



**HAL**  
open science

## **Modélisation du couplage hydromécanique en milieu fibreux déformable non-saturé: Application aux procédés d'infusion.**

Mouna Zaidani, Tariq Ouahbi, Chung-Hae Park, Abdelghani Saouab, Joël Bréard

► **To cite this version:**

Mouna Zaidani, Tariq Ouahbi, Chung-Hae Park, Abdelghani Saouab, Joël Bréard. Modélisation du couplage hydromécanique en milieu fibreux déformable non-saturé: Application aux procédés d'infusion.. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.213. hal-00596995

**HAL Id: hal-00596995**

**<https://hal.science/hal-00596995>**

Submitted on 30 May 2011

**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 du couplage hydromécanique en milieu fibreux déformable non-saturé: Application aux procédés d'infusion.**

## *Modeling of hydro-mechanical coupling of unsaturated deformable fibrous medium: Application to infusion processes*

**Mouna Zaidani, Tariq Ouahbi\*, Chung-Hae Park, Abdelghani Saouab et Joël Bréard**

Laboratoire Ondes et Milieux Complexes. (LOMC, FRE 3102 CNRS)  
Université du HAVRE - BP 540 - 76058 Le Havre CEDEX  
\* e-mail : ouahbit@univ-lehavre.fr

### **Résumé**

La modélisation des procédés de mise en œuvre des matériaux composites par infusion, nécessite la prise en compte du couplage hydro-mécanique entre l'écoulement de la résine et la déformation de la préforme fibreuse. Dans ce travail nous avons intégré un modèle de formation de vides à un modèle numérique pour le traitement du couplage hydro-mécanique en milieu fibreux déformable. Ce modèle de couplage hydro-mécanique est basé sur des équations de conservation moyennées obtenues par une prise de moyenne, sur un VER (Volume Élémentaire Représentatif) déformable, des équations de conservation locales relevant de la mécanique des milieux continus (masse, quantité de mouvement). Afin de mieux contrôler ces procédés d'infusion, où les étapes d'infiltration de la résine et de la compression du renfort se déroulent simultanément, Il est important de prédire le temps d'infusion, l'évolution de l'épaisseur de la pièce et le taux de défauts. Le modèle de formation de défauts intégré ici est basé sur un modèle mathématique permettant de prédire l'évolution de la répartition et du taux volumique des défauts (micro-vides et macro-vides) dans la pièce en fonction des paramètres procédé. Nous présenterons quelques résultats de simulations d'infusion de résine par le procédé VAP (Vacuum Assisted Process). Ce procédé, qui dispose d'une membrane microporeuse perméable au gaz et constituant une barrière contre la résine (Fig. 1), permet de réduire considérablement les inclusions d'air et de gaz. Une attention particulière sera portée à l'étude et l'analyse de l'influence de la déformabilité du renfort fibreux sur les caractéristiques (porosité, taux de vide,..) de la pièce obtenue. Une étude paramétrique relative au temps d'infusion, au taux volumique de fibres et au taux de vide dans la pièce en fonction des paramètres procédé (contrainte totale, pression à l'évent) sera présentée.

### **Abstract**

In the infusion process, it is important to take into account the reinforcement deformation as well as the resin flow. Moreover, the analysis of the process physics clearly shows the existence of a hydro-mechanical coupling between these two phenomena. In this work, a numerical tool to model the hydro-mechanical coupling of unsaturated deformable fibrous medium, considering a void formation and compression/tow saturation models is presented. The case study of two phase deformable medium requires an analyse of the pore scale phenomena and an up-scaling method on a Representative Elementary Volume (REV) of the local mass conservation equations, The reinforcement compressibility and the resin flow occur simultaneously and there is thus a mutual influence between the two "solid and liquid" phases. It is important to simulate the infusion process by calculating the maximum height infused by the resin, the final height of the part, the infusion time and the content of entrapped air in the final part. In the simulation code, a void formation model is integrated considering two different flows in the macropore and the micropore, respectively, the viscous flow and the capillary wicking.

We propose modeling and simulation of resin infusion processes (such as the vacuum assisted process), However, the perform stack is covered by an air/gas permeable, microporous membrane, under vacuum conditions, the small molecules of trapped air can be removed, while the large-molecules of resin stays stable in the mould (Fig. 1) . The influence of fibrous medium deformation on fiber tow saturation and void formation during infusion is presented too. Finally, a parametric study will be presented to show the advantage of vacuum application at air vents to reduce the void content in the final part.

**Mots Clés :** procédés d'infusion, déformabilité du renfort, taux de vide, étude paramétrique.

**Keywords :** infusion process, fibrous medium deformation, void content, parametric study.

## 1. Introduction

Les procédés d'infusion, tels que le VAP 'Vacuum assisted process' (Fig. 1), ont été développés ces dernières années afin de réduire les coûts de production et de résoudre les problèmes de remplissage de pièces de grandes dimensions. Le VAP est une technique conçue et brevetée par EADS qui est basée sur une technique d'infiltration à basse pression renforcée par une membrane. Cette membrane microporeuse est perméable au gaz, imperméable à la résine (Fig. 1) et elle favorise un dégazage en continu de la résine pendant la mise en œuvre. Par conséquent, Les inclusions d'air et de gaz dans la pièce finale sont considérablement réduites.

D'une manière générale, le principe de la mise en œuvre des matériaux composites par infusion, consiste à infuser la résine, sous l'action d'une contrainte totale et/ou du vide, à travers l'épaisseur de la préforme fibreuse [1,2]. La maîtrise de ces techniques d'infusion, nécessite une meilleure compréhension de la physique de ces procédés. Dans ce cas, contrairement au procédé RTM, les étapes d'infiltration de la résine et de la compression du renfort se déroulent simultanément.

