



**HAL**  
open science

## Modélisation semi-analytique et choix optimal des procédés CRTM

Adil Mamoune, Abdelghani Saouab, Chung-Hae Park, Tariq Ouahbi

► **To cite this version:**

Adil Mamoune, Abdelghani Saouab, Chung-Hae Park, Tariq Ouahbi. Modélisation semi-analytique et choix optimal des procédés CRTM. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391250

**HAL Id: hal-03391250**

**<https://hal.science/hal-03391250>**

Submitted on 21 Oct 2021

**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 semi-analytique et choix optimal des procédés CRTM

A. MAMOUNE<sup>a</sup>, A. SAOUAB<sup>a</sup>, C. H. PARK<sup>a</sup>, T. OUAHBI<sup>a</sup>

a. Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes, FRE 3102 CNRS-Université du Havre,  
25 rue Philippe Lebon, BP 540, 76058, Le Havre, France.

## Résumé :

La technique de mise en forme des matériaux composites par les procédés CRTM (Compression Resin Transfer molding) permet le moulage des pièces en matériaux composites à taux de fibres élevé et à cadence plus forte. Nous pouvons caractériser ces procédés selon le mode d'injection de la résine avec un contrôle de la pression ou du débit au seuil d'injection et selon le mode de compression du renfort fibreux avec une vitesse ou force imposée. Ces deux derniers peuvent être réalisés d'une façon séparée ou simultanée et par conséquent nous aurons une multitude des scénarios envisageables pour ce procédé. Dans ce travail nous commençons tout d'abord par présenter la modélisation analytique qui tient en compte de tous ces scénarios à vitesse imposée. Nous introduisons ensuite la démarche numérique employée dans le cadre de ces scénarios à force imposée. Puis nous montrons ; comment ce travail peut être mis à profit pour l'analyse des procédés CRTM et le choix du meilleur scénario.

## Abstract :

The CRTM technique (Compression Resin Transfer Moulding) is a derivative of the RTM process. Contrary to the RTM process, it enables the moulding of composite parts with a high content of fibers and a faster production rate. It is composed of a stage of injection of the resin and a stage of compression of the mould which can occur separately or simultaneously. The injection phase will be controlled either by the injection pressure or the flow rate. The phase of compression will be controlled by imposing the mould displacement or the imposed force of the mobile part of the mould. The second part of this study is devoted to the semi analytical modelling of the CRTM processes with imposed mould compression speed.

**Mots clefs :** CRTM, vitesse de compression, force de fermeture, scénarios.

## 1 Introduction

Le procédé CRTM comporte une phase d'injection de la résine et une autre phase de compression du renfort fibreux qui a lieu grâce à la partie mobile de moule [1]. Selon le mode d'injection (pression imposée  $P$ , débit imposé  $Q$ ) et de compression (vitesse  $U$ , force  $F$ ), ainsi que le mode injection-compression (séparément 1, Simultanément 2) employés ; nous aurons plusieurs scénarios pour le déroulement du procédé CRTM (PU1, PF1, QU1, QF1, PU2, PF2, QU2, QF2) (figure 1).

