
PROGRAMME ACCELERATEUR DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE SUR LE MANUFACTURING
APPEL A PROPOSITION DE SUJETS DE THESE 2024
DOSSIER DE CANDIDATURE

RAPPEL : LE DOSSIER DOIT ETRE TRANSMIS PAR L'ORGANISME OU L'ETABLISSEMENT AUQUEL EST RATTACHE LE DIRECTEUR DE THESE.

1. INTITULE DE LA THESE

- Intitulé de la problématique IRT concernée : **Formage et Préformage**

Maîtrise de la cuisson hors autoclave des structures composites à épaisseurs fortement variables.

- Intitulé de la thèse :

Pilotage spatio-temporel des conditions thermiques, aux limites d'une pièce composite de forte épaisseur et variabilité d'épaisseur importante, dans le but de maîtriser la cinétique de polymérisation.

- Etablissement d'enseignement supérieur où sera inscrit le doctorant : **Nantes Université**
- Ecole doctorale : **SIS (Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes)**
- Laboratoire où s'effectuera la thèse : **Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes – UMR6607**
- Directeur du laboratoire : **Steven LE CORRE**
- Directeur de la thèse : **Vincent SOBOTKA**
- Collaboration avec d'autres laboratoires dans le cadre de la thèse (nature de la collaboration) :
- Nom des autres laboratoires impliqués dans la collaboration :

2. DESCRIPTION DU SUJET (~20 lignes : contexte, description, éléments de l'état de l'art)

La mise en forme de pièces composites à partir de préimprégnés à matrice thermodurcissable induit un couplage entre différentes physiques, notamment la mécanique, les transferts de chaleur et la chimie. Dans le cas de réalisation de pièces de grandes dimensions, la cuisson se réalise la plupart du temps hors autoclave et sous bâche à vide. Dans ce cas, le seul paramètre qui peut être contrôlé durant le cycle de

1

mise en forme est la température de surface de la pièce. Dans le cas où les pièces sont de fortes épaisseurs le couplage entre la thermique et la polymérisation devient très important et peut générer des échauffements très importants. Ces derniers, associés à l'anisotropie complexe et multi-échelles des empilements stratifiés composites, vont induire le développement des contraintes résiduelles et des éventuelles distorsions de pièces après refroidissement. Un contrôle temporel de la température est nécessaire afin de limiter ces effets et notamment l'emballement de la réaction chimique. En outre dans le cas où les épaisseurs sont variables dans l'espace, il faut ajouter une dimension spatiale à ce contrôle. Avant d'atteindre une complète maîtrise de l'état de santé matière post-cuisson, il est nécessaire de proposer des stratégies de pilotage thermique par les conditions aux limites qui permettent de contrôler à façon les champs de température et de transformation.

L'ambition de la thèse proposée est de répondre à ce challenge en étudiant les aspects suivants :

1. *La description des transferts couplés entre la thermique et la polymérisation ; ainsi que la caractérisation des propriétés des matériaux utilisés si elle n'est pas déjà réalisée.* En accord avec l'IRT Jules Verne et les partenaires industriels, il faudra rapidement définir un matériau référence dans un but de validation de la méthodologie développée.
2. *La mise en place d'une stratégie d'optimisation thermique permettant d'estimer la distribution spatiale et temporelle des conditions aux limites thermiques à imposer afin de minimiser les gradients de transformation.* La validation expérimentale de cette étape, sur la base du matériau retenu, pourra se faire à l'échelle du laboratoire sur des épaisseurs raisonnables. L'utilisation de moyens IRT ou bien industriels permettra la validation sur des pièces plus épaisses.
3. *La recherche de moyens technologiques applicables pour la mise en œuvre de la stratégie et potentiellement leur mise en œuvre sur un démonstrateur proposé par l'IRT et les partenaires industriels.* Les épaisseurs visées dans ce projet impliqueront un coût matière et matériel important pour mener à bien la validation expérimentale des propositions qui seront faites. Ce dernier devra être anticipé dès le montage du projet.

La prise en compte du couplage mécanique, notamment la prise en compte des retraits et le développement des contraintes pourra être envisagé en fonction de la réalisation effective des tâches 1 et 2.

3. DESCRIPTION DES VERROUS SCIENTIFIQUES OU TECHNOLOGIQUES A LEVER ET PISTES ENVISAGEES (~2 pages)

Des verrous scientifiques et technologies liés à la problématique de la **maîtrise de la cuisson hors autoclave des structures composites à épaisseurs fortement variables** ont été identifiés sur la base de notre expérience et de l'étude bibliographique préalable déjà réalisée. Ils sont nombreux et liés aux physiques que nous souhaitons adresser durant ces travaux de recherche.