La prise en compte du couplage Hydro-Mécanique présent entre l'écoulement de la résine et la compression de la préforme fibreuse est nécessaire dans le but de développer un outil numérique efficace permettant le contrôle de ces procédés.

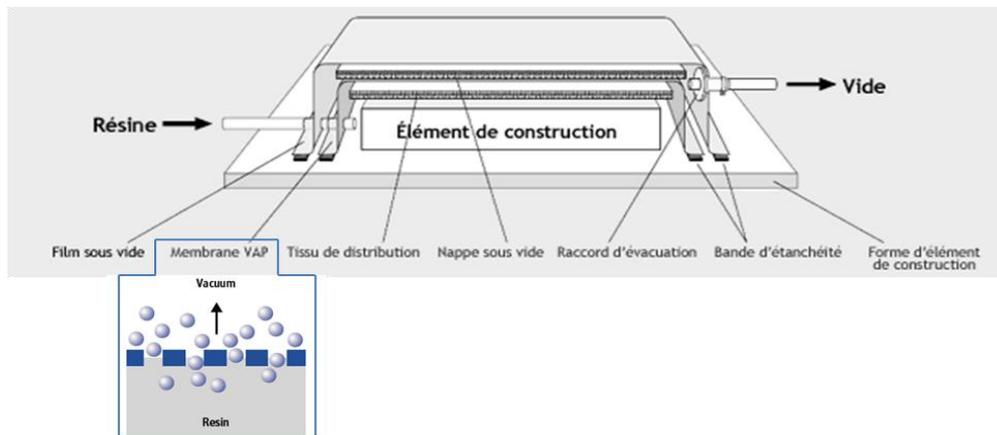


Fig.1. Schéma descriptif du procédé d'infusion (VAP).

Dans la plupart des études rencontrées dans la littérature concernant la modélisation d'infiltration des milieux fibreux, le problème est simplifié à une infiltration considérée saturée à travers une préforme rigide [3,4]. Le milieu poreux est alors caractérisé par son tenseur de perméabilité  $K$ , qui demeure constant tout au long du procédé. Alternativement, beaucoup de travaux se sont focalisés sur les problèmes d'écoulements saturés en milieux poreux compressibles. La plupart de ces études sont basées sur la mécanique des sols, datant des premiers travaux de Dave [5] à des travaux plus récents qui prévoient les changements locaux du taux volumique de fibres dans la préforme lors de l'infiltration [6-7]. Dans ce travail, nous sommes basés sur un modèle numérique qui traite le couplage hydro-mécanique dans les milieux fibreux lors des procédés d'infusion. Ce modèle, basé sur des lois de comportement des matériaux obtenues à partir de mesures expérimentales, a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux [8]. En outre, le renfort fibreux est considéré comme déformable dans le sens de l'épaisseur, et l'infiltration de résine se produit à travers l'épaisseur de la préforme.

La présence d'air piégé peut considérablement altérer la qualité des composites. Pour répondre aux normes de l'aéronautique, le taux de vide doit être très faible. La présence des défauts dans la pièce résulte principalement de l'hétérogénéité de la microstructure de la préforme fibreuse, cette inhomogénéité provoque une perméabilité non-uniforme du renfort, ce qui entraîne à son tour la variation de la vitesse de la résine à l'échelle microscopique d'un point à un autre.

La microstructure de la préforme fibreuse est caractérisée par une répartition bimodale de la taille des pores : les macropores (correspondant aux espaces entre les mèches du tissu) et les micropores (correspondant aux espaces entre les filaments composant celles-ci) [9].

L'écoulement visqueux est dominant dans les macropores, tandis que les forces capillaires sont plus importantes dans les micropores. En effet, la pression capillaire est inversement proportionnelle à la taille des pores. Par conséquent, le mécanisme de formation de vides peut être considéré comme une compétition entre écoulement visqueux dans les macropores et écoulement capillaire dans les micropores. Le nombre capillaire est alors introduit, ce nombre capillaire ( $Ca$ ) est lié aux effets d'échelles micro-macro et définit l'équilibre des forces visqueuses et capillaires :

$$Ca^* = \frac{\mu v}{\gamma \cos \theta} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec  $\mu$  est la viscosité de la résine,  $v$  est la vitesse de la résine,  $\gamma$  est la tension de surface la résine et  $\theta$  est l'angle de contact.

La formation de macrovides ou de microvides dépend de la vitesse d'écoulement de la résine. Quand cette vitesse est élevée (grand nombre capillaire), les vides se forment à l'intérieur de la mèche parce que le flux dans le canal est plus rapide que celui à l'intérieur des mèches, en raison de la perméabilité importante dans les canaux (entre les mèches) (Fig.2.a). Par contre, Pour des faibles vitesses de résine (petit nombre capillaire), l'écoulement capillaire entre les mèches va dominer et donc les vides se forment dans les canaux entre les mèches (Fig.2.b) [10-11].

Dans ce travail, nous présentons donc une approche de simulation multiphasique de l'écoulement en milieu poreux compressible, intégrant un modèle de formation de vide [12-13], de compression de vides dans les macropores et de saturation de mèches. En effet ; au niveau du front de l'écoulement de la résine, une fois les bulles d'air sont créés, leur taille et leur position changent avec le temps et en fonction de la déformation du milieu fibreux. L'imprégnation de la résine à travers la préforme fibreuse est modélisée comme étant un écoulement non saturé à travers un milieu poreux, où la loi de Darcy et les équations de conservation de la masse de résine et de fibres sont considérées. Une étude paramétrique est effectuée, afin de souligner l'avantage de l'application du vide pour réduire le taux de défauts (macro et micro vides) et l'influence de la déformation de la préforme fibreuse sur la formation du vide et la compression/ saturation des mèches durant l'infusion.