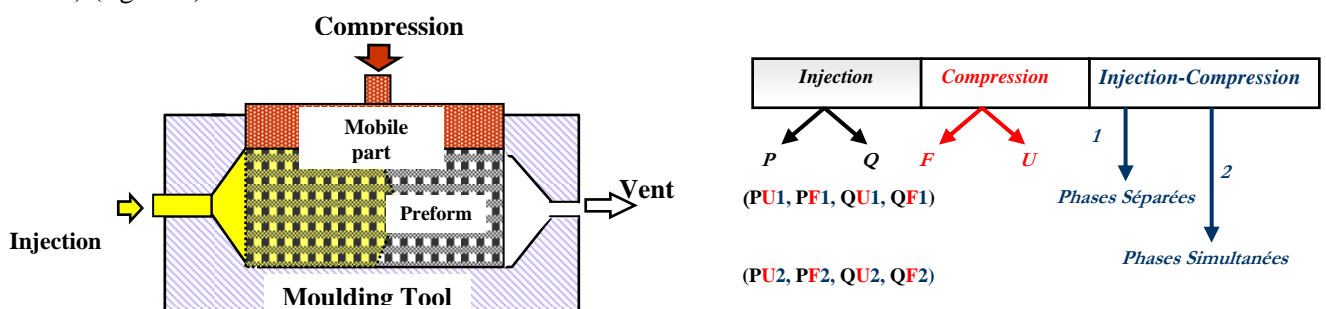


FIG. 1 – Description du procédé CRTM avec ces multitudes de scénarios

La finalité de l'étude que nous présentons est une contribution à l'optimisation par la voie numérique des procédés RTM et CRTM [2] & [3]. Dans cette problématique d'optimisation la difficulté principale est liée surtout au coût en temps de calcul. En vue de surmonter cette difficulté d'une part, et dans le but de contribuer aux développements d'outils numériques rapides, nous nous sommes limité au problème de la mise en œuvre d'une plaque mince rectangulaire par ce procédé. Dans ce contexte, les fonctions objectives essentielles pour l'optimisation (temps du procédé, pression maximale, volume de résine perdue, force de fermeture du moule...) sont développées par la voie analytique ou semi-analytique [4]. Les contraintes associées à ces procédés sont analysées et formulées pour être prises en compte dans l'optimisation numérique. Au delà des retombées de ce travail dans le cadre général de l'optimisation des procédés, la formulation des fonctions objectives que nous avons développée; constitue un outil d'aide pour la maîtrise et le contrôle du procédé CRTM et notamment dans le choix du meilleur protocole de mise en forme qui peut être envisager.

## 2 Développement mathématique

### 2.1 Procédé CRTM à vitesse imposée

L'écoulement de la résine à travers la préforme fibreuse est régit par la loi de darcy :

$$\vec{v} = -\frac{K}{\mu} \vec{\nabla} P \quad (1)$$

$K$  représente la perméabilité du renfort fibreux,  $\mu$  la viscosité de la résine,  $\vec{v}$  la vitesse de la résine (vitesse de Darcy) et  $P$  est le champ de pression. L'équation de continuité est donnée par :

$$\nabla \cdot (\vec{v}) = -\frac{U}{h} \quad (2)$$

$U$  correspond à la vitesse de compression de la préforme par la partie mobile du moule suivant l'épaisseur  $h$ . En couplant (1) et (2), nous obtenons l'équation gouvernante en champs de pression :

$$\nabla \cdot \left( \frac{K}{\mu} \vec{\nabla} P \right) = \frac{U}{h} \quad (3)$$

#### 2.1.1 Champ de pression

Dans ce problème d'écoulement unidirectionnel (figure 2), les champs de pression et de vitesse ne sont fonction que de la position  $x$  et du temps  $t$ . En supposant que la vitesse  $U$ , l'épaisseur  $h$ , la perméabilité  $K$  et la viscosité  $\mu$  sont indépendantes de la variable  $x$  à chaque instant  $t$ , nous pouvons trouver une solution analytique de l'équation (3) dont l'expression est :

$$P(x, t) = C_2(t)x^2 + C_1(t)x + C_0(t) \quad (4)$$

Avec :

$$\begin{cases} C_0(t) = P(0, t) = P_i(t) \\ C_1(t) = \frac{\partial P}{\partial x}(0, t) = -\frac{1}{L_1} \left( \frac{\mu Q_i}{hK} \right) (t) \\ C_2(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{\mu U}{hK} \right) (t) \end{cases} \quad (5)$$

$P_i(t)$  et  $Q_i(t)$  désignent respectivement la pression et le débit que nous imposons au seuil d'injection et  $L_0$  représente la longueur totale de la plaque. En Notant  $P_{fr}$  la pression au front ( $x=L$ ), nous pouvons déduire la relation suivante entre les trois coefficients  $C_k(t)$  et la position du front  $L(t)$ .

