

MODELISATION ET SIMULATION DE LA CREATION, LA COMPRESSION ET LE TRANSPORT DES BULLES D'AIR

Bouchra AABOUD¹, Abdelghani SAOUAB¹

¹ : Normandie Université, UNIHAVRE, CNRS, LOMC, 76600 Le Havre, France

E-mail : bouchra.aaboud@univ-lehavre.fr , abdelghani.saouab@univ-lehavre.fr

Résumé

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans différents domaines, notamment en industrie aéronautique. Le présent travail est positionné dans ce cadre, il est dédié au traitement de la problématique des bulles d'air formées dans les pièces composites unidirectionnelles, lors de leur mise en œuvre par le procédé RTM (Resin Transfer Molding). En effet, leur présence peut réduire considérablement les propriétés du produit final. Dans cette étude, nous nous intéressons plus précisément à la modélisation et la simulation, à double échelle de pores, des phénomènes de création, de compression et de transport des bulles d'air. A partir de cette modélisation, nous avons accès à la prédiction de la porosité finale de la préforme et la qualité d'imprégnation de celle-ci.

Mots clefs : *RTM, Matériaux composites, Bulles d'air, Simulation.*

1. Introduction

La mécanique en toutes ses ramifications, vise la conception de systèmes robustes. Cette robustesse peut être traitée selon différents points de vue : dynamique, fatigue, énergies renouvelables, rhéologie, modélisation, etc. Egalement, les composants du système étudié ont une importance majeure. En effet, la mécanique des solides diffère de celle des liquides ; de la même manière, la modélisation des milieux denses est distincte de celle des milieux poreux. En outre, les procédés de mise en forme et de fabrication agissent largement sur les caractéristiques du produit final.

A partir de ces éléments, nous pouvons positionner notre sujet. En effet, il s'agit d'une problématique relative aux milieux fibreux, en l'occurrence, les matériaux composites. Plus spécifiquement, notre étude concerne les défauts de type bulles d'air qui apparaissent dans les pièces composites et affectent leurs propriétés, lors de la mise en œuvre.

Nous signalons que la présence des bulles d'air dans une structure composite diminue la durabilité et la résistance à la fatigue de celle-ci ; aussi elle augmente son érosion et son absorption d'humidité. En effet, une augmentation de 1% de vide fait diminuer les caractéristiques mécaniques de la pièce de 5% [1]. Dans le domaine aéronautique, une pièce

structurale est jugée de bonne qualité, si sa porosité ne dépasse pas 2%. D'où l'intérêt de la présente étude. Cette dernière portera sur la modélisation et la simulation numérique des différents phénomènes par lesquels passent les bulles d'air, en milieux fibreux à double échelle de pores, lors de la mise en œuvre par le procédé RTM.

2. Outil numérique employé

L'ensemble des développements présenté dans le cadre de cette étude est intégré au sein d'un outil de simulation de l'injection. La modélisation considérée dans ce code se base sur la loi de Darcy pour décrire l'écoulement. A l'aide de l'équation de conservation de la masse, nous avons obtenu l'équation gouvernante en champ de pression.

L'approche numérique employée se repose sur trois différentes méthodes :

- La méthode CVFEM (Control Volume Finite Element Method) qui permet la résolution de l'équation gouvernante ;
- La méthode VOF (Volume Of Fluid) qui permet le suivi de front de résine ;
- La méthode FINE (Floating Imaginary Nodes and Elements) qui permet une localisation précise du front de résine.

3. Phénomènes mis en jeu

D'une manière générale, la problématique de la modélisation des bulles d'air lors de la mise en œuvre des composites par RTM, fait intervenir des phénomènes à la fois hydrodynamique et physico-chimique. Dans ce travail, nous allons nous concentrer sur l'aspect hydrodynamique en travaillant dans des conditions de mise en œuvre isothermes. Dans ce cadre, notre contribution va concerner précisément la modélisation des phénomènes de création, de compression et de transport des bulles d'air (Fig.1).

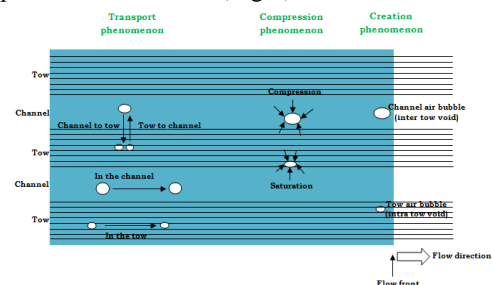


Figure 1 : Phénomènes de création, de compression et de transport des bulles d'air

3.1 Création des bulles d'air

Le phénomène de création des bulles d'air est observé au niveau du front de flux. En effet, durant l'injection, le liquide n'avance pas de la même vitesse par tout dans la préforme.

