Modèles multiphysiques pour la mise en forme de composites... Et après ?

Arthur Lévy

▶ **To cite this version:**

Arthur Lévy. Modèles multiphysiques pour la mise en forme de composites... Et après ?. Journée nationales des composites, 2017, Marne la Vallée, France. hal-03194256

HAL Id: hal-03194256
https://hal.science/hal-03194256

Submitted on 9 Apr 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.

Modèles multiphysiques pour la mise en forme de composites... Et après ?

Arthur Levy

7 juin 2017

Résumé

J'ai 34 ans et suis actuellement maître de conférence au Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes et à Polytech'Nantes. Mes travaux de recherche portent sur la modélisation et la simulation multiphysique appliquées à la mise en forme de matériaux composites. Après ma thèse à l'Ecole Centrale de Nantes (GeM), j'ai travaillé deux ans dans le Delaware (Etats-Unis) et deux ans à Montréal (Canada).

Dans cette présentation très générale, je vous exposerais la démarche scientifique que j'ai toujours tâché d'appliquer dans mes différents travaux de recherche. Je vous donnerais ensuite mon avis quant aux étapes qui sont, à mon avis, souvent délaissées : la partie valorisation et résultats industriels. Afin d'illustrer quelques pistes, je m'attarderais sur deux exemples sur lesquels j'ai travaillé ces dernières années : la mise en forme de structure sandwich hors autoclave, et la cristallisation dans le procédé de thermocompression.

1. Introduction

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés industriellement pour des structures primaires. Au préalable, les procédés de mise en forme doivent être validés en terme de robustesse et de sensibilité, et les fenêtres procédés doivent être identifiées. La modélisation et la simulation des procédés apparaissent comme une alternative à de coûteuses campagnes expérimentales.
La modélisation des procédés de mise en forme de composites pose des difficultés scientifiques du fait de : (i) la structure **multi-échelles** des composites, (ii) les **sollicitations sévères**, avec des chargements thermiques et/ou mécaniques localisés dans le temps et l'espace, et (iii) les couplages **multi-physiques** (illustrés figure 1), en particulier entre les phénomènes thermiques, mécaniques et chimiques.
Pour les différents procédés étudiés, je me suis efforcé de proposer une **modélisation** et/ou une **simulation** originale spécifique des phénomènes physiques prépondérants, puis de les valider **expérimentalement**. L'outil prédictif est ensuite mis en oeuvre pour **cartographier** l'influence des paramètres procédé et ainsi proposer des **optimisations.**
La figure 2 illustre la démarche scientifique, relativement classique, habituellement retenue dans mes travaux de recherche. Tandis que les premières étapes (modélisation, caractérisation, simulation et expérimentation) font l'objet de très nombreux travaux de recherche dans le domaine, la **valorisation** et les **résultats industriels** sont souvent délaissés. Il apparaissent comme le parent pauvre dans notre littérature. Ils sont pourtant souvent l'objectif industriel naturel de nos recherches académiques.
Fort de ce constat personnel, ma problématique actuelle peut donc se décliner comme suit : *comment assurer une valorisation efficace de nos travaux de recherche académiques ?*. Je vais tâcher de vous illustrer, aux JNC 2017 les pistes que j'ai emprunté avec cet objectif en tête sur deux procédés de mise en forme : la mise en forme de structure sandwich hors autoclave (sections 4.3) , et la cristallisation