$$\sum_{k=0,2} C_k(t) L^k = P_{fr} \quad (6)$$

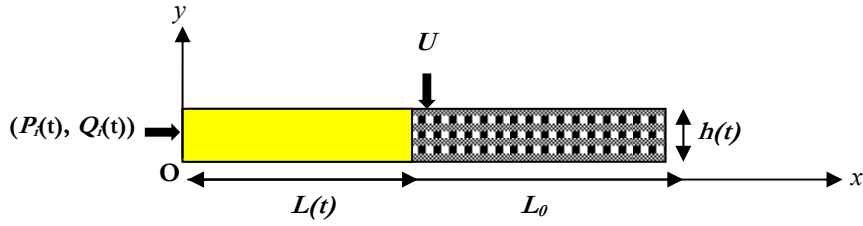


FIG. 2 – Représentation de la progression du front

### 2.1.2 La cinétique du front

Le suivi de la progression du front de résine dans la cavité du moule est obtenu par la détermination de la position  $L(t)$  au cours du procédé. A partir de la loi de Darcy (1) nous avons :-

$$\frac{dL}{dt}(t) = - \left( \frac{k}{\mu\phi} \right) \frac{\partial P}{\partial x}(L, t) \quad (7)$$

Où  $\phi(t)$  désigne la porosité et  $h(t)$  l'épaisseur instantanée de la préforme. Le produit de ces deux termes est noté par la suite  $\psi(t)$  et nous avons les relations :

$$\begin{cases} h(t) = H_0(t) + U(t - T_i) \\ \psi(t) = h\phi(t) = H_0\phi_0 + U(t - T_i) \end{cases} \quad (8)$$

$H_0$  et  $\phi_0$  représentent respectivement la hauteur et la porosité initiales. Dans ce contexte nous pouvons obtenir une nouvelle formulation de l'équation différentielle régissant la cinétique du front :

$$\frac{d(L(t)\psi(t))}{dt} = \frac{Q_i(t)}{L_1} \quad (9)$$

Où  $L_1$  désigne la largeur de la plaque. Cette équation est valide pour l'ensemble des scénarios évoqués précédemment à condition de lui associer les conditions opératoires appropriées au scénario considéré. Nous pouvons retrouver notamment la cinétique du front dans le cadre du procédé RTM en considérant la vitesse de compression  $U$  nulle.

#### Injection avec un débit imposé :

Dans le cadre d'un scénario qui comporte une injection contrôlée par son débit au seuil d'injection et une compression à vitesse imposée, nous obtenons :

$$L(t) = \frac{1}{\psi(t)} \left( \phi_0 I_p H_0 L_0 + \frac{\int_{T_i}^t Q_i(s) ds}{L_1} \right) \quad (10)$$

$T_i$  : Correspond au temps de la durée de la phase d'injection sans compression et  $I_p$  représente le pourcentage de remplissage de la cavité pendant cette phase ( $L(T_i) = I_p L_0, h(T_i) = H_0$ ).

#### Injection avec pression imposée:

En utilisant la relation entre le débit et la pression au seuil d'injection dans le cas d'une injection avec pression imposée et compression à vitesse constante, la position du front peut être déterminée par la relation

s suivante :

$$L^2(t) = \frac{1}{\psi(t)} \left( I_p^2 L_0^2 H_0 \phi_0 + 2(P_i - P_{fr}) \left( (H_0 - UT_i) I_1(t) + UI_2(t) \right) \right) \quad (11)$$

Avec :

$$\begin{cases} I_1(t) = \int_{T_i}^t \frac{K}{\mu}(s) ds \\ I_2(t) = \int_{T_i}^t \frac{sK}{\mu}(s) ds \end{cases} \quad (12)$$

