



Modélisation numérique de la formation des bulles d'air dans les matériaux composites = Numeric modelisation of air bubbles formation in composites materials

Aurélie Lebel, Chung-Hae Park, Saouab Abdelghani, Joel Breard, Florent Bouillon

► To cite this version:

Aurélie Lebel, Chung-Hae Park, Saouab Abdelghani, Joel Breard, Florent Bouillon. Modélisation numérique de la formation des bulles d'air dans les matériaux composites = Numeric modelisation of air bubbles formation in composites materials. JNC16, Jun 2009, Toulouse, France. 8 p. hal-00429977

HAL Id: hal-00429977

<https://hal.science/hal-00429977>

Submitted on 5 Nov 2009

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.

Modélisation numérique de la formation des bulles d'air dans les matériaux composites

Numeric modelisation of air bubbles formation in composites materials

Aurélie Lebel¹, Chung-Hae Park¹, Abdelghani Saouab¹, Joel Breard¹, Florent Bouillon²

1 : Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes
Université du Havre - FRE 3102-CNRS - 76058 LE HAVRE
e-mail : aurelie.lebel302@univ-lehavre.fr, chung-hae.park@univ-lehavre.fr, saouaba@univ-lehavre.fr, joel.breard@univ-lehavre.fr

2 : Aircelle – Groupe Safran
Rue du Pont VIII - 76700 GONFREVILLE L'ORCHER
e-mail : florent.bouillon@aircelle.com

Résumé

Les bulles d'air dans les matériaux composites altèrent les propriétés mécaniques de la pièce. Dans le cas du procédé de fabrication RTM (Resin Transfer Molding), ces bulles proviennent de la micro-structure non-uniforme du renfort de fibres, ce qui entraîne des différences dans les valeurs de la perméabilité entre les canaux et les mèches et donc des variations de la vitesse de la résine. Cet article présente un modèle mathématique permettant de décrire dans le cas d'un renfort bidirectionnel, la formation des bulles d'air dans les mèches de la trame et de la chaîne, et dans les canaux. Ce modèle permet de prédire la répartition et le taux volumique des bulles dans la pièce en fonction des paramètres d'injection et des caractéristiques du renfort. L'influence de la compressibilité de l'air est prise en compte dans ce modèle car en effet, lors du remplissage du moule, la résine exerce une pression sur chaque bulle. Nous présenterons quelques résultats de simulations d'injections de pièces avec ce modèle avec prédiction de la formation de bulles d'air et influence du phénomène de compressibilité de l'air.

Abstract

Air bubbles in composite materials deteriorate the mechanical properties of the part. In Resin Transfer Molding manufacturing processes, air bubbles result from non-uniform micro-structure of the fiber preform, which leads to the difference in permeability, and subsequent variations in resin velocity. This article presents mathematical models to describe, for bidirectional preform, the formation of channel air bubbles and tow air bubbles. This model allows getting the distribution and the volume fraction of bubbles in the part depending on the injection parameters and characteristics of the reinforcements. The influence of air compressibility is taken into account in this model because when filling the mold, the resin applies a pressure on each air bubble. We present some results of injection simulations of parts with this model with prediction of the formation of air bubbles and influence of the phenomenon of air compressibility.

Mots Clés : RTM, Bulles d'air, Trame et Chaîne, Compressibilité de l'air

Keywords : RTM, Air bubbles, Warp and Weft, Air compressibility

1. Introduction

Un matériau composite résulte de l'association de deux constituants de base : une résine et un renfort. Dans le cadre des procédés LCM (Liquid Composites Molding), son élaboration est obtenue grâce à l'injection d'une résine thermodurcissable sur une préforme fibreuse disposée au préalable dans un moule.

La microstructure des fibres des renforts utilisés en RTM n'est pas uniforme. Il existe des grands espaces entre les mèches, appelés canaux, et des petits espaces à l'intérieur des mèches entre les fibres. La résine présente une vitesse plus importante dans les canaux entre les mèches en raison de la valeur de la perméabilité qui est plus élevée qu'à l'intérieur des mèches. Cependant, il faut tenir compte de l'effet de la pression capillaire qui engendre une augmentation de la vitesse de la résine à l'intérieur des mèches. De plus, il a été démontré que la présence de bulles altère les propriétés mécaniques des matériaux composites [1] [2]. La simulation de la formation de ces bulles lors de l'injection de la pièce est donc nécessaire pour identifier les paramètres d'injection optimaux conduisant à un taux de bulle minimum.