Tout d'abord, la **très forte épaisseur des pièces** à traiter dans le cadre de cette thèse est en soi un verrou à la fois technologique et scientifique. En effet, mettre en œuvre des pièces composites ayant des épaisseurs allant jusqu'à 200 mm environ est un challenge en tant que tel. Il nécessite des moyens matériels et un support technique rares que nous espérons trouver à l'IRT Jules Verne. Notons ici que dans le cadre de l'étude bibliographique réalisée, les épaisseurs atteintes sont au maximum de 60 à 80 mm. Derrière ses épaisseurs se cache la problématique de la sensibilité des champs de température et de transformation aux conditions aux limites de la pièce visée. Une première étape théorique du travail consistera ainsi en l'étude de ces sensibilités en fonction de l'épaisseur de la pièce dans la gamme 2 à 20 cm. Dépendamment de ces premiers résultats, il conviendra d'établir une stratégie de contrôle qui soit

également crédible d'un point de vu technologique (vitesse de chauffage/refroidissement, puissances mises en jeu ...).

Le **caractère multiphysiques des procédés** de mise en œuvre des polymères et composites adressent ici de manière évidente le couplage entre température et transformations (polymérisation, cristallisation ou fusion). Cependant, la dépendance des propriétés thermophysiques des matériaux aux 2 champs cités induit un couplage thermomécanique important qui devra être pris en considération, notamment dans le cas de pièces mises en œuvre sur un moule. En effet, les gradients de transformations peuvent induire des contraintes mécaniques au sein du matériau pouvant mener à une déformation de celui-ci, donc à une modification, parfois très locale, de la nature des conditions aux limites de la pièce. L'implémentation d'un code incluant ces trois physiques avec des paramètres variables en fonction des champs est identifié comme un verrou scientifique tout comme la validation expérimentale de celui-ci est un verrou technologique.

La **forte variabilité des épaisseurs des pièces** mise en œuvre, tout comme des **géométries complexes** (équerres, pièces en U ...) adressent également des connaissances encore fragiles qui nécessitent d'être renforcées.

Enfin, la **nature même des matériaux étudiés**, sièges de transformations fortement exothermiques (ou endothermique dans le cas de la fusion) dans un milieu thermiquement isolant adresse le double challenge de l'évacuation de forte puissance thermique au travers d'un milieu peu diffusif ! Notons ici que le caractère composite des pièces complexifie encore plus les problématiques, notamment sur l'aspect thermomécanique, mais qu'il peut être une solution dépendamment de la nature et de la disposition des renforts, en particulier les fibres de carbone.

4. POSITIONNEMENT DU SUJET DE THESE PAR RAPPORT A L'ETAT DE L'ART - BIBLIOGRAPHIE (2- 3 pages)

Le développement de pièces composite épaisses, par exemple les pieds de pale d'éolienne, ont suscité de nombreux travaux de recherche en lien avec la détermination de cycles optimaux de mise en forme [1-11]. Ces travaux ont majoritairement pour objectif la mise en place de stratégies d'optimisation mono ou multi critères visant à réduire le temps de polymérisation, la température maximale dans les pièces, ainsi que la diminution des gradients de température et/ou d'avancement [2,5, 7-11]. Différentes approches sont utilisées pour minimiser ces critères : stochastiques, génétiques, par réseaux de neurones, par apprentissage [2,4,9,10].

Dans la thèse proposée ici, **le choix du critère d'optimisation ainsi que la méthode numérique constituent évidemment une partie de l'étude à partir de l'analyse bibliographique.**

Néanmoins, dans la majorité de ces travaux issus de la littérature, les pièces considérées présentent une épaisseur variant de 20 à 60 mm [2,3,5,7,9,11] qui reste très éloignée des contraintes proposées dans le contexte de cette problématique (jusqu'à 200mm). Mettre en œuvre de telles pièces épaisses, même aussi simple que des plaques est déjà en soit un challenge. En effet, nous avons déjà démontré [14, 19-21] qu'il était possible de contrôler, par la thermique, la transformation dans un matériau composite à matrice thermodurcissable de quelques centimètres d'épaisseur. La question se pose par rapport à la **potentielle sensibilité de la polymérisation à la température de paroi de la pièce composite** sur des pièces encore plus épaisses ?

