

Simulation numérique en configuration industrielle de procédés d'élaboration de composites structuraux par infusion de résine

D. Nguemalieu Kouetcha¹, K. Andriamananjara¹, N. Moulin¹, J. Bruchon¹, S. Drapier¹

¹ Mines Saint-Etienne - Chaire Hexcel
Centre SMS & LGF UMR CNRS 5307 Mines Saint-Etienne - Université de Lyon
158, Cours Fauriel, F-42023 Saint-Etienne cedex 2-France,
{daniella.nguemalieu, andriamananjara, nmoulin, bruchon, drapier}@emse.fr

Résumé — Cette étude vise à simuler numériquement les procédés d'élaboration des matériaux composites par infusion de résine dans un cadre industriel. En régime transitoire, dans lequel les simulations sont faites, les équations de Stokes-Darcy qui modélisent l'écoulement du fluide dans le drainant et dans la préforme sont couplées à la méthode *level-set* qui modélise l'avancement de la résine. La résolution de ce problème se fait par une approche monolithique, et repose sur la méthode éléments finis stabilisée.

Mots clés — Couplage Stokes-Darcy, procédé par infusion (LRI), LS.

1 Introduction

Les procédés d'élaboration des matériaux composites par voie liquide, en particulier les procédés par infusion de résine liquide (LRI : *Liquid Resin Infusion*), sont actuellement en plein développement car ils présentent des solutions économiquement viables et optimisées pour la réalisation de pièces composites hautes performances (HP) de grandes dimensions. La Chaire industrielle Hexcel - Mines Saint-Etienne offre le cadre pour développer des outils numériques adaptés et robustes qui permettent de simuler ces procédés d'infusion de la résine liquide à l'échelle de la pièce, pour des conditions au plus proche des configurations industrielles (géométries 3D complexes, matériaux orthotropes à fort gradient de propriétés).

En effet, lors de l'élaboration d'un matériau composite par LRI, plusieurs étapes sont à considérer : drappage, pré-compaction, remplissage, post-remplissage, cuisson, et démoulage. La simulation complète des différentes étapes du procédé nécessite donc décrire et coupler différentes physiques (mécaniques des fluides, mécanique des solides, thermiques, cinétique de réticulation de la résine) [4]. La modélisation de l'étape de drappage - cf Bouquerel *et al. Mise en œuvre de l'adhésion-frottement pour le formage de renforts composites UD's HiTape®* dans cette même conférence - permet de fournir la configuration d'entrée à la modélisation de l'étape de remplissage qui reste la plus critique avec les matériaux composites HP utilisés en aéronautique [5]. C'est donc cette étape d'infusion isotherme vue à l'échelle de la pièce qui est simulée et présentée dans cet article. La résine supposée non-réactive s'écoule d'abord dans un tissu drainant puis à travers l'épaisseur de la préforme, sous l'effet combiné d'une dépression imposée en tirant le vide dans le système comme présenté sur la Figure 1, et de pressions d'origine capillaire - cf Chevalier *et al.* dans cette même conférence -.

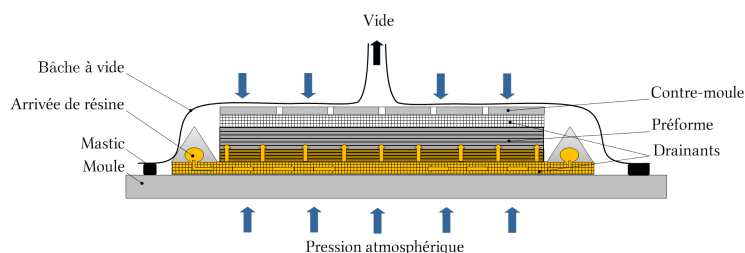


FIGURE 1 – Procédé d'infusion de la résine liquide [5]

La modélisation et la simulation en régime transitoire de l'écoulement du fluide repose sur une approche éléments finis stabilisée par une méthode *ASGS* [10], mise en place dans l'environnement *Z-set* [12]. Il s'agit de simuler aussi bien l'écoulement de fluide dans le drainant, décrit par les équations de Stokes ou Darcy, qu'à travers l'épaisseur des préformes (milieu poreux orthotrope), décrit par les équations de Darcy. Ces préformes possèdent des perméabilités pouvant être aussi faibles que $10^{-16}m^2$ dans l'épaisseur pour des configurations industrielles (Figure 2). En couplant les équations de Stokes/Darcy ou Darcy/Darcy, l'avancement du front de fluide est modélisé par l'isovaleur zéro d'une fonction *level-set* [8] transportée par la vitesse du fluide. La difficulté consiste ici à se positionner dans les conditions industrielles sévères en termes de régimes d'écoulements, liés au contraste de caractéristiques géométriques et physiques du drainant, des préformes, et des fluides.