Dans un premier temps, nous exposerons l'approche utilisée pour la modélisation de la formation des bulles d'air dans le cas d'un renfort unidirectionnel. Un modèle valable dans le cas d'un renfort bidirectionnel sera ensuite proposé. Nous verrons enfin, comment le phénomène de compressibilité de l'air est pris en compte. Dans un second temps, nous présenterons quelques résultats de simulation d'injection avec prédiction de la formation de bulles d'air.

2. Modélisation

2.1 Formation des bulles d'air dans un renfort unidirectionnel

2.1.1 Flux de résine

Il existe deux types de bulles d'air à l'échelle microscopique, les bulles d'air dans les canaux entre les mèches et celles à l'intérieur de la mèche. Si la vitesse de la résine est faible, le flux capillaire sera plus important que le flux dans les canaux, des bulles d'air pourront être formées dans les canaux (Fig. 1 - gauche). Au contraire, si la vitesse de la résine est élevée, les bulles d'air pourront être formées dans les mèches à cause de la perméabilité élevée dans les canaux (Fig. 1 - droite) [3] [4].

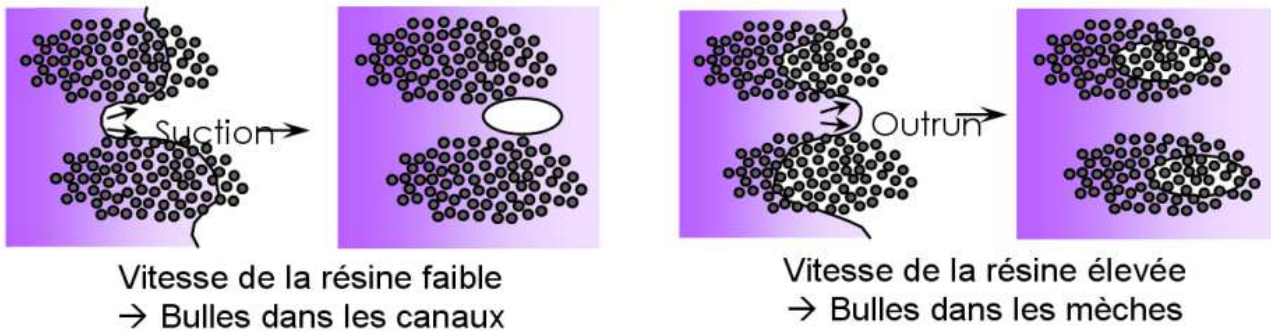


Fig. 1. Principe de formation des bulles d'air dans les mèches et dans les canaux.

Afin de déterminer quel type de bulle d'air est formé, il faut comparer le temps nécessaire à la résine pour parcourir la longueur de la mèche l_T , ceci à l'intérieur de la mèche et dans le canal [5]. Les expressions permettant d'estimer ces deux temps, ont été proposées par W.I. Lee et al. [6] [7], à savoir :

$$\Delta t_{l_T, channel} = \frac{-l_T}{F_{K, channel}(\phi) \frac{d_c^2}{\mu} \frac{dP}{dn}} \quad (\text{eq. 1})$$

$$\Delta t_{l_T, tow} = \frac{-l_T}{F_{K, tow}(\phi) \frac{d_T^2}{\mu} \frac{dP}{dn}} \left[1 + \frac{\frac{P_{cap, tow}}{l_T}}{\frac{dP}{dn}} \log \left(1 - \frac{\frac{dP}{dn}}{\frac{P_{cap, tow}}{l_T}} \right) \right] \quad (\text{eq. 2})$$

Où $F_{K, tow}(\phi)$, $F_{K, channel}(\phi)$ et $P_{cap, tow}(\phi)$ sont des constantes à déterminer expérimentalement et dépendantes uniquement des propriétés du renfort. Les constantes d_c , d_T et l_T sont dépendantes des propriétés de la mèche. Puis, P et μ représentent respectivement la pression et la viscosité de la résine.

2.1.1 Taille des bulles d'air

Il y a donc deux catégories de bulles d'air que l'on peut définir en utilisant les équations (eq. 1 et 2) : Bulles d'air dans les mèches si $\Delta t_{l_T, channel} < \Delta t_{l_T, tow}$ et bulles d'air dans les canaux si $\Delta t_{l_T, channel} > \Delta t_{l_T, tow}$. Nous pouvons ensuite évaluer la distance parcourue par la résine l_t et l_c pendant le temps minimum $\Delta t_{l_T, channel}$ ou $\Delta t_{l_T, tow}$ par dichotomie, ce qui nous permet de connaître la taille du vide $l_{bulle, channel}$ ou $l_{bulle, tow}$ (eq. 3 et 4). Par la suite, le taux volumique de bulles $F_{volume, bulle, channel}$ ou $F_{volume, bulle, tow}$ en chaque point de la pièce peut être calculé, en utilisant les équations (eq. 5 et 6). h_v représente la largeur de la bulle.

