

Simulation numérique de l'écoulement de la résine dans un milieu poreux double-échelle : prise en compte des effets capillaires

Numerical simulation of resin flow in a dual-scale porous media: accounting for capillary effects

Mouadh BOUBAKER¹, Arthur CANTAREL^{1,3} et Gérald DEBENEST²

1 : Institut Clément Ader, Université de Toulouse, CNRS UMR 5312, IMT Mines Albi, UPS, INSA, ISAE-SUPAERO
e-mail : MOUADH.BOUBAKER@iut-tarbes.fr, arthur.cantarel@iut-tarbes.fr

2 : INPT, UPS, IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse), Université de Toulouse, Allée Camille Soula, 31400, Toulouse, France

e-mail : gerald.debenest@toulouse-inp.fr

3 : UTTOP (Université de Technologie de Tarbes Occitanie Pyrénées)

Résumé

Les procédés par voie liquide (LCM - Liquid Composites Molding) sont largement utilisés pour produire des matériaux composites de haute qualité. Ces procédés impliquent l'injection d'une résine liquide dans un renfort textile à double échelle de pores, où la résine s'écoule à la fois dans les espaces inter-mèches et intra-mèches. Les forces capillaires jouent un rôle crucial dans la circulation de la résine au sein des mèches. Par conséquent, une modélisation précise des effets capillaires est essentielle pour un modèle complet des procédés LCM. Cette étude propose un modèle numérique robuste pour simuler l'imprégnation de résine liquide, dans un milieu poreux à double échelle à l'échelle mésoscopique, en intégrant les effets capillaires. L'effet de la pression capillaire sur la saturation du domaine et les profils de pression est étudié. Pour simuler l'écoulement de la résine au sein d'un renfort réel numérisé, un modèle numérique d'écoulements multiphasiques, multi-échelle sera ensuite utilisé. Des images expérimentales de l'avancement du front d'écoulement, ainsi que des mesures de perméabilité insaturée du textile, seront utilisées pour valider les résultats de la simulation numérique.

Abstract

Liquid Composite Molding (LCM) processes are widely used to produce high-quality composite materials. These processes involve injecting liquid resin into a dual-scale fabric reinforcement, where resin flows through both inter-tow and intra-tow spaces. Capillary forces play a crucial role in driving resin flow within the fibrous tows. This study proposes a robust numerical model to simulate liquid resin impregnation in a dual-scale porous medium at the mesoscale, incorporating capillary effects. The impact of capillary pressure on domain saturation and pressure profiles is investigated. The multiphase multiscale numerical model is then applied to simulate resin flow within a real digitized reinforcement. Experimental images of flow front advancement and measurements of unsaturated permeability are used to validate the numerical simulation results.

Mots Clés : LCM – Simulation numérique – Effets capillaires - écoulements multiphasique multi-échelles.

Keywords : LCM – Numerical simulation – Capillary effects – Multiphase multiscale flow.

1. Introduction

En raison de leurs excellentes propriétés mécaniques alliées à une faible densité, la demande en matériaux composites est en constante augmentation dans divers domaines industriels tels que l'aéronautique, l'aérospatial et la construction navale. Les procédés par voie liquide ou Liquid Composites Molding (LCM) répondent à cette demande en offrant une grande flexibilité de fabrication de pièces de haute qualité. Ces procédés consistent à injecter une résine liquide dans un moule contenant un renfort textile sec. Les tissus utilisés en LCM présentent généralement une structure complexe à double échelle de pores. Les mèches sont constituées de fibres individuelles regroupées en faisceaux de plusieurs milliers de fibres avant d'être assemblées pour former des UD,

des tissus ou des tresses (Fig. 1). Cette structure crée deux réseaux poreux distincts : un réseau inter-mèches, très perméable, où l'espace libre entre les mèches est de l'ordre du mm , et un réseau intramèche, beaucoup moins perméable, où les fibres sont séparées par des distances de l'ordre de μm .

