



## Sujet de thèse de doctorat en génie mécanique

### **R2C2 : Recherche sur le Réemploi et la valorisation des Chutes de Composites pour fabriquer des produits durables**

#### **CONTEXTE**

La thèse proposée est une thèse en cotutelle internationale entre l'ENS Rennes et l'ETS Montréal (Canada) concernant la maîtrise et l'optimisation multicritères des procédés de mise en forme de produits durables à partir de chutes de matériaux composites.

Le laboratoire d'accueil côté français est l'Institut de Physique de Rennes (IPR, UMR 6251 – CNRS, <https://ipr.univ-rennes1.fr/>) et l'établissement d'inscription est l'ENS Rennes (<http://www.ens-rennes.fr/>) au sein de l'école doctorale SPI.bzh (<https://ed-spi-bzh.doctorat-bretagne.fr/fr/>), avec Olivier Kerbrat, Professeur des universités, comme co-directeur de la thèse. Le laboratoire d'accueil côté canadien est le Laboratoire d'ingénierie des polymères et composites (LIPEC, <https://www.etsmtl.ca/laboratoires/lipec>) et l'établissement d'inscription est l'École de Technologie Supérieure à l'Université du Québec (ETS, <https://www.etsmtl.ca/>) avec Martine Dubé, Professeure titulaire, comme co-directrice de la thèse.

La thèse fait suite à 2 thèses dirigées par Olivier Kerbrat récemment soutenues (Vincent Lacoma, Evaluation environnementale des procédés composites pour l'analyse multicritère des systèmes de production : méthodologies, outils et applications, soutenue le 25/09/23 et Thibault Le Gentil, Méthodologie d'analyse de performance multicritère pour outiller la prise de décision sur la fabrication additive de pièce en polyamide renforcé par fibres de carbone, en cotutelle ENS Rennes – Polytechnique Montréal, soutenue le 14/12/23) et l'expertise de Martine Dubé (30 publications en revue scientifique de rang A au cours des 10 dernières années sur les matériaux composites).

#### **RESUME DU PROJET**

Depuis plusieurs années, on observe une utilisation croissante des matériaux composites pour des applications de transport (automobile, maritime, aéronautique). Cela s'explique par le fait que l'utilisation de ces matériaux aux bonnes propriétés mécaniques spécifiques (propriétés mécaniques rapportées à la densité) permet d'alléger des pièces structurelles initialement fabriquées dans d'autres matériaux comme les alliages métalliques. Les prévisions de croissance des matériaux composites dans l'industrie sont estimées entre 4 et 6 % par an sur la période 2022-2027 [1].

Pour une bonne maîtrise de la qualité du matériau, les procédés de mise en forme des composites utilisent généralement des matériaux sous forme de « préimprégnés », c'est-à-dire des tissus de fibres de verre ou de carbone, qui sont préalablement imprégnés de résine polymère thermodurcissable ou thermoplastique et stockés sous forme sèche. Ces matériaux préimprégnés sont ensuite mis en forme et consolidés sous pression et chaleur pour former le produit final [2].

Dans le cas de préimprégnés thermoplastiques, cela se fait habituellement sur des plaques pré-consolidées dans lesquelles des flans sont découpés puis thermoformés. Cette méthode génère de nombreux déchets de composite, en particulier les chutes (squelettes) des plaques suite à la découpe des flans. Qui plus est, la fabrication des préimprégnés eux-mêmes génère des rebuts dont notamment les bords des rouleaux qui ne rencontrent pas les requis des fabricants dû à un taux de fibre moins précisément contrôlé [3, 4]. Ainsi, l'industrie des matériaux composites surconsomme de la matière première. Des travaux de thèse récent quantifient l'impact de cette surconsommation : entre 48% et 80% des impacts environnementaux du procédé de mise en forme par thermoformage et près de la moitié des coûts du procédé [5].

Ainsi dans un contexte de transition environnementale de l'industrie et d'économie circulaire, les déchets des composites préimprégnés constituent une matière première qui doit être réemployée et valorisée. Elle peut

notamment être mise en forme par thermoformage [6], impression 3D [7, 8] ou moulage par compression [9] pour des applications moins exigeantes que l'aéronautique.

L'utilisation d'une matière première dans un système de production nécessite d'être étudiée en termes de caractéristiques techniques afin de prévoir la qualité des produits mis en forme : tenue en service, résistance aux sollicitations, état de surface, précision dimensionnelle et géométrique, etc. De plus, l'utilisation de matière première de seconde main ayant pour objectif de réduire les impacts environnementaux de l'industrie de production, il convient également d'étudier les caractéristiques environnementales des produits ainsi mis en forme : consommation d'énergie, de ressources et rejets pendant le processus.