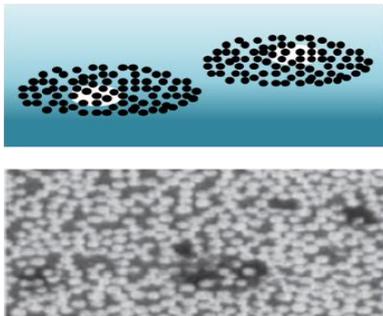


Fig.2a. Formation de vides dans les micropores.  
(grand nombre capillaire).

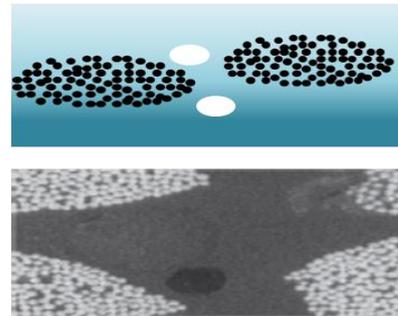


Fig.2b. Formation de vides dans les macropores.  
(faible nombre capillaire).

## 2. Modélisation du couplage hydromécanique

L'étude du couplage hydro-mécanique dans les milieux fibreux déformables repose sur la compréhension du phénomène de l'imprégnation des pores par un fluide et leurs déformations. Il est donc important d'étudier et de prendre en compte les différents mécanismes mis en jeu lors de cette imprégnation du milieu poreux déformable considéré. La morphologie de ces milieux peut également conduire à des discontinuités des deux phases (solide et liquide) dans certaines régions. Par conséquent dans ce cadre, la modélisation du comportement des grandeurs physiques de ce couplage devient parfois délicate, et l'une des techniques utilisées pour remédier à cette problématique est la prise de moyenne volumique. Cette méthode, basée sur le choix d'un VER, permet un changement d'échelle et assure la continuité des variables dans le milieu fibreux. Il a été démontré [14,15] que la prise en compte du caractère déformable du VER n'introduisait aucune modification sur la forme de l'équation classique de conservation de masse.

Afin de bien poser le problème du couplage hydro-mécanique dans ce cadre, nous allons introduire un ensemble d'équations en tenant compte de la déformation du milieu.

### 1.1 Les équations gouvernantes

L'écoulement de la résine dans une région partiellement saturée peut être caractérisé comme étant un écoulement triphasique dans un milieu poreux. Dans ce cas, nous prenons en compte la notion de la saturation de la phase liquide, et qui se développe au cours de l'imprégnation à l'échelle macroscopique et à l'échelle microscopique. Cette grandeur est directement liée à la formation de macrovides et de microvides:

$$S = \frac{v_l}{(1-v_f)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Où :  $v_l$  est le volume liquide et  $v_f$  est le taux volumique de fibres.

Les équations de conservation de la masse de résine et de fibres sur un volume élémentaire représentatif peuvent être exprimées respectivement comme suit:

$$\text{Phase liquide} \quad \frac{\partial \phi S}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi S u^l) = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{Phase solide} \quad \frac{\partial (1-\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot ((1-\phi) u^s) = 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

Où :  $\phi$  représente la porosité du milieu,  $u^l$  la vitesse du liquide et  $u^s$  le déplacement du renfort.

La combinaison de ces deux équations, conduit à l'équation de conservation de la masse suivante:

$$\nabla \cdot q = -\frac{S}{1-\phi} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \phi \cdot u^s \right) - \phi \left( \frac{\partial S}{\partial t} + \nabla S \cdot u^s \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

L'écoulement de la résine à travers les fibres est un exemple typique d'un écoulement en milieux poreux qui, à l'échelle macroscopique, est bien décrit par la loi de Darcy (Darcy, 1856) reliant linéairement la vitesse du liquide  $q_i$  au gradient de la pression  $\nabla P$  par la viscosité de la résine  $\mu$  et la perméabilité  $k_{ij}$  du milieu poreux [16] :

$$q_i = \frac{-k_{ij}(S)}{\mu} \nabla P \quad (\text{Eq. 6})$$

La combinaison de l'équation de conservation de la masse (5) et l'équation de conservation de la quantité de mouvement (6), conduit à l'équation générale qui gouverne l'écoulement :

$$\nabla \cdot \left( \frac{-k_{ij}}{\mu} \nabla P \right) = -\frac{S}{1-\phi} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \phi \cdot u^s \right) - \phi \left( \frac{\partial S}{\partial t} + \nabla S \cdot u^s \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Dans les procédés d'infusion, la préforme est soumise à deux modes de pressions: (i) la pression due à l'infiltration de la résine à travers la préforme  $P$  et (ii) l'action de la contrainte totale appliquée  $\sigma_{tot}$ . L'équilibre mécanique entre les forces développées par ces pressions peut être formulé par l'intermédiaire de la loi de Terzaghi [17]:

$$\langle \sigma_{tot} \rangle = \langle \sigma' \rangle + PSI \quad (\text{Eq. 8})$$

Cette loi exprime que la contrainte totale  $\sigma_{tot}$ , peut être exprimée en fonction de la contrainte effective  $\sigma'$  (qui agit sur le solide) et en fonction de la pression  $P$  de la phase liquide (où  $S$  est le degré de saturation et  $I$  le tenseur unité).

Dans ce travail, nous nous plaçons, dans le cadre d'un écoulement unidirectionnel, de direction  $z$ , les évolutions de la perméabilité et de la compressibilité du renfort sont identifiées expérimentalement via un dispositif HMz développé à l'université du Havre [18].

