



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



C. R. Mecanique 333 (2005) 585–591



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2B/>

## Simulation du front d'écoulement dans les procédés de moulage des composites liquides

Mohamed Hattabi <sup>a</sup>, Ikbal Snaïke <sup>a</sup>, Jamal Echaabi <sup>a</sup>, Mohammed Ouadi Bensalah <sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire des plastiques et composites, ENSEM, BP 8118, Oasis, Casablanca, Maroc*

<sup>b</sup> *Laboratoire de mécanique et des matériaux, avenue Ibn Batouta, BP 1014, faculté des sciences, Rabat, Maroc*

Reçu le 4 mars 2005 ; accepté après révision le 24 mai 2005

Disponible sur Internet le 6 juillet 2005

Présenté par Évariste Sanchez-Palencia

---

### Résumé

L'objectif de ce travail est la simulation du suivi du front d'écoulement dans les procédés de moulage des composites liquides tel que le RTM (Resin Transfer Moulding). La méthode numérique développée est basée sur une discrétisation en différences finies sur un maillage curviligne, évolutif et adapté à la géométrie de la zone saturée. Nous décrivons, la formulation et la mise en oeuvre numérique de notre démarche. Des applications associées à deux configurations d'injections sont présentées. On note alors un accord satisfaisant entre nos résultats numériques et les résultats analytiques et expérimentaux (issus de la littérature).

**Pour citer cet article :** *M. Hattabi et al., C. R. Mecanique 333 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Flow front simulation in the liquid composite molding processes.** This work proposes a procedure of finite difference discretized in a system of curvilinear coordinates adapted to the shape of the saturated zone, to simulate a flow in the LCM (Liquid Composites Molding) process. Formulation and the numerical application of the procedure are described. We describe two configurations of injections. A good agreement is found between numerical, analytical and literature experimental results.

**To cite this article:** *M. Hattabi et al., C. R. Mecanique 333 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* Mécanique des fluides numérique ; Moulage des composites liquides ; Simulation numérique ; Front d'écoulement

*Keywords:* Computational fluid mechanics; Liquid composites molding; Numerical simulation; Flow front

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [bensal@hotmail.com](mailto:bensal@hotmail.com) (M.O. Bensalah).

## Abridged English version

The Aerospace industry shows a growing interest for parts in composite materials, obtained by injection on reinforcement. This family of manufacturing processes includes among others, closed mould injection commonly called RTM (resin transfer molding). The liquid composite molding (LCM) consists of the injection of a thermoset resin into a closed mould containing a fibrous reinforcement of glass or carbon. The applications of this process are getting sharper and sharper and allow realizing good quality parts. The present study concerns the simulation of (LCM) processes. It particularly deals with the modelling of the flow front evolution through a fibrous reinforcement. Most of the existing methods are based on a finite element approach coupled to volume control. Reference work on this approach is given in [1–5]. However, even if this approach is well adapted to simulate the manufacture of complex composites parts; it cannot be used to follow the flow front position during the resin filling stage. Moreover, it requires doing calculation on the whole mould mesh at each time step. On the contrary, a finite difference numerical method using curvilinear meshing was adopted. This method describes the evolution of the resin flow front with limited remeshing at each time step. However, it is limited to then saturate part of the mould.

### 1. Introduction

L'industrie aérospatiale manifeste un intérêt croissant pour les pièces en composite obtenues par injection sur renfort. Cette famille de procédés de fabrication, englobe entre autres l'injection à moule fermé communément appelée RTM (Moulage par Transfert de Résine). Le moulage des composites liquide (LCM) consiste en l'injection d'une résine thermodurcissable dans un moule fermé contenant un renfort fibreux de verre ou de carbone. Les applications de ce procédé sont de plus en plus pointues et permettent de réaliser des pièces de bonne qualité. La présente étude concerne la simulation des procédés (LCM). Elle porte sur la modélisation de l'écoulement du front de la résine à travers un renfort fibreux. La plupart des méthodes de modélisation déjà développées sont basées sur une approche de type élément finis couplés à des volumes de contrôle. On peut citer à titre d'exemple les travaux [1–5]. Ce type d'approche semble bien adapté aux configurations complexes des pièces fabriquées, mais ne permet d'obtenir qu'une position approximative du front d'écoulement au cours du remplissage et nécessite un calcul sur un maillage du moule entier à chaque pas de temps.