**Le projet R2C2, par une thèse de doctorat en cotutelle ENS Rennes – ETS Montréal, vise à apporter une contribution scientifique majeure dans l'utilisation et la valorisation des chutes de composite en développant deux axes :**

- **Axe 1 : Une caractérisation complète (technique et environnementale) de l'utilisation des chutes de préimprégnés** issues de l'industrie aéronautique. Dans un premier temps, une caractérisation et modélisation de la qualité des matériaux composites à réemployer et valoriser seront réalisées. Dans un deuxième temps, des applications de mise en forme par thermoformage, impression 3D et moulage par compression de chutes de préimprégnés en résine thermoplastique renforcée par des fibres de carbone seront étudiées et caractérisées. Ainsi la chaîne complète depuis le « déchet » chute de composite jusqu'à l'obtention de produits durables sera caractérisée.
- **Axe 2 : Des indicateurs de comparaison de performance afin de prendre des décisions combinant les aspects technico-économico-environnementaux dans le cas de réemploi et valorisation de matériaux composites.** En effet, la baisse de qualité inhérente à l'utilisation de chutes de matériaux composites par rapport à des matériaux neufs est à mettre en regard d'un gain environnemental et économique. Il faut donc développer des indicateurs permettant cette comparaison aisée et la prise de décision adaptée.

## ORGANISATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

L'approche envisagée pour le projet R2C2 suit le découpage temporel général en 36 mois de travail, répartis équitablement entre les deux sites ENS Rennes (France) et ETS Montréal (Canada).

En fonction de la provenance du/de la candidat.e sélectionné.e, et afin de favoriser une intégration rapide dans les équipes de recherche, le travail débutera à l'automne 2024 soit à Rennes, soit à Montréal. Dépendamment du lieu de démarrage de la thèse, la fin se déroulera sur l'autre site.

- **Tâche 1, mois M0 à M5 (Rennes ou Montréal) : Analyse de la littérature** pour identifier les verrous scientifiques relatifs à l'utilisation des chutes de composites dans les 3 procédés à considérer pour la mise en forme : thermoformage, impression 3D et moulage par compression. Il conviendra notamment de définir précisément les baisses de qualités déjà identifiées par le réemploi de matériaux composites et les leviers d'actions environnementaux associés aux procédés considérés.
- **T2, M6 à M9 (Rennes), axe 1** : Définition d'un **protocole expérimental pour l'analyse environnementale** des procédés de thermoformage, impression 3D et moulage par compression, incluant l'obtention de modèles de flux entrants et sortants du système de production et l'intégration des incertitudes liées aux paramètres intervenant sur les modèles. Cette tâche prendra appui sur les travaux de l'équipe d'Olivier Kerbrat [5, 8] et sera déployées sur les 3 procédés considérés, en lien avec l'expertise et les moyens du centre technique Innozh composite à Saint Briec.
- **T3, M10 à M13 (Montréal), axe 1 : Caractérisation technique des matériaux composites à réemployer et valoriser.** Par des essais sous différentes sollicitations mécaniques (traction, flexion [10]), des caractérisations structurales à différentes échelles (observation MEB, tomographie) et des analyses thermiques (analyse thermogravimétrique ATG, calorimétrie différentielle à balayage DSC), les chutes des composites seront complètement caractérisées du point de vue de leurs propriétés mécaniques et physiques [3], de leur composition et de leur capacité de cristallisation (thermoplastiques semi-cristallins). Un article en revue internationale de rang A présentant ces caractérisations sera soumis, idéalement à *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*.
- **T4, M14 à M19 (Montréal) puis M20 à M23 (Rennes), axe 1 : Caractérisation technique et environnementale des procédés considérés**, par la réalisation d'expérimentations sur machines de mise en forme de laboratoires en environnement représentatif de l'industrie. L'ETS est équipée de moyens de mise

en forme par thermoformage et moulage par compression, l'ENS est équipée de moyens de mise en forme par impression 3D. En suivant un protocole identique pour les 3 procédés considérés défini en tâche 2, cette phase permettra de finaliser l'axe 1 du projet. Des articles en conférences nationales (*S.mart*) ou internationales (telles que *CIRP Manufacturing Systems* et *ICCM* par exemple) sur les procédés de mise en forme à partir de matériau composite de seconde main sont envisagés au cours de cette tâche.

- **T5, M24 à M27 (Rennes) puis M28 à M31 (Montréal), axe 2 : Proposition d'indicateurs de performance multicritères pour le réemploi et la valorisation.** Sur la base des caractérisations obtenues lors tâches 3 et 4, il conviendra de proposer de nouveaux indicateurs liés à une exploitation technique, économique et environnementale des démarches d'économie circulaire pour l'industrie des composites. Des cas d'études liées aux filières de construction navale (en région Bretagne, avec la Lorient Composite Valley pour laquelle Olivier Kerbrat a déjà des travaux en cours dans le projet EcoSailingDesign® soutenu par la région) et aéronautique (au Québec, avec la Chaire de recherche en génie Marcelle-Gauvreau sur les matériaux composites respectueux de l'environnement dont la titulaire est Martine Dubé) permettront de confronter les propositions d'indicateurs avec des choix d'ingénierie dans un contexte industriel. Suivant les cas choisis, et notamment des cas industriels liés à Lorima et Crazy Lobster, des communications scientifiques seront également réalisées au cours de cette tâche.
- **T6, M32 à M36 (Rennes ou Montréal) : Synthèse des apports** et mise en perspective des travaux, soutenance et fin du doctorat.