Nous notons que dans un matériau composite, nous distinguons entre l'échelle macro (inter-mèches) et l'échelle micro (intra-mèches). En conséquence, c'est la microstructure de celui-ci qui favorise l'avancée du liquide dans une échelle plus que dans l'autre. En d'autres termes, si le liquide avance plus rapidement dans les macro-capillaires que dans les micros, alors des micro-bulles d'air seront créées. Dans le cas inverse, des macro-bulles d'air seront formées. Sinon, si les vitesses du liquide dans les macro et micro-capillaires sont identiques, alors aucune bulle d'air ne sera piégée.

La modélisation de la création des bulles d'air proposée dans cette étude repose sur la comparaison des temps de remplissage des capillaires et peut être établie selon deux approches :

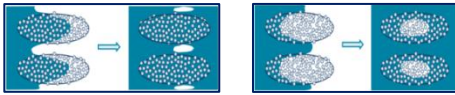


Figure 2 : Première approche [2]

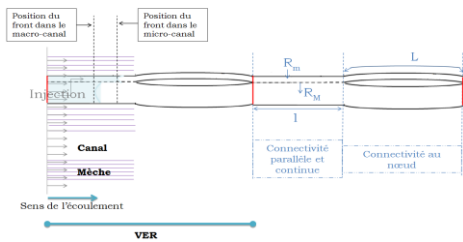


Figure 3 : Deuxième approche [3]

- La première approche (Fig.2) consiste à comparer les temps de remplissage des capillaires selon les directions longitudinale et transversale, à l'échelle macro et micro :

- o Si le minimum des temps de remplissage des macro-capillaires est supérieur à celui des micro-capillaires, alors des macro-bulles d'air seront créées. Le taux de création est estimé par :

$$\phi_{mac} = \left(1 - \frac{\Delta t_{mic}}{\Delta t_{mac}}\right) h_{v,mac}$$

- o Dans le cas contraire, des micro-bulles d'air seront créées, et leur taux peut être calculé par la relation :

$$\phi_{mic} = \left(1 - \frac{\Delta t_{mac}}{\Delta t_{mic}}\right) h_{v,mic}$$

- La seconde approche (Fig.3) est la combinaison de deux modèles, qui, l'un permet le piégeage des macro-bulles d'air et l'autre permet l'emprisonnement des micro-bulles d'air :

- o Si la position du liquide dans le micro-capillaire est supérieure à celle dans le macro-capillaire, alors

des macro-bulles d'air seront formées. Leur taux peut être déduit à partir de l'expression suivante :

$$\phi_{mac} = \frac{R_{mac}^2 (x_{mic}(t_{fL}) - x_{mac}(t_{fL}))}{(R_{mac}^2 + R_{mic}^2)(l + L)}$$

- o Dans le cas contraire, des micro-bulles d'air seront formées, et leur taux peut être calculé comme suit :

$$\phi_{mic} = \frac{R_{mic}^2 (x_{mac}(t_{fL}) - x_{mic}(t_{fL}))}{(R_{mac}^2 + R_{mic}^2)(l + L)}$$

En termes de comparaison entre les deux approches, nous signalons que la première est efficace dans le cas d'une injection à pression imposée. Par ailleurs, dans le cas d'une injection à débit imposé, il n'y a qu'un seul type de bulles d'air qui est détecté (micros). En revanche, la deuxième approche, permet la détection des deux types de bulles d'air (micros et macros) indépendamment des conditions d'injection (pression et débit imposés).

3.2 Compression des bulles d'air

Lors de l'écoulement, les bulles d'air subissent une pression exercée par le fluide qui les entoure. La modélisation du phénomène de compression des bulles d'air peut être régie par la loi des gaz parfaits. Nous considérons que l'air est un gaz parfait et que la température est constante. Ainsi, les taux de compression peuvent être estimés à partir de l'équation suivante :

$$P V = constante$$

Néanmoins, nous distinguons entre l'échelle macro et celle micro, pour le calcul de ces taux [2].

- Au niveau de l'intra-mèche, nous tenons compte de la pression de la résine autour de la bulle, de la pression de l'air à l'intérieur de la bulle et la pression capillaire. Ce sont ces trois composantes qui font diminuer la taille de la micro-bulle. Nous parlons donc de la saturation de la mèche (Fig.4).

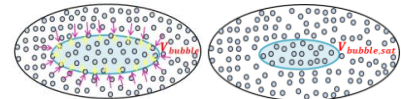


Figure 4 : Saturation de la mèche

- Au niveau de l'inter-mèche, la pression de la résine est prédominante. Par conséquent, elle est responsable de la réduction de la taille de la macro-bulle d'air. Nous parlons donc de la compression (Fig.5).



Figure 5 : Compression des macro-bulles d'air

3.3 Transport des bulles d'air

Une fois créées et comprimées, les bulles d'air sont transportées par l'écoulement. Ce phénomène peut être modélisé à l'aide de l'équation de transport suivante :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla(\varphi \cdot u_b) = \dot{S}$$

Cette équation donne la quantité de bulles d'air transportée φ en fonction de la vitesse des bulles u_b et un terme source \dot{S} [4].

