

# Sujet de thèse cotutelle internationale ENS Rennes (France) – Polytechnique Montréal (Canada)

## Projet ATEFA

### Accélération des Transitions Environnementales pour la Fabrication Additive

#### I. Résumé du projet

Les transitions environnementales des procédés visent à considérer conjointement des considérations environnementales (flux de matière et d'énergie entrants et sortants du système de production) et technico-économiques traditionnelles (qualité, coût, délai des produits fabriqués) afin de proposer une industrie durablement performante. L'aspect environnemental des procédés de fabrication prend alors une place importante par la réglementation, les opportunités de marché ou la réduction des coûts associée à une meilleure maîtrise des consommations et rejets. Pour répondre à l'enjeu stratégique actuel de transitions environnementales des entreprises manufacturières, il convient désormais de standardiser les méthodologies d'évaluations environnementales des procédés et développer les outils permettant d'exploiter ces évaluations afin de faire des choix combinant les performances technico-économiques et environnementales des procédés de fabrication.

**Le projet ATEFA, par une thèse de doctorat en cotutelle internationale ENS Rennes (FR) – Polytechnique Montréal (CA), vise à apporter une contribution scientifique majeure dans l'intégration des considérations environnementales pour les systèmes de production, en développant deux axes :**

1. Une modélisation complète du système de production, de la matière première au produit final, basée sur une maîtrise technologique de l'ensemble du procédé (application à la fabrication additive de composites)
2. Des outils d'exploitation d'indicateurs de performance environnementale afin de prendre des décisions combinant les aspects technico-économiques (traditionnels) et environnementaux (émergents).

#### 2. Sujet détaillé

##### 2.1. Contexte scientifique et socio-économique du projet

Au cours des 10 dernières années, les évolutions de la technologie de fabrication additive ont rendu mature ce système de production basé sur la réalisation couche par couche de produits physiques à partir de leur modélisation numérique 3D. Désormais, les machines permettent de mettre en forme des matériaux toujours plus nombreux, aux fonctionnalités avancées. C'est le cas notamment du PA-12 avec renforts en fibre de carbone que les industries aérospatiales québécoises et nautiques bretonnes souhaitent utiliser pour des pièces non-structurales. L'objectif est d'obtenir des produits optimisés en légèreté et résistance, ce qui est possible grâce à la fabrication additive, qui permet la mise en forme de produits avec des complexités géométriques impossibles à réaliser de façon technico-économiquement intéressante avec les procédés traditionnels de mise en forme de matériaux composites.

D'autre part, l'évaluation environnementale des procédés de fabrication est désormais incontournable afin de disposer de données précises et fiables sur les consommations et rejets des procédés de fabrication pour évaluer quantitativement les impacts environnementaux. Le manque d'information sur les flux entrants et sortants des machines utilisant les technologies de fabrication additive ne permet pas de réaliser des évaluations environnementales précises. C'est pourtant le préalable nécessaire pour le développement des transitions environnementales des procédés de fabrication et la transformation vers une industrie durable (objectif 9 de l'Agenda 2030 de l'ONU).

Le projet ATEFA s'appuie sur les expertises des équipes des co-directeurs de recherche (en analyse environnementale des procédés, fabrication additive, dépôt de PA-12 renforcé) pour proposer une accélération des transitions environnementales pour les procédés de fabrication additive en développant deux axes :

1. Une **modélisation complète des flux entrants et sortants du système de production, de la matière première au produit final**. Cette modélisation prend appui sur une maîtrise technologique de l'ensemble du procédé depuis la préparation de la matière première (mélange de polyamide PA-12 et de fibres de carbone, puis mise en bobine), la fabrication par construction de couches successives dans une machine de dépôt de fil adaptée au matériau composite, jusqu'au post-process (suppression des supports) et aux phases de contrôle finales. Elle permettra en outre de continuer à élaborer une méthode standardisée d'évaluation environnementale des procédés de fabrication, basée sur les travaux du groupe de travail ISO TC39/WG12 qui a développé les récentes normes ISO 14955
2. Des **outils d'exploitation d'indicateurs de performance environnementale afin de prendre des décisions combinant les aspects technico-économiques et environnementaux**. L'une des difficultés majeures lorsque l'on cherche à intégrer des considérations environnementales dans les choix de procédés de fabrication est qu'on se retrouve soit avec un modèle très local de ce qui se passe au niveau de la mise en forme, soit avec un modèle très global au niveau entreprise. Le projet ATEFA ambitionne de proposer des outils d'intégration d'une évaluation de performance fine (liée à des compétences au niveau technologie et machines du domaine des sciences des matériaux et de la mise en forme) à des systèmes de décisions d'entreprise (liés à des compétences relevant du domaine du génie industriel). Ces outils permettront alors d'utiliser des indicateurs pertinents pour prendre des décisions fines au niveau de choix de machines ou de stratégies de fabrication en optimisant les coûts et les impacts environnementaux tout en garantissant l'objectif de qualité.

## 2.2. Problématique et hypothèses de recherche

Le défi à relever pour accélérer les transitions environnementales des procédés de fabrication est d'être en mesure d'inclure dans les objectifs de performance des industries la dimension environnementale afin que les systèmes de production soient raisonnés en combinant des approches technico-économiques traditionnelles avec des approches environnementales.

