



HAL
open science

Perméabilité des renforts fibreux : évaluation de différentes méthodes de prédiction

Bertrand Laine, Fabrice Boust, Philippe Boisse

► **To cite this version:**

Bertrand Laine, Fabrice Boust, Philippe Boisse. Perméabilité des renforts fibreux : évaluation de différentes méthodes de prédiction. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-04091297

HAL Id: hal-04091297

<https://hal.science/hal-04091297>

Submitted on 8 May 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Perméabilité des renforts fibreux: évaluation de différentes méthodes de prédiction

Bertrand Laine* - Fabrice Boust* - Philippe Boisse**

* Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques
29 avenue de la Division Leclerc, F-92322 Châtillon

** LAMCOS, UMR 5514, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
Bâtiment Joseph Jacquard – 27, Av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne Cedex

Résumé :

La prédiction de la perméabilité de renforts fibreux mis en oeuvre par RTM nécessite une bonne connaissance de la géométrie des renforts eux-mêmes. On se propose d'étudier l'interaction déformations/ variations de perméabilité ainsi que de comparer différentes méthodes numériques de prédiction de la perméabilité. Nous présentons ici une « chaîne numérique » permettant, à partir d'une modélisation tridimensionnelle d'un renfort fibreux, de déterminer sa perméabilité. Les valeurs numériques sont comparées à des résultats expérimentaux et des images de microtomographie sont utilisées afin de valider les modèles 3D.

Abstract :

The prediction of the permeability of fibrous reinforcements used in RTM requires a good knowledge of the geometry of the reinforcements themselves. In this work the interaction deformations / variations of permeability like comparing various numerical methods of prediction of the permeability are studied. We present a "numerical chain " allowing, starting from a three-dimensional modeling of a fibrous reinforcement, to determine its permeability. The numerical values are compared with experimental results and images of microtomographies are used in order to validate the 3D models.

Mots clefs :

Injection sur renfort (RTM), Perméabilité, Géométrie des tissés , Tomographie

1 Introduction

Plusieurs techniques de mise en forme des composites, regroupées sous l'appellation LCM (Liquid Composite Moulding) se développent dans des secteurs industriels souvent liés aux transports (automobile, aéronautique, plaisance, éolienne,...) dans l'objectif de fabriquer des pièces aux géométries de plus en plus complexes de manière à réduire au maximum les assemblages [1-3]. Dans cette optique, la capacité à simuler efficacement l'injection d'une résine dans une préforme fibreuse est devenue d'une importance capitale. Les logiciels disponibles sur le marché utilisent en général l'équation de Darcy, qui relie la vitesse moyenne du fluide (vitesse macroscopique) au gradient de pression via le tenseur de perméabilité, pour représenter l'évolution temporelle du front de résine dans le moule en vue de vérifier la faisabilité de la pièce, déterminer les pressions d'injection adéquates,...[4][5]. La connaissance de la perméabilité d'un renfort fibreux, qui est une grandeur tensorielle définie à l'échelle macroscopique et qui représente la capacité de ce milieu poreux à se laisser pénétrer et traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression, détermine la validité de la simulation effectuée. Dans cette étude, nous nous intéressons au procédé RTM (Injection

sur renfort) qui permet d'obtenir des fractions volumiques de fibres importantes et par conséquent des propriétés mécaniques élevées. Les renforts utilisés sont alors le plus souvent des tissés ou tressés de carbone. Ce type de renfort présente une double échelle de porosité : l'intérieur des mèches, où l'espacement entre les fibres est de quelques micromètres (microporosités) et les macroporosités situées entre les mèches de l'ordre d'une centaine de microns de large [6]. Ainsi, en fonction des conditions d'injection, plusieurs modes d'imprégnation peuvent apparaître en régime transitoire. En effet, si la perméabilité d'un renfort est un paramètre géométrique ne dépendant pas des conditions prescrites au point d'injection, la surpression capillaire doit pour sa part être prise en compte [7] dans le cas des faibles débit (faible pression d'injection ou zones éloignées du/des points d'injection). Néanmoins, les simulations, ainsi que les mesures expérimentales effectuées dans ce travail, sont relatives au régime stationnaire ou permanent, régime pour lequel l'équation de Darcy est bien appropriée, au contraire du régime transitoire [8]. La modélisation de la perméabilité d'un milieu poreux a fait l'objet de nombreux travaux y compris numériques. Concernant les structures fibreuses, on peut citer par exemple les travaux récents : [9-15].

