

Titre de la thèse	Amélioration et durabilité des performances mécaniques d'une solution éco-conçue par fabrication additive de grandes dimensions
-------------------	--

Ecole Doctorale	ED548
Laboratoire	MAPIEM - COSMER
Discipline	Mécanique et Matériaux
Directeur(s) de Thèse & Encadrant(s)	Y. JOLIFF (MCF – HDR CNU 60) - MAPIEM B. OSTRE (MCF CNU 60) – COSMER

Description du sujet de recherche

Contexte, originalité et pertinence par rapport à l'état de l'art :

Pour répondre à la communauté des pratiquants de sport d'eau (voile, plongée, surf...) en attente de produits favorisant une empreinte écologique, la plus neutre possible, il est urgent de proposer des alternatives aux solutions traditionnelles. C'est dans ce contexte que naît l'entreprise Wyve, avec comme objectif d'utiliser les nouvelles technologies (Impression 3D, matières recyclées...) pour lever les verrous techniques, scientifiques et répondre au défi sociétal.

Dans les faits peu d'études sont présentes dans la littérature dans ce domaine qui reste très empirique dans son innovation [Thompson 2021]. L'approche la plus usuelle étant l'utilisation de matières bio-sourcées ou recyclées [Michelena 2016] [Correia 2022] et quelques modèles numériques pour estimer l'apport des évolutions [Falk 2019]. En 2021, dans le cadre de l'accueil au laboratoire MAPIEM d'une stagiaire de SeaTech (ingénieur 2^{nde} année), un travail préliminaire a été initié avec l'entreprise Wyve sur l'étude de la performance d'un surf imprimé sur la base d'une structure cellulaire innovante (Figure 1). Une campagne de caractérisation mécanique (essais de traction et pelage) de différents échantillons a permis d'identifier les propriétés du PLA, le PLA expansé et le PETG chargé en carbone (élaborés par l'industriel et à l'école) à l'échelle d'une éprouvette. Ces données ont permis d'alimenter les premiers modèles numériques sous Abaqus. Puis les cellules unitaires composant la planche ont été étudiées, jusqu'au squelette complet. Les essais de pelage ont permis d'observer la résistance du matériau aux jointures des formes hexagonales et des essais de flexion sur les cellules unitaires ont mis en évidence les endroits les plus fragiles. Les mécanismes d'endommagement des cellules ont été étudiés en détail. Les modèles numériques développés en parallèle ont complété cette analyse et conforté les résultats expérimentaux.

Enfin, le comportement du squelette complet a été relevé par la méthode de photogrammétrie lors d'essais de flexion et de torsion. Tous ces essais ont été modélisés et validés par modélisation numérique également. De manière générale, les résultats obtenus de manières expérimentales par corrélation d'images rejoignent les valeurs obtenues par modèle numérique.

Ce projet a permis de mettre en place une approche multi-échelle allant de l'éprouvette de caractérisation au produit final en passant par une échelle intermédiaire de la cellule. Chaque échelle apporte son lot d'informations

permettant une identification des phénomènes mis en jeu et aussi de leurs synergies ou pas (Figure 2). Ce projet a validé plusieurs méthodologies permettant de comprendre les phénomènes, d'un point de vue statique dans cette première approche, et de fiabiliser les outils numériques et expérimentaux avec des résultats en bon accord. L'apport de la structure cellulaire est prometteuse pour obtenir des performances élevées tout en intégrant une démarche responsable et vertueuse pour l'empreinte carbone du produit comparé à l'existant



Figure 1 : Surf de l'entreprise WYVE / cellule élémentaire du squelette (imprimée à l'école)