## LIEN AVEC LES TRANSITIONS ENVIRONNEMENTALES DE L'INDUSTRIE

Le projet R2C2 s'attaque à des problématiques de transitions industrielles et écologiques. En effet, l'idée du réemploi et de valorisation des chutes de matières utilisées dans l'industrie favorisera le déploiement d'une économie circulaire, à condition que les performances techniques, économiques et environnementales soient maîtrisées. C'est bien l'objet de l'axe 2 du projet, qui, sur la base des expérimentations menées sur les matériaux et procédés au cours de l'axe 1, permettra de proposer et tester sur cas d'études des indicateurs de performance multicritères. Cela permettra d'agir avec des ressources disponibles localement et caractérisées en termes de qualité et de maîtrise des impacts environnementaux.

## CANDIDATURE

Le/la candidat.e à cette thèse de doctorat devra avoir des connaissances scientifiques dans le domaine de la mécanique des matériaux, 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 aux approches environnementales (écoconception, approche cycle de vie) est indispensable.

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

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] The composites industry bounces back at different speeds', *JEC Compos. Mag.*, no. April-May, 2023.
- [2] McCool, R., Murphy, A., Wilson, R., Jiang, Z., Price, M., Butterfield J., Hornsby, P. Thermoforming carbon fibre-reinforced thermoplastic composites, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L: J. Mater. Des. Appl.*, vol. 226, no. 2, pp. 91–102, Apr. 2012, <https://doi.org/10.1177/1464420712437318>
- [3] Pattery, H., Smith, A., Canart, J.-P., Tabiai, I., **Dubé, M.** Mechanical Sieving of Carbon-Fibre/PEEK Prepreg Tape Edge Trim Waste Prior to Compression Moulding and its Influence on Panel Properties, *International Conference on Composite Materials*, July 30th – August 4th 2023, Belfast (United Kingdom).
- [4] Smith, W.A., Legait, A., Tabiai, I., **Dubé, M.** Optical evaluation, sieving and re-manufacturing of unidirectional thermoplastic prepreg trim waste, *CANCOM Conference*, July 12-15 2022, Fredericton (NB, Canada).
- [5] Lacoma, V., Bailleul, J.-L., Moisan, S., Vincent, G., Binetruy, C., **Kerbrat, O.** Inventory analysis of the carbon fibres reinforced polyphenylene sulfide thermos-stamping manufacturing process, *Journal of Cleaner Production* 393, 2023, 136337, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136337>.

- [6] Sultana, S., Asadi, A., Colton, J., Kalaitzidou, K. Composites made from CF prepreg trim waste tapes using sheet molding compounds (SMC) technology: Challenges and potential, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 134, 2020, 105906, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105906>.
- [7] Farahani, R.D., **Dubé, M.**, Therriault, D. Three-Dimensional Printing of Multifunctional Nanocomposites: Manufacturing Techniques and Applications, *Advanced Materials* 28 (2016), p.5794-5821, <https://doi.org/10.1002/adma.201506215>
- [8] Le Gentil, T., Langot, J., Therriault, D., **Kerbrat, O.** Identifying efficient solutions for additive manufacturing of short carbon-fiber reinforced polyamide 6 from energy and mechanical perspective, *30<sup>th</sup> CIRP Life Cycle Engineering conference*, May 15-17 2023, New Brunswick (New Jersey, USA).
- [9] Fleischer, J., Teti, R., Lanza, G., Mativenga, P., Möhring, H-C., Caggiano, A., Composite materials parts manufacturing, *CIRP Annals*, Volume 67, Issue 2, 2018, Pages 603-626, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.005>
- [10] Deluy M-C, Khay M, Ngo AD, **Dubé M.**, Ganesan R. Effects of environmental conditions on the axial tension–compression fatigue behavior of carbon/epoxy plain-weave laminates containing flaws. *Journal of Composite Materials*. 2020;54(27):4215-4230. <https://doi.org/10.1177/0021998320929411>

## CONTACTS :

Olivier Kerbrat, [Olivier.Kerbrat@ens-rennes.fr](mailto:Olivier.Kerbrat@ens-rennes.fr), +33(0) 2 99 05 52 75  
Martine Dubé, [martine.dube@etsmtl.ca](mailto:martine.dube@etsmtl.ca), +1(514) 396-8487