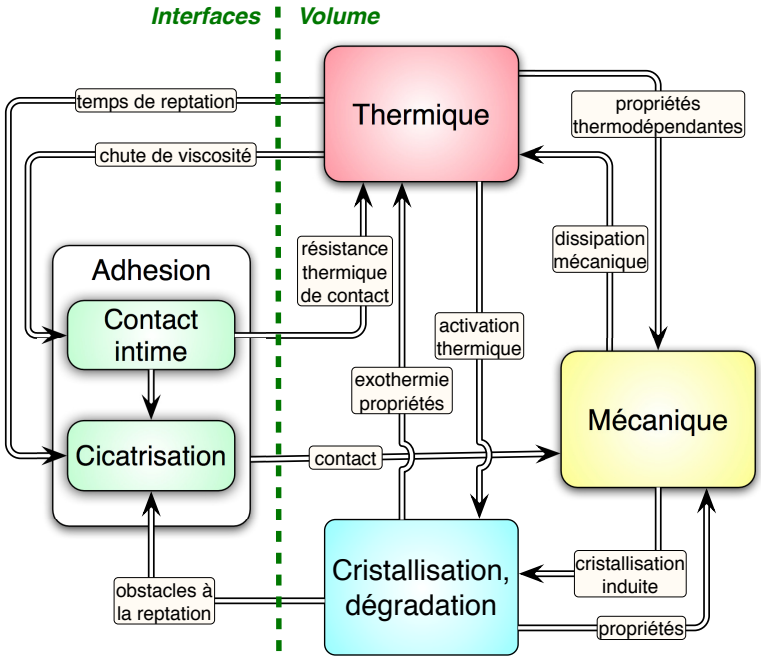

Fig. 1. Les phénomènes physiques dans la mise en forme de composites organiques et leurs couplages.

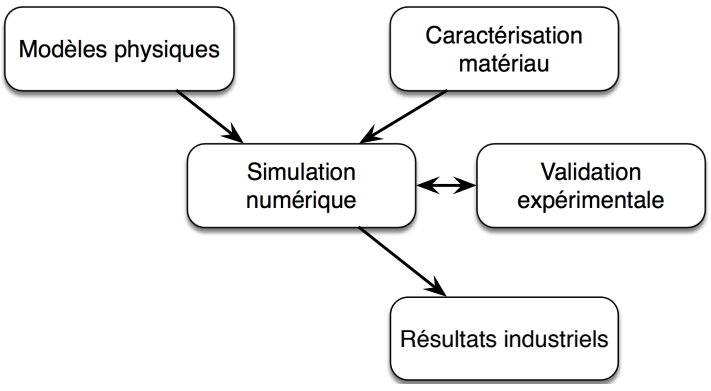

Fig. 2. Démarche scientifique habituellement retenue dans mes travaux de recherche sur la mise en forme de composites.

dans le procédé de thermocompression (section 5.1). Le corps de ce document retrace l'ensemble de mes travaux de recherche tels que soumis au jury du prix Daniel Valentin 2016.

2. Travaux de thèse, 2006-2010

Mes travaux de thèse, effectués à l'institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM), ont porté sur la modélisation et la simulation d'un écoulement sous vibrations. L'application est le **soudage par ultrasons de composites à matrice thermoplastique**.
Après une modélisation théorique faisant appel à des outils **d'homogénéisation temporelle**, un **outil spécifique de simulation** par la méthode des éléments finis a été développé. L'outil numérique a ensuite été utilisé pour mieux comprendre l'influence des paramètres procédé sur la qualité finale de la soudure [1].
Mes travaux sur le soudage par ultrasons se sont poursuivis, avec Steven Le Corre, après mon travail de thèse. Une innovation du procédé nous a poussé à établir une **collaboration** avec Irene Fernandez Villegas à l'université technologique (TU) de Delft (Pays-Bas) [2].

3. Post-doctorat aux Etats-Unis, 2010-2012

Mon travail de post doctorat au *Center for Composite Materials,* à l'Université du Delaware, aux Etats-Unis, a consisté en une modélisation et une simulation du **procédé de dépose de bandes thermoplastiques**.
Le couplage fort entre transfert thermique et contact intime a été traité [3]. Afin de simuler cet effet **multi-physique** une **librairie MATLAB** a été développée [4]. A l'aide de cet outil de calcul, il a notamment été montré qu'avec la conception de l'outillage proposée par le partenaire industriel (EADS - IW), une bonne adhésion interpli ne peut-être obtenue sans dégrader le matériau [5].

4. Travaux effectués au Québec, 2012-2014

Mon séjour de deux ans au laboratoire *structures and composite materials* de l'université McGill, à Montréal, m'a permis d'aborder plusieurs sujets en parallèle.

4.1. Dépose de bandes.

A mon arrivée à Montréal, dans la continuité de mes travaux effectués dans le Delaware, j'ai encadré la fin du travail de master de Xavier Gagné Brulotte sur la dépose de bandes [6].

4.2. Moulage par compression.

Le procédé de moulage par compression de fragments aléatoires de bandes a été étudié à McGill dans le cadre d'un projet de recherche transcanadien du conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (NSERC). Les fragments subissent trois modes de déformation :

1. une réponse élastique, due à la flexion des fragments, négligeable aux forces de fermeture élevées appliquées dans le procédé
2. un écrasement local de chaque fragment, qui vient remplir les vides inter fragments
3. et un écoulement macroscopique, où la matière se déplace vers les zones vides de la cavité.