$$l_{bulle, tow} = l_T - l_t \quad (\text{eq. 3})$$

$$l_{bulle, channel} = l_T - l_c \quad (\text{eq. 4})$$

$$F_{volume,bulle,tow} = \frac{l_{bulle,tow}}{l_T} h_v^2 \quad (\text{eq. 5})$$

$$F_{volume,bulle,channel} = \frac{l_{bulle,channel}}{l_T} h_v^2 \quad (\text{eq. 6})$$

2.2 Formation des bulles d'air dans un renfort bidirectionnel

2.2.1 Flux de résine

Le principe de la modélisation employée pour prédire la formation des bulles dans un renfort bidirectionnel est le même que pour un renfort unidirectionnel. De plus, il permet de différencier les bulles présentes dans les mèches de la trame et de la chaîne [8][9].

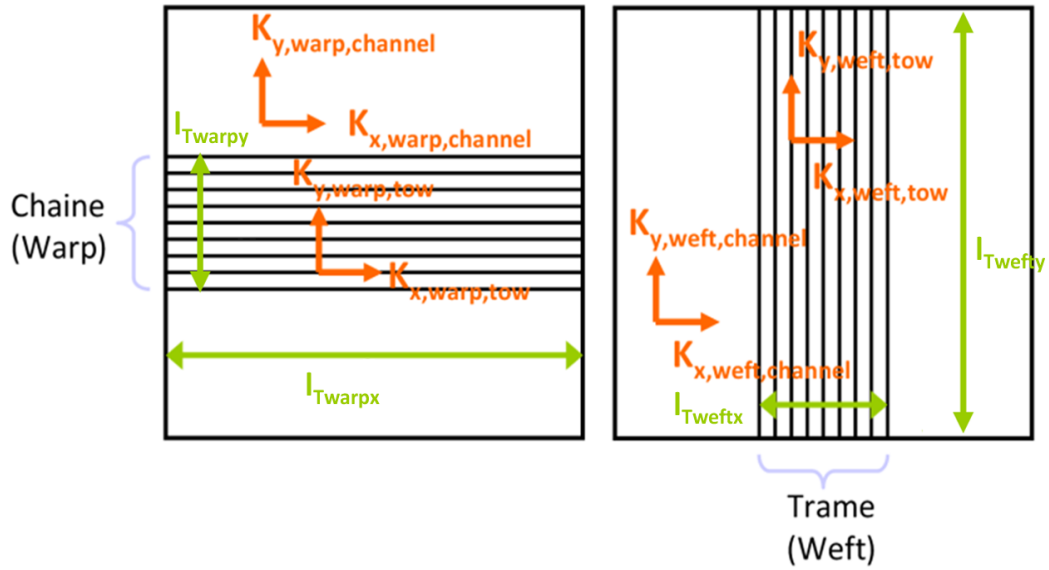


Fig. 2. Trame et chaîne dans le renfort

De la même façon que dans la partie 2.1.1, nous calculons les temps nécessaires à la résine pour parcourir la longueur l_T de la mèche mais en différenciant la trame et la chaîne (Fig. 2). L'équation différentielle (eq. 7) est utilisée pour évaluer ce temps à l'intérieur de la mèche et la loi de Darcy (eq. 8) est employée pour sa détermination dans le cas des canaux.

$$\frac{dl}{dt} = -\frac{K_x}{\mu} \frac{1}{V_f} \left(\frac{dP}{dx} - \frac{P_{cap}}{l} \right) \quad (\text{eq. 7})$$

$$v_{channel} = -\frac{K_x}{\mu} \frac{1}{1-V_T} \nabla P \quad (\text{eq. 8})$$

Les expressions suivantes sont celles utilisées pour le cas de la chaîne (eq. 9 à 18). Celles pour la trame sont identiques.

$$\Delta t_{l_T,tow,warp,x} = \frac{-C_{2Lx}}{(C_{1Lx})^2} \ln \left(l_{Twarpx} + \frac{C_{2Lx}}{C_{1Lx}} \right) + \frac{l_{Twarpx}}{C_{1Lx}} + \frac{C_{2Lx}}{(C_{1Lx})^2} \ln \left(\frac{C_{2Lx}}{C_{1Lx}} \right) \quad (\text{eq. 9})$$

$$\Delta t_{l_T,tow,warp,y} = \frac{-C_{2Ly}}{(C_{1Ly})^2} \ln \left(l_{Twarpy} + \frac{C_{2Ly}}{C_{1Ly}} \right) + \frac{l_{Twarpy}}{C_{1Ly}} + \frac{C_{2Ly}}{(C_{1Ly})^2} \ln \left(\frac{C_{2Ly}}{C_{1Ly}} \right) \quad (\text{eq. 10})$$