Un autre verrou scientifique que nous identifions concerne les épaisseurs fortement variables dans des pièces de grandes dimensions. En effet le **caractère fortement anisotrope des composites à matrice organique complexifie la gestion de l'inhomogénéité spatiale.** Toutefois, cette propriété peut-être un atout pour évacuer la chaleur, dans le plan, des zones chaudes vers les zones froides. Il est potentiellement ici possible de prévoir une sorte de drain thermique.

-
- [1] L. Sorrentino, C. Bellini, "Validation of a Methodology for cure process optimization of Thick composite laminates", Polymer Plastics Technology and Engineering , 2015
- [2] G. Struzziero, A.A. Skordos , "Multi-objective optimization of the cure of thick components", Composite part A, 2017
- [3] L. Sorrentino, L. Esposito, C. Bellini , "A new methodology to evaluate the influence of curing overheating on the mechanical properties of thick FRP laminates", Composite Part B, 2017
- [4] D. Aleksendric, C. Bellini, P. Carlone, V. Cirovic, F. Rubino, L. Sorrentino , "Neural-Fuzzy optimization of thick composites curing process", Materials and manufacturing processes, 2017
- [5] K.I. Tifikitsis, T.S. Mesogitis, G. Struzziero, A.A. Skordos, "Stochastic multi-objective optimization of the cure process of thick laminates", Composite s part A, 2018
- [6] S. Anandan, G. S. Dhaliwal, Z. Hou , "Curing of thick thermostet composite laminates : multiphysics modeling and experiments", Applied Composite Materials, 2018
- [7] R. Matsuzaki, R. Yokoyama, T. Kobara, T. Tachikawa , "Multi-objective curing optimization of carbon fiber composite materials using data assimilation and localized heating.", Composite Part A, 2019.
- [8] Z. Yuan, X. Tong, G. Yang, Z. Yang, D. Song, S. Li, Y. Li , "Curing cycle optimization for thick composite laminates using the multiphysics coupling model", Applied composite materials, 2020
- [9] Y. Gao, J. Ye, Z. Yuan, Z. Ling, Y. Zhou, Z. Lin, J. Dong, H.Wang, H-X. Peng , "Optimization strategy for curing ultra-thick composite laminates based on multi-objective genetic algorithm", Composites Communications, 2022.
- [10] Y. Gao, Z. Lin, Y. Zhou, Z. Ling, J. Dong, H. Wang, H-X. Peng , "Size effect in curing optimization for thick composite laminates", Materials Today Communications, 2023.
- [11] K.I. Tifikitsis, A. Winistoerfer, A.A. Skordos , "Online optimization and active control of the cure process of thick composite laminates", Journal of manufacturing processes, 2023.

5. DEMARCHE SCIENTIFIQUE, METHODE ET PLAN DE TRAVAIL (1 page)

Le plan de travail proposé est le suivant :

- 1) Etude bibliographique autour de la cuisson de pièces composite épaisses : technologies, phénomènes physiques mis en jeu, approche numérique et expérimentale
- 2) Sur la base d'un matériau (choisi en concertation avec les industriels financeurs du projet), développement d'un code de simulation numérique des physiques et validation expérimentale sur la base de mesures existantes.
- 3) Etude de la sensibilité des champs de transformations et thermiques aux conditions aux limites du problème en fonction de l'épaisseur de la pièce étudiée.
- 4) Au regard de l'étude précédente, préconisation de méthodologies de contrôle en fonction de l'épaisseur des pièces.

- 5) Extension de la problématique au cas de pièces à forte variabilité d'épaisseur.
- 6) Rédaction du manuscrit et soutenance.

Les étapes 3, 4 et 5 seront menées dans l'objectif de rédiger une publication scientifique de rang A.

6. RISQUES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES (1 page)

N°	Risque technique	Actions préventives	Probabilité (Très forte, forte, moyenne, faible)	Impact (Très fort, fort, moyen, faible)	Criticité (cf. tableau ci-dessous)	Mesure corrective
1	Choix d'un matériau représentatif et caractérisation de celui-ci	Concertation avec les industriels financeurs et l'IRT Jules Verne + collecte de données	Faible	Fort	Faible	Sur la base de l'expertise de l'équipe d'encadrement des mesures pourront être conduites au laboratoire
2	Développement et validation d'un code de simulation des phénomènes physiques dans le cas de pièces épaisses (>10cm)	Collecte de mesures déjà réalisées sur des pièces semi-épaisses (3 à 7 cm)	Moyen	Très fort	Moyenne	Utilisation des compétences du laboratoire et de l'IRT Jules Verne pour développer un moyen expérimental
3	Sensibilité des champs de transformation et thermiques aux conditions aux limites	Etudier les sensibilités des champs (T et α) aux conditions limites pour plusieurs épaisseur (3 à 20 cm)	Forte	Très Fort	Fort	Proposer et qualifier des stratégies originales pour réaliser le contrôle des champs I
4	Réalisation d'un démonstrateur à échelle pré-industrielle pour la cuisson de pièces d'épaisseur variable (> 10c m)	Prévision des coûts dans la feuille de route initiale	Moyenne	Fort	Moyenne	Simplification au maximum du démonstrateur envisagé