Contrairement à cet approche, nous adoptons une méthode numérique du type différences finies avec maillage curviligne, capable de mieux décrire la progression du front de la matière et dont le remaillage à chaque instant reste limité simplement à la partie saturée du moule.

### 2. Le processus physique du procédé et les modèles mathématiques

#### 2.1. Description de l'écoulement

Le but de cette étude est de simuler dans le plan du moule l'imprégnation du renfort par un fluide newtonien (la résine) en condition isotherme. On suppose que le fluide est incompressible, les forces de pesanteur sont négligeables, les effets de surface sur les parois du moule sont négligés devant la résistance due au milieu poreux ainsi que les effets de capillarité et de mouillabilité des fibres devant les pressions d'écoulements.

#### 2.2. Modélisation du remplissage

A l'échelle macroscopique, l'écoulement de la résine à travers un renfort fibreux est gouverné par l'équation de continuité et la loi de Darcy :

$$\operatorname{div}(\vec{V}) = 0 \quad \text{et} \tag{1}$$

$$\vec{V} = \frac{\overline{\overline{K}}}{\mu} \overrightarrow{\text{grad}}(P) \tag{2}$$

où :  $\vec{V}$ ,  $\mu$ ,  $\overrightarrow{\text{grad}}P$  et  $\overline{\overline{K}}$  représente respectivement le vecteur vitesse, la viscosité de la résine, le gradient de la pression et le tenseur symétrique de la perméabilité. Dans notre cas, nous nous intéressons à suivre le front d'écoulement dans un plan suivant les directions principales. Dans ce cas  $\overline{\overline{K}}$  est de la forme :

$$\overline{\overline{K}} = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \tag{3}$$

La substitution de l'Éq. (2) et (1) donne :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{K_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{K_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \tag{4}$$

La simulation du remplissage du moule est gouvernée par la résolution numérique de l'équation elliptique (4) du champs de pression, associée aux conditions aux limites prises comme suit : sur le seuil d'injection  $P = P_{inj}$  ou  $Q = Q_{inj}$  avec  $P_{inj}$  et  $Q_{inj}$  sont respectivement la pression et le débit d'injection, aux parois du moule  $\partial P / \partial n = 0$  et au front d'écoulement  $P_{front} = P_{atmosphère}$ .

### 3. Procédure de résolution

La difficulté majeure dans ce problème ne réside pas tant dans la résolution numérique de l'équation elliptique (4), mais plutôt dans le fait que la géométrie du domaine de résolution varie au cours du temps. En effet, à chaque pas de temps, on doit résoudre cette équation dans la partie saturée du moule. La configuration d'une telle géométrie dépend donc de l'avancée du fluide et par conséquent de la forme du front de l'écoulement. On choisit alors une discrétisation spatiale à l'aide d'un système de coordonnées curvilignes adapté à la forme complexe du domaine où des lignes du maillage coïncident avec le front de matière et la ligne d'injection. Si  $\xi(x, y)$  et  $\eta(x, y)$  représentent le réseau des lignes du maillage, un tel système de coordonnées peut être obtenu en résolvant dans la zone saturée, le système elliptique suivant [6] :

$$\Delta \xi(x, y) = S ; \quad \Delta \eta(x, y) = T \tag{5}$$

Avec les conditions aux limites traduisant le passage de lignes de maillage sur le bord de la zone saturée, des fonctions  $S$  et  $T$  permettent la maîtrise du contrôle de l'espacement dans le maillage. Dans ces conditions, on montre que la résolution du système (5) est équivalente à la résolution dans un domaine rectangulaire ( $R$ ) du système quasi-linéaire elliptique (Fig. 1) [6] :

$$AX_{\xi\xi} + BX_{\eta\eta} + 2CX_{\xi\eta} = -J^2(SX_{\xi} + TX_{\eta}) \tag{6}$$

