

Approche multi-échelle pour la simulation numérique de procédés d'élaboration directe par infusion de résine

Multi-scale approach for the numerical simulation of resin infusion-based processes

K. Andriamananjara¹, L. Chevalier¹, N. Moulin¹, P.-J. Liotier¹, J. Bruchon¹, S. Drapier¹

¹ : Chaire industrielle Hexcel-Mines Saint-Etienne
Mines Saint-Etienne, Univ. Lyon CNRS, UMR 5307 LGF, Centre SMS
158 cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne CEDEX 2, France
e-mail : nmoulin@emse.fr, liotier@emse.fr

Résumé

Le but de ce travail, qui représente le cœur de la chaire industrielle entre Mines Saint-Etienne et Hexcel, est de mettre au point un chaînage numérique robuste pour prendre en compte les effets locaux d'imprégnation de fibres par une résine liquide dans des simulations à l'échelle du procédé. Les effets locaux sont donc modélisés à l'échelle des fibres pour capturer les effets capillaires et calculer ainsi des paramètres, tels que la pression capillaire, à exporter à l'échelle supérieure. Ceci a été rendu possible par des stabilisations et enrichissements des méthodes éléments finis utilisés pour simuler des écoulements de Stokes et Darcy ainsi que leur couplage. Les contraintes capillaires (pressions capillaires dans les directions principales) sont alors incluses dans les simulations d'élaboration par procédés directs de pièces aéronautiques. Le but ultime de cette approche est de développer un modèle robuste permettant de prédire l'imprégnation et la post-infusion de renfort fibreux pour des applications industrielles.

Abstract

The aim of the present work, which lies at the heart of the Hexcel-Mines Saint-Etienne Industrial, is to set up numerical modeling tools ranging from the component scale (local or microscopic scale) to the process scale (macroscopic scale), based on fluid-solid coupling methods undergoing finite strains within an high performing computing framework. At the local scale, the aim is to model flows in the fibrous network of preforms where wettability and capillary effects are assumed to play a key role. First, at the fiber scale, the resin flow in impervious fiber systems will be characterized and modeled relying on some specific stabilized and enrichment numerical methods able to deal with coupled Stokes-Darcy flows in low permeability orthotropic media. Capillary effects will be included in numerical simulations of local flows in industrial parts with complex geometries via capillary pressures (capillary stress). The ultimate goal of this approach is to yield a robust numerical model for infusion processes at the scale of industrial parts in order to understand and hence control both filling and post-filling stages for industrial applications.

Mots Clés: Pression capillaire, procédé par infusion (LRI), Effets capillaires.

Keywords: Capillary pressure, Liquid Resin Infusion process, Capillary effects.

1. Introduction

Les matériaux composites connaissent aujourd'hui un fort développement, en particulier pour l'élaboration de structures primaires aéronautiques à base de fibres de carbone. Toutefois, les coûts associés à leur mise en œuvre restent importants. Pour répondre à cette problématique, le développement de nouvelles architectures fibreuses Uni-Directionnelle (UD) dédiées aux procédés par infusion (Fig. 1) constitue une avancée significative [1]. Pour cela, la mise en place d'outils de simulation robustes et prédictifs de ces procédés de fabrication est décisive pour valider l'ensemble

