



**HAL**  
open science

## **Modélisation du revêtement de matière liquide lors d'un processus de trempage - approche thermomécanique et validation expérimentale**

Emmanuelle Relot, Jérôme Bikard, Patrick Navard, Tatiana Budtova

### ► **To cite this version:**

Emmanuelle Relot, Jérôme Bikard, Patrick Navard, Tatiana Budtova. Modélisation du revêtement de matière liquide lors d'un processus de trempage - approche thermomécanique et validation expérimentale. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. 7 p. <hal-00521750>

**HAL Id: hal-00521750**

**<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00521750v1>**

Submitted on 29 Sep 2010

**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.



HAL Authorization

## Modélisation du revêtement de matière liquide lors d'un processus de trempage – Approche thermomécanique et validation expérimentale

Emmanuelle Rélot<sup>1,2</sup>, Jérôme Bikard<sup>1</sup>, Patrick Navard<sup>1</sup> & Tatiana Budtova<sup>1</sup>

1 -Ecole des Mines de Paris  
Centre de Mise en Forme des Matériaux – CEMEF /  
Rue Claude Daunesse BP 207 06904 Sophia-Antipolis  
[Emmanuelle.relot@ensmp.fr](mailto:Emmanuelle.relot@ensmp.fr)  
2 – MAPA R&D Ruelle Colin, 60140 Liancourt / France

### Résumé :

*Ce papier a pour objectif de présenter les premiers essais de modélisation du procédé de trempage d'un moule cylindrique dans un bain de polymère. L'objectif est de pouvoir prédire numériquement l'épaisseur de couche liquide extraite autour du moule après sa sortie du bain. Une rhéologie anisotherme newtonienne a été utilisée dans un premier temps. Les premiers résultats obtenus ont montré que l'épaisseur extraite n'était pas constante le long du moule ; elle est maximale à l'extrémité inférieure et minimale à l'extrémité supérieure. Des problèmes d'instabilités à l'interface matière/air et de pertes de matière apparaissent, une approche d'introduction de la tension de surface sera présentée.*

### Abstract :

*This paper describes the modelling of the dip-coating process over a cylindrical mould which is dipped into a liquid polymer bath at a constant speed. The goal of this work is to numerically predict the thickness of the layer extracted on the mould. An anisotropic newtonian rheology is used as a first approximation. The results show that the thickness is heterogeneous along the mould: maximal at the bottom and minimal at the top. The approach of encountering of the interfacial tension liquid/air in order to avoid surface instabilities and mass loss will be also presented.*

### Mots-clefs :

**Trempage, modélisation, solution de polymère, épaisseur de couche**

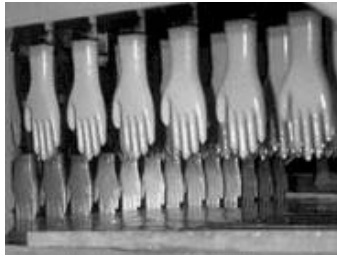
## 1 Introduction

Le recouvrement par trempage d'objets est une technique largement utilisée depuis plusieurs milliers d'années, à titre d'exemple l'émaillage des poteries se réalise grâce à cette méthode. Depuis plusieurs dizaines d'années, ce procédé est intensivement employé à chaud dans le cadre de la fabrication et du revêtement de câbles et pour la galvanisation de plaques en métal, de feuilles, etc. Il permet également de solidifier autour d'un moule une certaine épaisseur pour ensuite obtenir un objet à géométrie complexe comme par exemple, des gants en latex, des gélules médicales, des prothèses mammaires et des préservatifs (FIG. 1).

Cette technique appelée trempage, ou *dip-coating*, consiste à déposer une couche mince de matière sur un moule ou sur un objet par immersion de ce dernier dans un bain liquide. Il est possible de déposer plusieurs couches et d'obtenir ainsi des épaisseurs plus ou moins importantes. Ce procédé, largement employé dans l'industrie, ne fait cependant pas systématiquement l'objet d'études et l'un de ses paramètres clés, l'épaisseur de la couche solidifiée, est mal maîtrisé.

L'objectif de ce projet est de modéliser le revêtement de matière formé lors du procédé de trempage et d'avoir un outil numérique permettant de prédire l'épaisseur de matière solidifiée

autour du moule. Le logiciel employé est Forge® développé par le CEMEF et commercialisé par Transvalor S.A.



(a) Mise en forme des gants [1]



(b) Mise en forme des préservatifs [2]



(c) Mise en forme d'implants mammaires [3]

FIG. 1: Photographies de différentes industries utilisant le procédé de trempage

## 2 Modélisation du trempage sur Forge®

### 2.1 Equations constitutives

Dans un premier temps, il est présenté brièvement le modèle de comportement du bain de polymère.