2 Modélisation de l'écoulement du fluide et de l'avancement du front de fluide

2.1 Modélisation du couplage Stokes-Darcy

La modélisation du couplage Stokes-Darcy est complexe. Cette complexité vient du fait qu'il est difficile de trouver des éléments finis qui soient stables à la fois pour le problème de Stokes et de Darcy. Pour parvenir à ce couplage, il existe différentes stratégies dans la littérature à savoir : l'approche dé-couplée [7] et l'approche monolithique [10]. Pour des raisons de commodité expliquées ci-dessous, l'approche monolithique est privilégiée. Dans cette étude, l'interface entre le milieu purement fluide et le milieu poreux est définie explicitement. Des conditions supplémentaires sont ajoutées sur cette interface à savoir : la continuité de la vitesse normale, la continuité de la contrainte normale et la condition de Beaver-Joseph-Saffman (Figure 2) qui permet de contrôler la vitesse tangentielle à cette interface *via* un coefficient de 'frottement' noté α . Une autre interface existe, entre le liquide et le gaz en amont du front mobile. Les propriétés, notamment la viscosité, dépendent donc de la position au sein du milieu fluide.

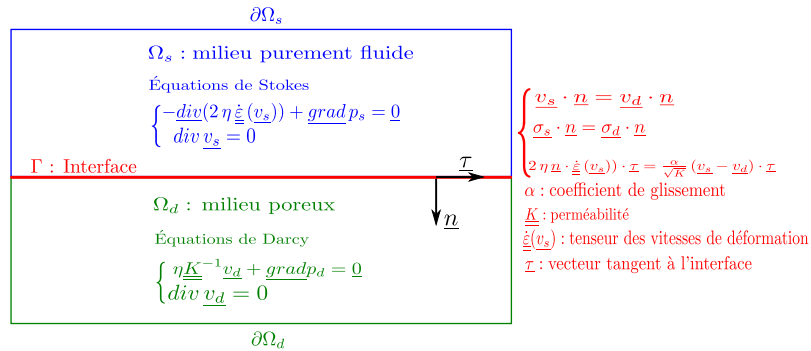


FIGURE 2 – Représentation du domaine de calcul pour le couplage Stokes-Darcy, permettant de modéliser l'écoulement du fluide dans le drainant et dans la préforme : $v_{s,d}$ et $p_{s,d}$ correspondent respectivement aux vitesses et pression dans les domaines de Stokes et Darcy, η la viscosité du fluide - fluide ou air.

La formulation intégrale faible du problème couplé Stokes-Darcy est obtenue en sommant les formulations faibles en vitesse-pression de chacun des problèmes de Stokes et de Darcy sur l'ensemble du domaine, et en prenant en compte les conditions aux limites décrites sur la Figure 2. La formulation faible couplée consiste à trouver les champs de vitesse et de pression (\underline{v}, p) tels que :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} 2\eta(\underline{x}) \underline{\xi}(\underline{v}) : \underline{\xi}(\underline{w}) H_s d\Omega - \int_{\Omega} p \operatorname{div} \underline{w} d\Omega + \int_{\Gamma} \frac{\alpha\eta(\underline{x})}{\sqrt{K}} (\underline{v} \cdot \underline{\tau})(\underline{w} \cdot \underline{\tau}) d\Gamma + \\ \int_{\Omega} \eta(\underline{x})(\underline{K})^{-1} \underline{v} \cdot \underline{w} H_d d\Omega = \int_{\Gamma_{s,N}} \underline{t} \cdot \underline{w} d\Gamma + \int_{\Gamma_{d,N}} p_{ext} \underline{w} \cdot \underline{n} d\Gamma \quad (1) \\ - \int_{\Omega} q \operatorname{div} \underline{v} d\Omega = 0 \end{aligned}$$

pour les champs tests (\underline{w}, q) suffisamment continus et réguliers. H_i avec $(i = s, d)$ sont des fonctions Heaviside associées à chaque sous-domaine Ω_i ($i = s, d$) [10], et $\underline{\dot{\epsilon}}(\underline{v})$ est le tenseur des vitesses de déformation défini par $\underline{\dot{\epsilon}}(\underline{v}) = \frac{1}{2}(\underline{\nabla}\underline{v} + \underline{\nabla}^T\underline{v})$. La viscosité η peut prendre les valeurs du liquide ou de l'air, aussi bien dans Stokes que dans Darcy. La perméabilité $\underline{\underline{K}}$ est supposée orthotrope et constante, les déformations du squelette n'étant pas considérées ici.