géométrie-matériaux-procédé associé à une pièce, et apporter les moyens de compréhension permettant d'optimiser le procédé. Ces travaux sont au cœur de la Chaire Industrielle entre Mines de St-Étienne et la société Hexcel. Dans le contexte des procédés d'élaboration de matériaux intrinsèquement multi-échelles comme les composites, les modélisations et simulations associées dépendent directement de l'échelle de représentation (échelles microscopique, mésoscopique ou macroscopique, cf. Fig. 1). La tentation de recourir à une description spatiale extrêmement fine des phénomènes est grande. Cependant, les temps de calcul associés sont souvent incompatibles avec les applications industrielles. Pour autant, cette démarche peut s'avérer très précieuse pour peu qu'on soit capable d'extraire des simulations réalisées sur des volumes supposés représentatifs, les informations nécessaires à la description des phénomènes qui interagissent aux échelles locales. Ainsi, l'étude présentée ici vise à modéliser puis simuler, à travers ces principales échelles d'observation des composites, de l'échelle des fibres ($\sim\mu\text{m}$) à l'échelle du procédé ($\sim\text{m}$), les procédés par infusion de résine. Sur la base de développements numériques importants déjà réalisés à l'échelle macroscopique, la modélisation de l'écoulement de la résine dans le procédé par infusion est réalisée au moyen d'une approche monolithique par éléments-finis du couplage Stokes-Darcy, associé à un modèle de mécanique en grandes transformations [1]. Les méthodes numériques utilisées sont capables de prendre en compte les propriétés fortement anisotropes des matériaux (perméabilités et comportement mécanique), ainsi que les différentes interfaces (Stokes-Darcy et front de fluide) qui évoluent au cours du procédé. Malgré la richesse et la pertinence de ces approches à l'échelle du procédé, de nombreux aspects ne sont pas pris en compte comme les phénomènes capillaires et de mouillage, pouvant se traduire par exemple par la formation de porosités [2]. A l'échelle de la pièce, *i.e.* l'échelle du milieu homogène équivalent, ces phénomènes locaux sont pris en compte via une pression capillaire appliquée au front de fluide, lui-même décrit par une fonction *level-set* [3]. Cependant, il est nécessaire de caractériser ou d'estimer ces pressions capillaires, soit à partir d'expériences d'imprégnation de milieux poreux [4], soit à partir de simulations numériques à l'échelle locale de ces phénomènes pilotés par les tensions de surface [5,8].

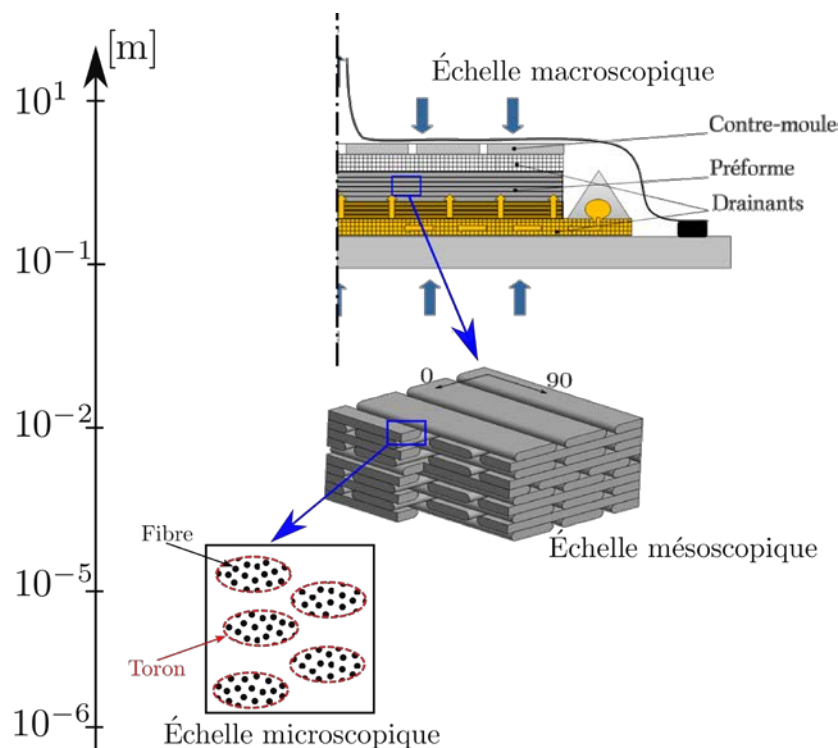


Fig. 1. Schéma de principe du procédé par infusion et échelles de représentation.

2. Modélisation de l'écoulement à l'échelle microscopique des fibres

Soit Ω le domaine de calcul de dimension spatiale 2 ou 3, décrivant une microstructure fibreuse dans laquelle s'écoule un liquide supposé newtonien. Les fibres sont rigides et donc représentées par des "trous" dans le domaine Ω (Fig. 2). Le domaine contient également un "milieu environnant", ou phase gazeuse, de sorte que $\Omega = \Omega_l \cup \Omega_g$, avec Ω_l et Ω_g les parties occupées, respectivement, par le liquide et le gaz. L'interface liquide-gaz est notée Γ_{lg} , tandis que Γ_{ls} et Γ_{gs} représentent les interfaces liquide-solide et gaz-solide. Enfin, les jonctions triples (P en Fig.2) sont définies comme les intersections de ces trois interfaces.