$$C_{1Lx} = \frac{-K_L \partial P / \partial x}{\mu V_{f_{warp}}} \quad (\text{eq. 11})$$

$$C_{2Lx} = \frac{K_L P_{capL}}{\mu V_{f_{warp}}} \quad (\text{eq. 12})$$

$$C_{1Ly} = \frac{-K_T \partial P / \partial y}{\mu V_{f_{warp}}} \quad (\text{eq. 13})$$

$$C_{2Ly} = \frac{K_T P_{capT}}{\mu V_{f_{warp}}} \quad (\text{eq. 14})$$

$$\Delta t_{l_T, tow, warp} = \min(\Delta t_{l_T, tow, warp, x}; \Delta t_{l_T, tow, warp, y}) \quad (\text{eq. 15})$$

$$\Delta t_{l_T, channel, warp, x} = \frac{-l_{Twarp x} \mu (1 - V_{Twarp} - V_{Tweft})}{K_{satx} \partial P / \partial x} \quad (\text{eq. 16})$$

$$\Delta t_{l_T, channel, warp, y} = \frac{-l_{Twarp y} \mu (1 - V_{Twarp} - V_{Tweft})}{K_{saty} \partial P / \partial y} \quad (\text{eq. 17})$$

$$\Delta t_{l_T, channel, warp} = \min(\Delta t_{l_T, channel, warp, x}; \Delta t_{l_T, channel, warp, y}) \quad (\text{eq. 18})$$

Pour le calcul des pressions capillaires [10] longitudinales et transversales (eq. 19 et 20), nous utilisons les équations de Young-Laplace et pour évaluer les différentes perméabilités (eq. 21 et 22), nous considérons le modèle de B. R. Gebart [11] en considérant la forme circulaire pour la mèche.

$$P_{capL} = \frac{2}{R_f} \frac{1 - \phi}{\phi} \gamma \cos \theta \quad (\text{eq. 19})$$

$$P_{capT} = \frac{1}{R_f} \frac{1 - \phi}{\phi} \gamma \cos \theta \quad (\text{eq. 20})$$

$$K_L = \frac{8R_f^2}{64} \frac{(1 - V_{f_{warp}})^3}{(V_{f_{warp}})^2} \quad (\text{eq. 21})$$

$$K_T = \frac{16R_f^2}{9\pi\sqrt{6}} \left(\sqrt{\frac{\pi}{2V_{f_{weft}}\sqrt{3}}} - 1 \right)^{5/2} \quad (\text{eq. 22})$$

La méthode employée pour obtenir le taux volumique de bulles dans les canaux et dans les mèches est la même que nous avons proposée dans le cas d'un renfort unidirectionnel. Nous comparons donc les différents temps pour déterminer quel type de bulle est formé : bulle dans le canal, bulle dans la mèche de la trame ou bulle dans la mèche de la chaîne.

2.3 Compressibilité de l'air

Actuellement dans la littérature, les modélisations numériques proposées pour calculer le taux volumique de bulles ne tiennent pas compte de la compressibilité de l'air. Cependant, lors de l'opération de d'injection, la résine exerce une pression sur chaque bulle d'air.

Au moment où l'air est emprisonné par la résine, la pression à l'intérieur de la bulle est la même que la pression à l'évent $P_{\text{évent}}$ et la pression de la résine au voisinage de cette bulle est $P_{r,\text{initial}} = P_{\text{évent}}$. Lorsque le moule est totalement rempli, la pression de la résine à l'endroit où a été formé la bulle est $P_{r,\text{final}}$.

La loi des gaz parfaits (eq. 23 et 24), nous permet de déterminer le nouveau volume d'air dans la bulle après la compression. P est la pression, V est le volume de la bulle, T est la température considérée constante, R est la constante universelle des gaz, n est le nombre de moles constant.

$$PV = nRT \quad (\text{eq. 23})$$

$$[V_{\text{void,tow}} \times P_r]_{\text{initial}} = [V_{\text{void,tow,compr}} \times P_r]_{\text{final}} \quad (\text{eq. 24})$$

Le nouveau volume d'air après compression peut donc être déterminé de la façon suivante (eq. 25):

$$V_{\text{void,tow,compr}} = V_{\text{void,tow}} \frac{P_{r,\text{initial}}}{P_{r,\text{final}}} \quad (\text{eq. 25})$$

3 Modélisation

3.1 Nomenclature et tableau de valeurs

Les valeurs des constantes utilisées dans cet article sont regroupées dans le tableau suivant (Tab. 1) :