Calcul de la criticité

Impact	Très fort	Moyenne	Moyenne	Fort	Très fort
	Fort	Faible	Moyenne	Fort	Très fort
	Moyen	Faible	Moyenne	Fort	Fort
	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne
		Faible	Moyen	Fort	Très fort
		Probabilité			

7. RENSEIGNEMENTS SUR LE LABORATOIRE D'ACCUEIL (~1 page : thématiques, organisation, personnels)

Créé en 1967, le Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes (LTEN), Unité Mixte de Recherche du CNRS (UMR 6607) regroupe aujourd'hui près de 70 personnes sur le site de Polytech'Nantes. Il est structuré en 2 axes de recherche : Transfert dans les Fluides et les Systèmes Energétiques (TFSE) et Transfert Thermique dans les Matériaux et aux Interfaces (TTMI). Dans ce dernier axe, une équipe s'est spécialisée, depuis plus de 30 ans, dans le contrôle et la maîtrise thermique des procédés d'élaboration de polymères et composites.

Le laboratoire est notamment reconnu pour son expertise dans l'analyse fine des phénomènes multi-physiques mis en jeu lors de l'élaboration de matériaux. Il a ainsi développé, toujours en interaction avec le monde industriel, des bancs d'essais originaux permettant de caractériser les phénomènes physiques au plus près des conditions réelles des procédés. Avec cette vision du thermicien, des outils et méthodes allant de la caractérisation au recyclage des composites à matrice polymère, en passant par l'optimisation et le contrôle du procédé, sont mis au service des utilisateurs et de grands codes de calcul.

Nos travaux font l'objet de collaborations scientifiques avec d'autres centres tant à l'échelle française qu'à l'échelle internationale. Ainsi le laboratoire a-t-il développé depuis plusieurs années une expertise dans le domaine de la qualification des interfaces de composites à matrice thermoplastique.

8. INSCRIPTION DE LA THESE AU SEIN DES AXES DE RECHERCHE DU LABORATOIRE (~20 lignes)

Cette proposition de thèse s'inscrit dans la thématique de la maîtrise des champs thermique couplés à la transformation des composites, à matrice thermoplastique ou thermodurcissable, développée au laboratoire depuis plus de 20 ans. Elle s'inscrit parfaitement dans les axes de recherche de l'axe TTMI. Le contrôle de la cinétique de réticulation d'une matrice thermodurcissable ayant déjà fait l'objet de travaux de recherche dans les années 1990 [20,21].

Le couplage entre le champ de température et le champ de transformation dans un matériau composite qui se transforme constitue une thématique transverse au groupe travaillant sur la thermique de la mise en forme des polymères et composites et au groupe travaillant sur les transferts aux interfaces et à micro-échelle. La problématique de la maîtrise de la source thermique, dans le cadre de pièce particulièrement épaisse et avec une grande variabilité de cette dernière, rejoint naturellement la thématique des transferts en cours de mise en œuvre, développée de longue date au laboratoire [14-19].

Les membres du groupe Procédés Polymères et Composites du LTEN collaborent depuis plusieurs années sur la modélisation des couplages thermo-chimiques dans les procédés à matrice thermodurcissable notamment. Ce sujet fait régulièrement l'objet de communications en conférences nationale et internationales [23, 25,26].