Cette étude présente les étapes nécessaires à l'obtention par des outils de simulation d'un tenseur de perméabilité pour un renfort donné. Les résultats obtenus sont comparés des données expérimentales en évaluant l'influence de chacune des étapes (expérimentales et numériques). De plus, dans cette étude, deux modèles géométriques 3D de renforts fibreux ainsi que des observations effectuées par micro-tomographie X sont étudiés conjointement de manière à évaluer l'influence de la description géométrique sur le tenseur de perméabilité.

2 – Etude et modélisation de la géométrie du tissé

L'objectif global du présent travail est d'utiliser des outils numériques aptes à prédire la perméabilité d'un renfort donné. Un code éléments finis (développé à l'ONERA) est utilisé pour résoudre les équations de la mécanique des fluides incompressibles entre les mèches (équation de Stokes) mais également à l'intérieure de celles-ci (équation de Brinkman) si cela s'avère nécessaire [6]. Ce code a besoin d'un maillage du volume inter-mèches et éventuellement intra-mèches où s'écoule le liquide lors de l'imprégnation du renfort. Ce maillage est obtenu à partir de modèles géométriques tridimensionnels du renfort étudié. De tels modèles existent depuis déjà plus d'une dizaine d'années, mais l'on assiste aujourd'hui à l'émergence d'outils de modélisation de plus en plus précis, capables de modéliser diverses sortes de renforts, parmi lesquels deux semblent particulièrement attractifs pour des raisons que nous verrons par la suite : le logiciel WiseTex, développé par l'équipe de Stepan Lomov [16] et le logiciel développé par Gilles Hivet [17].

2.1. Microscopie Optique

Les modèles géométriques tridimensionnels de renforts nécessite sont construits à partir de paramètres géométriques (comme la largeur et la hauteur des mèches) souvent obtenus par le biais d'observations en microscopie optique. Cette technique donne accès à des informations de surface ou de coupe (surface polie d'une coupe d'échantillon composite et éventuellement surface 3D reconstruite du renfort sec) (figure 1).

2.2. Les modèles 3D de la géométrie de la maille tissée

Deux « modeleurs » sont utilisés dans cette étude. L'un, WiseTex (et WeftKnit pour les tricots), fait partie d'une suite logicielle permettant de modéliser un renfort (tissé, non-tissé, tresse, ...), d'empiler plusieurs plis selon différentes configurations (LamTex) et d'exporter enfin la géométrie sous forme de voxels (FlowTex). Le second est (pour l'instant) exclusivement dédié à la modélisation de monoplis de renforts tissés. Il s'appuie sur l'utilisation d'un logiciel de DAO pour effectuer l'interpolation des trajectoires de mèches entre les sections de contrôle et ainsi créer le modèle tridimensionnel.