La vitesse des bulles d'air est calculée en fonction de la vitesse du liquide, qui est déduite à partir de l'équation de Washburn.

Le terme source se compose de deux éléments, qui sont la conservation (Fig.6.a) et la migration (Fig.6.b).

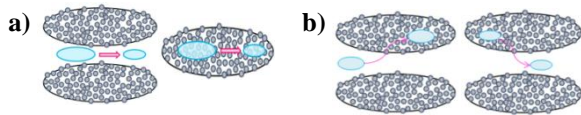


Figure 6 : a) Conservation du type de bulles d'air, b) Migration des bulles d'air

La conservation correspond aux micro/macro-bulles d'air qui demeurent micros/macros tout au long de l'injection. En revanche, la migration désigne les bulles d'air qui changent de capillaires : des micros qui deviennent macros et inversement. Ce phénomène de migration est piloté par les fréquences de migration.

La quantité de bulles d'air restante dans la pièce finale, est appelée porosité et estimée par :

$$R = C * (1 - \varphi)$$

Ainsi, nous pouvons déduire la saturation de la préforme :

$$s = \frac{1 - V_f - R}{1 - V_f}$$

4. Résultats de la simulation numérique

En adoptant la deuxième approche et en réalisant une injection à débit imposé, tels que $Q_{inj} = 0.85 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{vent} = 1.1 \text{ bar}$, $f_{coal} = 0,4$, $f_{acc} = 0,1$ et $f_{tur} = 0,01$, nous donnons les représentations spatiotemporelles des quantités de bulles d'air créées (F) et restées (R) à double échelle de pores, ainsi que celles de la saturation (S) :

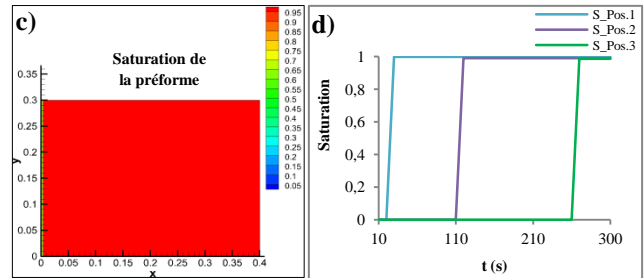
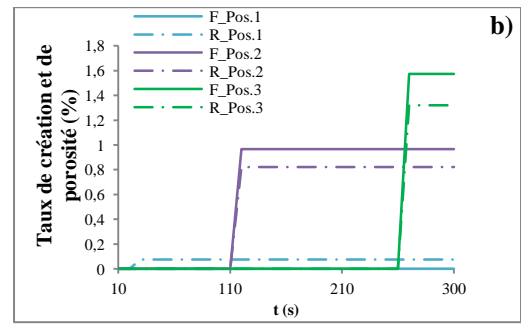
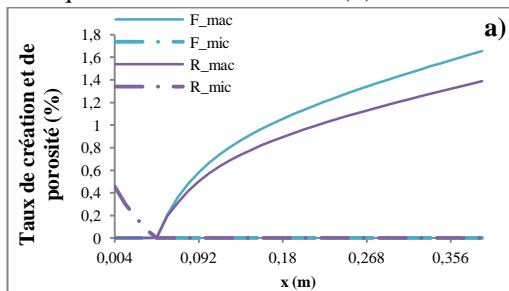


Figure 7 : Création et Porosité en fonction, a) de la position, b) du temps, Saturation en fonction c) de la position, d) du temps

5. Conclusion

Ce travail a permis de traiter la problématique des bulles d'air dans sa totalité. L'approche proposée permet de décrire le cycle de vie de ces bulles en temps et en espace, quelles que soient les conditions d'injection, en modélisant chaque étape de leur développement : création, compression et transport. Ainsi, nous sommes en mesure de prédire la porosité finale de la préforme et la qualité de son imprégnation.

Références

- [1] K. J. Bowles et S. Frimpong, «Void effects on the interlaminar shear strength of unidirectional graphite-fiber-reinforced composites,» *Journal of Composite Materials*, vol. 26, n° 110, 1992.
- [2] C. H. Park, A. Lebel, A. Saouab, J. Breard et W. I. Lee, «Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes,» *ScienceDirect, Composites : Part A*, vol. 42, pp. 658-668, 2011.
- [3] Y. Wielhorski, M. A. Ben Abdelwahed et J. Breard, «Theoretical Approach of Bubble Entrapment Through Interconnected Pores: Supplying Principle,» *Springer*, vol. 96, pp. 105-116, 2013.
- [4] B. Aaboud, *Modélisation et simulation de la formation, la compression et le transport des bulles d'air en milieu fibreux à double échelle de pores : Application au procédé RTM*, PhD thesis, Le Havre: Université du Havre, 2016.