



## **Proposition d'un sujet de thèse en cotutelle 2026/2027**

### **A. Porteur du sujet à l'Université Libanaise**

1. Nom : CHALLITA
2. Prénom : Georges
3. Titre (Prof, HDR, ....) : Professeur
4. Laboratoire : Centre de Recherche Scientifique en Ingénierie
5. Adresse Web : <http://www.ulfg.ul.edu.lb/research>
6. Etablissement : Université Libanaise Faculté de Génie (ULFG)
7. Adresse Web : <http://www.ulfg.ul.edu.lb/branches/2>
8. Domaines d'expertise :
  - Mécanique des Matériaux
  - Caractérisation des matériaux polymériques et composites
  - Essais dynamiques
  - Modélisation numérique
9. Publications importantes en relation avec le sujet proposé :
  - M. Said, A. Céline, G. Challita, S. Fréour, Estimation of the hygro-elastic behavior of polymeric composites during moisture aging considering hygromechanical coupling, Journal of reinforced plastics and composites 2024, Vol. 43, 1189 –1201
  - Z. El-Hachem et al., Dimensional variation and evolution of mechanical properties of wet aged composites reinforced with flax fibers, Journal of Composite Materials, 2020, DOI: 10.1177/0021998320966045
10. Adresse Web de votre page personnelle : [<https://www.linkedin.com/in/georges-challita-0a780120a/>]
11. Adresse e-mail : [[georges.challita@ul.edu.lb](mailto:georges.challita@ul.edu.lb)]

### **B. Partenaire à l'UPJV :**

1. Nom : PANIER
2. Prénom : Stéphane
3. Titre (PU, MCF, HDR, ...) : Professeur des Universités (PU)



Université Libanaise



4. Laboratoire : Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI – EA 3899)
5. Etablissement : Université de Picardie Jules Verne
6. Adresse Web : <https://www.u-picardie.fr/>
7. Domaines d'expertise :
  - Fabrication additive
  - Polymères chargés
  - Modélisation des matériaux composites
8. Publications importantes en relation avec le sujet proposé :
  - Boudeville, V., Grugeon, S., Maurel, A., Lesieur, R., Louati, M., Cayla, A., Ursescu, S., Campagne, C., **Panier, S.** and Dupont, L. (2024). Solvent-free extrusion of a LFPbased monofilament for three-dimensional printing of a lithium-ion battery positive electrode. *Journal of Power sources*, 593, 233973.
  - Wintiba, B., Vasiukov, D., **Panier, S.**, Lomov, S., Kamel, K. and Massart, T.J. (2020). Automated post-processing and conformal discretization of 3D woven composite CT scans with local fiber volume fraction control. *Composite Structures*, 248, 112438.
  - Nguyen, V.H., Lagardère, M., Park, C.H. and **Panier, S.** (2014). Permeability of natural fiber reinforcement for liquid composite molding processes. *Journal of Materials Science*, 49, 6449-6458.
9. Adresse Web de votre page personnelle : <https://www.researchgate.net/profile/Stephane-Panier>
10. Adresse e-mail : [stephane.panier@u-picardie.fr](mailto:stephane.panier@u-picardie.fr)

### **C. Description du sujet de thèse proposé : (3 à 5 pages)**

1. **Discipline** : Science des matériaux – Génie mécanique – Éco-conception
2. **Titre** : Fabrication additive par extrusion de granulés (GEAM) de composites hybrides PA6.10 / fibres de verre / fibres naturelles pour micro-turbines hydrauliques : optimisation procédé, comportement hydrothermique et recyclabilité. |

**Résumé** : Cette thèse en cotutelle UPJV / Université Libanaise vise à développer des composites hybrides à matrice polyamide 6.10 biosourcé (PA6.10) renforcés par hybridation de fibres de verre et de fibres naturelles (lin, chanvre), mis en forme par fabrication additive par extrusion de granulés (GEAM) pour des applications structurales en micro-turbines hydrauliques. Le programme associe : (1) l'optimisation des paramètres GEAM sur des pièces de grande dimension, (2) la caractérisation multi-physique des matériaux imprimés (mécanique, thermique, microstructure), (3) l'étude du comportement hydrothermique en conditions hydrauliques immergées, et (4) une étude de recyclabilité multi-cycles (broyage, re-extrusion, réimpression) dans une logique d'économie circulaire, complétée par une analyse du cycle de vie (ACV). La cotutelle valorise la complémentarité entre les équipements GEAM grande pièce du LTI-UPJV, l'expertise libanaise en matériaux, et le contexte applicatif au Liban (énergie hydraulique décentralisée).

3. **Sujet** : Voir description détaillée ci-dessous (sections a à f).