Les deux derniers modes de déformation, qui dictent la qualité finale de la pièce, ont été modélisés, simulés puis validés expérimentalement à l'aide de la **presse chauffante instrumentée** [7, 8, 9].

4.3. Procédés hors autoclaves.

La mise en forme hors autoclave de panneaux sandwichs, par sac à vide seul, a été également étudiée. La modélisation puis la simulation de l'évolution du **champ de pression** P est proposée [1]. Le modèle

1. La plupart de mes contributions logicielles ont été développées sous licence libre (GPL). L'implémentation COMSOL est disponible à l'adresse https ://github.com/arthurlevy/sandwichAirExtraction.

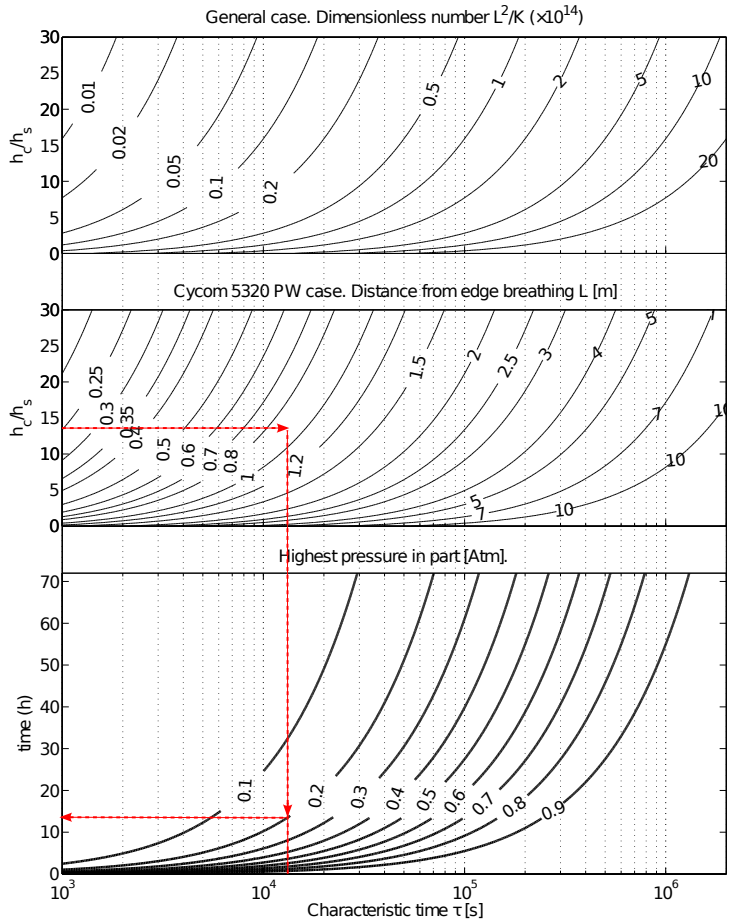

Fig. 3. Abaque de prédiction de pression résiduelle dans les structures sandwich mises en forme hors autoclave [10]

a été validé **expérimentalement** à l'aide de l'évolution des pressions mesurées par des capteurs miniatures intégrés dans l'âme d'un panneau sandwich. Finalement, des **abaques** ont été construites et permettent d'identifier les limites technologiques du procédé [10] (cf. Figure 3).

5. Travaux en cours, Nantes 2014-17

Depuis l'été 2014, je suis de retour en France, au LTN. D'abord en contrat post-doctoral, je suis actuellement maître de conférence depuis septembre 2015.

5.1. Moulage par compression.

Un outil numérique de simulation multiphysique de l'étape de refroidissement du procédé de compression moulage de composite thermoplastique a été développé [11]. A la suite, un module COMSOL permettant d'intégrer la cinétique de cristallisation de Nakamura a été développé [12, 13]. L'objectif est d'assurer une implémentation le plus simple possible pour l'utilisateur (cf. Figure 4). [2]

5.2. Thermo-estampage

Un modélisation de la thermique sous l'hypothèse de membrane mince est en cours d'implémentation dans PlasFib [14, 15].