Le liquide et le milieu environnant sont considérés comme deux fluides newtoniens et incompressibles de viscosités respectives η_l et η_g et de masses volumiques ρ_l et ρ_g . Il ne s'agit en effet pas de décrire précisément la dynamique du gaz, mais, dans une approche eulérienne, de prolonger les champs vitesse et pression v et p dans tout le domaine de calcul sans perturber l'écoulement du liquide. Nous négligeons ici les effets d'inertie, si bien que la conservation de la quantité de mouvement et de la masse conduisent au système de Stokes suivant :

$$-\nabla \cdot (2\eta \dot{\epsilon}(v)) + \nabla p = \rho g \quad \text{dans } \Omega \quad (1)$$

$$\nabla \cdot v = 0 \quad \text{dans } \Omega \quad (2)$$

où $\dot{\epsilon}(v)$ est la partie symétrique du gradient de vitesse, g la gravité, η valant η_l dans Ω_l , η_g dans Ω_g , et ρ , ρ_l dans Ω_l , ρ_g dans Ω_g . Le système de Stokes est fermé par les conditions aux bords (conditions de type Neumann *i.e* condition sur la contrainte normale $\sigma \cdot n$ ou de Dirichlet *i.e* conditions sur la vitesse) et caractérisant les écoulements capillaires. Ces dernières seront données dans la suite. La description 2D faite ici est étendue au 3D dans [7].

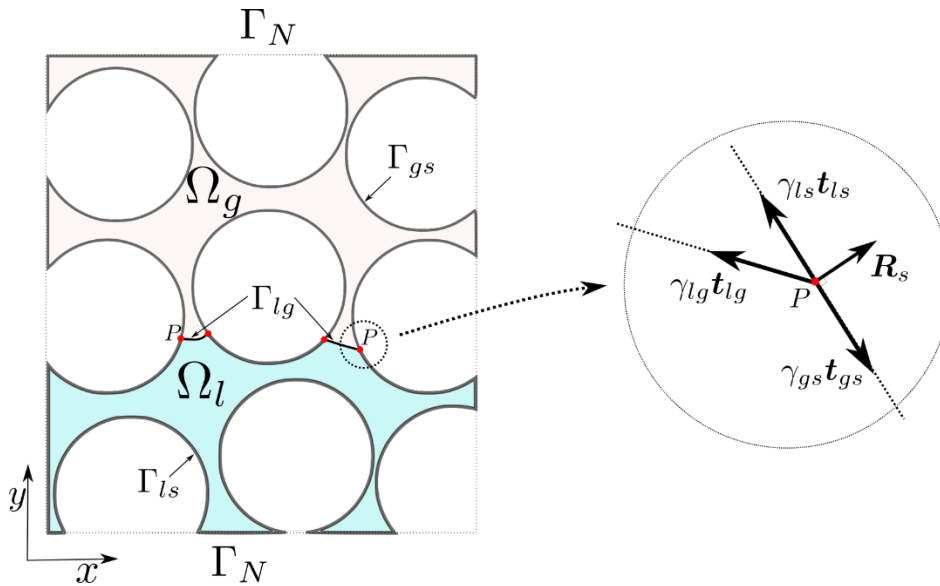


Fig. 2. Définition du domaine de calcul à l'échelle des fibres (échelle microscopique).

2.1 Équilibre mécanique des interfaces

Interface liquide - gaz.

Dû à la présence de trois phases, l'équation de Laplace doit être vérifiée sur chaque interface pour décrire le saut de contrainte. L'équilibre des forces sur l'interface Γ_{lg} conduit à [5,7] :

$$[\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}]_{\Gamma_{lg}} = -\frac{d}{ds}(\gamma_{lg} \mathbf{t}_{lg}) \quad (3)$$

où $[\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}]_{\Gamma_{lg}}$ désigne le saut du vecteur contrainte à l'interface. Remarquons qu'en développant le membre de droite de cette expression, on retrouve d'une part le fait que le saut de contrainte normale est dû à la courbure moyenne (notée κ) de l'interface (loi de Laplace), et d'autre part que le saut de contrainte tangentielle est lié à la variation de γ_{lg} le long de l'interface (effets Marangoni, ici négligés).

Interfaces fluides - solide.