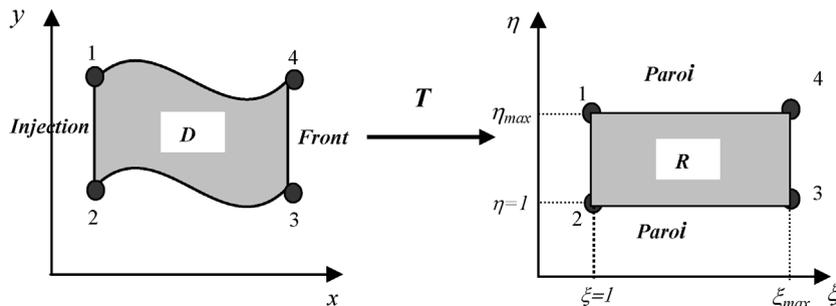


Fig. 1. Correspondance entre le domaine physique et le domaine de calcul.

où :  $X = (x; y)^T$ ,  $J = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$ ,  $A = |X_\eta|^2$ ,  $B = |X_\xi|^2$  et  $C = X_\xi \cdot X_\eta$ .

Dont les conditions aux limites sont données par la spécification des frontières de la zone saturée.

Le passage au nouveau système de coordonnées  $\xi(x, y)$  et  $\eta(x, y)$  dans l'Éq. (4) conduit à l'équation suivante :

$$\alpha P_{\xi\xi} + \gamma P_{\eta\eta} + 2\beta P_{\xi\eta} + \delta P_\xi + \rho P_\eta = 0 \tag{7}$$

où :  $\alpha = K_x \xi_x^2 + K_y \xi_y^2$ ,  $\gamma = K_x \eta_x^2 + K_y \eta_y^2$ ,  $\beta = K_x \xi_x \eta_x + K_y \xi_y \eta_y$ ,  $\delta = K_x \xi_{xx} + K_y \xi_{yy}$  et  $\rho = K_x \eta_{xx} + K_y \eta_{yy}$ , avec :  $\xi_x = y_\eta J^{-1}$ ,  $\xi_y = -y_\eta J^{-1}$ ,  $\eta_x = -y_\xi J^{-1}$  et  $\eta_y = x_\xi J^{-1}$ .

La discrétisation de l'Éq. (7) est faite sur la région rectangulaire ( $\Delta\xi = \Delta\eta = 1$ ) par des différences finies centrées. L'équation approchée obtenue conduit à :

$$P_{i,j} = F(x_{i\pm 1,j\pm 1}, y_{i\pm 1,j\pm 1}, P_{i\pm 1,j\pm 1}, K_x, K_y, x_{i,j}, y_{i,j}) \tag{8}$$

Dont la résolution est effectuée à l'aide d'une méthode itérative utilisant de la sur-relaxation successive.

Le champ de pression obtenu permet alors, par l'intermédiaire de la loi de Darcy d'estimer la vitesse du front d'écoulement et sa nouvelle position à chaque pas du temps, comme suit :

$$\begin{cases} u_{f(m,j)} = -\frac{K_x}{\mu\phi} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)_{(m,j)} \\ v_{f(m,j)} = -\frac{K_y}{\mu\phi} \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right)_{(m,j)} \end{cases} \text{ et} \tag{9}$$

$$\begin{cases} x_{m,j}^{n+1} = x_{m,j}^n + (u)_{f(m,j)} \Delta t \\ y_{m,j}^{n+1} = y_{m,j}^n + (v)_{f(m,j)} \Delta t \end{cases} \tag{10}$$

Le front coïncide avec la ligne du maillage  $i = m$  puis l'indice  $n$  est relatif à l'instant  $t^n$ .

#### 4. Résultats et discussions

Les trois applications présentées dans cette étude correspondent à des simulations d'écoulements dans le plan lors du procédé RTM.

Dans la première application, on considère une cavité rectangulaire dans laquelle on a placé un renfort isotrope de perméabilité  $K$  et de porosité  $\phi$ . Puis on injecte une résine de viscosité  $\mu$  à travers la section (largeur  $\times$  épaisseur) de la cavité sous la pression constante  $P_{inj}$ . Le front progresse alors selon une forme droite perpendiculairement à la direction d'écoulement (direction  $Ox$ ) et on parle par la suite d'écoulement à injection droite. Dans ces conditions, la cinétique du front (position du front  $x_f$  au cours du temps) peut être obtenue analytiquement comme suit :

$$x_f(t) = \sqrt{\left( \frac{2K P_{inj}}{\phi\mu} t \right)} \tag{11}$$

Dans ce cas, deux exemples sont présentés relatifs à deux cavités rectangulaires de dimensions respectives  $(600 \times 170)$  mm<sup>2</sup> et  $(500 \times 50)$  mm<sup>2</sup>. Le premier exemple, concerne la validation de nos résultats numériques avec les résultats analytiques (Éq. (11)) et des résultats expérimentaux [7]. Le fluide de viscosité  $\mu = 0,109$  Pa s est injecté sous la pression  $P_{inj} = 1,69 \times 10^5$  Pa à travers un renfort isotrope de perméabilité  $K = 2,65 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup> et de porosité  $\phi = 0,696$ . La comparaison des trois cinétiques du front obtenues est présentée en Fig. 2.