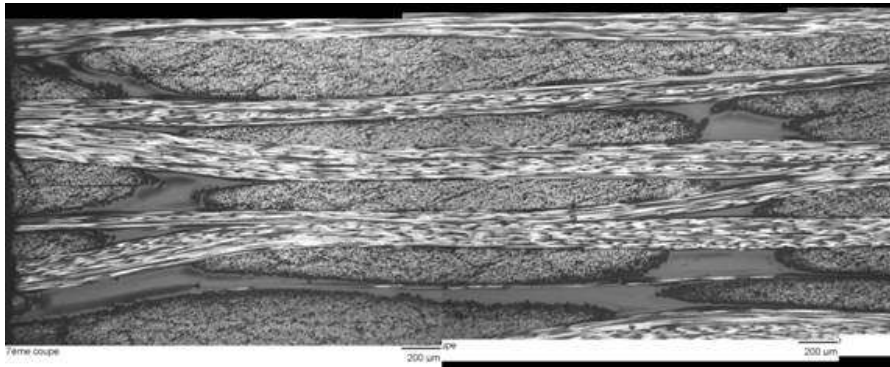


FIG. 1 – Coupe d'un composite à renforts tissés

Le tissu est composé d'un ensemble de mèches, elles-mêmes décrites comme une succession de section, variable ou non, parcourant des trajectoires : celles des différentes mèches. L'assemblage de ces mèches constitue alors la géométrie 3D du renfort. La description des trajectoires et de l'assemblage des différents éléments, conduit à la possibilité de mailler directement ou non le modèle ainsi réalisé.

Le modèle développé par G. Hivet propose une description « géométriquement cohérente » des renforts tissés. C'est-à-dire qu'il fait correspondre exactement la trajectoire de la chaîne à la portion de section de la trame sur laquelle elle est en contact lors de leur croisement et ce pour tous les croisements de mèches. De plus, le nombre de paramètres utilisés est réduit au minimum de manière à n'utiliser que des paramètres extractibles de la géométrie réelle. Cette cohérence géométrique permet de mailler directement le modèle 3D. Pour finir, l'utilisation d'un mailleur efficace (pour le volume des mèches, cette fois ci) ouvre la possibilité de déformer (tension biaxiale, cisaillement) la maille de tissage 3D à l'aide d'un code de calculs mécanique. Les cellules élémentaires déformées obtenues par ce biais restent « géométriquement cohérentes » lors des déformations puisque le contact est correctement géré et représentent bien les comportements observés expérimentalement.

Le modèleur WiseTex, quant à lui, possède une interface utilisateur développée et intuitive permettant de modéliser et déformer grossièrement (cisaillement plan, traction biaxiale) divers types de renforts, sous réserve de l'alimenter correctement en « donnée mécaniques » (compressibilité, comportement en traction,...) sur les fibres, mèches... Cependant, les modèles 3D créés à l'aide de ce modèleur ne sont pas « cohérents » : il existe des vides entre les mèches se croisant ou au contraire des interpénétrations de mèches en ces zones. De plus, le cisaillement du renfort peut amplifier ces phénomènes. Ainsi, il est nécessaire de transformer la description en termes de trajectoires et sections en une description binaire discrète des deux zones que sont la matrice (le vide) et les mèches (ici considérées comme un milieu continu) afin de pouvoir réaliser un maillage.

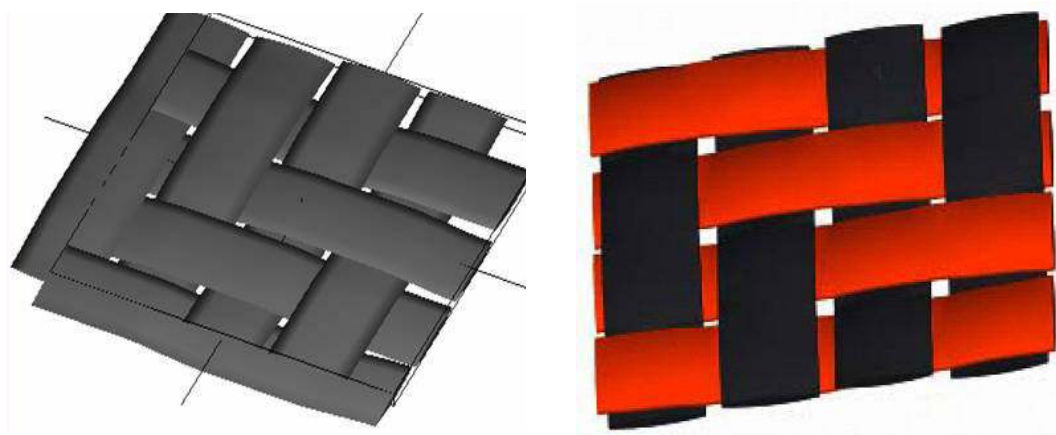


FIG. 2 – Modèles géométriques d'un sergé 2x2, WiseTex (G) et Hivet (D)