Pour cela, deux visions complémentaires sont indispensables.

Premièrement, ces nouvelles approches doivent nécessairement prendre appui sur une **maîtrise technologique des systèmes de production industriels**, qui constitue le premier verrou principal. Des actions de recherche se déclinent pour développer les procédés innovants de fabrication additive de produits en matériaux composites (combinant ainsi les possibilités de mise en forme de géométries complexes de la fabrication additive avec l'optimisation du matériau lié à l'utilisation du composite).

Deuxièmement, l'**intégration de connaissances environnementales pour la prise de décision sur les systèmes de production** reste un enjeu majeur et constitue donc le deuxième verrou principal. Il faut en effet proposer des méthodes et outils pour intégrer des connaissances issues des analyses environnementales dans les analyses de performance des systèmes de fabrication basées sur des approches technico-économiques traditionnelles (qualité – coût – délai). Il ne s'agit donc pas uniquement d'être capable de prévoir les flux de matières et d'énergie entrants et sortants d'un système de production, mais il faut également pouvoir exploiter ces données de manière pertinente afin de faire des choix de stratégies ou de paramètres de fabrication. Cela passe par la combinaison de performances multi-domaine (coût – qualité – environnement) et l'optimisation multicritères.

## 2.3. Approche envisagée

L'approche envisagée pour le projet ATEFA suit le découpage temporel général en six semestres de travail, répartis entre les deux sites ENS Rennes (France) et Polytechnique Montréal (Canada).

En fonction de la provenance du candidat sélectionné, le travail débutera entre septembre 2020 et janvier 2021, soit à Rennes, soit à Montréal pour tenir compte des circonstances exceptionnelles

actuelles rendant délicats les voyages internationaux. Dépendamment du lieu de démarrage de la thèse, la fin se déroulera sur l'autre site

- **S1 (Rennes ou Montréal) : Analyse de la littérature** pour identifier les verrous scientifiques relatifs aux méthodes d'évaluation environnementale des procédés de fabrication, en particulier les procédés innovants de fabrication additive de produits en matériaux composites ;
- **S2 (Rennes) : Définition d'un guide méthodologique** pour l'analyse environnementale des procédés, incluant l'obtention des modèles de flux entrants et sortants du système de production et l'intégration des incertitudes liées aux paramètres intervenant dans les modèles. Cette phase passera par la conception d'un protocole de mesure et l'élaboration d'un guide générique pour caractériser et modéliser le système de production global, de la matière première jusqu'au produit final en service ;
- **S3 (Montréal) : Consolidation du protocole par la réalisation d'une campagne d'essais** sur les machines de fabrication additive de matériaux composites de Polytechnique Montréal ;
- **S4 (Montréal) : Expérimentations** pour l'obtention des modèles complets de flux entrants et sortants pour les technologies de fabrication additive de produits composites en polymères chargé de fibre de carbone. **Des partenaires industriels** intéressés par la technologie de fabrication additive de matériaux composites dans le secteur aéronautique au Québec et dans le secteur nautique en Bretagne fourniront des cas d'études permettant de réaliser des applications à des produits industriels ;
- **S5 (Rennes) : Analyses des résultats et développement d'un outil d'exploitation des données environnementales** pour qu'elles soient utilisables dans un contexte industriel, c'est-à-dire mises en regard avec des données technico-économiques traditionnellement analysées pour la prise de décision sur les systèmes de production et optimisation multicritères (coût – environnement) sous contraintes (qualité) ;
- **S6 (Rennes ou Montréal) : Synthèse des apports** et mise en perspective des travaux, fin du doctorat.

### 3. Candidature (jusqu'au 30 juin 2020)

#### 3.1. Profil recherché

Le candidat à cette thèse de doctorat devra avoir des connaissances scientifiques dans le domaine de la mécanique des matériaux et la fabrication de produit, attestée par la réussite à une **maitrise en génie mécanique ou un master dont le champ disciplinaire dominant est la mécanique** (ou équivalence). En outre, une première sensibilisation à l'écoconception est indispensable. Enfin, une première expérience en tant qu'utilisateur de machines de **fabrication additive** est un plus.

La qualité du travail réalisé sera attestée par la publication en revues scientifiques à comité de lecture ainsi qu'en conférence d'audiences nationales et internationales ; le candidat devra donc témoigner des **capacités en français et en anglais** suffisantes pour un travail de recherche scientifique.

#### 3.2. Financement

Le financement provient pour moitié d'une Allocation de recherche doctorale de la Région Bretagne (soit environ 1300 € mensuel pour les séjours à Rennes) et pour moitié de subvention sur fonds de recherche (soit environ 1800 \$CAD mensuel pour les séjours à Montréal).

Il est également envisagé que le doctorant candidate à différents programmes favorisant la mobilité des jeunes chercheurs entre la France et le Québec.

#### 3.3. Contacts

[Olivier.Kerbrat@ens-rennes.fr](mailto:Olivier.Kerbrat@ens-rennes.fr), Maître de conférences – HDR, ENS Rennes, directeur de thèse  
[Daniel.Therriault@polymtl.ca](mailto:Daniel.Therriault@polymtl.ca), Professeur titulaire, Polytechnique Montréal, co-directeur de thèse