R_f	Rayon de fibre	14.0 e-6 m	P_{capL}	Pression capillaire longitudinale	2839 Pa
l_{Twarpx}	Longueur de mèche de la chaîne	0.005 m	P_{capT}	Pression capillaire transversale	1419 Pa
l_{Twarpy}	Largeur de mèche de la chaîne	0.004 m	Φ	Porosité de la préforme	0.58
l_{Twefx}	Longueur de mèche de la trame	0.004 m	μ	Viscosité de la résine	0.1 Pa.s
l_{Twefy}	Largeur de mèche de la trame	0.005 m	V_{fwarp}	Taux volumique de fibre chaîne	0.7
K_{Lx}	Perméabilité mèche longitudinale x	1.4 e-12 m ²	V_{fwef}	Taux volumique de fibre trame	0.7
K_{Tx}	Perméabilité mèche transversale x	3.2 e-13 m ²	V_{Twarpx}	Taux volumique de mèche chaîne	0.3
K_{Ly}	Perméabilité mèche longitudinale y	3.2 e-13 m ²	V_{Twefx}	Taux volumique de mèche trame	0.3
K_{Ty}	Perméabilité mèche transversale y	1.4 e-12 m ²	θ	Angle de contact	30°
K_{satx}	Perméabilité de canal selon x	1e-10 m ²	γ	Tension de surface	31.7e-3 N.m ⁻¹
K_{saty}	Perméabilité de canal selon y	1e-10 m ²	h_v / l_T	Rapport largeur longueur de la bulle	0.51

Tab. 1. Les valeurs des constantes utilisées.

3.2 Nombre capillaire et taux volumique de bulles d'air

Nous allons simuler l'injection linéaire d'une pièce avec une pression d'injection de 110 000 Pa et une pression à l'évent de 10 000 Pa.

La courbe (Fig. 3) décrit le taux volumique de bulles d'air dans les canaux, et dans les mèches en fonction de la position x le long de la pièce. Le taux volumique de bulles d'air dans les mèches est égal à la somme des taux volumiques de bulles d'air de la trame et de la chaîne.

Il est courant de représenter le taux volumique de bulles global en fonction du nombre capillaire, qui est le rapport des forces visqueuses et capillaires [12]. Le nombre capillaire est défini par l'équation (eq. 26). Nous pouvons donc représenter l'évolution du taux volumique de bulles global, en fonction du nombre capillaire (Fig. 4).

