

## Profil du candidat :

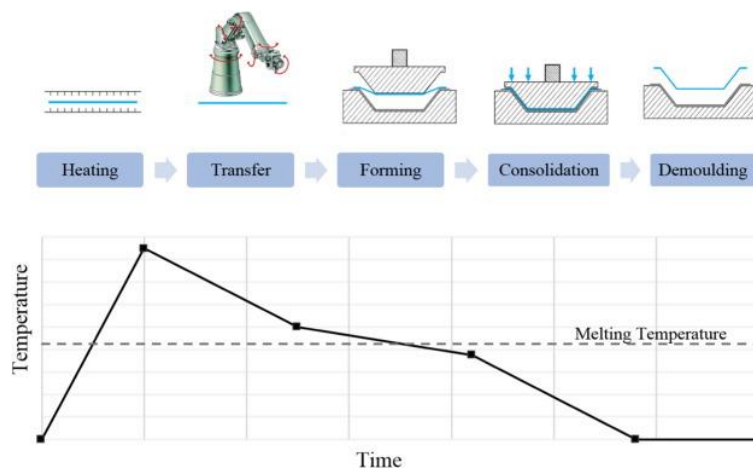
De formation ingénieur ou Master en mécanique, le doctorant aura à aborder des problèmes thermiques et mécaniques, voire multiphysiques. Une appétence pour le développement numérique sera nécessaire.

## Introduction

La réduction des émissions polluantes et l'allègement des véhicules impose d'utiliser de nouveaux matériaux ou assemblages jusqu'alors plutôt réservés aux applications de niche. Les composites à matrice thermoplastiques ont connus un intérêt croissant ces dernières années, car ils répondent à ce besoin de réduction de masse tout en garantissant une tenue mécanique élevée. Des verrous sont néanmoins à lever, notamment concernant la fabrication et le coût de transformation de ces matériaux. D'un côté, les modes de fabrication actuels ne permettent pas de réaliser facilement des formes complexes. D'un autre côté, pour que ces matériaux soient compétitifs, le produit final doit intégrer des fonctionnalités supplémentaires : des raidisseurs pour la tenue mécanique ou de l'électronique pour des fonctions dites « smart », telles que la traçabilité, le suivi de l'intégrité des structures ou l'affichage.

## Contexte

Les matériaux composites thermoplastiques à renforts continus CFRTP (Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic) sont mis en forme en quelques minutes par une succession d'étapes de plus en plus maîtrisées (Figure 1). Une plaque souvent préconsolidée est chauffée à une température supérieure à la température de fusion, puis un bras robotisé positionne le composite dans un outillage (poinçon / matrice) afin d'être estampée. Finalement lors d'une longue phase de consolidation une pression est exercée le temps nécessaire à la fermeture des porosités et à la cristallisation de la matrice.



**Figure 1** Etapes du thermoestampage d'un composite CFRTP

De nombreux défauts propres aux CFRTP doivent être évités. Ces défauts dépendant du cycle de mise en forme sont de différentes natures.

La mise en forme étant faite à chaud (après passage en four infrarouge), la matrice arrive au moule à l'état fondu. Le comportement de ces matériaux est très sensible à la température et donc à ses gradients éventuels dans l'épaisseur, et des phénomènes visqueux importants apparaissent.

Or, pour accélérer les cadences de production, les températures des outils sont largement inférieures à la température du composite en sortie de four. Le choc thermique du au contact entre les outils et le flan conduit très vite à des chutes de température fortes et surtout à un champ thermique hétérogène, responsable des gradients de structure (cristallinité) et donc du comportement mécanique.