#### 2.1.1 Equations mécaniques

Les équations décrivant le mouvement quasi statique d'un fluide newtonien incompressible sont modélisées par les équations de Stokes. Le problème est construit à partir des équations d'équilibre dynamique et de continuité; ces équations peuvent s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \eta \cdot \Delta v + \nabla p = \rho g \\ \nabla \cdot v = 0 \end{cases} \quad (1)$$

où  $v$  est la vitesse du fluide,  $\rho$  la masse volumique,  $\eta$  la viscosité cinématique,  $p$  la pression et  $g$  la gravité.

#### 2.1.2 Conditions aux limites

Les conditions aux frontières correspondent :

- la surface libre

$$\sigma \cdot \vec{n} = -P_{atm} \cdot \vec{n} \quad (2)$$

où  $n$  est le vecteur normal à la surface,  $\sigma$  la contrainte et  $P_{atm}$  la pression atmosphérique.

- le contact pièce-outil où est appliquée une condition de non-pénétration

$$\begin{cases} (v - v_{outil}) \cdot n \leq 0 & \text{non pénétration} \\ \sigma_n \leq 0 \\ ((v - v_{outil}) \cdot n) \cdot \sigma_n = 0 \end{cases} \quad (3)$$

où  $v_{outil}$  est la vitesse de l'outil et  $\sigma_n$  la pression de contact.

Une loi de frottement peut également être appliquée : le vecteur contrainte tangentiel  $T_f$  dépend de la vitesse tangentielle du fluide  $v_t$  et du coefficient de friction  $\alpha$  :

$$T_f = -\alpha \cdot \mu \cdot v_t \quad (4)$$

#### 2.1.3 Equation de la chaleur

L'équation de la chaleur s'écrit classiquement :

$$\rho c \dot{T} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{w} \quad (5)$$

où  $c$  est la capacité calorifique spécifique,  $T$  la température,  $k$  la conductivité et  $\dot{w}$  la source de chaleur.

#### 2.1.4 Couplages thermomécaniques

Le bain est une solution de polymère. Son comportement rhéologique est décrit sous Forge à l'aide d'une loi de newtonienne complétée par une loi d'Arrhénius qui a été déterminée expérimentalement :

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} R = 8,315 \text{ J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \\ E_a = 18,56 \text{ kJ.mol}^{-1} \\ \eta_0 = 0,5435 \text{ Pa.s} \\ T_{ref} = 293 \text{ K} \end{cases} \quad (6)$$

Le moule employé est chauffé à 80°C ; le bain de polymère est maintenu à 30°C.

## 2.2 Description de la mise en donnée

Ce projet étudie le cas du trempage d'un moule dans une solution de polymère. Les simulations présentées dans cette première partie ont été réalisées sur la version commerciale du logiciel Forge2005 version 7.1.

### 2.2.1 Géométries

Deux cas ont été traités : dans un premier temps, il a été considéré que la température du moule était constante ; dans un deuxième temps, il a été pris en compte la variation à l'intérieur et en surface de ce dernier. La simulation utilise deux outils : une plaque chauffante supportant le bain et permettant son maintien en température et un moule cylindrique qui est animé d'un mouvement vertical. Le contact entre le moule et le bain est considéré comme collant. Sur la FIG. 2 est présentée la géométrie avant trempage telle qu'elle apparaît sur le logiciel Forge et sur la FIG. 3 sont données les dimensions du moule employé.

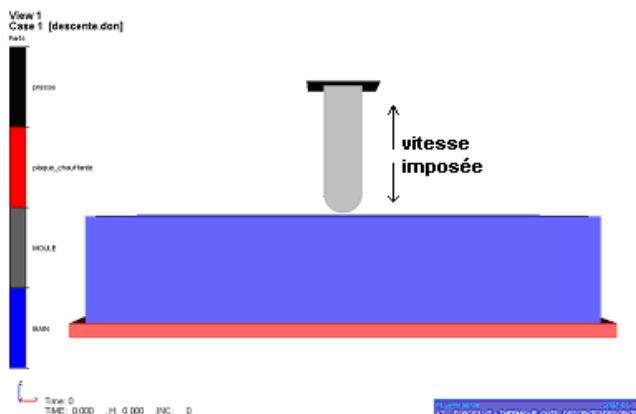


FIG. 2: Ensemble des outils (plaque chauffante, moule et presse) et bain modélisés sous Forge

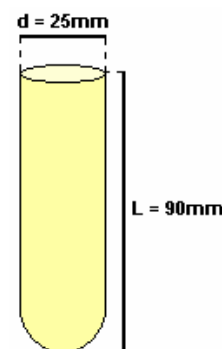


FIG. 3: Dimension du moule

### 2.2.2 Cinétique de l'outil

Le bain ainsi que la plaque chauffante sont spatialement fixes, le mouvement est appliqué au moule de manière verticale.