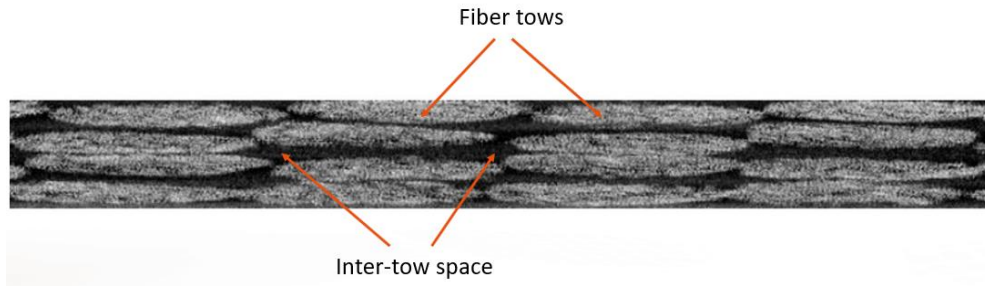


Fig. 1 : Structure double-échelle d'un textile utilisé pour les composites [1].

La résine imprègne ces deux régions à des vitesses très différentes : un écoulement rapide et macroscopique dans l'espace inter-mèches contraste avec un écoulement lent et microscopique à l'intérieur des mèches. Cette disparité de vitesses, pouvant atteindre plusieurs ordres de grandeur [2], engendre une progression non uniforme du front d'imprégnation et favorise ainsi la formation de vides. L'optimisation des conditions d'injection est donc cruciale pour minimiser ces défauts.

L'infiltration de la résine au sein des faisceaux de fibres est fortement influencée par la pression capillaire au front d'écoulement. Celle-ci dépend de plusieurs paramètres, notamment la fraction volumique de fibres, la tension superficielle résine-air, le rayon des fibres et l'angle de contact. Pour les faisceaux à faible perméabilité, couramment utilisés dans les composites avancés, l'effet de la pression capillaire est particulièrement marqué [3, 4]. Les phénomènes capillaires, résultant des interactions entre la résine, l'air et les fibres, jouent un rôle crucial dans l'imprégnation et influent directement sur la qualité finale du composite. Une modélisation précise de ces phénomènes est donc indispensable pour simuler de manière réaliste les procédés LCM.

Au cours de l'étape d'imprégnation, la résine visqueuse déplace l'air présent dans le tissu, formant un écoulement diphasique dans un milieu poreux complexe. Dans le cadre de la simulation numérique, ce type d'écoulement doit être correctement modélisé afin de capturer la position exacte du front et d'empêcher l'émergence de vitesses parasites non physiques [5]. Dans ce travail, un solveur multiphasique multi-échelle open-source, appelé *hybridPorousInterFoam*, basé sur l'approche de Darcy-Brinkman, est utilisé pour simuler l'écoulement diphasique de la résine dans un renfort fibreuse à double échelle de pores. Il permet de décrire de manière unifiée l'écoulement dans les régions poreuses (équations de Darcy) et dans les régions libres de solides (équations de Navier-Stokes) [6].

Le solveur *hybridPorousInterFoam* repose sur un modèle micro-continuum à champ unique, décrivant l'écoulement diphasique dans un milieu poreux rigide à l'aide de trois équations : conservation de la masse, de la saturation et de la quantité de mouvement. Cette dernière inclut des termes spécifiques pour rendre compte des effets à multiples échelles : un terme de force de traînée et un terme de force capillaire lié à la pression capillaire macroscopique. Cette modélisation des effets capillaires, couplée à l'approche multi-échelle, rend le solveur particulièrement adapté à la simulation de l'imprégnation de résine dans des matériaux poreux complexes comme ceux rencontrés en LCM.