$$Ca^* = \frac{\mu v}{\gamma \cos \theta} \quad (\text{eq. 26})$$

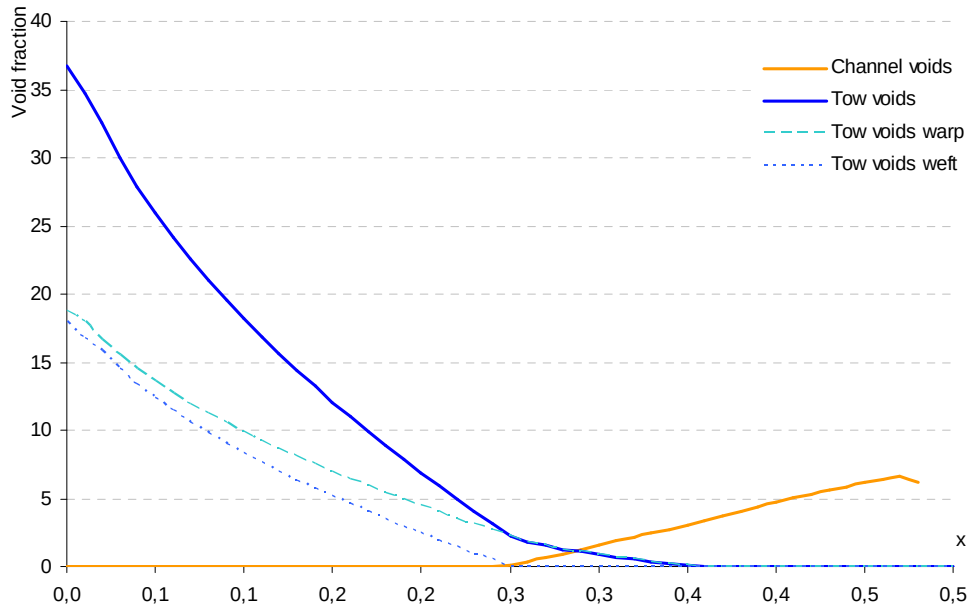


Fig. 3. Répartition du taux de bulles en fonction de la position x

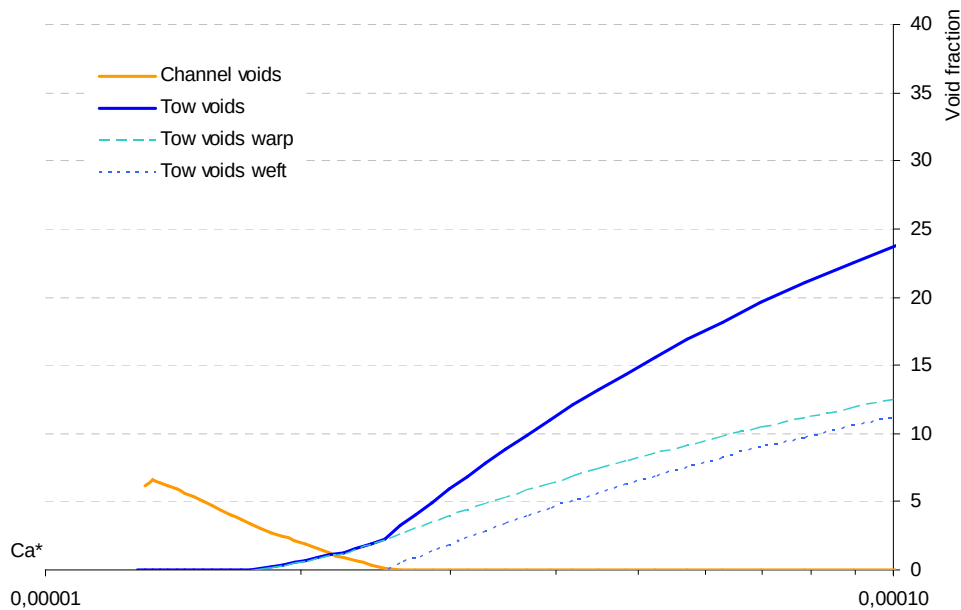


Fig. 4. Taux de bulles d'air global en fonction du nombre capillaire.

Les courbes en Fig. 4 décrivant les différents taux de bulles d'air en fonction du nombre capillaire nous permettent d'identifier deux nombres capillaires optimaux, $Ca_{opt,warp}$ pour la chaîne et $Ca_{opt,weft}$ pour la trame, dans le sens où ils engendrent un taux de bulles global minimum. Ici, nous avons $Ca_{opt,warp} = 1.1 \cdot 10^{-5}$ pour la chaîne et pour les bulles de la trame, nous avons $Ca_{opt,warp} = 1.14 \cdot 10^{-5}$. Donc pour l'ensemble des bulles, nous obtenons une plage de minimisation : $1.11 \cdot 10^{-5} < Ca_{opt} < 1.14 \cdot 10^{-5}$.

3.3 Simulation d'injection dans un renfort bidirectionnel

Nous allons simuler l'injection linéaire d'une pièce de dimension $1m \times 0.02m$ avec une pression d'injection $P_{inj} = 110\,000\text{ Pa}$ et une pression à l'évent $P_{évent} = 10\,000\text{ Pa}$.

Les courbes suivantes décrivent la répartition obtenue en fin d'injection des taux volumiques de bulles dans les mèches trame et chaîne et dans les canaux (Fig. 5). La comparaison entre les résultats de ces taux volumiques de bulles simulés avec ou sans prise en compte de la compression des bulles est effectuée.