Le deuxième exemple, concerne la confrontation nos résultats numériques avec les résultats analytiques (Éq. (11)) et d'autres résultats numériques [5]. Ici, la résine est injectée sous la pression  $P_{inj} = 1,5 \times 10^5$  Pa à travers un renfort isotrope, le rapport de la perméabilité sur la viscosité  $K/\mu = 300$  mm<sup>2</sup>/mPas et de porosité  $\phi = 0,4$ . En Fig. 3 nous présentons la comparaison des cinétiques du front obtenues.

Dans la seconde application, on considère un renfort anisotrope de porosité  $\phi = 0,53$  et on se place dans les directions principales du déplacement du fluide notées  $Ox$  et  $Oy$  associées au sens chaîne et trame du tissage de ce

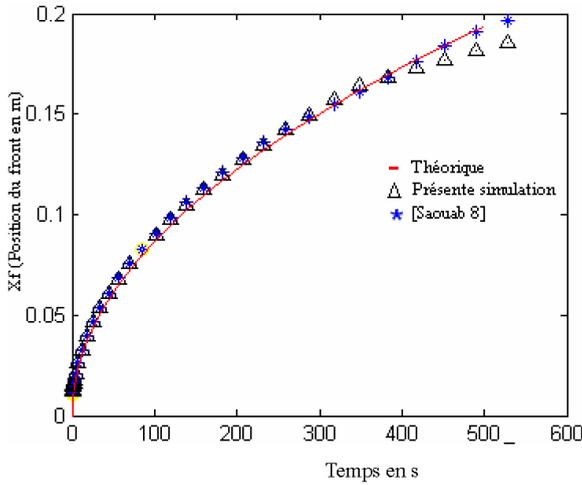


Fig. 2. Position du front en fonction du temps.

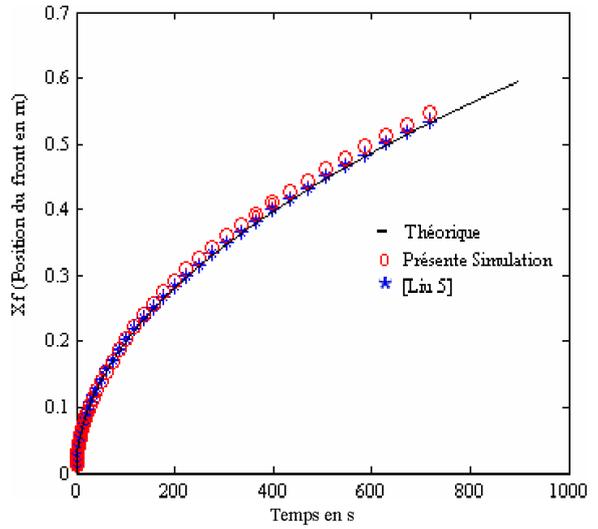


Fig. 3. Position du front en fonction du temps.