2.2. Micro Tomographie : validation des modèles

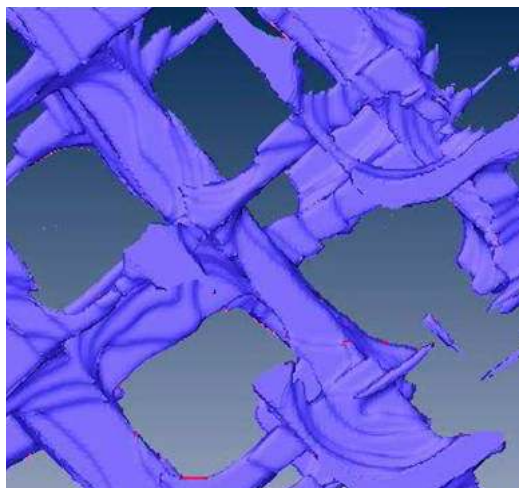


FIG. 3 – Canaux 3D obtenu par tomographie (CEG Gramat)

Une fois le modèle géométrique 3D construit, il est nécessaire de le valider d'une manière ou d'une autre. La micro tomographie par rayons X est une technique qui permet d'obtenir une représentation tridimensionnelle du coefficient d'atténuation de chaque cube de l'espace discrétisé. Dans les composites à matrice thermosable et fibres de verre, la matrice (chaînes de carbone = faible coefficient d'atténuation) peut être aisément distinguée des fibres (silice = coefficient d'atténuation plus élevé). A partir de telles « images 3D » (fig. 4), il est possible d'effectuer différents types de comparaisons et donc de valider les modèles géométriques 3D construits, éventuellement d'identifier certains paramètres. modèles/observations (géométriques, morphologiques, ...). Vu l'objectif de cette étude, la validation est effectuée sous forme d'un calcul EF du tenseur de perméabilité de la géométrie obtenue par tomographie X ci-dessous.

3. Perméabilité des renforts fibreux

3.1. Procédure Numérique

L'écoulement du fluide à l'intérieur de la maille est décrit par l'équation de Stokes assortie de la condition d'incompressibilité. Le code (développé à l'ONERA) éléments finis utilisés dans cette étude [6] utilise un changement d'échelle classique [18] conduisant à l'équation de Darcy. La technique d'homogénéisation périodique utilisée impose des contraintes importantes sur le maillage puisque celui-ci doit être périodique selon les trois directions de l'espace. Le passage du modèle géométrique 3D au maillage est une étape clef. En effet, il s'agit de mailler en trois dimensions un volume géométriquement très complexe résultant de l'imbrication de plusieurs mèches. Les zones particulièrement délicates sont celles situées au croisement entre deux mèches où le volume complémentaire se réduit jusqu'à disparaître au point de contact entre les mèches. Nous utilisons une méthode permettant de mailler à peu près n'importe quelle géométrie, mais d'un coût relativement élevé en termes de temps et d'intervention humaine. Cette méthode consiste à transformer dans un premier temps le modèle géométrique 3D en voxels de différents labels (0 pour les fibres et 1 pour la matrice). Ces voxels sont alors transformés en un maillage de surface (chacune des facettes des voxels appartenant à la frontière matrice-mèches est divisée en deux triangles) qui est ensuite simplifié (le nombre de triangles constituant la surface est réduit en formant de plus grands triangles) et pour finir maillé en volume (formation successive de tétraèdres à partir des triangles de surface jusqu'à ce que se rejoignent tous les fronts d'avancée). Par ailleurs, nous avons également évalué l'intérêt ainsi que les limites du « maillage direct », qui consiste à réaliser le maillage du volume complémentaire à partir de sa description géométrique sans passer par une description en voxels. L'avantage du « maillage direct » est qu'il permet d'obtenir des maillages périodiques d'excellente qualité à partir de géométries périodiques.. Cependant, cette technique n'est envisageable que lorsque le modèle de renfort utilisé est géométriquement cohérent et prévu à cet effet (un certain nombre de précautions doivent être prises lors de la construction du modèle 3D pour que le maillage direct soit possible par la suite).