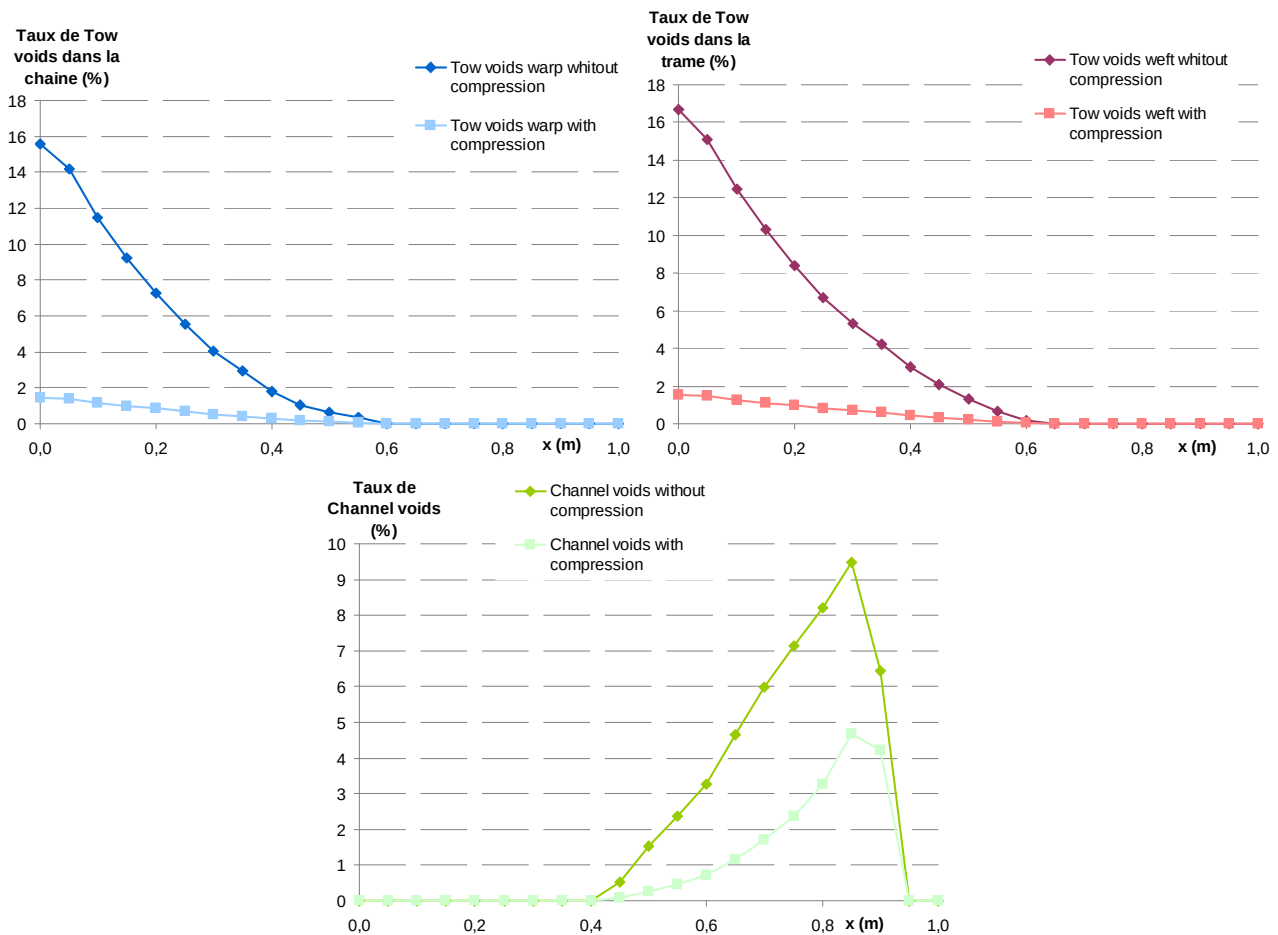


Fig. 5. Répartition du taux de bulles en fonction de la position x

D'une manière générale, nous constatons que les taux de bulles dans les mèches sont plus élevés, au voisinage du seuil d'injection, dès lors que la vitesse de la résine est élevée. Lorsque cette vitesse de résine diminue, le taux de bulles dans les canaux augmente. La prise en compte du phénomène de compressibilité de l'air conduit à une réduction du taux de bulles jusqu'à près de 80%.

3.4 Influence de la pression d'évent

Les courbes suivantes (Fig.6) décrivent la répartition du taux volumique de bulles formées dans les canaux pour différents cas d'injection linéaire avec un même gradient de pression $\Delta P = P_{inj} - P_{vent} = 0.1\text{MPa}$ entre le seuil d'injection et l'évent.