La discrétisation du problème se fait avec des éléments finis mixtes linéaires en vitesse et pression (approximation P1/P1). Cette formulation n'étant pas structurellement stable, une méthode *Variationnelle Multi-Échelle*, plus précisément une méthode dite *Algebraic Sub-Grid Scale* [3, 10, 4] est utilisée.

2.2 Modélisation de l'avancement du front de fluide

L'avancement du front de fluide est modélisé en utilisant une fonction *level-set* ϕ_f . Cette fonction est transportée d'un instant t à $t + \Delta t$ par le champ de vitesse du fluide (résine), grâce à la résolution de l'équation de transport :

$$\frac{\partial \phi_f}{\partial t} + \underline{v} \cdot \underline{\nabla} \phi_f = 0 \quad \forall \underline{x} \in \Omega \quad (2)$$

Pour éviter que la solution se dégrade et assurer la propriété de distance signée de la *level-set* ($\|\underline{\nabla} \phi_f\| = 1$), une étape de réinitialisation et l'utilisation d'un filtre sont nécessaires pour s'affranchir des problèmes numériques qui peuvent apparaître loin de l'interface [11]. La résolution de cette équation est faite par une méthode éléments finis stabilisée SUPG (*Streamline Upwind Petrov-Galerkin*) [6].

3 Résultats

Les résultats présentés illustrent les capacités de la modélisation proposée à traiter les écoulement en régime saturé puis transitoire, dans un domaine Stokes/Darcy et Darcy-Darcy, pour des propriétés physiques correspondant aux cas industriels typiques. Enfin, une extension permettant d'intégrer les effets capillaires, en plus de la force motrice liée au procédé lui-même, est illustrée sur un cas 3D.

3.1 Couplage Stokes-Darcy en régime saturé

La première des simulations consiste à vérifier en régime saturé que l'écoulement du fluide est bien modélisé en couplant Stokes-Darcy, y compris pour des paramètres matériaux très spécifiques ayant des intérêts industriels : $\frac{K_L}{\eta_r} \propto 10^{-14} N^{-1} \cdot m^4 \cdot s^{-1}$, épaisseur drainant $\sim 0.7mm$ et épaisseur préforme $\sim 3.5mm$. La Figure 3 présente les conditions aux limites des simulations, la distribution en pression ainsi que l'amplitude des vitesses. Comme attendu, la pression calculée est homogène dans la direction de l'écoulement .

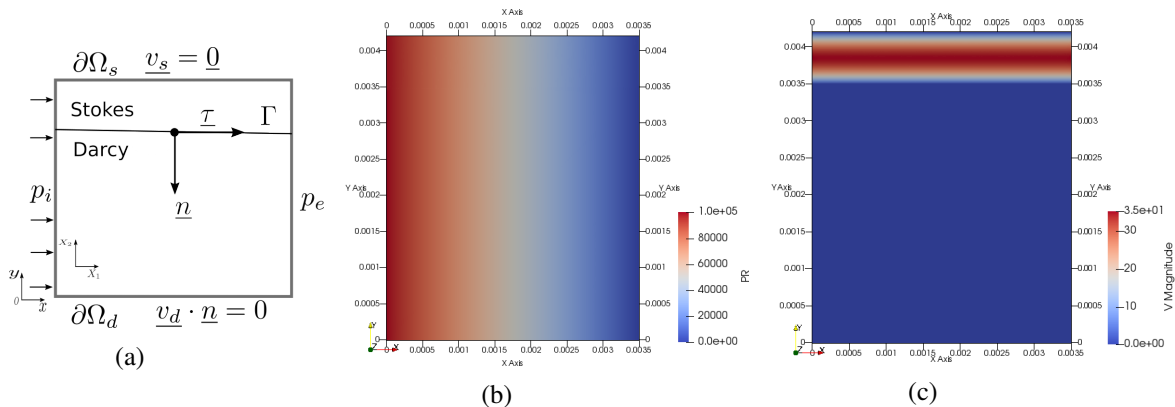


FIGURE 3 – Écoulement tangent à l'interface en régime saturé : (a) conditions aux limites, $p_i = 10^5 Pa$ et $p_e = 0 Pa$, (b) distribution de pression et (c) distribution en amplitude des vitesses.

Sur la Figure 4, le profil de vitesse est représenté. Ce profil met en exergue l'écoulement de type Poiseuille dans Stokes et constant dans Darcy. On obtient une parfaite corrélation entre les résultats

numériques et la solution analytique, même dans les conditions d'écoulement sévères considérées.