Dans ce travail, la modélisation de la saturation des mèches, notamment en compression, nous incite à s'intéresser en particulier à la compressibilité de la mèche. L'approche que nous avons adoptée repose sur l'évaluation de la variation du taux volumique de fibres de la mèche en se basant

sur la variation globale du taux volumique de fibres du renfort. Certains auteurs se sont penchés sur des aspects plus théoriques du problème de compression en se basant sur la théorie des poutres. Leur analyse s'est focalisée sur un modèle micromécanique d'une cellule élémentaire, en assimilant les fibres du renfort à des poutres soumises à des sollicitations compressives [19]. Ici, nous supposons que la mèche a une forme rectangulaire et que seulement l'épaisseur de la mèche ( $H(t)$ ) varie durant la compression (Fig.3) [20], la largeur  $b_0$  de la mèche demeure constante. Nous utilisons le modèle de Gutowski [21], développé pour la simulation de la compression des renforts saturés [22]. Ce modèle établit une relation entre la contrainte effective  $\sigma'$  et le taux volumique de fibres de la mèche  $\nu f_m$  :

$$\sigma' = \frac{3\pi E}{\beta^4} \frac{\left( \sqrt{\frac{\nu f_m}{\nu_0}} - 1 \right)}{\left( \sqrt{\frac{\nu_a}{\nu f_m}} - 1 \right)^4} \quad (\text{Eq. 9})$$

Avec  $E$  est le module d'Young de fibres,  $\nu_0$  est le taux de fibres initial de la mèche,  $\nu_a$  est le taux de fibres maximal, et  $\beta$  est une constante empirique.

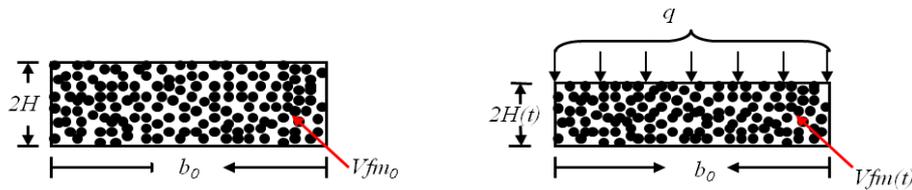


Fig. 3. Modèle de compression d'une mèche.

### 3. Modélisation de la formation de vides et de la compression/saturation des mèches

Les bulles d'air se forment au niveau du front à cause de la non-uniformité de la vitesse de la résine, cette non-uniformité est due à une compétition entre l'écoulement visqueux dans les macropores et la pression capillaire dans les micropores. Un modèle de formation de vides considérant deux différents flux dans les macropores et dans les micropores a été proposé par Kang et al. [23]. Dans cette approche, la formation des bulles d'air dans les canaux et à l'intérieur des mèches a été modélisée, les résultats de modélisation ont montré un bon accord avec les corrélations expérimentales du taux de vides en fonction du nombre capillaire. En supposant que le gradient de pression de la résine est identique dans les macropores et dans les micropores, le temps nécessaire pour que le front de résine traverse la hauteur d'une mèche  $h_{low}(t)$  a été calculé dans les macropores  $h_c(t)$  et à l'intérieur des mèches  $h_t(t)$  [23-12], comme indiqué dans (Fig.4).

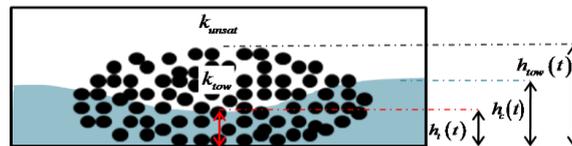


Fig. 4. Deux différents flux dans les macropores et dans les micropores

#### 3.1 Formation des bulles d'air

Entre les mèches, l'écoulement de la résine est un écoulement visqueux. Dans cette zone, la vitesse de la résine est obtenue en utilisant la loi de Darcy. La vitesse de la résine dans les macropores  $u_c$  peut être estimée donc comme suit:

$$u_c = \frac{dh_c}{dt} = -\frac{k_{unsat}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (\text{Eq.10})$$

Dans les mèches, la pression capillaire doit être considérée dans le calcul de l'avancement du front de résine à travers la mèche (ligne rouge de la figure 4). La vitesse de la résine dans les micropores est évaluée par:

$$u_T = \frac{dh_T}{dt} = -\frac{1}{1-V_{f,T}} \frac{k_T}{\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{P_{cap}}{h_T} \right) \quad (\text{Eq.11})$$

Où  $V_{f,T}$  est le taux volumique de fibres de la mèche,  $k_T$  est la perméabilité de la mèche et  $P_{cap}$  est la pression capillaire. La perméabilité de la mèche  $k_T$  dans le sens transversal est déterminée à l'aide du modèle de Gebart [24] et la pression capillaire est calculée de la façon suivante [25]:

$$P_{cap} = \left( \frac{F}{D_f} \right) \frac{V_{f,T}}{1-V_{f,T}} \gamma \cdot \cos \theta \quad (\text{Eq.12})$$

Ici,  $\gamma$  représente la tension de surface,  $D_f$  le diamètre des fibres,  $\theta$  l'angle de contact et  $F$  un facteur de forme (considéré égal à 2 pour la direction transversale). Le temps nécessaire pour que le front de résine dans les macropores  $\Delta t_C$  et dans les micropores  $\Delta t_T$ , traverse la hauteur totale d'une mèche est ensuite calculé en utilisant les vitesses  $u_c$ ,  $u_T$  et la hauteur  $h_{tow}$  de la mèche. Si le temps de traversée nécessaire d'une mèche  $\Delta t_T$  est plus important que le temps nécessaire du parcours du canal  $\Delta t_C$ , les bulles d'air sont formées dans les micropores (Fig.5a), Dans le cas contraire, les bulles sont plutôt formées dans les macropores (Fig. 5b).