Le solide étant supposé rigide et représenté par un bord du domaine de calcul, les considérations précédentes permettent d'écrire :

$$\boldsymbol{\sigma}_l \cdot \mathbf{n} = \frac{d}{ds}(\gamma_{lg} \mathbf{t}_{ls}) \text{ sur } \Gamma_{ls} \text{ et } \boldsymbol{\sigma}_l \cdot \mathbf{n} = \frac{d}{ds}(\gamma_{lg} \mathbf{t}_{gs}) \text{ sur } \Gamma_{gs} \quad (4)$$

Une condition de frottement, de type Navier, peut également être ajoutée à (4) [5,7].

Équilibre mécanique aux jonctions triples.

Les jonctions triples entre les différentes phases (liquide, gaz et solide) sont définies comme les intersections des interfaces Γ_{lg} , Γ_{ls} et Γ_{gs} . Dans le cas 2D de la Fig. 2, ce sont l'ensemble des points P. La condition d'équilibre aux niveaux de ces points triples (lignes triples en 3D) s'écrit :

$$\gamma_{lg} \mathbf{t}_{lg} + \gamma_{ls} \mathbf{t}_{ls} + \gamma_{gs} \mathbf{t}_{gs} = -\mathbf{R}_s \quad (5)$$

où \mathbf{R}_s est la réaction du solide, ici orthogonale à la surface du solide car celui-ci est rigide. Ce vecteur sera considéré comme inopérant dans la suite.

3. Stratégie numérique

Nous utilisons une méthode de type éléments finis stabilisée pour résoudre le système précédent, combinée à une approche *level-set* pour décrire l'évolution de l'interface liquide - gaz. Les tensions de surface sur les interfaces (Solide/Gaz et Solide/Liquide) sont appliquées sur le bord du maillage. Cependant, le front de fluide (interface liquide-gaz), doit être représenté explicitement pour pouvoir y appliquer la force de tension de surface. Cela est obtenu par l'utilisation d'une fonction *level-set* combinée à une méthode de reconstruction d'interface (méthode SLR [8])

Le système de Stokes (Eq. 1, 2) est résolu par éléments finis en utilisant des approximations linéaires en vitesse et pression au sein de l'élément. Ces éléments ne vérifiant pas la condition de stabilité LBB, une stabilisation *Algebraic SubGrid Scale* [3,7,8] est utilisée. L'idée directrice de la stabilisation est de décomposer la vitesse et la pression comme la somme d'une solution aux échelles éléments finis et sous-grille. La solution sous-grille doit alors être modélisée. Par choix, la vitesse à l'échelle sous-grille s'écrit proportionnellement au résidu éléments finis de l'équation de conservation de mouvement et le terme de pression sous-grille est pris proportionnel au résidu éléments finis de l'équation de conservation de la masse.

La stratégie numérique exposée ci-dessus a été implantée dans le logiciel éléments finis Z-Set. Sa pertinence est évaluée dans les références [3,5,7,8] sur des cas d'étalement de goutte et de montées

capillaires. En particulier, l'angle de contact déduit de l'équilibre au point triple (5) par la loi de Young - Laplace est bien retrouvé. Dans ce travail, nous présentons des simulations de montées capillaires dans deux microstructures différentes, et ébauchons un premier calcul de pression capillaire. Les deux structures considérées (Fig. 3) sont un arrangement hexagonal de fibres circulaires disposées en quinconce (structure 1) présentant un taux volumique de fibres (TVF) de 52%, et une microstructure aléatoire (structure 2) constituée de fibres circulaires identiques avec un TVF de 45 % [9]. Dans ces structures, le rayon des fibres est de $5\mu\text{m}$. Les tensions et énergies de surface sont $\gamma_{lg} = 37.03 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, $\gamma_{ls} = 30.03 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ et $\gamma_{gs} = 60.93 \times 10^{-3} \text{ N/m}$. De plus, la viscosité du liquide est $\eta_l = 10^{-3} \text{ Pa.s}$, celle du milieu environnant $\eta_g = 1.71 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$, et la gravité est négligée. La Fig. 2 montre la vitesse, la pression, et les lignes de courant lors d'une montée dans les structures 1 et 2. Le front de fluide est représenté en vert pour un instant donné dans le cas aléatoire.