Nous supposons ici que la viscosité de la résine est constante  $\mu_0$  et que le modèle décrivant le comportement du renfort en terme de perméabilité est une loi en puissance:

$$k(s) = A \left( \frac{H_0(1-\phi_0)}{h(s)} \right)^B \quad (13)$$

### 2.1.3 Force de fermeture de moule

La force  $F_m$  nécessaire à développer pour la fermeture du moule devra être en équilibre instantané avec la résultante des forces  $F_r$  et  $F_f$  exercées respectivement par la résine et le renfort sur les parois de ce moule (figure 3). Dans le cadre de l'étude considérée ici, l'action globale du renfort correspond à :

$$F_f(t) = L_1 L_0 \sigma(v_f(t)) \quad (14)$$

L'action de la résine peut être formulée par l'intégration du champ de pression sur la partie saturé en résine.

$$F_r(t) = L_1 L(t) \left( C_2(t) \frac{L^2(t)}{3} + C_1(t) \frac{L(t)}{2} + C_0(t) \right) \quad (15)$$

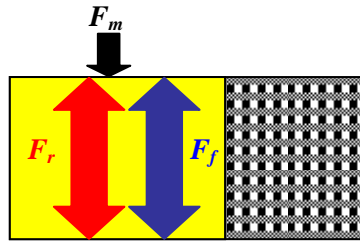


FIG. 3 –Schématisation de l'équilibre des forces dans le moule

$v_f(t)$  représente le taux volumique de fibres et  $\sigma(v_f)$  la loi de comportement du renfort en terme de compressibilité.

## 2.2 Procédé CRTM à force imposée

Dans le cas où la compression est contrôlée par une force imposée  $F_m$ . La démarche que nous avons retenue consiste à déterminer à chaque instant  $t$ , la vitesse induite  $U(t)$  par la contrainte imposée. Cette vitesse est obtenue à partir de la résolution l'équation ci-dessous :

$$\begin{cases} \forall k \leq i & (t_k = T_i, U(t_k) = 0) \\ \forall k \geq i+1 & \exists! U(t_k) / F_f(U(t_k)) + F_r(U(t_k)) = F_m \end{cases} \quad (16)$$

qui traduit la relation d'équilibre instantanée entre les trois forces (Figure 3):  $F_m(t)$ ,  $F_f(U(t_k))$  et  $F_r(U(t_k))$ . Le temps du déroulement du procédé est déterminé selon l'algorithme ci-dessous :

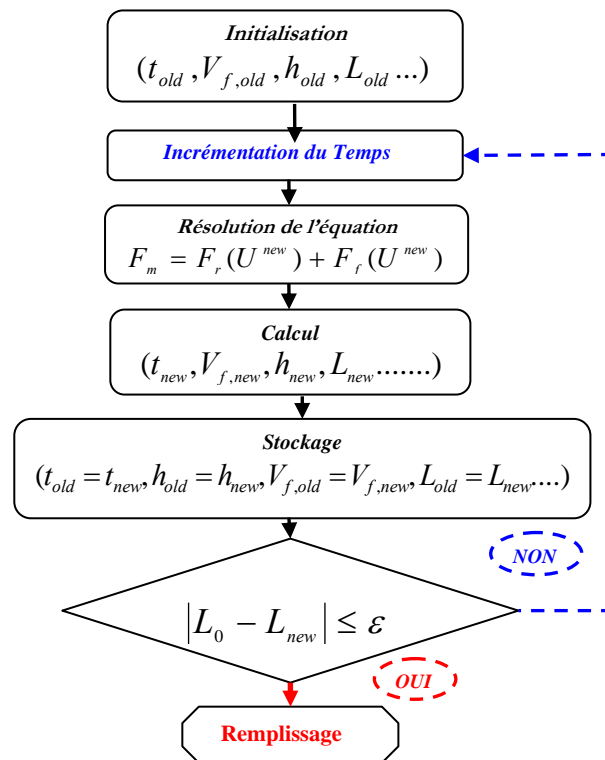


FIG. 4 –Algorithme de calcul du temps de remplissage

## 2.3 Résultats

Dans cette application, nous nous intéressons en particulier à l'estimation du temps de mise en forme d'une plaque composite d'épaisseur  $h_f$  prédéfinie à l'aide de cinq scénarios du procédé CRTM. Les paramètres du procédé possibles dans cette élaboration sont regroupés dans le vecteur  $X = (I_p, V_{f0}, P_{inj} \text{ ou } Q_{inj})$ . Dans cette mise en œuvre nous sommes contraints à respecter les contraintes :