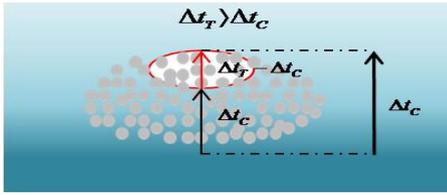


Figure 5.a: Bulle d'air formée dans la mèche.

( $\Delta t_T > \Delta t_C$  : Bulle dans les micropores)

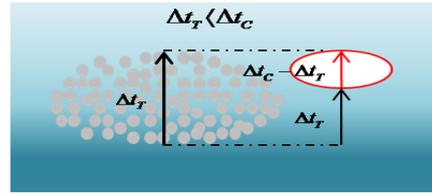


Figure 5.b: Bulle d'air formée dans le canal.

( $\Delta t_T < \Delta t_C$  : Bulle dans les macropores)

Le rapport des deux temps  $\Delta t_T$  et  $\Delta t_C$  décrit la compétition entre les flux dans les micropores et dans les macropores. Si le temps  $\Delta t_T$  est plus important que  $\Delta t_C$  ( $\Delta t_T > \Delta t_C$ ), le taux de bulles d'air formées dans les micropores peut donc être obtenu (Eq. 13). Dans le cas contraire, nous obtenons de la même façon le taux de bulles d'air dans les macropores (Eq. 14).

$$\Phi_T = h_v \cdot \left( 1 - \frac{\Delta t_C}{\Delta t_T} \right) \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\Phi_C = h_v \cdot \left( 1 - \frac{\Delta t_T}{\Delta t_C} \right) \quad (\text{Eq. 14})$$

avec  $h_v$  est le facteur de forme des bulles d'air.

### 3.2 Compression des bulles d'air et saturation des mèches

Lors de l'opération d'infusion, la résine exerce une pression sur chaque bulle d'air. En effet ; la bulle est formée au niveau du front de résine à une pression donnée, lorsque ce front avance, la pression de la résine qui entoure cette bulle d'air varie en fonction du temps et engendre par conséquent sa compression. En utilisant la loi des gaz parfaits, le nouveau taux de bulles d'air dans les canaux après la compression peut donc être déterminé comme suit (Eq. 15) :

$$\Phi_{C,new}(t + \Delta t, z) = \frac{P_{old}(t, z)}{P_{new}(t + \Delta t, z)} \cdot \Phi_{C,old}(t, z) \quad (\text{Eq. 15})$$

Dans la plupart des études proposées dans la littérature qui concernent la modélisation de la saturation des mèches, la géométrie de la mèche est ramenée souvent à une forme rectangulaire ou

cylindrique [26]. Dans ce travail, nous considérons dans la continuité du modèle de compressibilité de la mèche précédemment présenté, que la mèche présente une forme rectangulaire, dont la hauteur est  $H(t)$ . Nous désignons par  $h(t)$  la hauteur de la partie non-saturée à l'intérieur de la mèche (Fig. 6a).

La saturation de la mèche est entraînée par l'effet de la pression de la résine qui entoure la mèche, celui de la pression capillaire au front de l'écoulement et de la pression à l'intérieur de la bulle d'air (Fig. 4a). Si nous supposons que l'air piégé à l'intérieur de la mèche, ne peut pas s'échapper ou se dissoudre dans la matrice, la pression du vide à l'intérieur de la mèche augmente et les bulles d'air sont ensuite comprimées [12,27]. Dans ce cadre, la pression du vide à chaque instant de la partie non saturée de la mèche, peut être estimée en utilisant la loi des gaz parfaits (Eq. 16) :

$$P_{void}(t + \Delta t, z) = \frac{\Phi_r(t, z)}{\Phi_r(t + \Delta t, z)} \cdot P_{void}(t, z) \quad (\text{Eq. 16})$$

La micro imprégnation de la mèche entraînée par le gradient de pression, peut être estimée à l'aide de la loi de Darcy (Eq. 17) :

$$q_r = \frac{K_r}{\mu} \frac{P_{resin} - P_{void} + P_{cap}}{H(t) - h(t)} \quad (\text{Eq. 17})$$

Au cours de la saturation des mèches, à chaque instant, la partie saturée de la mèche par le flux de résine  $\Delta\Phi$  est calculée (voir partie rouge de la Fig. 6b) par :

$$\Delta\Phi_r = \frac{q_r \cdot A \cdot \Delta t}{(1 - V_f) \cdot Volume_{total}} \quad (\text{Eq. 18})$$

Avec  $A$  et  $Volume_{total}$  sont respectivement la surface de la partie saturée de la mèche et le volume total de la mèche. Dans la plupart des approches de modélisation, la mèche est infiltrée par la résine par la face supérieure et la face de base uniquement [23]. Dans ce travail, on considère que la mèche est infiltrée par la résine à travers toutes ses faces. Nous introduisons dans ce cadre un facteur d'imprégnation  $\alpha$ , qui peut prendre une valeur entre 0 et 1. Les nouvelles dimensions de la partie non saturée peuvent être exprimées de la façon suivante:

$$\begin{cases} 2h(t) = 2H(t) \cdot \Phi^\alpha \\ b(t) \cdot l(t) = BL \cdot \Phi^{1-\alpha} \end{cases} \quad 0 < \alpha < 1 \quad (\text{Eq. 19})$$