La section 2 se concentre sur l'étude de l'influence de la pression capillaire sur l'écoulement de la résine au sein de la structure poreuse à double échelle. Dans la section 3, nous mettrons en œuvre le modèle numérique pour simuler l'écoulement d'une résine liquide au sein d'un renfort réel. En comparant les résultats de ces simulations (avancement du front de fluide, perméabilité insaturée)

avec des données expérimentales, nous validerons la capacité du modèle à reproduire les phénomènes physiques observés en pratique.

2. Etude de l'influence de la pression capillaire sur l'écoulement

La capillarité, phénomène régi par les tensions superficielles et interfaciales, permet à un liquide de s'élever dans un milieu poreux sans l'aide de forces externes [7]. Dans le contexte des procédés LCM, la différence de tension superficielle entre la résine et l'air engendre une pression capillaire qui pilote l'écoulement, en particulier au niveau du front d'imprégnation. Bien que souvent négligés dans les procédés à haute pression, les effets capillaires peuvent atteindre des valeurs significatives, notamment dans les tissus à faible perméabilité, et influencer significativement le remplissage des cavités [8,9]. La caractérisation précise de ces effets reste un défi majeur en raison de la complexité des interactions à l'échelle microscopique et de la nécessité de considérer des échelles de temps et d'espace multiples.

Afin d'évaluer l'influence des effets capillaires sur l'écoulement de la résine à l'échelle mésoscopique, une géométrie textile 3D tissée plane idéalisée est considérée. Un volume élémentaire représentatif (VER), comprenant 2 mèches dans le sens chaîne et 2 dans le sens trame (Fig. 2), est examiné dans ce cas.

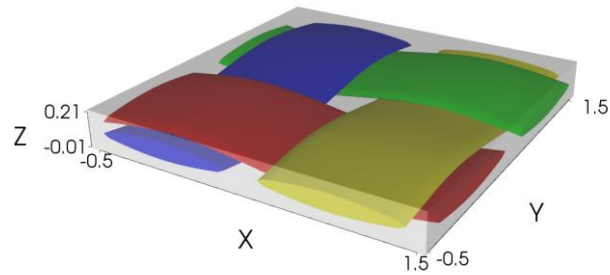


Fig. 2: Géométrie utilisée dans les simulations générée avec TexGen [10]

La perméabilité des mèches a été approchée en utilisant la formule de Gebart [11] pour un arrangement de fibres hexagonales, en supposant une fraction volumique de fibres de 0.6 et un rayon de fibre de $12 \mu\text{m}$. L'écoulement a été simulé suivant la direction y , avec une perméabilité longitudinale K_{\parallel} attribuée aux mèches dans la direction y et la perméabilité transversale K_{\perp} attribuée aux mèches dans la direction perpendiculaire x . Les paramètres d'écoulement sont décrits dans le Tableau 1. Le fluide est injecté dans le domaine par un gradient de pression appliqué entre l'entrée et la sortie, tandis que le domaine est initialement supposé saturé d'air.

Paramètre	Valeur
$V_f \text{ mèche}$	0.6
K_{\parallel}	$3.864 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$
K_{\perp}	$8.388 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$
μ_{fluide}	$2 \cdot 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Tab. 1. Paramètres de la simulation

Le modèle de pression capillaire utilisé dans ce cas est le modèle de Van Genuchten donné par l'équation suivante :

$$-p_c = p_{c0} \left(\alpha_{l,pc}^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{1-m} \quad (\text{Eq. 1})$$

avec p_{c0} la pression capillaire d'entrée et m un paramètre représentant la distribution de taille de pore.

Le gradient de pression est fixé à $\Delta P = 20 \text{ kPa}$ et trois valeurs de pression capillaire d'entrée $p_{c0} = 10 \text{ Pa}$, 100 Pa et 1000 Pa sont étudiées. Comme observé dans la Fig. 3, une pression capillaire plus élevée entraîne une saturation accrue du domaine fibreux.