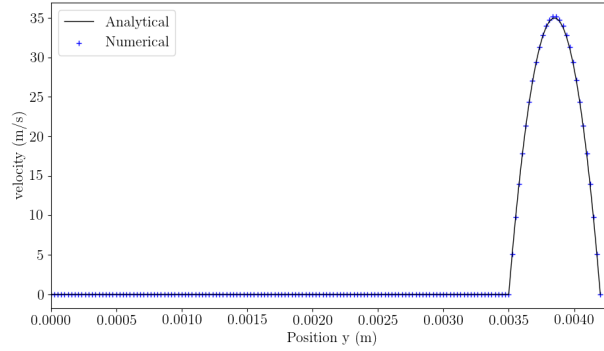


FIGURE 4 – Profil de l'amplitude des vitesses le long de la direction y : comparaison des solutions analytique et numérique.

3.2 Simulation de remplissage de la préforme à l'aide d'un drainant

3.2.1 Description du problème

Dans l'optique de valider la modélisation du remplissage du drainant puis de la préforme, mettant en avant des difficultés numériques attendues, deux simulations ont été réalisées, à savoir : un écoulement perpendiculaire à l'interface (Figure 5a) qui permet de valider le passage du front de fluide (*level-set* mobile) sur l'interface fixe entre Stokes et Darcy, et un écoulement tangent à l'interface avec une buse d'injection de résine (Figure 5b) qui permet de valider la prise en compte de la condition de non-glissement.

En régime transitoire, pour représenter l'écoulement bi-phasique (liquide-air), les propriétés de l'air considéré comme un fluide Newtonien peu visqueux $\eta_{air} \ll \eta_{resine}$ sont prises en compte. En fait, il s'agit de prolonger dans l'air les champs de vitesse et de pression sans perturber la propagation du fluide. Pour les calculs suivants, $\eta_a = 10^{-5} Pa \cdot s$.

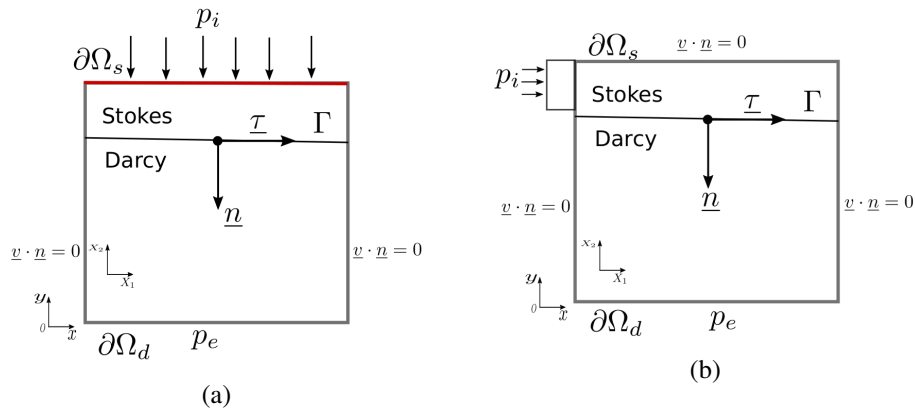


FIGURE 5 – Conditions aux limites pour la modélisation de l'avancement du front de fluide : (a) écoulement perpendiculaire à l'interface et (b) écoulement tangent à l'interface avec une buse d'injection de la résine, avec $p_i = 10^5 Pa$ et $p_e = 0 Pa$.

Ces écoulements possèdent des solutions analytiques pour le temps de remplissage t_f (Equation 4). La position du front de fluide est déduite de la vitesse réelle de l'écoulement exprimée par :

$$v_{reel} = \frac{v_{darcy}}{\phi} = \frac{dy}{dt} = \frac{K_t}{\phi \eta_r} \frac{\Delta P}{y} \quad (3)$$

avec ϕ la porosité et K_t la perméabilité isotrope pour ce cas. En intégrant l'Equation 3, on obtient la position du front de fluide en fonction du temps :

$$y(t) = \sqrt{\frac{2K_t(P_i - P_e)t}{\phi\eta_r}} \quad (4)$$

3.2.2 Remplissage de la résine dans le cas d'un écoulement perpendiculaire à l'interface

Considérons le cas transitoire de l'écoulement de fluide dans le cas perpendiculaire à l'interface schématisé sur Figure 5a. La Figure 6a présente l'état initial - de la simulation - initialisation de la fonction *level-set*. La résine s'écoule ensuite à travers l'épaisseur du drainant qui se remplit en moins de 2s comme présenté sur la Figure 6b. À $t = 2s$, sur la Figure 6c, la résine se trouve déjà dans les préformes, la *level-set* du front de fluide vient de traverser l'interface fixe. La Figure 6d présente l'état de remplissage total.

