Pacquaut sur une autre voie de modélisation [2].

Nous proposons, dans cette communication, de faire un comparatif de ces 2 approches, et notamment d'évaluer leur capacité à modéliser un écoulement de fluide dans 2 zones contiguës où règnent des régimes de Stokes et de Darcy (Figure 1) représentant respectivement une zone de résine pure et une zone de préformes en cours de remplissage. Le suivi du front de fluide dans les préformes est, en effet, étroitement lié à la capacité de la résolution à fournir des champs de vitesses stables et homogènes à l'interface Stokes-Darcy, notamment pour des perméabilités d'intérêt industriel de l'ordre de  $10^{[-11,-15]}m^2$ .

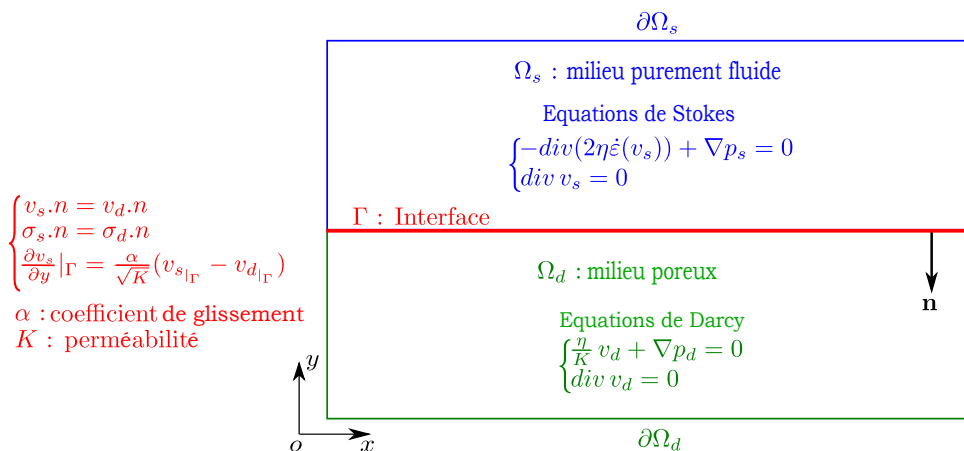


FIG. 1 – Écoulements de Stokes-Darcy :  $v_{s,d}$  et  $p_{s,d}$  pression et vitesses dans les zones de Darcy et Stokes,  $\eta$  viscosité du fluide

## 2 Approches couplée vs découplée

Dans ces approches, la déformabilité des préformes est couplé faiblement avec les écoulements. D'une part, le comportement orthotrope non-linéaire des préformes est modifié pour intégrer la présence du fluide *via* sa pression hydrostatique (Terzaghi étendu). À l'inverse, la déformabilité des préformes modifie leur porosité, et donc leur perméabilité qui évolue en rapport *via* un modèle de Carman-Kozeny.

Concernant les écoulements, les 2 approches considérées ici s'appuient sur des mini-éléments mixtes vitesse/pression, connus pour leur stabilité dans la gestion de l'incompressibilité. Les différences principales interviennent au niveau de la représentation de l'interface Stokes-Darcy et des couplages correspondant, mais également par les formulations des mini-éléments utilisés.

### 2.1 Couplage faible itératif

L'approche proposée par Celle [1] consiste à résoudre indépendamment les écoulements de Stokes et Darcy. Un mini-élément P1+/P1 est utilisé dans sa formulation duale pour les écoulements dans Stokes, tandis que la formulation primale, plus stable, est considérée dans Darcy. Ensuite, un processus itératif permet d'équilibrer les vitesses normales et pressions de part et d'autre de l'interface (Figure 1) représentée ici à l'aide d'un maillage structuré. L'équilibre est considéré comme atteint lorsque le résidu en vitesse/pression pour les 2 zones est admissible au sens d'un critère de convergence fixé.

Cette solution, prenant également en compte la déformation des préformes, est actuellement en cours de consolidation en vue de son industrialisation. Par contre, la représentation des écoulements à forts rapports de perméabilités, tels que rencontrés en milieux industriels, doit faire l'objet d'une étude complémentaire pour valider la robustesse des simulations dans ces conditions sévères.

### 2.2 Couplage fort direct

L'autre solution envisagée pour coupler ces écoulements consiste à recourir à un couplage direct, à travers la formulation faible des équations couplées de Stokes et Darcy. La formulation duale est considérée dans Stokes et dans Darcy afin d'assurer la continuité des vitesses et des pressions de façon 'naturelle' à travers l'interface.

Afin de stabiliser cette formulation duale dans Darcy, une approche dite *Huges Variational Multiscale*[3] est utilisée pour prendre en compte, à l'échelle macroscopique, les effets locaux de l'écoulement. De plus, une condition dite *Beaver-Joseph-Saffman* est imposée à l'interface, elle permet de relier le cisaillement de l'écoulement le long de cette interface aux vitesses tangentielles dans les 2 milieux (*cf* Figure 1). L'interface est représentée ici par une fonction Level-set définie dans un maillage non-structuré.

## 3 Perspectives

Les approches, qui seront détaillées dans la version finale de cette contribution, sont en cours d'évaluation sur les mêmes cas tests en régime stationnaire et transitoire. On note que les écoulements changent de régime lorsque la perméabilité diminue dans le milieu poreux, passant d'un régime dominé par des écoulements normaux, à un régime où les écoulement tangentiels à l'interface deviennent prépondérants. La stabilisation de l'écoulement grâce à la condition de *Beaver-Joseph-Saffman* prend donc tout son sens dans ce cas.

## Références

- [1] P. Celle, S. Drapier, et J-M. Bergheau. *Numerical modelling of liquid resin infusion into fiber preforms undergoing compaction.*, European Journal of Mechanics/A, 7(4) :647–661, 2008.
- [2] G. Pacquaut, J. Bruchon, N. Moulin, et S. Drapier. *Combining a level set method and a mixed stabilized P1/P1 formulation for coupling Stokes-Darcy flows*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, À paraître, 2011.
- [3] K.B. Nakshatrala, D.Z. Turner, K.D. Hjelmstad, A. Masud. A stabilized mixed finite element method for Darcy flow based on a multiscale decomposition of the solution. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195 :4036–4049, 2006.