Le premier mouvement consiste à immerger le moule dans le bain par un déplacement vertical. La vitesse de descente est de 20 mm/s. Dans un deuxième temps, le moule est ressorti du bain par un mouvement vertical et à une vitesse de 20 mm/s également.

### 2.2.3 Maillage

Une étape importante dans ce problème est la génération du maillage. La construction de ce dernier est d'autant plus délicat dans ce cas que l'objectif est de simuler un problème industriel où l'objectif recherché est une épaisseur de l'ordre du 100 de  $\mu\text{m}$  ; il faut donc trouver une taille de maille permettant d'obtenir des résultats indépendants de cette dernière tout en n'ayant pas des coûts de calcul trop important.

Forge permet de réaliser un raffinement de maillage au cours du calcul à l'aide d'un remaillage. Ce principe est employé dans la modélisation du trempage en générant un maillage non régulier sur l'ensemble du système : des boîtes de raffinement du maillage sont ainsi créées pour raffiner la taille de maille autour du moule, là où il est important d'avoir des résultats précis, et pour imposer une grande taille de maille dans le reste du bain. Des boîtes de maillage mobiles suivent la trajectoire du moule pour qu'un raffinement s'effectue dans la matière extraite lors de sa remontée. Grâce à cela, pendant le calcul, le maillage du bain reste grossier (en dehors de la zone proche du moule).

## 3 Modélisation du trempage sous Forge

### 3.1 Premiers résultats numériques sur la version commerciale de Forge2005 [4]

Dans un premier temps il n'a pas été tenu compte de la thermique dans l'outil, i.e. le moule est maintenu à une température constante (80°C) alors qu'il est plongé dans un bain à 30°C. L'expérience a révélé que le moule au contact du bain voyait sa température en surface diminuée de 20°C environ dans les zones les plus longtemps immergées. Ceci a une influence sur la viscosité du matériau et donc également sur l'épaisseur extraite autour du moule.

Il a alors été ensuite modélisé le trempage avec prise en compte de la variation de température dans le moule. La FIG. 4 présente les variations de températures dans l'épaisseur extraite et dans le moule. La FIG. 5 montre que la diminution de température en surface du moule se fait dans un premier temps rapidement pour atteindre une valeur constante de 60°C (température identique à celle observée expérimentalement).