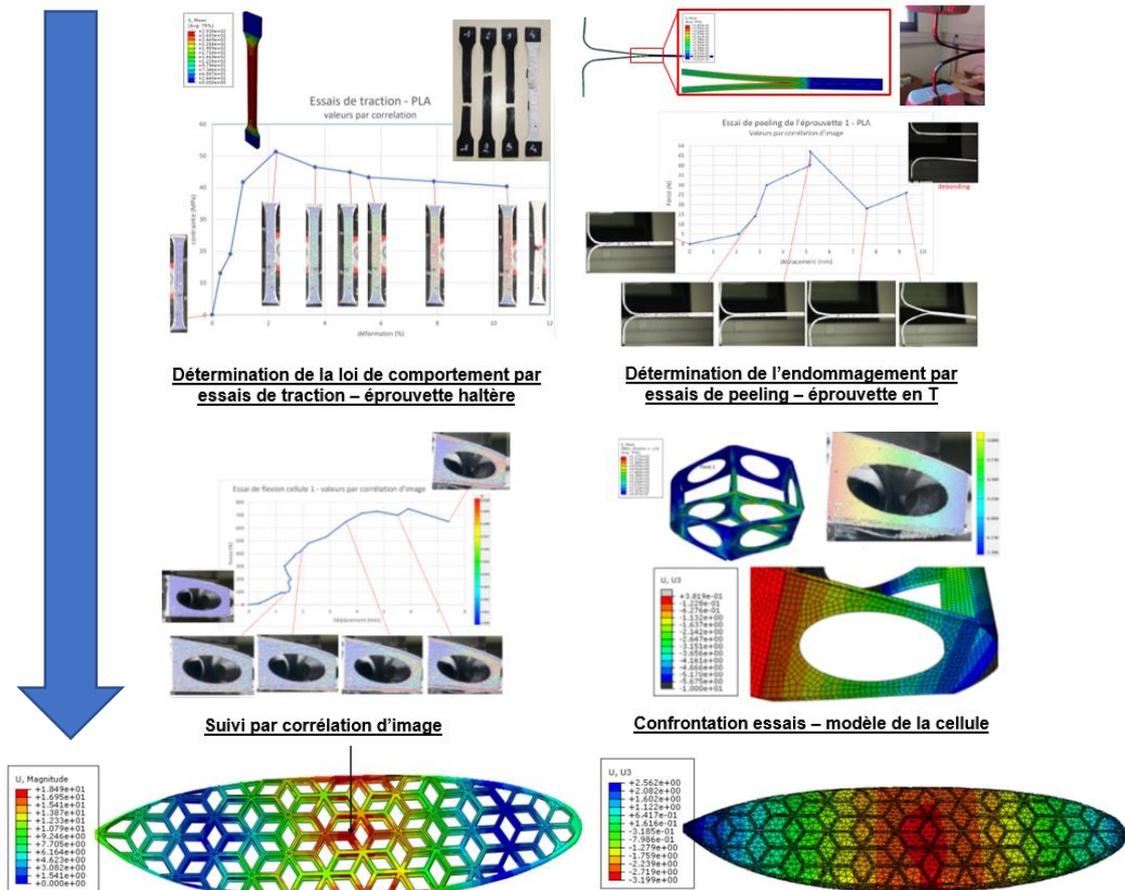


Figure 2 : Approche multi-échelle validée par cette étude

Objectifs :

C'est fort de ces premiers travaux, en cours de publication, que se place cette demande de contrat doctoral avec plusieurs objectifs :

1. Améliorer la connaissance du comportement mécanique des matériaux bio-sourcés, recyclables, recyclés pouvant être utilisés dans le procédé d'impression 3D tant à l'état initial que vieilli (vieillessement physico-chimique et mécanique).

2. Améliorer la qualité et la reproductibilité des structures complexes élaborées par impression 3D sur la base d'études paramétrique et de caractérisations expérimentales en laboratoire, puis en environnement marin.
3. Identifier de nouvelles géométries optimisées pour un critère poids/performance/durabilité en s'appuyant sur les outils numériques à différentes échelles

Méthodes :

1. Approche laboratoire basée sur les matériaux, la structure et le procédé d'impression 3D

Tout d'abord, des essais complémentaires de caractérisation mécanique devront être menés sur le PLA expansé mis en œuvre par WYVE (considéré comme référence pour ce projet). D'autres matériaux sont envisagés dans une optique de benchmark des alternatives existantes en impression 3D (polymères avec des fibres ou des charges). De plus, les essais de pelage seront approfondis car à ce jour ces essais ne sont pas normalisés pour l'impression 3D et des précautions sont à prendre quant aux valeurs obtenues. L'idée est, à l'issue de ces caractérisations, qu'une cellule optimisée pourrait être identifiée.

Afin de définir l'environnement du système, il est proposé dans une seconde partie de mesurer, lors des différentes phases de chargement mécanique, l'influence des conditions aux limites et des matériaux sur le squelette hexagonal. Cette étude devra être menée sur un banc/bassin de mesures dédié et une structure instrumentée afin de proposer une optimisation structurelle.

En parallèle de ces travaux, une étude spécifique sera conduite pour identifier par corrélation d'images les déplacements et les déformations de l'ensemble de la structure. Cette analyse permettra ainsi de déterminer les contraintes mises en jeu lors des sollicitations. A l'issue de cette phase de test, les conditions aux limites appliquées au système seront définies et permettront alors de renseigner les modèles numériques d'optimisation avancée pour identifier la performance mécanique de différents designs de squelette simulés.

Une étude paramétrique sera mise en place afin d'identifier pour chaque matériaux retenu l'impact des paramètres du procédé d'impression 3D sur les propriétés finales des pièces à l'état initial et en service.

2. Validation industrielle – prototype optimisé

Sur la base de la phase 1 et des conclusions, des prototypes dits « optimisés » seront fabriqués par l'entreprise Wyve afin de les faire tester dans le cadre du laboratoire et par des professionnelles. Pour cela un banc d'essai spécifique sera développé au laboratoire pour définir les cas de chargement permettant de discriminer la performance mécanique des différentes conceptions.