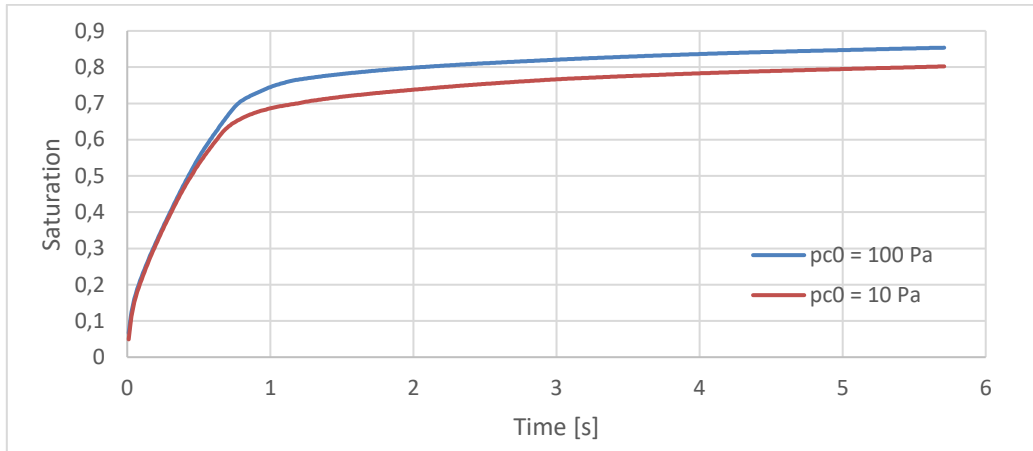


Fig. 3: Effet de la pression capillaire sur la saturation du domaine.

Afin de mieux comprendre l'influence de la pression capillaire sur la dynamique de l'écoulement dans les milieux poreux à double échelle, nous avons analysé le profil de pression le long d'un axe central du VER (Fig. 4).



Fig. 4: Axe central considéré.

La pression capillaire exerce une influence significative sur l'imprégnation, tant au niveau global qu'au niveau local. Comme le montrent les Figures 5 et 6, la pression capillaire réduit à la fois le plateau de pression global et l'amplitude du plateau entre les mèches, facilitant ainsi l'écoulement du fluide à travers le matériau poreux.

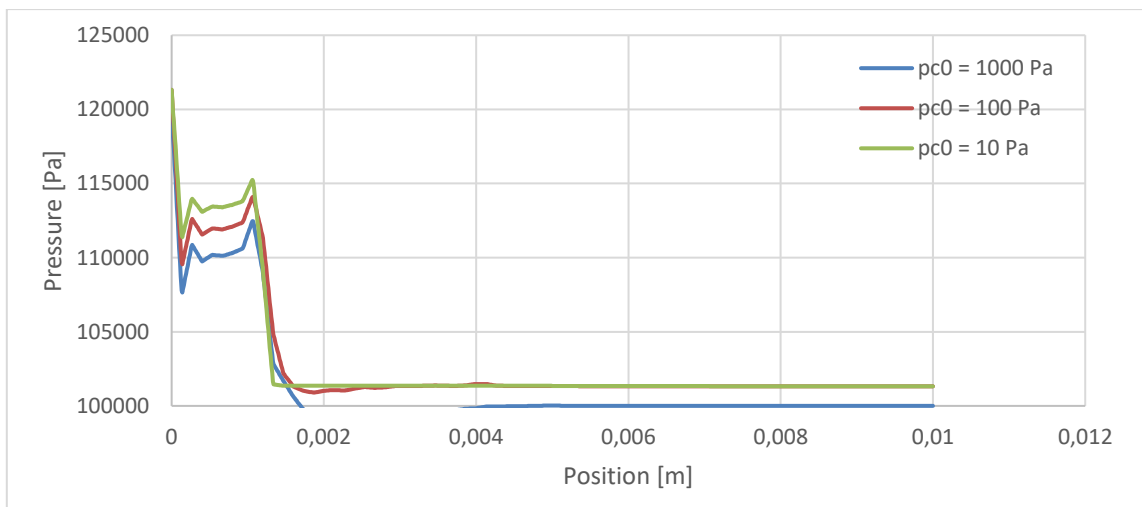


Fig. 5: Effet de la pression capillaire sur le profil de pression à $t = 0.1s$.