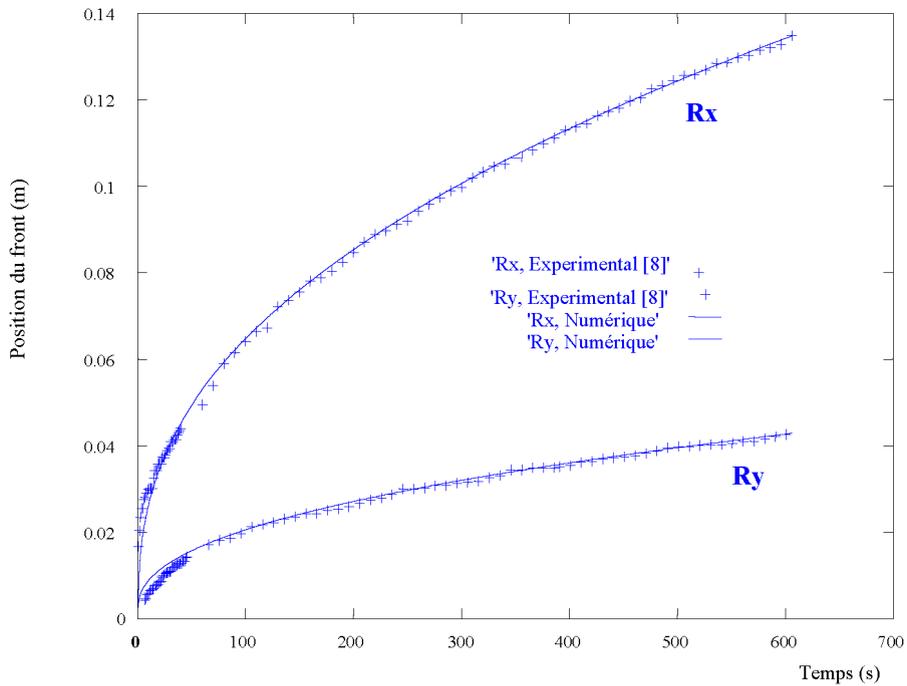


Fig. 4. Cinétique du front ( $R_x(t)$ ,  $R_y(t)$ ) en injection centrale.

renfort. Le tenseur de perméabilités  $\overline{\overline{K}}$  est donc diagonal et se résume à  $K_x = 210^{-11} \text{ m}^2$  et  $K_y = 210^{-12} \text{ m}^2$ . Pour une résine de viscosité  $\mu = 0,109 \text{ Pa s}$ , injectée sous une pression  $P_{inj} = 2,035 \times 10^5 \text{ Pa}$  par un rayon d'injection  $R_0 = 2, \text{ mm}$  au centre du renfort, le front progresse selon une ellipse caractérisée par ses rayons  $R_x$ ,  $R_y$  on parle par la suite d'écoulement à injection centrale. Sur la Fig. 4, on décrit la progression au cours du temps de ses deux rayons et on présente la comparaison de nos résultats numériques avec d'autres résultats expérimentaux [7].

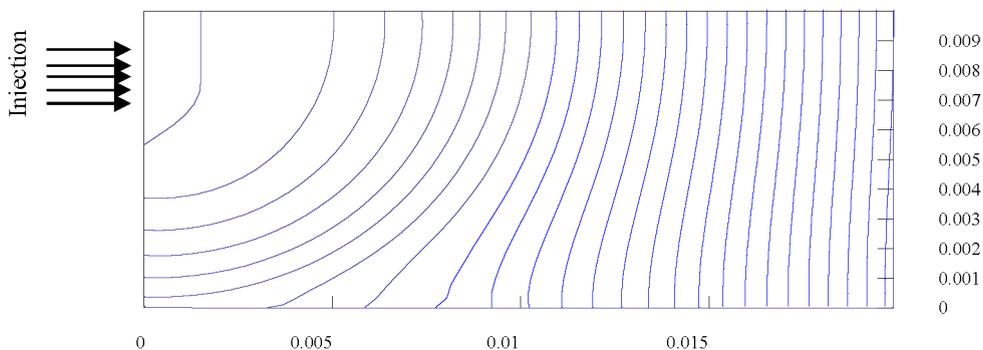


Fig. 5. Simulation d'un remplissage d'une cavité rectangulaire.