En combinant les équations (Eq. 18) et (Eq. 19), nous obtenons à chaque instant, le nouveau taux de vides dans les micropores durant la saturation :

$$\Phi_r(t + \Delta t) = \Phi_r(t) - \frac{K_r}{\mu} \frac{\Delta t}{(1 - V_f)} \frac{\Delta P}{H(t)^2} \frac{1}{\Phi^{(2\alpha-1)}} \quad (\text{Eq. 20})$$

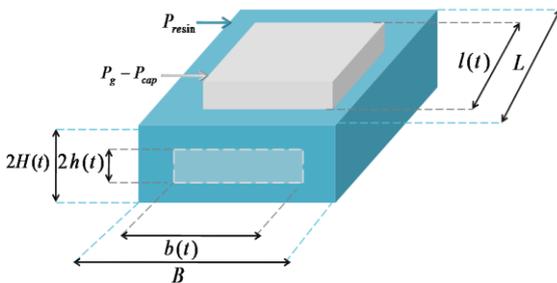


Figure 6.a: Dimensions de la mèche et de la zone non saturée.

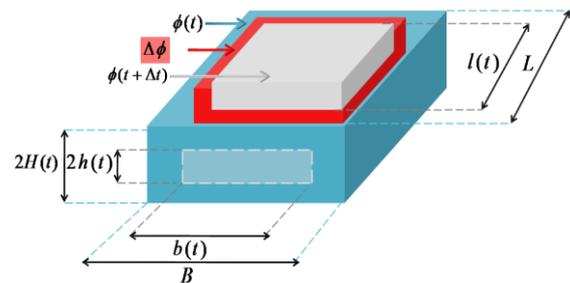


Figure 6.b: Configuration de la mèche lors de la saturation.

#### 4. Modélisation numérique : résultats et discussion

Dans les procédés d'infusion, l'identification de l'épaisseur finale de la pièce, du temps d'infusion et du taux de vide global correspondent à des informations très importantes. Ces paramètres interviennent dans la prédiction du coût de fabrication et des propriétés mécaniques de la pièce finale. Ici, nous avons intégré les modèles de formation de vides, compression/saturation des

mèches au modèle de couplage hydro-mécanique proposé précédemment. L'outil de simulation ainsi développé nous permet de suivre l'avancée du front de résine et de connaître l'évolution de la distribution du champ de pression. En fonction de ces paramètres, le taux de vide dans la pièce est calculé et l'influence de la déformation du milieu fibreux sur la formation du vide est étudiée.

#### 4.1 Résultats numériques

Le Vacuum Assisted Process est un procédé d'infiltration à basse pression. Nous considérons dans cette application une pression d'injection équivalente à la pression atmosphérique ( $10^5 \text{Pa}$ ) et une pression à l'évent maintenue constante à ( $5 \cdot 10^3 \text{Pa}$ ). Le taux de fibres initial du renfort est de 60%. Le renfort utilisé est un carbone NCF (Non Crimp Fabric), la microstructure du renfort et les propriétés de la résine sont indiquées dans le tableau (Tab. 1) :

Paramètres	Symboles	Valeur
Viscosité	$\mu$	0.15 Pa.s
Tension de surface	$\gamma$	0.0317 N/m
Angle de contact	$\theta$	$30^\circ$
Taux volumique de fibres du renfort initial	$V_f$	0.6
Taux volumique de fibres de la mèche	$V_{fT}$	0.65
Facteur de forme de la bulle	$h_v$	0.6
Diamètre de fibre	$D_f$	$7 \mu\text{m}$
Hauteur de la mèche	$2H$	0.8 mm
Module d'Young des fibres	$E$	240 GPa
Paramètre empirique	$\beta$	320
Facteur de remplissage de la mèche	$\alpha$	1/3

Table 1: Propriétés de la résine et de la micro-architecture du renfort.

La figure (Fig. 7a), présente les résultats numériques que nous avons obtenus dans le cadre de la description du taux de vides dans les macropores et dans les micropores en fonction de l'épaisseur finale de la pièce. La figure (Fig. 7b), décrit l'évolution du taux de vides (micro et macro) en fonction du nombre capillaire modifié  $Ca^*$ .

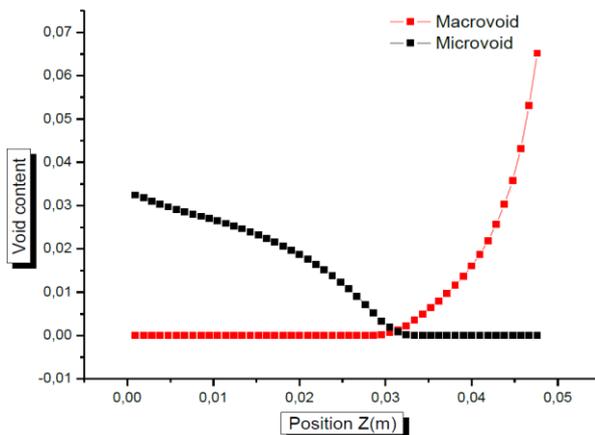


Figure 7.a: Taux de vides en fonction de la position Z. (Avec compression/saturation des mèches).

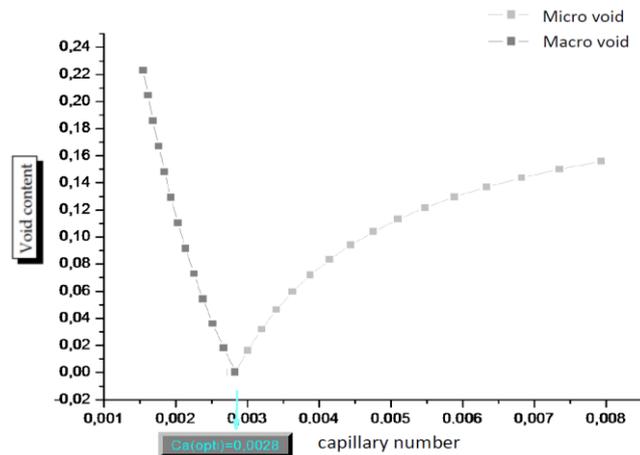


Figure 7.b: Taux de vides en fonction du nombre capillaire. (Sans compression/ saturation des mèches).