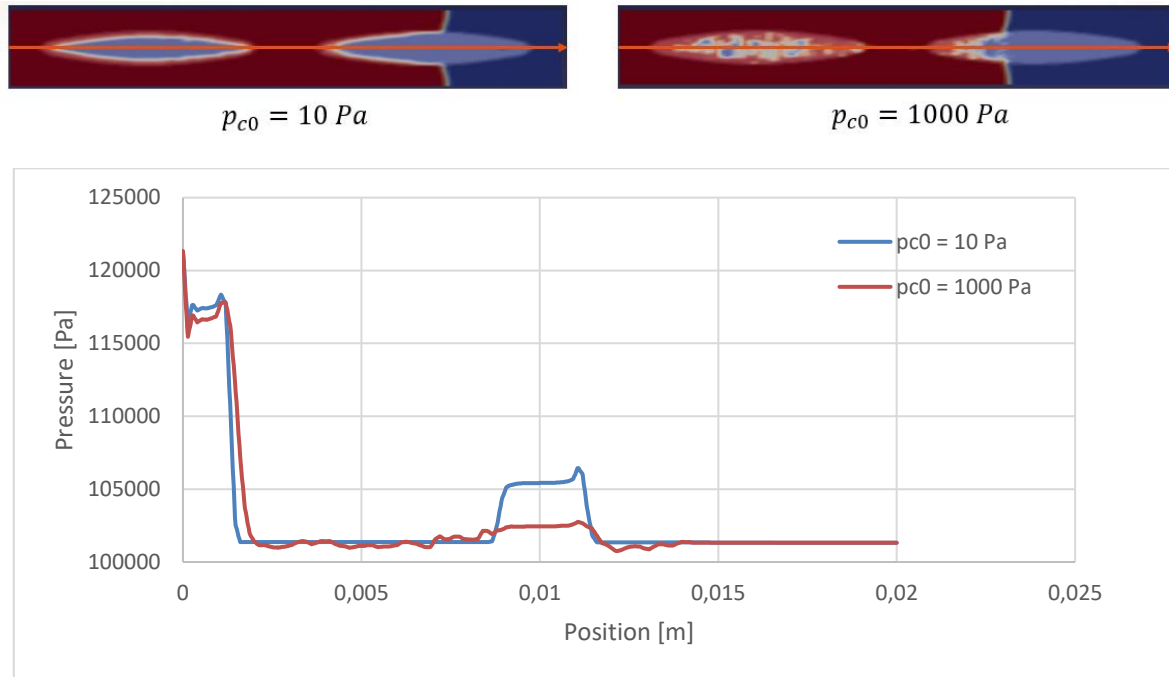
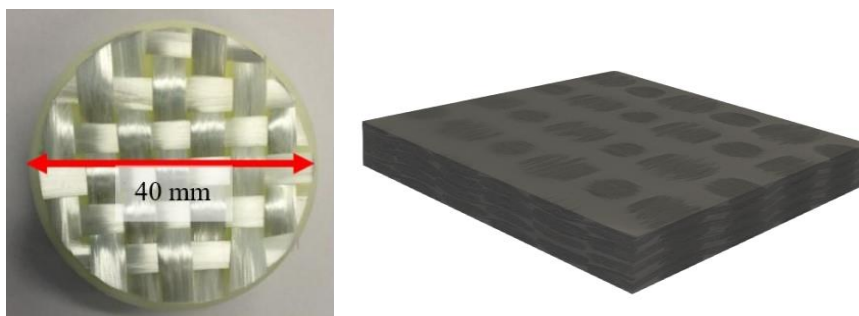


Fig. 6: Effet de la pression capillaire sur le profil de pression à $t=2.1s$.