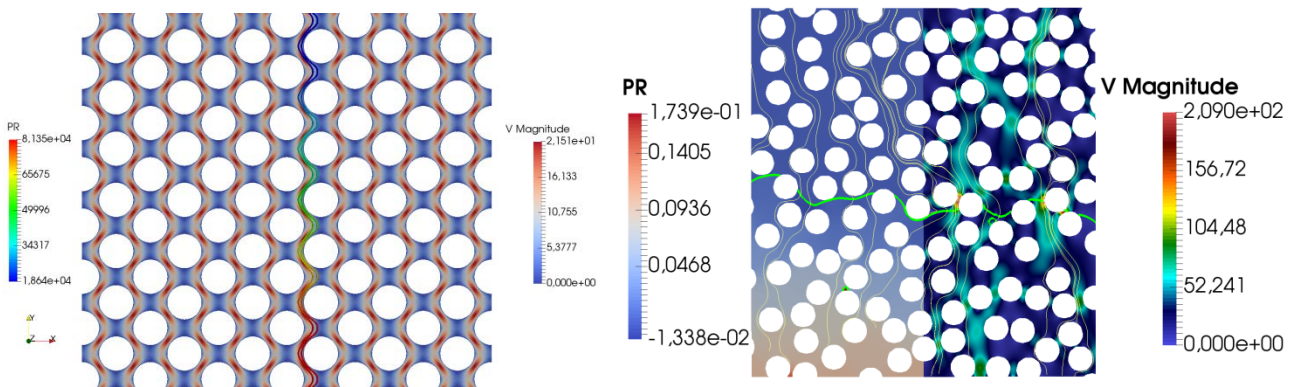


Fig. 3. Structures fibreuses considérées ; quinconce (gauche) et aléatoire (droite).

4. Détermination d'une pression capillaire numérique

Nous présentons d'abord le cas d'une montée capillaire dans l'empilement hexagonal. Le différentiel de pression considéré ici est nul : $p_{\text{ext}} = 0$, $\Delta p = 0$. La Fig. 4 montre la hauteur moyenne du front fluide $h(t)$, ainsi que $p_{\text{cap}} \times K$, i.e. le produit de la pression capillaire et de la perméabilité calculé à partir d'une équivalence avec Darcy [8]. En dehors des premiers instants de la montée (instabilité à $t = 0$), $p_{\text{cap}} \times K$ fluctue autour d'une valeur stationnaire de $1,0 \times 10^{-8} \text{ Pa.m}^2$, ce qui correspond à une pression capillaire $p_{\text{cap}} \approx 0,44 \text{ bar}$ (en utilisant une valeur estimée de la perméabilité numérique [9]). Ces résultats signifient également que la position moyenne du front fluide, $h(t)$, donnée ici par un écoulement de Stokes avec la capillarité comme seule force motrice, est fonction de la racine carrée du temps, comme le montre le médaillon de la Fig. 4 où est tracé $h^2(t)$, ou encore que la vitesse moyenne de ce front décroît en $1/h(t)$. Considérons à présent un écoulement dans une structure aléatoire à 48% de fibres (Fig. 3 droite). Dans cette structure, une montée capillaire spontanée est impossible, l'espacement entre certaines fibres étant trop important. Une force motrice supplémentaire, engendrée par un différentiel de pression, est donc nécessaire pour forcer l'écoulement. Ici, $p_{\text{ext}} = 2 \text{ kPa}$ est imposé sur le bord entrant, $p_{\text{ext}} = 0$ sur le bord sortant, si bien que $\Delta p = -2 \text{ kPa}$. La Fig. 5 (gauche) présente comme précédemment la hauteur moyenne $h(t)$ du front fluide durant la montée ainsi que $h^2(t)$. $(p_{\text{cap}} - \Delta p)K$, est calculée de la même manière que précédemment [8] et tracée en Fig. 5 droite. Malgré le caractère aléatoire de la structure, i.e. la variation de l'espacement des fibres, et son effet sur la régularité de l'imprégnation, on constate que h dépend encore de la racine carrée du temps. En dehors des premiers instants, la valeur de $(p_{\text{cap}} - \Delta p)K$ est constante, égale à $7,3 \times 10^{-9} \text{ Pa.m}^2$, ce qui correspond à une pression capillaire $p_{\text{cap}} \approx 0,15 \text{ bar}$ (avec une perméabilité estimée de la même façon que précédemment [8]). Les valeurs de pression capillaire trouvées ici, inférieures à celles obtenues dans la structure hexagonale, traduisent le fait que cette microstructure aléatoire est moins favorable aux phénomènes capillaires.