2. Ce module est accessibles sur http ://github.com/arthurlevy/ComsolPhysics

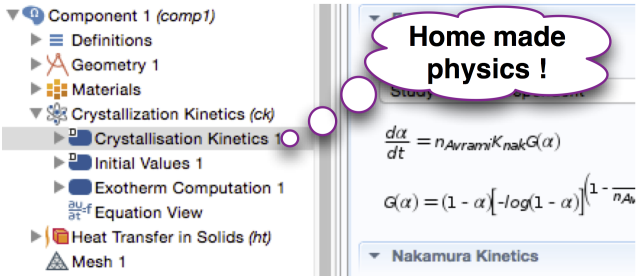

Fig. 4. Un module Comsol a été développé pour prendre en compte la cristallisation.

Références

[1] A. Levy, S. Le Corre, A. Poitou « Ultrasonic welding of thermoplastic composites : a numerical analysis at the mesoscopic scale relating processing parameters, flow of polymer, and quality of adhesion », *International Journal of Material Forming* Vol. 7 n° 1, pp. 39–51, 2014.

[2] A. Levy, S. Le Corre, I. Fernandez Villegas « Modeling of the heating phenomena in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors », *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 214 n° 7, pp. 1361–1371, 2014.

[3] A. Levy, D. Heider, J. Tierney, J. Gillespie « Inter-layer Thermal Contact Resistance Evolution with the Degree of Intimate Contact in the Processing of Thermoplastic Composite Laminates. », *Journal for Composite Materials* Vol. 48 n° 4, pp. 491–503, 2014.

[4] A. Levy, J. Tierney, D. Heider, J. W. Gillespie, P. Lefebure, D. Lang « Modeling of Inter-Layer Thermal Contact Resistance During Thermoplastic Tape Placement », in : SAMPE, Baltimore, MA, USA, 2012.

[5] A. Levy, J. Tierney, D. Heider, P. Lefebure, D. Lang « Simulation And Optimization Of The Thermoplastic Automated Tape Placement (ATP) Process », in : SAMPE, Baltimore, MA, USA, 2012.

[6] X. Gagné Brulotte, A. Levy, P. Hubert, A. Yousefpour « Effect of Tape/Substrate Orientation on the Tape Deformation During Automated Tape Placement », in : ICCM 19, Montreal, Canada, 2013.

[7] A. Levy, P. Hubert « Interstrand Void Content evolution in compression moulding of Randomly Oriented Strands (ROS) of thermoplastic composites », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 70, pp. 121–131, 2015.

[8] G.-P. Picher-Martel, A. Levy, P. Hubert « Compression Moulding of Carbon/PEEK Randomly-Oriented Strands composites : A 2D Finite Element Model to predict the Squeeze Flow Behaviour », *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. In press.

[9] G.-P. Picher-Martel, A. Levy, P. Hubert « Compression Molding of Carbon/PolyEther Ether Ketone Composites : Squeeze Flow Behavior of Unidirectional and Randomly-Oriented Strands », *Polymer Composites* Vol. 81, pp. 69–77, 2016.

[10] A. Levy, J. Kratz, P. Hubert « Air evacuation during vacuum bag only prepreg processing of honeycomb sandwich structures : in-plane air extraction prior to cure », *Composites Part A : applied science and manufacturing* Vol. 68, pp. 365–376, 2015.

[11] A. Levy, S. Le Corre, V. Sobotka « Heat transfer and crystallization kinetics in thermoplastic composite processing . A coupled modelling framework . », in : ESAFORM 19, Nantes, France, 2016.

[12] A. Levy « A Novel Physics Node for Nakamura Crystallization Kinetics », in : COMSOL Conference, Munich, Germany, 2016.

[13] A. Levy « Robust Numerical Resolution of Nakamura Crystallization Kinetics », *Engineering Mathematics* Vol. 2 n° 1, pp. 7–11, 2017.

[14] D. A. Hoang, A. Levy, S. Le Corre « Integration of Heat Transfer Effects in Simulation of Composite Stamping », in : ESAFORM 19, Nantes, France, 2016.

[15] A. Levy, D. A. Hoang, S. Le Corre « On the alternate direction implicit (ADI) method for solving heat transfer in composite stamping », *Material Sciences and Applications* Vol. 8, pp. 37–63, 2017.