Afin de simuler de manière réaliste les procédés LCM et de prédire les performances des pièces composites, il est essentiel de prendre en compte les effets de la pression capillaire. Les résultats présentés dans cette section démontrent que la pression capillaire joue un rôle majeur dans l'écoulement de la résine et qu'une modélisation précise de ce phénomène est indispensable pour optimiser les procédés de fabrication.

3. Simulation numérique de l'imprégnation de la résine dans un renfort réel numérisé

Afin de simuler l'imprégnation de résine dans une géométrie réaliste, nous avons utilisé un renfort taffetas de verre caractérisé par une densité linéaire de 2400 g/km et un poids surfacique nominal de 800 g/m^2 . Un échantillon à quatre plis d'un diamètre de 40 mm (Fig. 7(a)) a été préparé et numérisé à différents niveaux de compaction, à l'aide d'un tomographe, résultant en des géométries 3D pour trois fractions volumiques de fibres distinctes : 0.5, 0.55 et 0.6 (Figure 7(b)).



(a) Echantillon réel

(b) Géométrie numérisée en niveaux de gris

Fig. 7 : Géométrie scannée utilisée dans la simulation numérique.

Les résultats des simulations numériques ont été comparés aux données expérimentales obtenues dans une étude précédente [12] sur le même taffetas de verre. Le traitement des images d'écoulement à

l'aide de MATLAB R2024b a permis d'extraire les formes et les niveaux d'avancement du front d'écoulement expérimental. Comme le montre la Figure 8, une bonne concordance a été observée entre les résultats numériques et expérimentaux, validant ainsi notre modèle de simulation.



Fig. 8 : Comparaison de l'avancement du front fluide.

La perméabilité insaturée, déterminante pour la cinétique d'imprégnation, a été estimée numériquement pour différentes fractions volumiques de fibres à l'aide de l'équation (Eq. 2).

$$K_{unsat} = \frac{x_f^2(t) \mu(1-V_f)}{t P_{in}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Les résultats obtenus, en bon accord avec les données expérimentales de [12] (Figure 9), attestent de la précision de notre modèle numérique dans la prédiction de ce paramètre crucial.

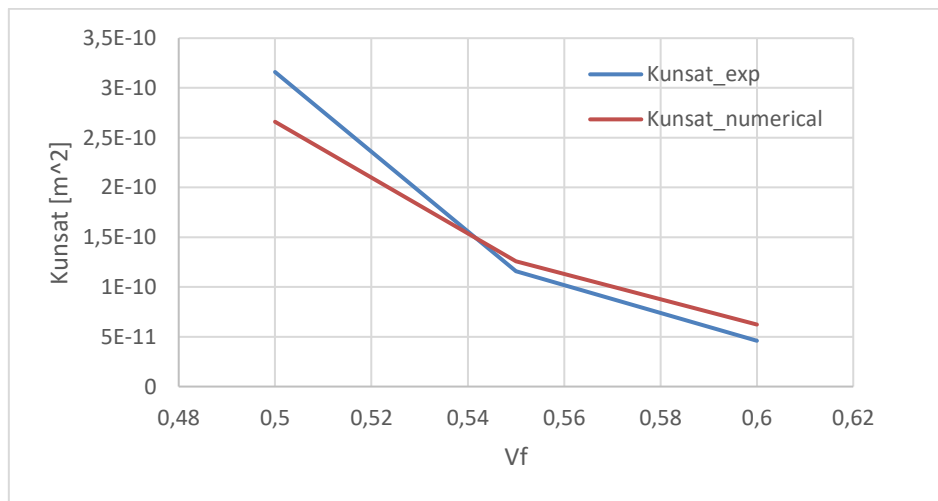


Fig. 9 : Comparaison des perméabilités insaturées numériques et expérimentales.