Cependant, une étude plus détaillée est nécessaire, notamment pour connaître l'influence du différentiel de pression imposé et ainsi conclure sur leur pertinence.

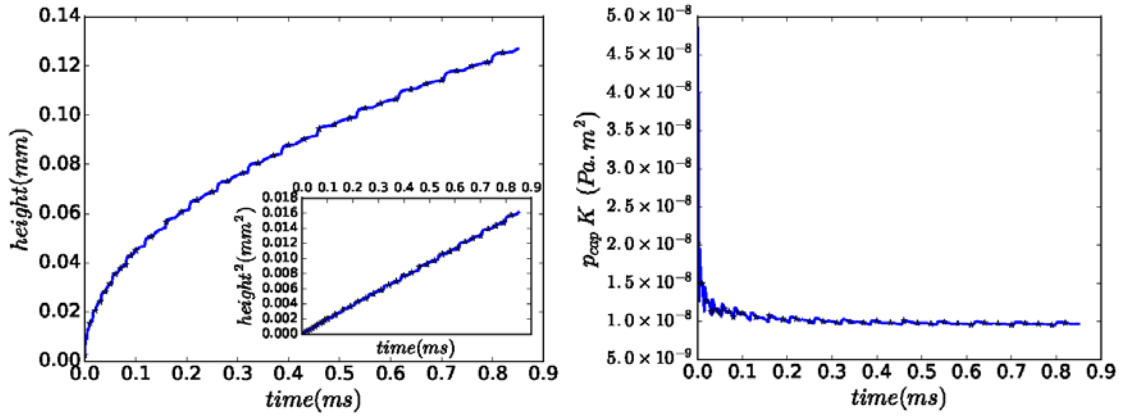


Fig. 4. Hauteur moyenne du fluide lors d'une imprégnation spontanée de la structure en quinconce (gauche) et calcul de pression capillaire à la perméabilité près (droite).

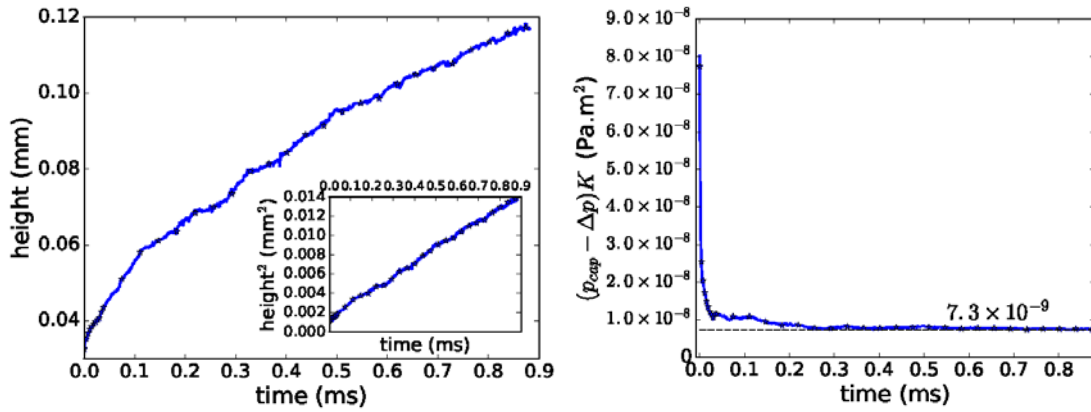


Fig. 5. Hauteur moyenne du fluide lors d'une imprégnation de la structure aléatoire (gauche) et calcul de pression capillaire à la perméabilité près (droite).

5. Prise en compte de la pression capillaire numérique à l'échelle du procédé

Les valeurs obtenues par le calcul dans les paragraphes précédents peuvent être exportées à l'échelle du procédé (ou de la pièce composite). Pour cela, les phénomènes capillaires sont modélisés à cette échelle par un tenseur de contraintes capillaires (prenant en compte les pressions capillaires estimées dans les directions principales du renfort) au front de fluide :

$$\boldsymbol{\sigma}_{cap} = \begin{pmatrix} \sigma_{cap}^x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{cap}^y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{cap}^z \end{pmatrix} \quad (6)$$

Ces phénomènes capillaires impliquent un saut de pression au travers du front de fluide, qui s'exprime de la manière suivante :

$$[p] = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{cap} \mathbf{n} \quad (7)$$

où \mathbf{n} est la normale sortante au front de fluide. La difficulté d'une telle approche réside dans la prise en compte de la discontinuité du champ de pression associée dans l'écoulement du fluide au sein de milieu fibreux (décrit par l'équation de Darcy) [3].