Au début de l'infusion, la vitesse d'imprégnation est élevée, par conséquent; le flux visqueux entre les mèches est plus important que l'écoulement capillaire à l'intérieur des mèches. Ce qui engendre, plutôt la formation des microvides. Au cours de l'infusion, l'avancement du front de l'écoulement à travers l'épaisseur devient faible, l'écoulement capillaire entre les mèches devient alors dominant et les macrovides se forment dans les canaux entre les mèches.

Plusieurs études expérimentales ont montrées l'existence d'une dépendance entre le taux de vides et le nombre capillaire [13,23], il a été observé que pour un nombre capillaire optimal, le taux de vides est minimal. L'évolution du taux de vides (sans prise en compte de la compression/saturation des

mèches) en fonction du nombre capillaire est présentée sur la figure 7.a, nous avons identifié un nombre capillaire optimal de l'ordre de  $2,8.10^{-3}$ .

Nous nous sommes également intéressés à l'influence de la déformation du milieu fibreux sur la formation du taux de vide. Une comparaison du taux de vides dans les micropores (Figure.8.a) et les macropores (Figure.8.b) entre un milieu rigide et un milieu déformable a été effectuée. Nous constatons que la déformabilité du milieu fibreux favorise la compression des bulles d'air et la saturation des mèches, le taux de macro et micro vides est donc plus important dans un milieu rigide que dans un milieu déformable.

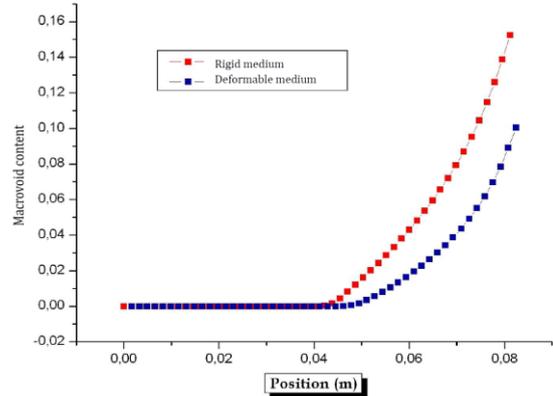
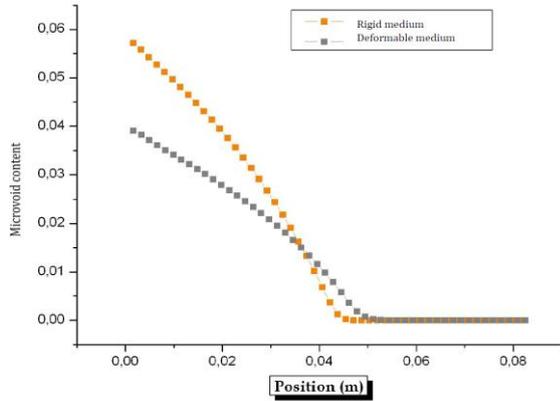


Figure 8.a: Taux de microvides en fonction de la position Z.

Figure 8.b: Taux de Macrovides en fonction de Z.

Figure 8: Taux de vides pour un milieu rigide et un milieu déformable en fonction de la position Z.

### 5. Etude paramétrique

Le taux volumique de fibres final et le taux de vides global sont des paramètres importants dans la mise en œuvre des matériaux composites, car les propriétés mécaniques et la qualité de la pièce en dépendant. Dans notre étude paramétrique, le taux volumique de fibres et le taux du vide global sont présentés en fonction de différentes pressions maintenues à l'événement (Figure 9). Nous constatons, que plus la pression à l'événement est faible, plus le taux de vides global est réduit. Quand la pression à l'événement est réduite par une application du vide, la pression de l'air dans la bulle au moment de sa formation est également faible. Par conséquent donc, la compression des bulles d'air et la saturation des mèches sont plus importantes. Il faut donc baisser au maximum la pression à l'événement pour contribuer à réduire le taux de bulles d'air lors du procédé réel.

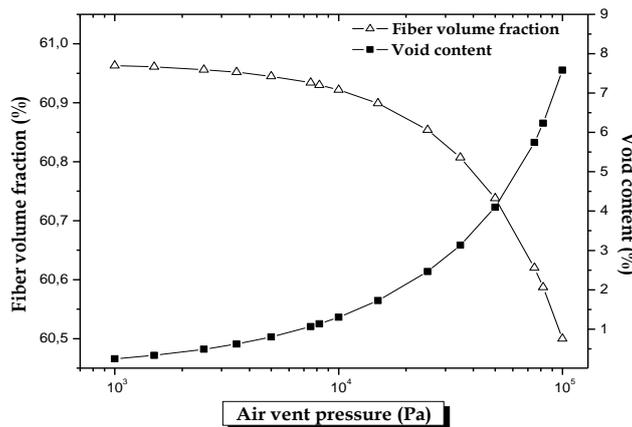


Figure 9: Résultat de simulation du taux de vides global et du taux volumique de fibres en fonction de la pression à l'événement.