4. Conclusions

Cette étude présente un modèle numérique multiphasique multi-échelle qui simule l'écoulement de la résine à travers un domaine poreux à double échelle, intégrant les effets capillaires grâce à des paramètres multi-échelle basés sur la pression capillaire. Les résultats démontrent que la pression capillaire améliore l'imprégnation de la résine dans les faisceaux de fibres en surmontant la résistance due à la faible perméabilité. Cependant, la capacité du modèle à atteindre des pressions capillaires élevées nécessite des investigations supplémentaires. Le modèle simule avec succès l'écoulement de la résine au sein d'une géométrie numérisée réaliste, produisant des résultats qui correspondent étroitement aux observations expérimentales. Afin de mieux comprendre les phénomènes d'imprégnation à l'échelle locale et d'identifier d'éventuelles zones non imprégnées, un dispositif

expérimental permettant des observations in situ à l'échelle microscopique est en cours de développement.

Références

- [1] W. Wijaya, M.A. Ali, R. Umer, K.A. Khan, P.A. Kelly, S. Bickerton, An automatic methodology to CT-scans of 2D woven textile fabrics to structured finite element and voxel meshes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 125, 2019, 105561, ISSN 1359-835X, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105561>.
- [2] Wang, Y., Moatamedi, M., & Grove, S. M. (2009). Continuum dual-scale modeling of liquid composite molding processes. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(12), 1469-1484.
- [3] Young WB. The effect of surface tension on tow impregnation of unidirectional fibrous preform in resin transfer molding. *J Compos Mater* 1996;30(11):1191–209.
- [4] Bayramli E, Powell RL. Impregnation dynamics of carbon fiber tows. *J Compos Mater* 1992;26(10):1427–42.
- [5] Ali Q, Raeini, Martin J. Blunt, Branko Bijeljic, Modelling two-phase flow in porous media at the pore scale using the volume-of-fluid method, *Journal of Computational Physics*, Volume 231, Issue 17, 2012, Pages 5653-5668, ISSN 0021-9991, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2012.04.011>.
- [6] F. J. Carrillo, I. C. Bourg, et C. Soulaine, « Multiphase flow modeling in multiscale porous media: An open-source micro-continuum approach », *Journal of Computational Physics: X*, vol. 8, p. 100073, sept. 2020, doi: [10.1016/j.jcp.2020.100073](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2020.100073).
- [7] Teixidó H, Staal J, Caglar B and Michaud V (2022) Capillary Effects in Fiber Reinforced Polymer Composite Processing: A Review. *Front. Mater.* 9:809226. doi: 10.3389/fmats.2022.809226.
- [8] M. F. Pucci, P.-J. Liotier, and S. Drapier. Capillary wicking in a fibrous reinforcement - orthotropic issues to determine the capillary pressure components. *Composites/A*, 77:133–141, 2015.
- [9] Verrey J, Michaud V, Manson J-A. Dynamic capillary effects in liquid composite moulding with non-crimp fabrics. *Compos Part A: Appl Sci Manuf* 2006;37(1):92–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.04.011>
- [10] M. Sherburn, Geometric and mechanical modelling of textiles, PhD thesis, The University of Nottingham (2007).
- [11] Gebart, B. R. (1992). Permeability of unidirectional reinforcements for RTM. *Journal of composite materials*, 26(8), 1100-1133.
- [12] Boubaker, M.; Wijaya, W.; Cantarel, A.; Debenest, G.; Bickerton, S. Permeability Measurement of Glass-Fiber Textiles Used in Composites Industry Using Radial Flow Experimental Setup and Comparison with Image-Based Numerical Methods. *Sci* 2024, 6, 49. <https://doi.org/10.3390/sci6030049>