#### **a. Description du sujet (contexte scientifique, description du problème, Objectifs, ....) :**

##### **1. Contexte et enjeux**

Les micro-turbines hydrauliques intégrées aux réseaux de distribution d'eau représentent une solution prometteuse pour la production d'énergie décentralisée, avec un intérêt stratégique particulier pour le Liban, confronté à des coupures d'électricité chroniques. Les composants structuraux de ces turbines (pales, boîtiers) sont soumis à des conditions exigeantes : immersion permanente, sollicitations mécaniques cycliques et gradients de pression et de température. Les composites à matrice polymère constituent une alternative compétitive aux alliages métalliques. Parmi les matrices disponibles, le polyamide 6.10 (PA6.10) se distingue par son caractère biosourcé à 63 % (issu de l'huile de ricin), thermoplastique et donc recyclable, et ses propriétés

mécaniques remarquables (module  $\sim 3\text{--}4$  GPa, bonne résistance en fatigue). L'hybridation de fibres de verre et de fibres naturelles (lin, chanvre) permet de combiner performances mécaniques et durabilité environnementale. La fabrication additive par extrusion de granulés (GEAM – Granular Extrusion Additive Manufacturing) traite directement des granulés thermoplastiques via une vis d'extrusion, permettant des pièces de grande dimension compatibles avec le recyclage. Le LTI-UPJV dispose d'une expertise reconnue dans ce procédé pour des structures hydrauliques.

## 2. Verrous scientifiques

Trois verrous majeurs subsistent dans la littérature : (i) le comportement rhéologique des granulés PA6.10 hybrides en GEAM grande pièce et son influence sur la microstructure, la porosité inter-cordons et l'anisotropie mécanique sont non documentés – les études publiées se limitent à des matrices PP ou PLA sur de petites pièces ; (ii) la durabilité hydrothermique spécifique de ces composites hybrides GEAM (architecture en cordons générant des interfaces multiples potentiellement fragilisantes en milieu humide) n'a jamais été étudiée ; (iii) la recyclabilité multi-cycles du PA6.10 hybride imprimé et ses mécanismes spécifiques de dégradation (rupture de chaînes, raccourcissement des fibres) ne sont pas caractérisés.

## 3. Objectifs

L'objectif général est de développer et d'optimiser des composites hybrides PA6.10 / fibres de verre / fibres naturelles pour la fabrication GEAM de grandes pièces structurales de micro-turbines hydrauliques, en visant un compromis optimal entre performances mécaniques, durabilité hydraulique et recyclabilité en économie circulaire.

Quatre questions structurantes guident le projet : (i) Comment optimiser les paramètres GEAM pour minimiser la porosité inter-cordons et maximiser l'adhésion entre couches ? (ii) Quel est l'effet du taux d'hybridation verre / naturel sur les propriétés des composites imprimés ? (iii) Comment ces composites se comportent-ils en service hydraulique (absorption d'eau, vieillissement couplé, fatigue en milieu humide) ? (iv) Quelle est leur recyclabilité effective et quel est leur bilan environnemental global par rapport aux solutions conventionnelles ?

### b. Approche méthodologique :

La démarche est structurée en cinq axes complémentaires conduits en parallèle sur 36 mois, valorisant la complémentarité entre le LTI-UPJV (fabrication GEAM grande pièce,

caractérisation) et l'Université Libanaise (expertise matériaux composites, contexte applicatif hydraulique). Axe 1 – Optimisation du procédé GEAM grande pièce : Caractérisation rhéologique complète des granulés PA6.10 hybrides (rhéométrie capillaire), puis plan d'expériences (DOE Box-Behnken) sur les paramètres GEAM : température de buse (190–230°C), débit d'extrusion, épaisseur de couche (1–3 mm), stratégie de dépôt. Attention particulière au retrait thermique, au warping et à la reproductibilité dimensionnelle pour les grandes pièces. Axe 2 – Formulation et caractérisation multi-physique : Variation du taux d'hybridation fibres de verre / fibres naturelles (0/100 à 100/0 en fraction massique) et évaluation de traitements de surface (NaOH, silane). Caractérisation mécanique (traction, flexion, fatigue  $R = 0,1$ , DIC, émission acoustique), viséolastique (DMA), thermique (DSC, TGA) et microstructurale (MEB,  $\mu$ CT, FTIR). Axe 3 – Comportement en environnement hydrothermique : Absorption d'eau en immersion à 23°C, 40°C et 60°C, modélisation des cinétiques (Fick, Langmuir), quantification des propriétés mécaniques résiduelles. Identification des mécanismes d'endommagement spécifiques (décohésion interfaciale, gonflement différentiel des fibres hybrides, délaminage inter-cordons) par MEB et  $\mu$ CT. Vieillesse accéléré couplé (eau + température + fatigue). Axe 4 – Recyclabilité multi-cycles et ACV : Protocole R0àR6 (broyage, re-extrusion à 230°C, réimpression GEAM) avec caractérisation complète à chaque cycle (mécanique, microstructure, DSC/FTIR). Critère de dégradation : chute > 20 % de la résistance par rapport à R0. Analyse du cycle de vie comparative (ISO 14040/14044) pour quatre scénarios matériaux. Axe 5 – Modélisation et validation applicative : Modélisation multi-échelle (micro→mésomacro) par éléments finis et modèles micromécaniques (Halpin-Tsai, Mori-Tanaka). Fabrication de démonstrateurs de pales de micro-turbines sur les équipements GEAM grande pièce du LTI-UPJV, soumis à des essais en conditions représentatives.