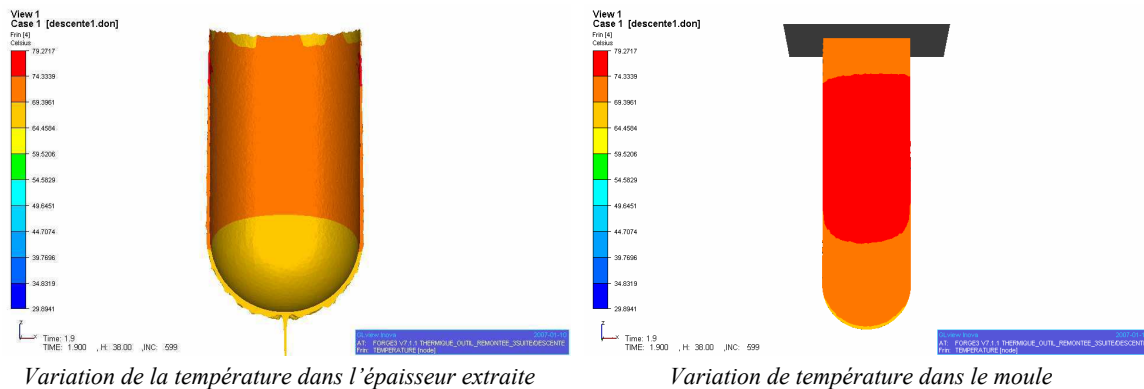


FIG. 4: Modélisation de la variation de température lors du trempage

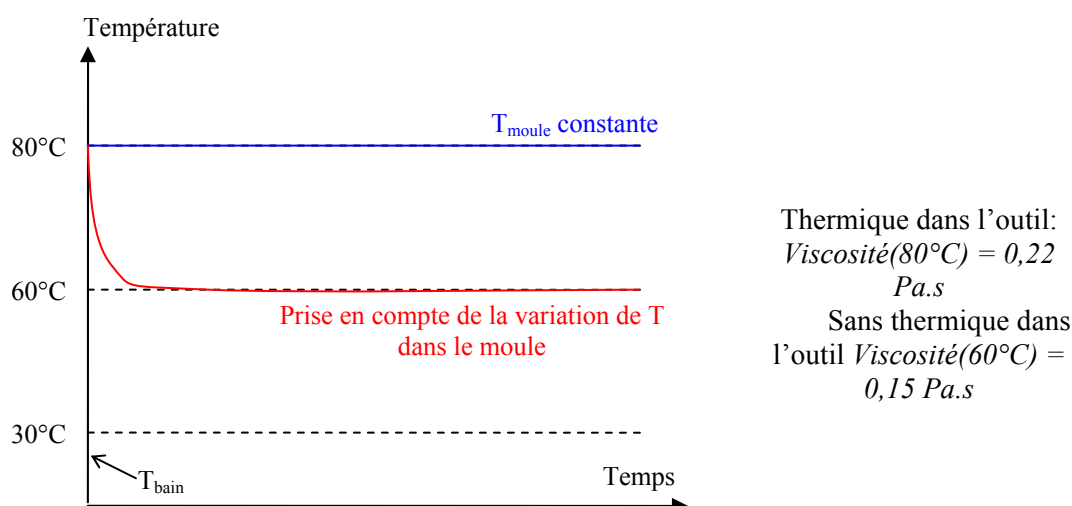


FIG. 5 : Comparaison de la température le long du moule dans les deux cas : avec et sans prise en compte de la thermique dans le moule

L'épaisseur extraite de liquide autour du moule est calculée en tenant compte ou non du changement de température du moule (FIG. 6). L'allure générale des courbes dans les deux cas est identique : l'épaisseur est maximale à l'extrémité inférieure du moule et minimale à l'extrémité supérieure. La quantité de matière extraite est cependant supérieure dans le cas où la variation de température du moule a été prise en compte.

Le paramètre thermique apparaît donc comme un facteur important à prendre en compte.

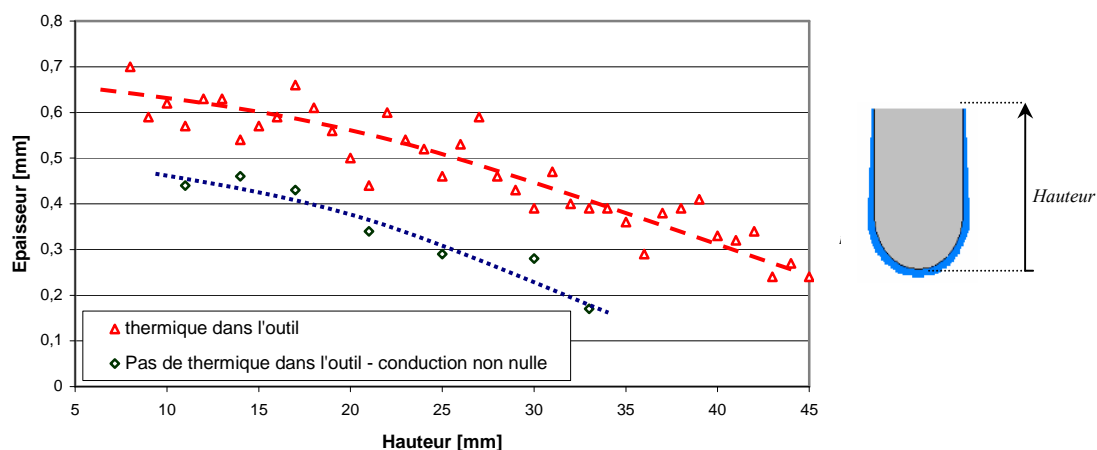


FIG. 6 : Comparaison de l'épaisseur retirée lors du trempage dans deux cas différents : avec et sans prise en compte de la variation de la température du moule (les points correspondent aux valeurs exactes et les lignes sont les interpolations de ces points)

### 3.2 Introduction de la tension de surface

La tension de surface n'est pas prise en compte dans les simulations précédentes. Ce paramètre se révèle important puisqu'il joue un rôle stabilisant de l'interface libre. Physiquement le fluide ne peut pas couler indéfiniment comme le montre la FIG. 7.

L'introduction de la tension de surface se révèle donc importante pour éviter la perte de matière le long du moule [5-6].