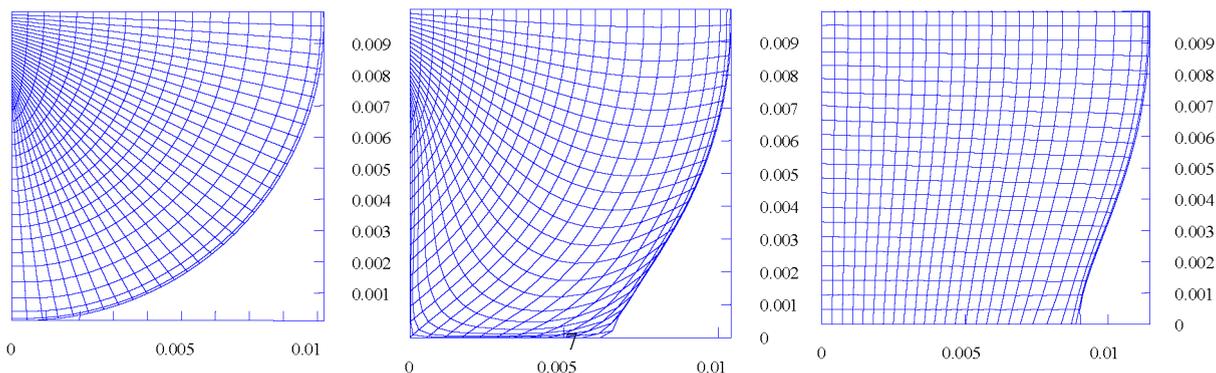


Fig. 6. Evolution du maillage au cours du remplissage.

Dans la dernière application, on s'intéresse à la simulation d'un remplissage complet d'une cavité rectangulaire ( $0,02 \times 0,01 \text{ m}^2$ ). Le seuil d'injection est positionné sur une portion de la largeur de la cavité (Fig. 5). La résine de viscosité  $\mu = 1,5 \text{ Pa s}$  est injectée sous une pression  $P_{inj} = 1,55 \times 10^5 \text{ Pa}$ , à travers un renfort isotrope de perméabilité  $K = 10^{-8} \text{ m}^2$  et de porosité  $\phi = 0,7$ .

On assiste dans ce cas à un écoulement bidirectionnel du front, et on note que le temps nécessaire pour le remplissage de la cavité est de l'ordre de 21,43 secondes. Sur la Fig. 5, on décrit l'évolution de la progression du front d'écoulement au cours du remplissage de ce moule. En Fig. 6, nous présentons des exemples de maillages associés à différentes zones saturées au cours de la progression du front.

### 5. Conclusion

Dans cette étude, nous avons développé un modèle numérique pour simuler le remplissage d'un moule isotherme dans le cadre du procédé RTM par une méthode de différence finie associée à un maillage curviligne, évolutif et adapté à la géométrie de la zone saturée.

Les résultats de la simulation numérique montrent une parfaite concordance avec des résultats : analytiques, expérimentaux et numériques. On note l'efficacité du modèle numérique développé dans le traitement du front dans ce type d'écoulement. Une excellente reproduction de la forme du front ainsi qu'une bonne précision dans son positionnement sont obtenues.

Dans nos prochaines études, nous allons nous intéresser à des moules de géométries complexes proches de la forme réelle des pièces industrielles. Dans ce cas il faudra prendre en considération les effets de bords qui se

produisent à l'interface renfort-moule et qui sont responsables d'écoulements préférentiels. Nous serons également amenés à considérer le cas des multicouches de renfort caractérisés par des perméabilités variables. Enfin l'extension de la méthode au cas tridimensionnel nous permettra de simuler la fabrication de pièces industrielles épaisses.

## Références

- [1] M.V. Brusckhe, S.G. Advani, A finite element/control volume approach to mold filling in anisotropic porous media, *Polymer Composites* 11 (1990) 398–405.
- [2] F. Trochu, R. Gauvin, Comparison between numerical and experimental results for mold filling in resin transfer molding, *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications* 19 (3) (1993).
- [3] W.B. Young, K. Han, L.H. Fong, L.J. Lee, M.J. Liou, Flow simulation in molds with preplaced fiber mats, *Polymer Composites* 12 (1991) 391.
- [4] A. Shojaei, S.R. Ghaffarian, S.M.H. Karimian, Numerical simulation of three-dimensional mold filling process in resin transfer molding using quasi-steady state and partial saturation formulations, *Composites Sci. Technol.* 62 (2002) 861–879.
- [5] X.L. Liu, Isothermal flow simulation of liquid composite molding, *Composites Part A: Appl. Sci. Manufacturing* 31 (12) (2000) 1295–1302.
- [6] A. Saouab, Génération de maillage adaptatifs par une méthode variationnelle, thèse de Doctorat, Université de Rouen, 1991.
- [7] A. Saouab, J. Bréard, G. Bouquet, Modélisation numérique de l'injection d'une résine à travers un renfort de composite à matrice polymère, in : 4<sup>ème</sup> Congrès de mécanique, FST de Mohammadia Avril 1999, Maroc.