3.2. Comparaisons des résultats avec des expériences

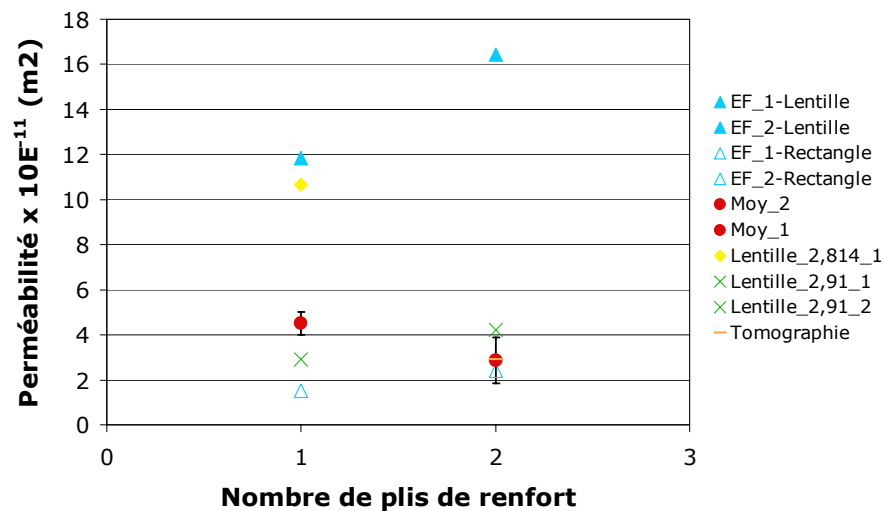


FIG. 4 – Perméabilités mesurées et calculées pour 1 et 2 plis

La figure 4 présente les résultats obtenus pour un et deux plis d'un sergé 2x2 de carbone (G986) (6 valeurs pour chaque épaisseur) à l'aide du dispositif expérimental ainsi que les prédictions numériques correspondantes. Au niveau des résultats expérimentaux (points rouges), les valeurs moyennes sont accompagnées d'une barre représentant les extrema observés. Des expériences sont effectuées en maintenant la fraction volumique de fibres constante et égale à 55%. Les différents jeux de paramètres géométriques utilisés lors des calculs numériques sont décrits dans le tableau 2 et les résultats expérimentaux récapitulés dans le tableau 1.

	Nombre de plis	Moyenne expérimentale	Ecart type	Minimum Maximum	Calcul EF
K_{xx} ($\times 10^{-11} \text{m}^2$)	1	4,50	0,43	3,99/5,05	11,8
K_{xy} ($\times 10^{-11} \text{m}^2$)	2	2,87	0,90	1,94/3,98	16,6

Tableau 1 - Résultats expérimentaux et calculés

L'écart observé entre prédictions numériques et résultats expérimentaux varie considérablement en fonction des paramètres retenus pour construire le modèle géométrique. En effet, les résultats numériques s'étalent sur une large plage (environ un ordre de grandeur), certains correspondants bien avec les expériences et d'autres pas du tout. Des analyses plus détaillées de ces résultats et comparaisons peuvent être trouvées dans [19].

