

## AVIS DE SOUTENANCE DE THESE DE DOCTORAT

Le **01-02-2019**

A **9h30**

Amphi F1

Mines Saint-Etienne

158 Cours Fauriel

42023 Saint-Etienne

Soutiendra en vue de l'obtention du titre de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne dans la spécialité : MECANIQUE ET INGENIERIE

**Koloïna**

**ANDRIAMANANJARA**

Une thèse ayant pour sujet :

Modélisation numérique des procédés LCM à l'échelle des milieux homogènes  
équivalents en cours de déformation ? intégration de la pression capillaire lors de l'infusion et  
équilibre post-infusion

**MEMBRES DU JURY :**

**Président**

(Le président est désigné le jour de la soutenance)

**Rapporteurs :**

|           |            |            |                              |
|-----------|------------|------------|------------------------------|
| Binetruy  | Christophe | Professeur | Centrale Nantes              |
| Geindreau | Christian  | Professeur | Université de Grenoble Alpes |

**Examineurs :**

|         |         |                       |                     |
|---------|---------|-----------------------|---------------------|
| Silva   | Luisa   | Chargée de Recherches | Centrale Nantes     |
| Drapier | Sylvain | Professeur            | Mines Saint-Etienne |
| Bruchon | Julien  | Professeur            | Mines Saint-Etienne |
| Moulin  | Nicolas | Maitre Assistant      | Mines Saint-Etienne |
| Bréard  | Joël    | Professeur            | Université du Havre |

Thèse préparée dans le centre SMS à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Travail co-encadré par : DRAPIER Sylvain  
BRUCHON Julien  
MOULIN Nicolas

**Destinataires :** DRI, Accueil, SCIDEM, Centre,  
D.CORTIAL « Le Progrès », 24 rue de la robotique – 42000 Saint-Etienne

**Direction Recherche et Innovation**

158, Cours Fauriel

CS62362 - 42023 Saint-Etienne cedex 2 - Tél : 04 77 49 97 10

Page 1 - 1

## Vendredi 01/02/2019 à partir de 9h30 en Amphi F1.

Il s'agit de la première thèse de la Chaire Hexcel – Mines Saint-Etienne.

Le travail présenté s'intitule :

### « Modélisation numérique des procédés LCM à l'échelle des milieux homogènes équivalents en cours de déformation – intégration de la pression capillaire lors de l'infusion et équilibrage post-infusion »

et sera soutenu devant le jury composé de :

- **J. Bréard** Professeur – Université du Havre – Examinateur
- **C. Geindreau** Professeur – Université Grenoble Alpes – Rapporteur
- **C. Binetruy** Professeur – Centrale Nantes – Rapporteur
- **L. Silva** CR HDR – Centrale Nantes – Examinatrice
- **S. Drapier** Professeur – Mines Saint-Etienne – Directeur de thèse
- **J. Bruchon** Professeur – Mines Saint-Etienne – Co-directeur de thèse
- **N. Moulin** Maître-Assistant Mines Saint-Etienne – Encadrant de thèse
- **J.-M. Béraud** R&T Reinforcements Director – Hexcel – Invité

## Résumé

Le procédé d'élaboration par infusion de résine liquide consiste à imprégner un renfort fibreux à travers son épaisseur, sous l'effet d'un gradient de pression créé par la mise sous vide du système. Ce procédé hors autoclave, a été mis au point afin de réduire les coûts de fabrication et de stockage des matériaux et assurer un bon remplissage des pièces de grandes dimensions ; d'où l'intérêt grandissant de l'industrie aéronautique pour cette technique.

Ces travaux de thèse, dans le cadre de la Chaire Hexcel-Mines Saint-Etienne visent à établir un outil numérique robuste et prédictif pour simuler à l'échelle de la structure élaborée les principaux phénomènes physiques apparaissant pendant le procédé. Afin de mieux représenter ces phénomènes complexes multi-physiques, et multi-échelles lors de l'élaboration, une nouvelle approche numérique basée sur la méthode éléments-finis est développée pour modéliser d'une part les effets capillaires lors de la phase critique d'infusion, et d'autre part les écoulements post-infusion durant la phase de rééquilibrage.

Les effets capillaires sont représentés par un tenseur de contraintes capillaires agissant à l'interface bi-fluide de l'écoulement modélisé par les équations de Darcy. Cette stratégie, générant un saut de pression, nécessite un enrichissement local de la pression au niveau des éléments traversés par le front fluide qui est représenté par une fonction Level-set.

La convergence et l'implémentation du modèle sont validées par la Méthode de la Solution Manufacturée. Les résultats numériques sont ensuite confrontés à mesures expérimentales dans le cadre d'une montée capillaire de l'eau dans des renforts en carbone. Le modèle est finalement adapté à l'échelle mésoscopique afin de simuler l'écoulement à travers les torons de fibres.

Une première approche de la modélisation de l'étape de post-infusion qui décrit la forte interaction entre la déformation de la préforme et l'écoulement de résine à la fin du remplissage, est ensuite proposée. Cette modélisation permettra, d'une part de prendre en compte l'influence du couplage fluide-structure sur les tolérances dimensionnelles de la pièce finale et le temps de repos nécessaire, et d'autre part de prédire l'évolution du taux volumique de fibres qui conditionnera in fine la performance mécanique de la pièce. Les équations constitutives du modèle sont déduites d'une approche thermodynamique utilisée en poromécanique et résolues par une méthode éléments finis. L'intégration de la modélisation de cette phase présente un premier pas vers les simulateurs dans un contexte industriel.

## **Abstract**

The liquid resin infusion process consists in impregnating a fibrous reinforcement through its thickness, under the pressure gradient created by pulling the vacuum in the system. This out-of-autoclave process was developed to reduce manufacturing and material storage costs and ensure proper filling of large parts; hence the increasing interest of the aeronautical industry in this technique.

This work, within the framework of the Hexcel-Mines Saint-Etienne Chair, aims to establish a robust and predictive numerical tool to simulate the main physical phenomena occurring during the process, at the macroscopic scale. In order to properly model the complex and multi-scale phenomena during the infusion process, a new numerical approach based on finite-element method is developed to model the capillary effects during the filling stage and to model the post-filling stage.

Capillary effects are represented by a capillary stress tensor acting at the bi-fluid interface of the flow modelled by Darcy's equations. This strategy, generating a pressure jump, requires a local pressure enrichment of the elements crossed by the fluid front. The latter is represented by a Level-set function convected by the fluid velocity.

The convergence and implementation of the model are firstly validated by the Manufactured Solution Method. The numerical results are then compared with experimental data in the case of capillary rises of water in carbon reinforcements. The model is finally adapted to the mesoscopic scale to simulate the flow through the fibre tows.

A first approach of post-filling stage modeling is proposed. This stage describes the strong interaction between the preform deformation and the resin flow at the end of the filling step. Moreover, modeling this stage will allow to study the influence of fluid-solid coupling on the final part geometry regarding the dimensional tolerances, and to predict the evolution of the fibre volume fraction which will ultimately determine the mechanical properties of the part. The constitutive equations of the model are deduced from a thermodynamic approach used in poromechanics, and then solved with a finite element method. The first simulation tests has revealed a high potential and present a first step towards industrial simulators..

**Koloïna Andriamananjara**