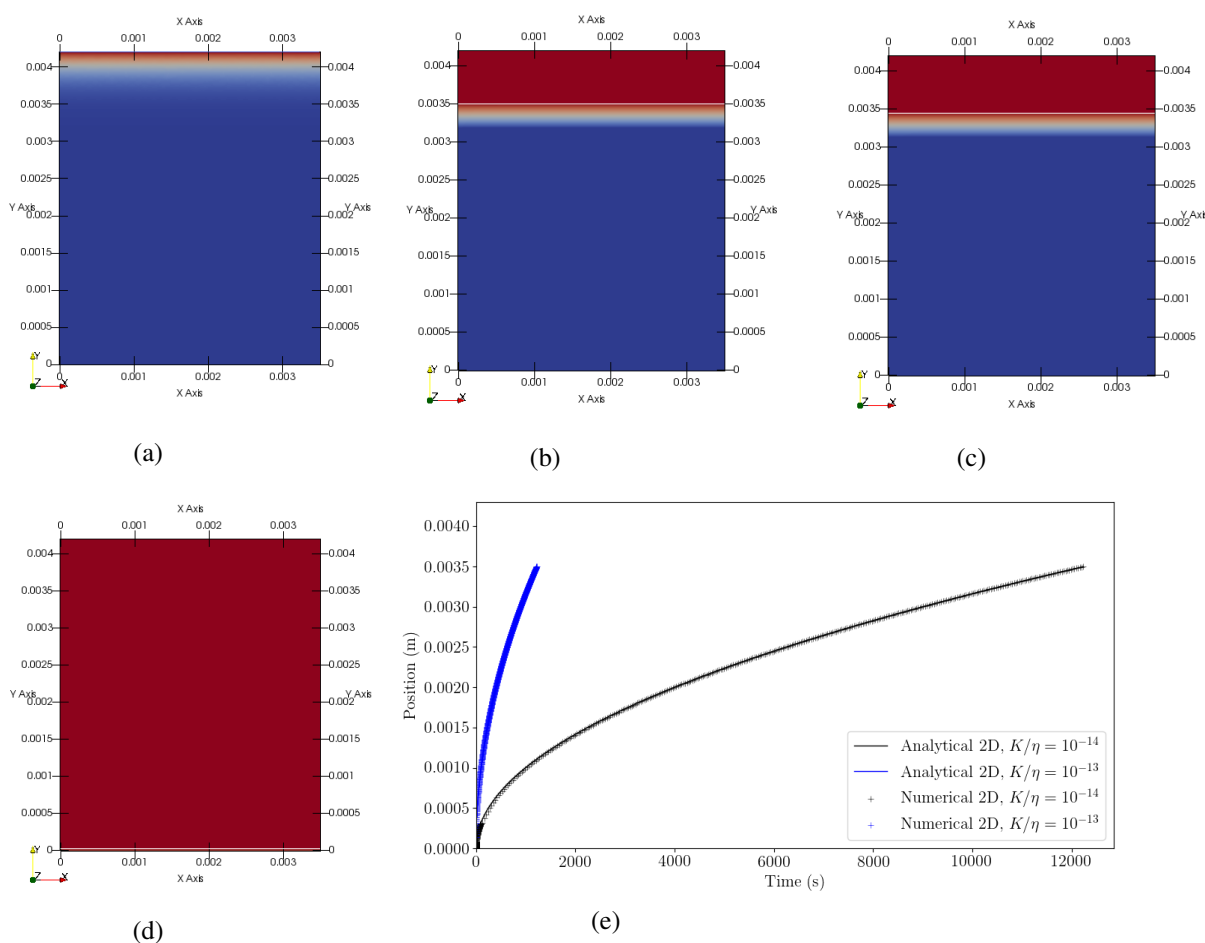


FIGURE 6 – Écoulement perpendiculaire à l'interface, résine (en rouge) et l'air (en bleu) : (a) initialisation de la fonction *level-set* ($t=0s$), (b) front de fluide à $t=100s$, (c) front de fluide à $t=200s$, (d) remplissage total et (e) position du front de fluide en fonction du temps de remplissage dans la préforme.

Les résultats obtenus sur le temps de remplissage total de la pièce infusée montrent que le temps de remplissage du drainant reste négligeable devant le temps de remplissage total de la préforme. La Figure 6e présente la position du front de fluide pour 2 rapports de $\frac{K_t}{\eta_r}$ dans le milieu poreux. On observe une bonne corrélation entre les positions du front de fluide simulées et les solutions analytiques. Plus le rapport $\frac{K_t}{\eta_r}$ est petit plus long sera le temps de remplissage total.