**c. Résultats attendus :**

Sur le plan scientifique, ce projet produira : (i) la première base de données expérimentales complète sur les composites hybrides PA6.10 / fibres de verre / fibres naturelles imprimés par GEAM (propriétés mécaniques, thermiques, hydrothermiques et de recyclabilité multi-cycles), inexistante dans la littérature ; (ii) la compréhension des mécanismes d'endommagement spécifiques à l'architecture GEAM en milieu humide (délaminage inter-cordons, gonflement

différentiel des fibres hybrides) ; (iii) les mécanismes de dégradation lors du recyclage multi-cycles du PA6.10 hybride, permettant d'établir les conditions d'un recyclage industriellement viable ; (iv) des modèles prédictifs du comportement hydrothermique et de la durée de vie des composites imprimés ; (v) un bilan ACV complet certifiant le gain environnemental de la solution biosourcée recyclable. Sur le plan industriel et sociétal : une feuille de route matériau-procédé pour la fabrication GEAM de pièces structurales hybrides recyclables ; la démonstration d'une économie circulaire viable appliquée aux composites imprimés ; des solutions directement transférables pour la production d'énergie hydraulique décentralisée au Liban. Sur le plan académique : 4 à 6 articles dans des revues internationales à comité de lecture (Composites Part A/B, Additive Manufacturing, Journal of Cleaner Production, Polymer Testing) et communications dans les congrès majeurs du domaine (European Conference on Composite Materials – ECCM, ESAFORM, ICSMA).

**d. Calendrier :**

La thèse est organisée en trois phases progressives et partiellement chevauchantes, couvrant 36 mois. Phase 1 (Mois 1–12) – Mise en place et caractérisation de référence : revue bibliographique sur les composites hybrides biosourcés, le procédé GEAM et la recyclabilité des composites thermoplastiques ; approvisionnement et caractérisation des granulés PA6.10 / fibres de verre / fibres naturelles (rhéologie, DSC, TGA) ; mise au point du protocole GEAM par DOE sur éprouvettes normalisées ; caractérisation mécanique, microstructurale et thermique du matériau vierge (R0, non vieilli). Phase 2 (Mois 10–24) – Comportement hydrothermique et recyclabilité : campagnes de vieillissement accéléré à 23°C, 40°C et 60°C ; protocole de recyclage multi-cycles (R1 à R6) ; caractérisation complète après vieillissement et par cycle ; identification des mécanismes d'endommagement (MEB,  $\mu$ CT, FTIR) ; début de la modélisation. Phase 3 (Mois 22–36) – Modélisation, ACV et validation applicative : modélisation multi-échelle et simulation du comportement en service ; ACV comparative ; fabrication et essais des démonstrateurs de pales sur les équipements GEAM grande pièce du LTI-UPJV ; rédaction du manuscrit de thèse et valorisation scientifique (publications, communications). Modalités de cotutelle : alternance semestrielle entre l'UPJV (Amiens) et l'Université Libanaise. Les phases expérimentales lourdes (GEAM, MEB,  $\mu$ CT,



Université Libanaise



DMA, fatigue) se dérouleront principalement au LTI-UPJV ; des missions courtes (1–3 mois) seront organisées selon les besoins.

e. **Mots clés :**

Composites hybrides biosourcés ; PA6.10 ; Fibres naturelles (lin, chanvre) ; GEAM ; Comportement hydrothermique ; Recyclabilité ; Économie circulaire ; ACV ; Micro-turbines hydrauliques

f. **Possibilité de financement** (Justificatif éventuel) :

Pistes envisagées : Bourse de cotutelle UPJV/Université Libanaise dans le cadre du programme bilatéral France-Liban (CNRS-L, Campus France, OIB) ;

Note : le LTI-UPJV dispose des équipements nécessaires (imprimante GEAM grand format, moyens de caractérisation complets) sans coût d'investissement supplémentaire.

**.Références bibliographiques**

[1] Wang B., “Optimization of GEAM Process for Flax Fiber Reinforced PP Composites”, *Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, 2025* —

[2] Calabrese L. et al., “Hygrothermally aged hybrid composites EP/basalt/flax: moisture diffusion kinetics and mechanical degradation”, *Composites Part B, 2022* — référence clé sur le vieillissement hydrothermique des composites hybrides.

[3] Duty C. et al., “What makes a good part? : Surveying the big area additive manufacturing (BAAM) process”, *Additive Manufacturing, 2017*