9. LISTE DES THESES RECENTES OU EN COURS EN LIEN AVEC CE SUJET

[12] R. Moussallem, « Identification de propriétés thermophysique de matériaux polymères et composites en cours de transformation », Thèse de doctorat de Nantes Université, Ecole doctorale Sciences pour l'ingénieur, soutenance fin 2024

[13] E. Reyes "Méthodologie de conception thermique d'outillage : Application aux composites hautes performances.", Thèse de doctorat de Nantes Université, Ecole doctorale Sciences pour l'ingénieur, 20 octobre 2022

10. LISTE DES TRAVAUX LES PLUS SIGNIFICATIFS DU LABORATOIRE (PUBLICATIONS, OUVRAGES, COLLOQUES...) DANS LE CHAMP THEMATIQUE DE LA THESE

Articles de Journaux :

- [14] E. Reyes, X. Tardif, J-L. Bailleul, N. Allanic, V. Sobotka, « Inverse heat transfer optimization of stamping with over-molding process involving high performance thermoplastic composites: Experimental validation. », *International Journal of Material Forming* (janvier 2022).
- [15] Denis, Y., Nguyen, T., Lecointe, D., Le Corre, S., & Levy, A. Thick thermoplastic composite laminate consolidation : Experimental observations and numerical approaches. *Journal of Composite Materials*, 56(14), 2169–2188 (2022).
- [16] A. Agazzi, V. Sobotka, R. LeGoff, and Y. Jarny, “Inverse method for the cooling system design in injection moulding – application to a ‘T-shaped’ piece,” *Inverse Probl. Sci. Eng.*, Volume 22, Issue 5, July 2014, pages 707-726.
- [17] V. Sobotka, N. Lefevre, Y. Jarny, and D. Delaunay, “Inverse methodology to determine mold set-point temperature in resin transfer molding process,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 49, no. 11, pp. 2138–2147, Nov. 2010.
- [18] A. El Labban, P. Mousseau, R. Deterre, J-L. Bailleul, “Curing cycle optimization of a thick section rubber part.”, *Rubber Chemistry and Technology* 83, 331, 2010.
- [19] A. El Labban, P. Mousseau, J-L. Bailleul, R. Deterre, « Optimization of thick rubber part curing cycles. », *Inverse Problems in Science and Engineering*, Vol. 18, 3 avril 2010, pp. 313-340.
- [20] J-L. Bailleul, V. Sobotka, D. Delaunay, Y. Jarny, « Inverse algorithm for optimal processing of composite materials. », *Composite part A*, 34 (2002), pp 695 – 708.
- [21] J-L. Bailleul, Y. Jarny, D. Delaunay, « Optimisation du cycle de cuisson d’une pièce composite épaisse. », *Revue des Matériaux Composites Avancés*, Vol. 8 n°2, décembre 1998, pp159-177.
- [22] J-Luc Bailleul, « Optimisation du cycle de cuisson de pièces épaisses en matériaux composites – Application à un pré-imprégné résine époxyde / fibres de verre. », Thèse de Doctorat de l’Université de Nantes, juillet 1997.

Articles de Conférences :

- [23] R. Moussallem, E. El Rassy, J. Faraj, J-L. Bailleul, « Identification of the thermophysical properties of polymer and composite materials during their transformation », IHTC, aout 2023, Le Cap.
- [24] E. Reyes Rodriguez, X. Tardif, J-L. Bailleul, N. Allanic, V. Sobotka, “Thermal design methodology in hybrid manufacturing process of High Performance Thermoplastics Composites.”, ESAFORM 2021, Liège (conf. orale + article)
- [25] Levy, A., Le Corre, S., & Sobotka, V. Heat transfer and crystallization kinetics in thermoplastic composite processing. A coupled modelling framework. In ESAFORM 19. Nantes, France (2016)..
- [26] J. Faraj, J-L. Bailleul, N. Boyard, D. Delaunay, G. Orange, "Heat transfer and crystallization modeling during compression molding of thermoplastic composite parts.", ESAFORM2015, Graz, Autriche, 15-17 avril 2015.
- [27] J-L. Bailleul, D. Delaunay, Y. Jarny, «Optimal thermal processing of composite materials: an inverse algorithm and its experimental validation. », *11e Int. Heat and Temperature Conf.*, Vol. 5, August 23-28, 1998, kyeongju, Korea, pp87-92
- [28] J-L. Bailleul, Y. Jarny, E. Artyukin, D. Delaunay, «Identification and control of heat sources in materials during thermal processing» *Inverse Problems in Science and Engineering*, Vol 4, pp111-128, 1997.

Signature du Directeur du Laboratoire

Signature du Directeur de l'Établissement

COORDONNEES DU CONTACT AU SEIN DE L'ORGANISME OU DE L'ETABLISSEMENT

- Nom : *Bailleul Jean-Luc*

- Adresse : *LTEN – UMR6607, Rue Christian Pauc, 44300 Nantes Cedex 03*

- Tel : *02 40 68 31 37 ou 02 28 09 20 66*

- Adresse e-mail : *jean-luc.bailleul@univ-nantes.fr*