3.2.3 Remplissage de la résine dans le cas d'un écoulement tangent à l'interface

Afin d'étudier d'autres types de remplissage de la résine, la simulation d'un écoulement parallèle à l'interface a été réalisée, en y ajoutant au système une buse d'arrivée de résine comme dans un cas industriel (Figure 5b). Ici la perméabilité est orthotrope, avec une perméabilité plane selon x , K_p , plus grande que la perméabilité transverse (selon y), K_t , soit un rapport $\frac{K_p}{K_t} = 100$.

3.2.4 Stokes-Darcy

L'avancement du front de fluide en fonction du temps est étudiée dans un premier temps pour une simulation de type Stokes-Darcy/level-set. Les résultats présentés sur la Figure 7 montrent que la résine remplit tout d'abord le drainant avant que le remplissage du milieu poreux ait lieu. Dans le drainant le front de la résine présente une forme particulière (Figure 7a), comparable à 1/2 Poiseuille. À $t=2$ s (Figure 7b) le drainant est complètement rempli. Une recirculation de l'air est observée à l'extrémité du drainant, elle disparaît lorsque le fluide a traversé l'interface Stokes/Darcy. Cette recirculation favorise les premiers instants du remplissage de la résine à travers l'épaisseur de la préforme, le front s'homogénéise par la suite pour devenir rectiligne jusqu'au remplissage total (Figure 7c).

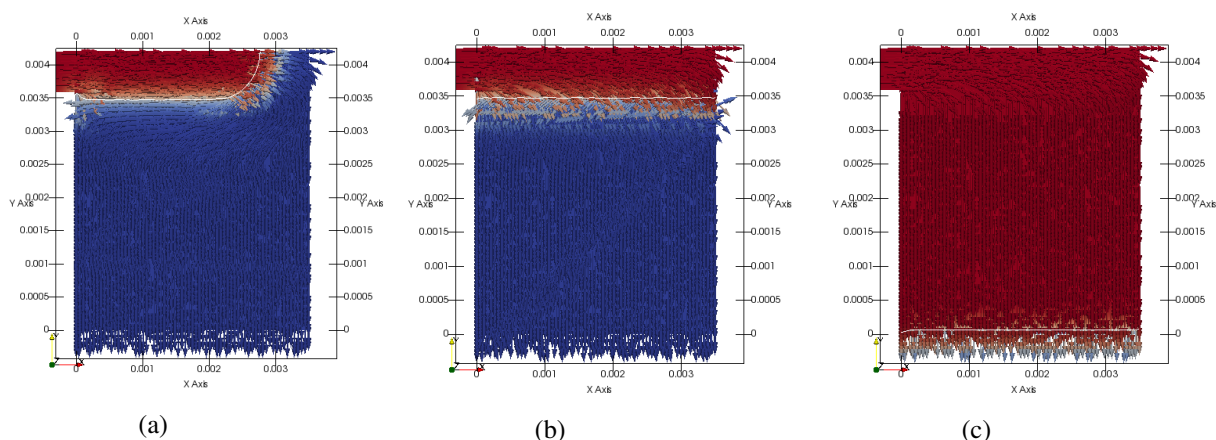


FIGURE 7 – Écoulement tangent à l'interface en régime transitoire Stokes-Darcy/level-set : (a) $t = 0,79s$, (b) $t = 2s$, et (c) remplissage total.

En comparant deux temps de remplissage, on note que ces temps diminuent lorsque le rapport $\frac{K_t}{\eta_r}$ augmente (Tableau 1-a). De même, en diminuant l'épaisseur de la pièce à infuser on retrouve bien la dépendance du temps par rapport au carré de l'épaisseur (Equation 4) puisque le temps de remplissage du drainant est négligeable (Tableau 1-b).

Stokes-Darcy/level-set		
$K_t/\eta_r(N^{-1} \cdot m^4 \cdot s^{-1})$	10^{-14}	10^{-13}
Temps de remplissage	224min	24min

(a)

Stokes-Darcy/level-set $\frac{K_t}{\eta_r} = 10^{-14}(N^{-1} \cdot m^4 \cdot s^{-1})$		
Épaisseur de la préforme (mm)	1,8	3,5
Temps de remplissage	57min	224min

(b)

TABLE 1 – Temps de remplissage de la préforme : (a) différents rapport K_t/η_r et (b) épaisseurs.

3.2.5 Darcy-Darcy

Les caractérisations des propriétés matériaux faites expérimentalement montrent que la perméabilité du drainant peut ne pas être négligeable, de l'ordre de $10^{-6-8} m^2$. Ainsi, d'autres simulations dans le cas de l'écoulement tangent à l'interface ont été réalisées, en faisant un couplage de type Darcy-Darcy/level-set pour modéliser l'avancement de fluide. Les positions du front de fluide obtenus en fonction du temps et les champs de vitesse sont présentés sur la Figure 8. Comme dans le couplage Stokes-Darcy/level-set, le drainant se remplit entièrement avant que l'on observe le remplissage de la préforme. On note un

légère différence dans le front de résine dans le drainant, légèrement aplati par rapport à la simulation de type Stokes-Darcy/level-set. Pour les différents rapports K/η (Tableau 2), les temps de remplissage obtenus sont également comparables au cas du couplage Stokes-Darcy/level-set.