### 6. Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté un modèle numérique permettant de simuler l'écoulement multiphasique dans un milieu déformable à double échelle de porosité, en prenant en compte le

phénomène de la formation de bulles d'air dans les canaux et dans les mèches. Un modèle permettant la description de la compression des bulles d'air et celle de la saturation des mèches ont été également proposés. Une étude de l'influence de la déformabilité du milieu poreux sur la formation des bulles d'air ainsi qu'une étude paramétrique sur l'analyse de l'effet de la pression à l'évent dans la réduction du taux de vides ont été effectuées. Ces travaux numériques seront prochainement complétés par une étude expérimentale pour confronter les deux aspects et valider le modèle proposé.

## Références

- [1] N. C. Correia, F. Robitaille, A. C. Long, C. D. Rudd, P. Simacek P, S. G. Advani, «Analysis of the vacuum infusion moulding process: I.Analytical formulation ». *Comp Part A*, 36(2005) 1645.
- [2] Williams, J. Summerscales, S. Grove, « Resin infusion under flexible tooling (RIFT): a review ». *Comp Part A*. 27(1996) 517.
- [3] R. Parnas, « Liquid composite molding. Munich: Hanser Publisher ». pp 170, 2000
- [4] S. G. Advani, «Flow and rheology in polymer composite manufacturing ». *Composite materials series*, Vol. 10, pp. 10, 1994.
- [5] R. Dave, J. L. Kardos, M. P. Dudukovic, «A model for resin flow during composite processing: Part 1- General mathematical development ». *Polym Compos*, Vol. 8, pp. 29-38, 1987.
- [6] V. Michaud, J. AE. Manson, « Impregnation of compressible fibre mats with a thermoplastic resin ». *J Compos Mater*, Vol. 35 1150, 2001.
- [7] A. Farina, L. Preziosi, « Deformable porous media and composites manufacturing ». *Politec di Torino*,1999.
- [8] T. Ouahbi, A. Saouab, J. Bréard, P. Ouagne, S. Chatel, «Modelling of hydro-mechanical coupling in infusion processes ». *Comp Part A*, Vol. 38, 2007.
- [9] C. Binetruy, «Calcul et validation expérimentale de la perméabilité et prévision de l'imprégnation de tissus en moulage RTM ». *Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Douai*, 1996.
- [10] 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 ». *Comp Sci Tech*, Vol. 66, 2006.
- [11] N. Patel, V. Rohatgi, L. J. Lee, « Modeling of void formation and removal in liquid composite molding, part II: model development ». *Polym Compos*, Vol. 17, 1996.
- [12] C. H. Park, A. Lebel, J. Bréard, A. Saouab, W. I. Lee, «Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes ». *Comp Part A*, Vol. 42, pp. 658-668, 2011.
- [13] N. Patel, V. Rohatgi, L. J. Lee, «Micro scale flow behavior and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fiberglass mat ». *Polym Eng Sci*, Vol. 35, 1995.
- [14] T. Ouahbi, « Modélisation du couplage hydro-mécanique en milieu fibreux déformable : application aux procédés d'infusion ». *Thèse de Doctorat*. Université du Havre, 2008.
- [15] J. Wahbi, D. Bruneau, G. Caceres, « Milieu poreux diphasique déformable : volume élémentaire représentatif déformable et prise de moyenne d'une équation de transport ». *18ème Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, 2007.
- [16] V. Antonucci, M. Giordano, L. Nicolais, A. Calabro, A. Cusano, et al, «Resin flow monitoring in the resin film infusion process ». *J Mat Pro Tech*, Vol. 143, 2003.
- [17] K. Terzaghi, R. B. Peck et G. Mesri. Soil mechanics in engineering practice. Jones Wiley & Sons, New York, 1967.
- [18] P. Ouagne, J. Bréard, T. Ouahbi, C.H. Park, A. Saouab, « Hydro-mechanical loading and compressibility of fibrous media for resin infusion processes ». *Int J Mat Forming*, Vol. 3, pp. 1287-1294, 2010.
- [19] B. Chen, T.-W. Chou, «Compaction of woven fabric preforms in liquid composite molding processes: single-layer deformation ». *Comp Sci Technol*, Vol. 59, pp. 1519-26, 1999.
- [20] R. A. Saunders, C. Lekakou, M. G. Bader, « Compression and microstructure of fibre plain woven cloths in the processing of polymer composites ». *Compos A-Appl Sci Manuf*, Vol. 29, pp. 443-54, 1998.
- [21] Z Cai, T Gutowski, «The 3-D deformation-behavior of a lubricated fiber bundle ». *J Compos Mater*, Vol. 26, pp. 1207-37, 1992.
- [22] Z.-R. Chen, L. Ye, T. Kruckenberg, «A micromechanical compaction model for woven fabric preforms. Part I: Single layer ». *Comp Sci Tech*, Vol. 66, pp. 3254-3262, 2006.
- [23] M. K. Kang, W. I. Lee, H. T. Hahn, « Formation of microvoids during resin-transfer molding process ». *Comp Sci Tech*, Vol. 60, pp 2427, 2000.
- [24] B. R. Gebart, « Permeability of unidirectional reinforcements for RTM ». *J Comp Mater*, Vol. 26, pp. 1101, 1992.
- [25] K. J. Ahn, J. C. Seferis, J. C. Berg, «Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements ». *Polym Compos*, Vol. 12, pp. 146, 1991.
- [26] P. Simacek, S. G. Advani, « A numerical model to predict fiber tow saturation during liquid composite molding ». *Comp Sci Tech*, Vol. 63, pp. 1725, 2003.
- [27] J. Wolfrath, V. Michaud, A. Modaresi and J.-A.E. Manson, «Unsaturated flow in compressible fibre preforms». *Comp Part A*, Vol. 37, pp. 881, 2006.