References

- [1] Rudd C.D., Long A.C., Liquid Molding Technologies, ed. Woodhead Publishing Limited, 1997.
- [2] Potter, K.D., History of the resin transfer moulding for aerospace applications, Composites A, 1999, 30, p. 757-765
- [3] Parnas R.S. Liquid Composite Molding, Hanser Garner publications, 2000
- [4] Gauvin R., Trochu F., Lemenn Y., Diallo L. Permeability measurement and flow simulation through fibre reinforcement, Polymer Composites, 1996, 17, 34-42.
- [5] Bickerton S., Simacek P. Guglielmi S.E., Advani S.G., Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of a compound curved composite part. Composite Part A, 1997, 28, 801-816.
- [6] Fabrice Boust, Rafael Torres-Carrot, Edouard Flavin, Arnaud Poitou, Procédé RTM : modélisation et mesure de la perméabilité des renforts fibreux, Revue des composites et matériaux avancés, Vol 12, n° 3, 2002, pp 435-446
- [7] C. Binetruy, B. Hilaire & J. Pabiot, « The interactions between flows occurring inside and outside fabric tows during RTM », Composites Science and Technology, 57, (1997), 587-596.
- [8] J. Slade, K.M. Pillai and S.G. Advani, « Investigation of Unsaturated Flow in Woven, Braided and Stitched Fiber Mats During Mold-Filling in Resin Transfer Molding », Polymer Composites, 22, 4, (2001), 491-505.
- [9] C. Binetruy, « Calcul et validation expérimentale de la perméabilité et prévision de l'imprégnation de tissus en moulage RTM », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1996.
- [10] T. S. Lundström, V. Frishfelds and A. Jakovics, « A Statistical Approach to Permeability of Clustered Fibre Reinforcements », Journal of Composites Materials, 38, 13, (2004), 1137-1149.
- [11] E.B. Belov, S.V. Lomov, I. Verpoest, T. Peters, D. Roose, R.S. Parnas, K. Hoes and H. Sol, « Modelling of permeability of textile reinforcements: lattice Boltzmann method », Composites Science and Technology, 64, (2004), 1069-1080.
- [12] Y.S. Song, K. Chung, T.J. Kang and J.R. Youn, « Prediction of permeability tensor for three dimensional circular braided preform by applying a finite volume method to a unit cell », Composites Science and Technology, 64 (2004), 1629-1636.
- [13] R. Fournier, « Optimisation et modélisation du procédé RTM », Thèse de doctorat, ENSMP, Sophia-Antipolis, 2004.
- [14] L. Bizet, « Analyse d'un renfort à fibres pour matériau composite. Microstructure et perméabilité », Thèse de doctorat, Université du Havre, 2004.
- [15] R. Torres-Carrot, « Estimación de la permeabilidad 3D de los refuerzos tejidos en la fabricación de piezas en materiales compuestos mediante Modelo por Transferencia de Resina », Thes doctoral, Universidad Politecnica de Valencia, 2004.
- [16] S.V. Lomov, G. Huysmans, Y. Luo, R.S. Parnas, A. Prodromou, I. Verpoest and F.R. Phelan, « Textile composites: modelling strategies », Composites Part A, 32, (2001), 1379-1394.
- [17] Gilles Hivet, Philippe Boisse, Consistent 3D geometrical model of fabric elementary cell. Application to a meshing preprocessor for 3D finite element analysis. Finite Element in Analysis and Design, to appear 2005
- [18] E. Sanchez-Palencia, Non homogeneous Media and Vibration Theory, vol 127 de Lecture notes in Physics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (1980).

- [19] B. Laine, F. Boust , P. Boisse, Alain Fanget, S. Lomov, G. Hivet, Perméabilité des renforts fibreux, écarts modèles numériques – expériences : une tentative de conciliation, Revue des composites et matériaux avancés, à paraître 2005