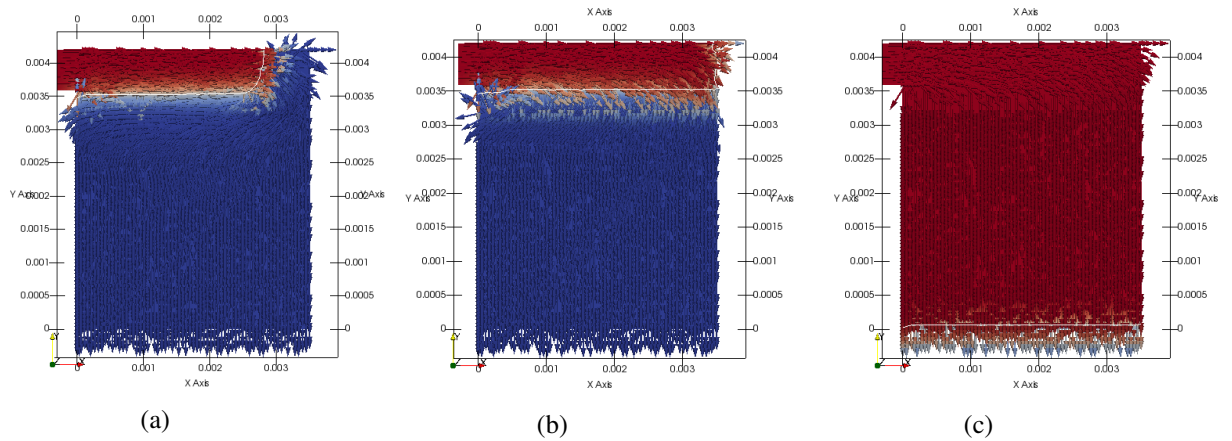


FIGURE 8 – Écoulement tangent à l’interface en régime transitoire Darcy-Darcy/level-set : (a) $t = 0,79s$, (b) $t = 2s$, et (c) $t = 3h44min$.

3.3 Pression capillaire

Les récents travaux de Andriamananjara *et al* [1] et Chevalier *et al* [9] - et dans cette même conférence *Écoulements capillaires dans une microstructure fibreuse-*, ont montré que l’effet capillaire influence le remplissage de la résine dans les renforts. A l’échelle du procédé, la prise en compte de la pression capillaire peut se faire en appliquant une contrainte capillaire - directionnelle - sur l’interface formée entre l’air et le fluide. La difficulté majeure consiste ici à appliquer une discontinuité dans un schéma éléments finis de Galerkin qui est par nature continu. Appliquer cette pression capillaire fait apparaître des vitesses parasites. Afin de ne pas ajouter des degrés de liberté supplémentaires et de rester dans un cadre de Galerkin continu, un enrichissement proposé par [2] a été introduit dans l’approximation du champ de pression, uniquement dans les éléments traversés par l’interface, en considérant deux fonctions de formes supplémentaires M_1 et M_2 (Equation 5) toutes deux discontinues. L’effet de la pression capillaire est illustré sur la Figure 9a où est représentée l’infusion de résine dans un raidisseur. On peut vérifier que la pression capillaire diminue les temps de remplissage.

$$p_h = \sum_i N_i p_i + \sum_j^2 M_j c_j \quad (5)$$

où N_i et p_i sont respectivement les fonctions de forme et les valeurs nodales de la pression associées aux degrés de libertés classiques, et c_j les degrés de liberté associés aux fonctions de formes discontinues M_j .

3.4 Conclusion et perspectives

L’objectif de ce travail était de simuler la phase de remplissage de la résine à travers les épaisseurs particulières du drainant et de la préforme, avec des rapports $\frac{K}{\eta_r}$ très faibles. Une validation des développements faits dans le logiciel Z-set pour simuler l’écoulement du fluide et l’avancement du front du fluide a été réalisée dans le cas d’un écoulement perpendiculaire à l’interface. Les positions du front de fluide en fonction du temps obtenues numériquement présentent une bonne corrélation avec les solutions analytiques. D’autre part, nous avons validé 2 façons de modéliser les écoulements transitoires dans le drainant, avec des couplages Stokes-Darcy/level-set ou Darcy-Darcy/level-set qui conduisent aux mêmes résultats en termes de scénario et de temps de remplissage. Ces différents résultats devront être confrontés à des mesures expérimentales.