Enfin, pour confirmer la performance des solutions proposées, il est envisagé de faire tester les produits par des jeunes surfeur de la FFS pour disposer d'un panel de mesure permettant de confirmer la performance du binôme surfeur/planche sur des vagues modèles en piscine (accès fourni par l'entreprise et la FFS). Pour cela la pose de capteur EMG waterproof (type COMETA) permettra de mesurer l'influence des évolutions et améliorations sur les muscles des pratiquants. Des premiers résultats encourageant ont été mis en évidence lors du projet précédent, validant ainsi la méthodologie. Ce qui permettra de confronter l'expérience en laboratoire au comportement in-situ. Une méthode de dépouillement spécifique des dépenses énergétiques et des efforts fournis par le sportif sera développée et fiabilisée pour une valorisation directe en entreprise (par analogie avec les approches proposées dans le monde du running par exemple).

Retombées attendues :

A l'issu de ces travaux, les résultats attendus sont multiples et dépasse le cadre simple du surf :

- ✓ -Une **base données matériaux imprimables** et de leur tenues mécanique dans le temps pour des applications en milieu marin et humide. Les perspectives de **développement de nouveaux matériaux imprimables** sur la base de déchets, de végétal ... pour des applications de structures.

- ✓ -Une base de données des **paramètres influant** sur la qualité des productions **par impression 3D d'objets de grandes dimensions**. Un outil d'aide aux réglages des paramètres à destination des utilisateurs est envisagé
- ✓ -Un **banc de mesure** fiabilisé permettant l'instrumentation d'une planche et la mesure des déplacements du système complet (en interne et en externe) – (un dépôt de brevet pourrait être envisagé).
- ✓ -Une **méthodologie d'analyse posturale** réalisable par un non-professionnel de santé (à l'image de ce qui se développe pour le matériel de course à pied) afin de proposer un outil d'aide à l'analyse posturale. Ce dispositif permettra d'identifier les besoins/pathologies du pratiquant (compétiteur ou amateur) et également d'apporter à la FFS un outils scientifique pour améliorer l'adéquation entre le pratiquant et la planche (et donc améliorer la performance globale du binôme)
- ✓ -La proposition d'un système de planche **personnalisable aux spécificités du sportif** (qu'il soit compétiteur ou non) ainsi qu'un outil d'aide à la décision concernant le design et le dimensionnement des planches.
- ✓ -Les **limites de l'adaptation** seront également énoncées pour permettre des travaux futurs tant en matériaux, en conception qu'en interaction homme/machine.

Ces travaux seront valorisés par la publication d'articles scientifiques et de communications dans les congrès nationaux et internationaux. La force de ce sujet est qu'il pourra s'adresser autant à des revues de mécanique, matériaux, bio-mécanique ou de fabrication additive.

Mots clés : Matériaux composites, Durabilité, Fabrication additive, Optimisation

Références :

[Correia 2022] J.M.D. Correia et al., Expanded (Black) Cork for the Development of an Eco-Friendly Surfboard: Environmental Impact and Mechanical Properties, Sustainability 14 (2022), 668

[Falk 2019] S. Falk et al., Computational hydrodynamics of a typical 3-fin surfboard setup , Journal of Fluids and Structures 90 (2019) 297–314

[Michelena 2016] A.H. Michelena et al., Eco-friendly Flax Fibre/Epoxy Resin/Composite System for Surfboard Production. In: Figueiro R., Rana S. (eds) Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications. RILEM Book series, vol 12. Springer, Dordrecht.

[Thompson 2021] K. Thompson, Innovations in surfboard manufacturing technologies from COBRA International, Reinforced Plastics 65 (2021) 87-93

Encadrement et conditions matérielles pour le doctorant

La thèse se déroulera au sein des laboratoires MAPIEM et COSMER de l'école d'Ingénieur SeaTech de l'Université de Toulon. Des travaux pourront être réalisés à Anglet (64) pour la partie impression d'objet de grandes dimensions. Le doctorat aura accès aux moyens matériels présents à SeaTech pour la bonne réalisation de son travail de recherche. Il disposera d'un bureau et d'un ordinateur portable pour la durée de sa thèse.

Compétences attendues et personnes à contacter

Compétences attendues :

Le (la) candidat(e) est titulaire d'un master ou un titre d'ingénieur dans les domaines de la mécanique du solide et/ou des matériaux. Un gout pour l'expérimental et la modélisation numérique est indispensable pour la conduite du sujet de recherche. Une première expérience dans le domaine de la fabrication additive serait un plus.

Personne(s) à contacter : Y. JOLIFF (yoann.joliff@univ-tln.fr) et B. OSTRE (benjamin.ostre@univ-tln.fr)