$$\begin{cases} F_m(X) \leq F_c \\ P(X) \leq P_c \end{cases} \quad (17)$$

Où  $P_c$  et  $F_c$  sont respectivement la pression et la force de fermeture critiques. La première contrainte est liée à l'outillage et la seconde est relative à la faisabilité du procédé dans le cas où l'injection et la compression se déroulent simultanément. Les modèles empiriques de perméabilité et de compressibilité en fonction de  $V_f$  sont des lois en puissance pondérés respectivement par les constantes A, B, C, et D. Le tableau suivant résume les différentes valeurs que nous avons utilisées:

$L_0$	$L_1$	$A$	$B$	$C$	$D$	$\mu_0$	$h_f$	$P_c$	$F_c$
0,5 m	0,1 m	$2.10^{-11} m^2$	- 3,1	$8,9.10^6 pa$	11,5	0,16 pa.s	1 cm	$1,25.10^6 pa$	$8.10^4 N$

En figure 5, pour les cinq procédés QU1, QF1, PU1, PF1 et QU2 nous représentons l'évolution du temps de procédé (normalisé par le temps du procédé RTM correspondant) en fonction de la hauteur initiale pour différents taux volumique de fibres finaux (45%, 50%, 55% et 60%). Nous observons que le rapport  $\frac{T}{T_{RTM}}$

demeure inférieur à l'unité et sa valeur minimale est atteinte pour les hauteurs initiales importantes avec les deux procédés à force imposée. Dans le cas des hauteurs initiales inférieures à 13 cm nous remarquons une forte concurrence entre ces scénarios, ainsi que l'importance du procédé à phases simultanées QU2 qui s'avère le scénario optimal dans le cadre des premières valeurs de la hauteur initiale.