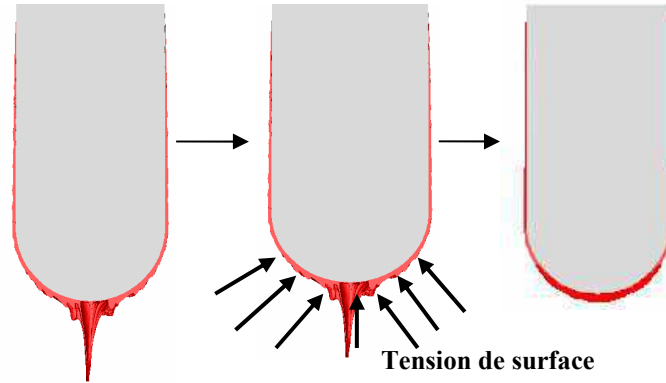


FIG. 7 : Effet de la tension de surface sur le liquide retiré autour du moule

Localement, le vecteur contrainte normale  $\vec{T}$  appliquée à la surface libre est donné par la formule de Laplace [4]:

$$\vec{T} = \vec{\sigma} \vec{n} = -P_{atm} \vec{n} - \gamma \kappa \vec{n} \quad (7)$$

où  $\gamma$  la tension de surface et  $\kappa$  la courbure locale.

On peut reconstruire la courbure grâce à l'expression suivante :

$$\kappa = -\nabla \cdot \vec{n} \quad (8)$$

La modélisation de la tension de surface se fait à partir de la formulation suivante :

$$F_{TS} = \int_{\Gamma} \gamma \kappa \vec{n} \cdot w d\Gamma \quad (9)$$

L'opérateur de Laplace-Beltrami est donné par :

$$\underline{\underline{\Delta}} \vec{x} = \kappa \vec{n} \quad (10)$$

avec  $\vec{x}$  le vecteur des coordonnées du point considéré et le gradient tangentiel par :

$$\underline{\underline{\nabla}} f(\vec{x}) = \nabla f(\vec{x}) - \left( \vec{n} \cdot \nabla f(\vec{x}) \right) \vec{n} \quad (11)$$

En remplaçant l'expression du vecteur courbure dans l'expression, on obtient :

$$F_{TS} = \int_{\Gamma} \gamma \left( \underline{\underline{\Delta}} \vec{x} \right) \cdot w d\Gamma = - \int_{\Gamma} \gamma \underline{\underline{\nabla}} \vec{x} \cdot \underline{\underline{\nabla}} w d\Gamma + \int_{\partial\Gamma} \gamma \partial_{\gamma} \vec{x} \cdot w d\gamma \quad (12)$$

Si les effets de bords sont négligés (reliés à l'angle de mouillage) et que l'on considère la configuration à l'incrément  $n$ , on obtient la forme explicite suivante :

$$F_{TS} = - \int_{\Gamma} \gamma \underline{\underline{\nabla}} \vec{x} \cdot \underline{\underline{\nabla}} w d\Gamma \quad (13)$$

Cette étude est en cours de validation.

## 4 Conclusions

Les premiers résultats de modélisation du procédé de trempage montre que l'épaisseur extraite autour du moule n'est pas constante : elle est maximale à l'extrémité inférieure (soit la zone restée le plus longtemps en contact avec le bain) et minimale à l'extrémité supérieure (soit la zone restée le moins longtemps en contact avec le bain). Des problèmes liés à l'absence de prise en compte de la tension de surface (perte de matière, dégoulinures entraînant du contact matière-matière) ont été rencontrés. Cette dernière sera introduite en se basant sur la formule de Laplace.

## Remerciements

Nous souhaitons remercier PIP, France, pour son partenariat industriel dans ce projet.

## Références

- [1] [www.safroys.com/dipping.jpg](http://www.safroys.com/dipping.jpg)
- [2] [www.dutchdipping.com/images/condoms.jpg](http://www.dutchdipping.com/images/condoms.jpg)
- [3] [www.pipfrance.fr/fr/index.htm](http://www.pipfrance.fr/fr/index.htm)
- [4] J. Bikard, J. de Oliveira, C. Chaudemanche, T. Budtova, "3D Numerical Modelling of the Dip-Coating Process by a Multidomain Macroscopic Approach", *Int. J. Mat. Forming*, submitted
- [5] Bellet, M. 2001 Implementation of surface tension with wall adhesion effects in a three-dimensional finite element model for fluid flow. *Commun. Numer. Meth. Engng.* **17**, 563-579
- [6] Hysing, S. A new implicit surface tension implementation for interfacial flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 51-6, 659-672
- [7] Hamide, M et Bellet, M. 2007 Projet soudage – Centre de Mise en Forme des Matériaux, Ecole des Mines de Paris – Rapport interne