La Fig. 6 présente la géométrie du calcul et la Fig. 7 présente les résultats de celui-ci à différents temps de simulation. Il apparaît alors clairement que, selon les hypothèses posées, les effets capillaires accélèrent significativement le front de fluide. Cet effet est d'autant plus marqué dans « la voile » du T, car l'orthotropie des effets capillaires les rends prédominant dans cette partie de l'écoulement (écoulement dans le plan des plis et non dans le sens transverse). La prochaine étape sera bien évidemment de croiser ces résultats de calcul avec des résultats expérimentaux.

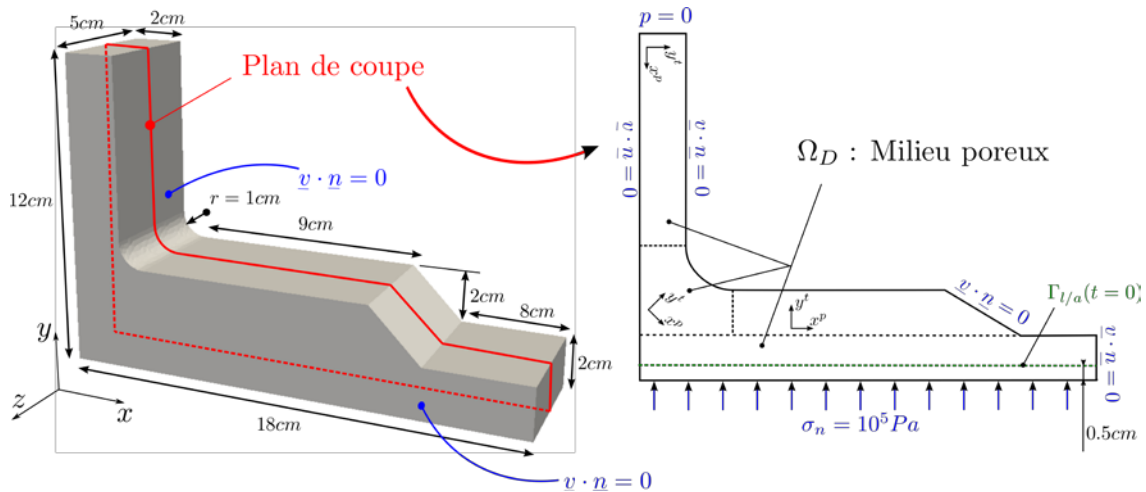


Fig. 6. Schéma d'une partie de panneau auto-raïdi en « T » utilisé en aéronautique.

6. Conclusions

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation et à la simulation des procédés par infusion à différentes échelles en intégrant les phénomènes capillaires. La modélisation des écoulements locaux associée à des prises de moyennes permet d'estimer les perméabilités et les pressions capillaires dans des microstructures idéalisées (structures hexagonale ou aléatoire). Ces informations sont ensuite exportées aux échelles supérieures. Les phénomènes capillaires sont alors modélisés à l'échelle du procédé (macroscopique) par le biais d'une pression capillaire, générant une discontinuité du champ de pression au niveau du front de fluide. L'une des originalités de l'approche est de proposer un cadre numérique commun pour traiter les écoulements décrits par des modèles de Stokes et/ou Darcy. Des méthodes numériques spécifiques de stabilisation et d'enrichissements ont été mises en place pour prendre en compte les discontinuités inhérentes aux phénomènes capillaires (saut de vecteur contrainte) et au contraste de propriétés (viscosités, densités). La transition entre ces échelles est délicate, pour cela une échelle de représentation intermédiaire (échelle mésoscopique) peut également être considérée. Les écoulements doivent alors intégrer une pression capillaire au niveau des mèches (paquets de fibres) vus comme des milieux poreux homogènes équivalents; la résine s'écoulant entre et dans les torons. Des travaux futurs sur l'étude des effets capillaires à l'échelle mésoscopique pourraient être envisagés dans le but d'analyser différents scénarios d'écoulement et donc la formation des micro/macro-porosités engendrée par la compétition entre les phénomènes capillaires et visqueux