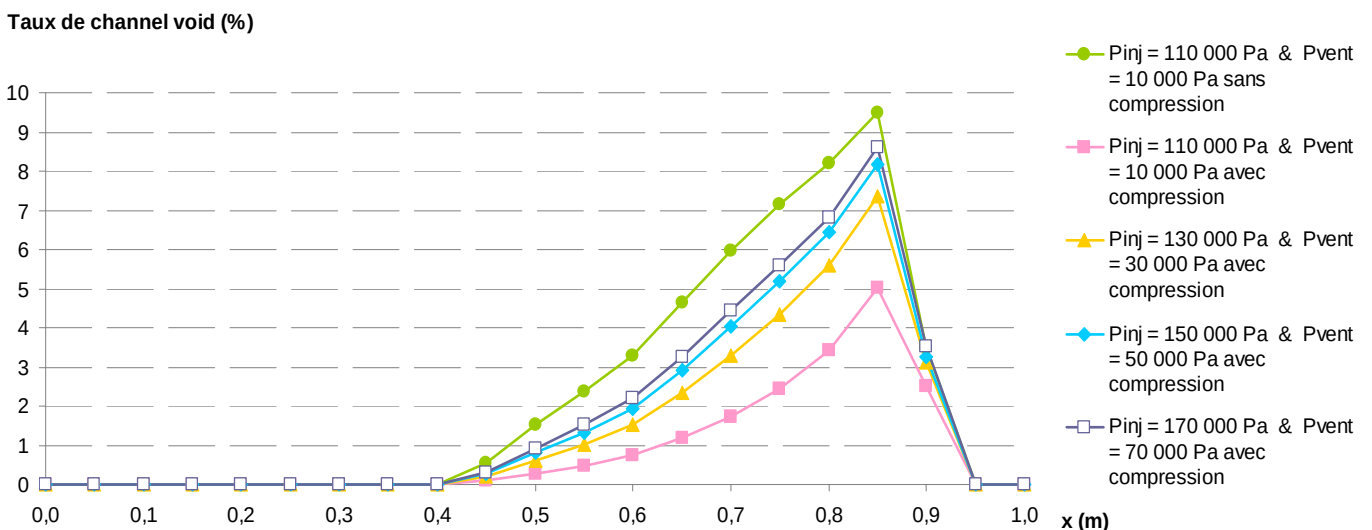


Fig. 6. Taux volumique de bulles et effet de la compressibilité de l'air pour différentes pressions d'injection

Nous constatons, que pour une même valeur de ΔP , plus la pression d'évent est faible, plus l'air dans la bulle est comprimé (Fig. 6). Cette observation reste valable également dans le cas de la formation des bulles dans les mèches. Il faut donc veiller à baisser au maximum la pression à l'évent dans le moule avant l'opération d'injection pour contribuer à réduire la formation du taux volumique de bulles.

4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce travail un modèle numérique permettant de simuler la formation de bulles d'air dans un renfort bidirectionnel dans les canaux et dans les mèches en différenciant trame et chaîne. La compressibilité de l'air à l'intérieur des bulles d'air a été intégrée dans ce modèle. Il faudrait cependant tenir compte du transport des bulles d'air, puisque les bulles d'air peuvent être déplacées suivant l'écoulement et éventuellement sortir du moule par l'évent lors du procédé réel. Ces travaux numériques seront confrontés à des résultats issus de nos travaux expérimentaux [13].

Références

- [1] L. B. Greszczuk, « Effect of voids on strength properties of filamentary composites ». *Proceeding of 22nd Annual Meeting of the Reinforced Plastics Division of the Society of the Plastic Industry*, 1967.
- [2] N. Wu, R. Shivpuri, L. J. Lee. *Journal of reinforced plastic composites*, Vol. 17, 1998.
- [3] L. Labat, J. Bréard, S. Pillut-Lesavre, G. Bouquet, « Void fraction prevision in LCM parts ». *The European Physical Journal Applied Physics*, Vol. 16, pp. 157-164, 2001.
- [4] E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, F. Trochu, J. Bréard, « Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites ». *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 475-486, 2006.
- [5] R. S. Parnas, S. M. Walsh, « Vacuum-Assisted RTM Model ». *Polymer Composites*, 2005.
- [6] M. K. Kang, W. I. Lee, H. T. Hahn, « Formation of microvoids during Resin Transfer Molding process ». *Composites Sciences and Technology*, Vol. 60, pp. 2427-2434, 2000.
- [7] D. H. Lee, W. I. Lee, M. K. Kang, « Analysis and minimisation of void formation during Resin Transfer Molding process ». *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 3281-3289, 2006.
- [8] B. Gourichon, C. Binetruy, P. Krawczak, « A new numerical procedure to predict dynamic void content in Liquid Composite Molding ». *Composites Part A : applied science and manufacturing*, pp. 1961-1969, 2006.
- [9] J. S. U. Schell, M. Deleglise, C. Binetruy, P. Krawczak, P. Ermanni, « Numerical prediction and experimental characterization of meso-scale-voids in Liquid Composite Molding ». *Composites Part A : applied science and manufacturing*, pp. 2460-2470, 2007.
- [10] M. Lin, H. T. Hahn, H. Huh, « A finite element simulation of Resin Transfer Molding based on partial nodal saturation and implicit time integration ». *Composite Part A : applied science and manufacturing*, pp. 541-550, 1998.
- [11] B. R. Gebart, « Permeability of unidirectional reinforcements for RTM ». *Journal of composite materials*, Vol. 26, No. 8, pp. 1100-1133, 1992.
- [12] B. Gourichon, M. Deléglise, C. Binetruy, P. Krawczak, « Dynamic void content prediction during radial injection in Liquid Composite Molding ». *Composites Part A : applied science and manufacturing*, pp. 46-55, 2008.
- [13] C. H. Park, J. Bréard, A. Saouab, W. I. Lee, « Unified saturation and micro-macro voids method in Liquid Composite Molding ». *Int. J Mater Form DOI* 10, 2008.1007/s12289-008-0251-5.