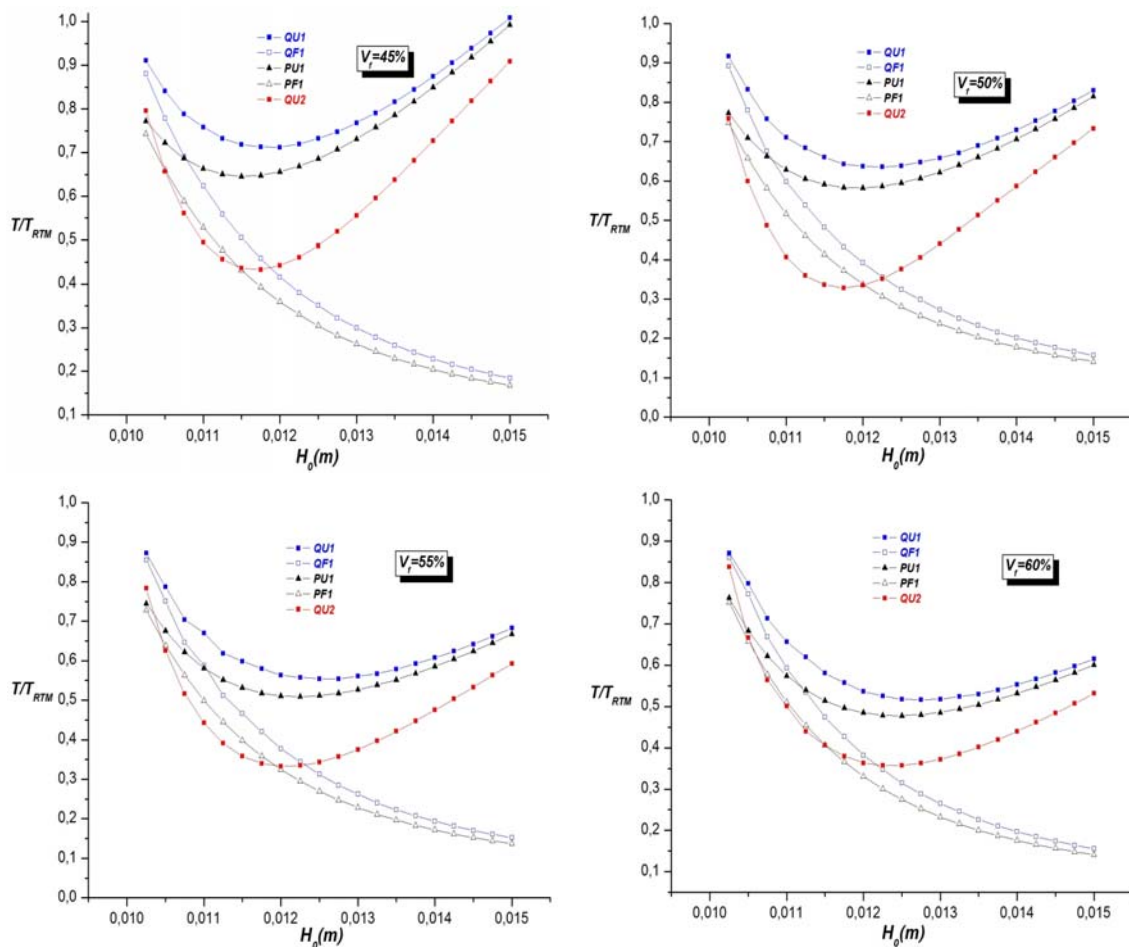


FIG. 5 – Evolution du rapport entre les temps des scénarios CRTM et RTM en fonction de la hauteur initiale

### 3 Conclusion

Dans le cadre général de la mise en forme d'une plaque rectangulaire, nous avons développé des modèles analytiques ou semi analytiques relatifs au procédé CRTM à contrainte ou déplacement imposée. Les fonctions objectives que nous avons développées constituent un outil d'aide dans le contrôle de ces procédés [5] et notamment dans le choix optimal du meilleur scénario de mise en forme. On se propose d'étudier dans nos travaux futurs l'effet de la prise en compte du couplage entre procédé CRTM et propriétés mécaniques de la structure finale ainsi que son optimisation. Nos modèles analytiques relatifs au procédé CRTM et à d'autres procédés LCM (Liquid Composite Molding) associés à un calcul analytique de structure [6] seront exploités pour réaliser ce couplage à moindre coût numérique.

### References

- [1] Bickerston S., Abdullah M.Z., Modeling and evaluation of the filling stage of injection /compression moulding, *Composites Science and Technology*, Volume 63, Issue 10, August 2003.
- [2] A. Saouab, J. Bréard & G. Bouquet. Contribution to the optimization of RTM and CRTM processes. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International ESAFORM conference*, Krakow, Poland April 2002, pp: 299-302.
- [3] R. Le Riche, A. Saouab and J. Bréard. Coupled compression RTM and composite layup optimization. *Composites Science and Technology*, Volume/issue: 63/15 (November 2003), p.: 2277-2287.
- [4] A. Saouab, J. Bréard, Analytical modeling of CRTM and RTM processes Part A: Mathematical developments. *International Journal of Forming Processes*, volume: 9, N°: 3, 2006, pp. 309-344.
- [5] A. Saouab, J. Bréard, Analytical modeling of CRTM and RTM processes Part B: Applications to the analysis of the process. *International Journal of Forming Processes* volume: 9, N°: 3, pp.: 345-364.
- [6] Berthelot JM. Composite materials: mechanical behaviour and structural analysis. Mechanical Engineering Series, Springer, 1999.