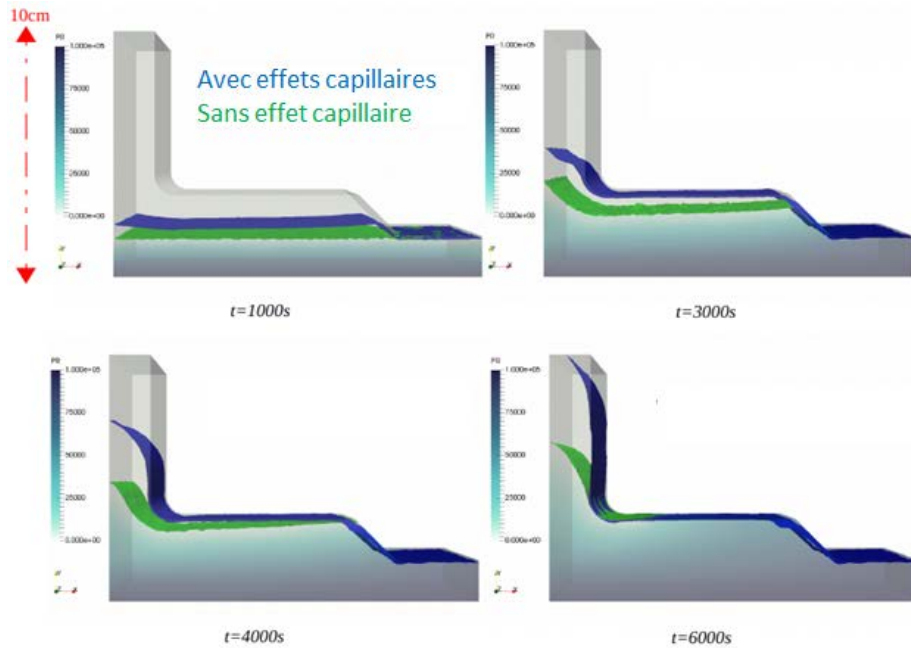


Fig. 7. Comparaison de l'imprégnation des renforts du raidisseur en considérant ou non les effets capillaires à travers une contrainte capillaire (« pression capillaire orthotrope »).

Remerciements

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de la Chaire Hexcel-Mines Saint-Étienne. Les auteurs remercient la société Hexcel pour le soutien financier.

Références

- [1] M. Blais, N. Moulin, P.-J. Liotier, S. Drapier « Resin infusion-based processes simulation : coupled Stokes-Darcy flows in orthotropic preforms undergoing finite strain », *International Journal of Material Forming* Vol. 10 n° 1, pp. 43–54, 2017.
- [2] J. Bréard, Y. Henzel, F. Trochu, R. Gauvin « Analysis of dynamic flows through porous media. Part I : Comparison between saturated and unsaturated flows in fibrous reinforcements », *Polymer Composites* Vol. 24 n° 3.
- [3] K. Andriamananjara, N. Moulin, J. Bruchon, P.-J. Liotier, 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, *Int J Mater Form*, accepté pour publication, 2018, <https://doi.org/10.1007/s12289-018-1442-3>.
- [4] M. F. Pucci, P.-J. Liotier, S. Drapier « Capillary wicking in a fibrous reinforcement - Orthotropic issues to determine the capillary pressure components », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 77, pp. 133–141, 2015.
- [5] L. Chevalier, J. Bruchon, N. Moulin, P.-J. Liotier, S. Drapier « Accounting for local capillary effects in two-phase flows with relaxed surface tension formulation in enriched finite elements », *Comptes Rendus Mécanique* Vol. 346 n° 8, pp. 617–633, 2018.
- [6] R. F. Ausas, F. S. Sousa, G. C. Buscaglia « An improved finite element space for discontinuous pressures », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 199 n° 17-20, pp. 1019–1031, 2010.
- [7] J. Bruchon, Y. Liu, N. Moulin. Finite element setting for fluid flow simulations with natural enforcement of the triple junction equilibrium, *Comput. Fluids*, 103-121, 2018.

- [8] L. Chevalier. Accounting for capillary effects in level-set based Finite Elements modelling of impregnation in fibrous media, Thèse de doctorat, École des Mines de Saint-Étienne, 11 mars 2019.
- [9] C. Mattrand, A Béakou, K. Charlet. Numerical modeling of the flax fiber morphology variability, Composites Part A, 10-20, 2014.