En perspective à ce travail, nous souhaitons prendre en compte l’effet capillaire sur le temps de remplissage totale dans des conditions industrielles (faibles épaisseurs, perméabilités très faibles) et éventuel-

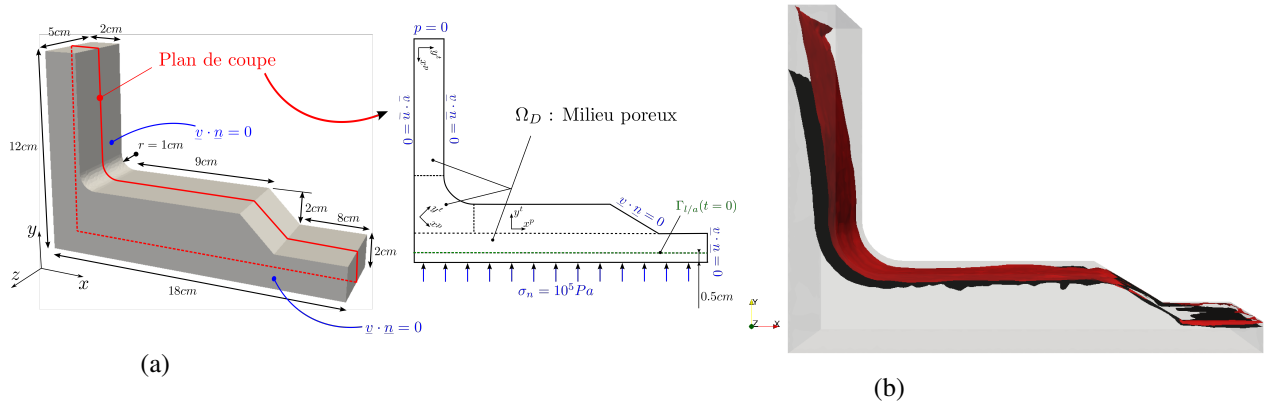


FIGURE 9 – Prise en compte de l’effet capillaire dans la simulation d’infusion d’un raidisseur [1] : (a) géométrie et conditions limites, (b) évolution du front de fluide avec (rouge) et sans (noir) effet capillaire.

lement compléter avec la phase de post-remplissage, pour enfin valider les simulations avec les données expérimentales pour des cas d’infusions de démonstrateurs réalisés dans le cadre de la chaire industrielle.

Références

- [1] K. Andriamananjara, N. Moulin, J. Bruchon, P.-J. Liotier and S. Drapier. *Numerical modeling of local capillary effects in porous media as a pressure discontinuity acting on the interface of a transient bi-fluid flow*, International Journal of Material Forming, 2018.
- [2] R. Ausas, G. C. Buscaglia, S.R. Idhelson. *A new enrichment space for the treatment of discontinuous pressures in multi-fluid flows*. International Journal For Numerical Methods in Fluids, 70 :829-850, 2011.
- [3] S. Badia and R. Codina. *Unified stabilized finite element formulations for the Stokes and the Darcy problems*, SIAM Journal on Numerical Analysis, 47 :3, 1971-2000, 2009.
- [4] M. Blais, N. Moulin, P.-J. Liotier, and S. Drapier *Resin infusion-based processes simulation : coupled Stokes-Darcy flows in orthotropic preforms undergoing finite strain*, International Journal of Material Forming, 10 :1, 43-54, 2017.
- [5] M. Blais, N. Moulin, P.-J. Liotier et S. Drapier *Simulation numérique du procédé par infusion de résine d’une nouvelle génération de renforts structuraux pour l’aéronautique*, Matériaux & Techniques, 104, 412, 2016.
- [6] A. N. Brooks and T. J. Hughes. *Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 32(1-3) :199–259, 1982.
- [7] 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.
- [8] Y.C. Chang, T.Y. Hou, B. Merriman and S. Osher. *A Level Set Formulation of Eulerian Interface Capturing Methods for incompressible Fluids Flows*, Journal of Computational Physics, 124 :2, 449-464, 1996.
- [9] L. Chevalier, J. Bruchon, N. Moulin, P.-J. Liotier, and S. Drapier *Accounting for local capillary effects in two-phase flows with relaxed surface tension formulation in enriched finite elements*, Comptes Rendus Mécanique, 346 :8, 617-633, 2018.
- [10] 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, 23(3-4) : 113-137, 2014.
- [11] L. Ville, L. Silva et T. Coupez. *Convected level set method for the numerical simulation of fluid buckling*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 66(3) :324–344, 2011.
- [12] www.zset-software.com