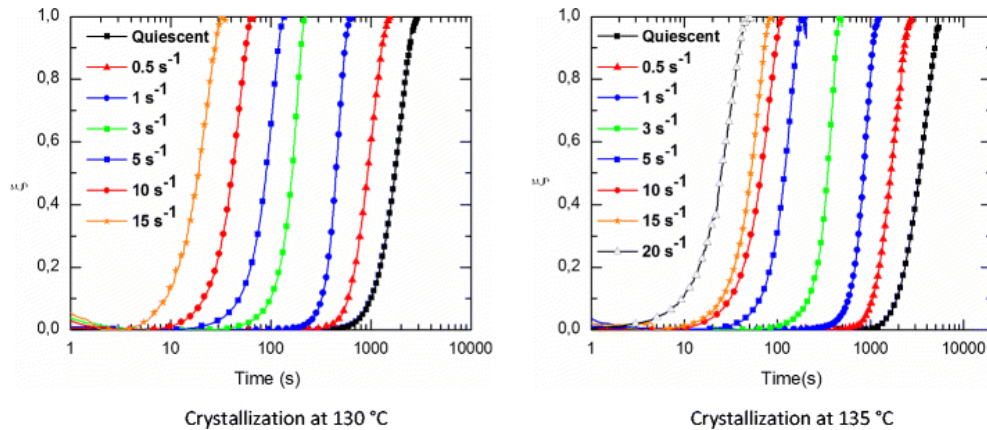
## **Sujet de thèse**

Le travail de thèse a pour vocation de développer des outils numériques d'aide à la conception et à la mise en œuvre des matériaux composites à matrice thermoplastiques. L'objectif étant de développer des méthodes innovantes de mise en formes en vue d'optimiser le procédé tout en contrôlant les propriétés en service de la pièce fabriquée.

Le principe de la mise en forme incrémentale est de discrétiser la cavité moulante d'un outillage de formage en plusieurs éléments ou pavés d'éloignement piloté indépendamment afin de contrôler la déformation du matériau et guider sa mise en forme. L'outil numérique développé dans ce projet permettra de reproduire le comportement du moulage en s'attachant à 2 aspects primordiaux de la modélisation :

- La prise en compte de l'histoire thermique du matériau par un couplage thermomécanique fort
- L'influence de la mise en forme sur les propriétés finales du démonstrateur

Durant la mise en forme, des calculs thermiques réactualisent les champs de température qui nourrissent les modèles mécaniques fortement thermodépendants. Afin de calculer ces champs de températures, les propriétés macroscopiques doivent être connues. La capacité calorifique du mélange fibre polymère peut être évaluée par une loi de mélange. Une autre méthode consisterait à la mesurer directement à l'aide d'un calorimètre dont dispose le CETHIL. De même, la conduction thermique étant un facteur clé dans la modélisation des transferts de chaleur dans le matériau, le CETHIL dispose de moyens de suivi de son évolution depuis l'état liquide à l'état solide. La prise en compte de son évolution réelle en fonction de la température dans la simulation numérique rendra les calculs plus pertinents dans la représentation des transformations du matériau.



**Figure 2.** Mesure du taux de cristallinité [Boutaous & al. 2017]

Grâce aux moyens de caractérisation, rhéologiques et rhéo-optiques, conductivité thermique, calorimétrie, et la modélisation de la cristallisation en quantifiant les effets de l'écoulement (cisaillement) et de la thermique, nous proposons un outil de couplage thermomécanique adéquat pour l'analyse du comportement du matériau lors de l'estampage. Cet outil sera la base pour une optimisation du procédé en relation avec la structure du matériau et donc son comportement final.

Outre les moyens expérimentaux et numériques dont disposent les partenaires, le consortium tripartite gravitant autour de la thèse est constitué d'équipes complémentaires. Le LAMCOS apportera ses compétences en modélisation multiéchelle des matériaux composites et son expertise en modèles thermomécanique. Le CETHIL apportera ses compétences sur l'analyse des transferts de chaleur et l'instrumentation thermique des procédés, la rhéologie du matériau, la modélisation et identification des cinétiques de cristallisation des polymères. IPC utilisera ses compétences en mise en forme des composites. Son outillage de mise en forme servira à valider les modèles sur un démonstrateur en matériau composite.

**Programme :** Le travail s'organisera autour de deux volets numériques et expérimentaux.

On commencera par caractériser et modéliser les propriétés de la matrice : rhéocinétique, thermique, cinétique de cristallisation en milieu confiné avec effet des fibres.

Ces modèles seront ensuite implémentés dans un code numérique simulant le procédé. Enfin, une validation des résultats sur un pilote industriel sera réalisée à l'IPC.

**Profil des candidats :** Etudiant(e) (master recherche où ingénieur avec stage recherche) en Génie mécanique, matériaux ou procédés de transformation de composites, possédant de bonnes compétences en modélisation numérique avec le souci de prise en compte de comportement réel de matériaux et procédés. Pour cela des connaissances en polymères et compétences expérimentales sont aussi exigées afin de caractériser les polymères et de réaliser des tests sur machines. Sens de l'initiative, travail en groupe pluridisciplinaire et un bon sens de l'organisation.

**Contacts :**

Nahiene Hamila, LaMCoS – INSA de Lyon. [nahiene.hamila@insa-lyon.fr](mailto:nahiene.hamila@insa-lyon.fr)

Mhamed Boutaous, Cethyl – INSA de Lyon. [mhamed.boutaous@insa-lyon.fr](mailto:mhamed.boutaous@insa-lyon.fr)