

Sujet	Ingénierie de stent instrumenté réalisée par impression 3D en stéréolithographie
Direction de thèse	Georgios Stamoulis, Maître de Conférences HdR, IRDL Christian Brosseau, Professeur des Universités, Lab-STICC
Co-encadrement	Victor Popineau, Maître de Conférences, IRDL Jérémy Thoraval, Ingénieur d'Etudes, Lab-STICC
Environnement collaboratif	Collaboration des 2 UMR CNRS Lab-STICC et IRDL Collaboration CHU et son centre d'innovation W.INN
Financement 1 (50%)	50% CDE ED SPI
Financement 2 (50%)	50% CDE ED S3M
Mots-clés	Caractérisation Mécanique, Impression 3D, MEMS, Méta-structure, Modélisation Numérique, Optimisation, Polymère, Stent

Description du sujet

L'athérosclérose est une maladie due à l'accumulation progressive d'un noyau lipidique et de débris cellulaires au sein de la paroi artérielle, formant une plaque d'athérome. Ce processus inflammatoire mène à une sténose limitant l'apport en oxygène aux tissus, ou à une rupture de plaque déclenchant un événement thrombotique aigu. Afin de rétablir une hémodynamique normale, la restauration du flux sanguin repose historiquement sur l'angioplastie. Le principe consiste dans l'introduction d'un cathéter à ballonnet qui écrase la plaque pour élargir l'artère. Cependant, l'angioplastie seule présente des limites : l'artère subit souvent un recul élastique immédiat ou une resténose cicatricielle à moyen terme. Pour pallier ces échecs mécaniques, l'implantation d'un stent est devenue la norme.

Le stent est une prothèse tubulaire maillée, généralement métallique ou polymère biodégradable. Son épaisseur varie de 60 à 80 μm pour le métal, contre 120 à 170 μm pour les polymères biodégradables. Sa longueur varie de 10 à 30 mm pour les artères coronaires et peut atteindre 80 mm pour les artères périphériques. Son diamètre, quant à lui, s'échelonne de 1 à 5 mm pour le réseau coronaire et peut atteindre 12 mm en périphérie. Sertie sur le ballonnet du cathéter, la prothèse est déployée contre la paroi artérielle lors de l'inflation du ballonnet et y demeure apposée. Son rôle est de maintenir le diamètre de la lumière artérielle et de stabiliser la plaque d'athérome. Pour limiter la prolifération cellulaire responsable de la resténose, les stents sont souvent dotés d'un revêtement polymère actif libérant un médicament de manière contrôlée. Malgré ces avancées, les géométries actuelles imposent un compromis complexe entre propriétés mécaniques (flexibilité, force radiale, durabilité), conformabilité et biocompatibilité. La transition vers des matériaux polymères biocompatibles accentue ces défis structurels. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette thèse, visant à explorer de nouvelles architectures basées sur des méta-structures polymères pour optimiser le comportement vasculaire des artères coronaires.

Dans cette étude, les stents seront produits par fabrication additive (stéréolithographie). Dans la première phase, la résine polymère sera sélectionnée, puis les protocoles d'impression et de fabrication seront validés. À cette fin, plusieurs types de résines seront testés sous forme d'éprouvettes de type dogbone. Celles-ci seront fabriquées selon différents angles d'impression (de 0° à 90°) [1] en faisant varier les paramètres du procédé (température de la résine, épaisseur de couche), ainsi que les étapes de nettoyage et de post-traitement (durée et température de l'insolation UV). L'objectif est de réaliser sur ces éprouvettes des essais de traction quasi-

statique (monotones et cycles charge-décharge) et d'examiner leur réponse temporelle (essais de relaxation, fluage et/ou fatigue). Les résultats permettront d'identifier les paramètres élastiques (module de Young et coefficient de Poisson) et d'estimer l'anisotropie induite par l'orientation d'impression. Un modèle de comportement capable de décrire la réponse du matériau sous une large gamme de sollicitations sera proposé. Les choix du protocole final et du matériau reposeront sur la répétabilité des mesures et l'optimisation des performances mécaniques. Dans un second temps, l'étude portera sur la caractérisation de structures tubulaires minces qui représentent une étape cruciale au regard de l'application envisagée. Ainsi, plusieurs éprouvettes présentant différentes épaisseurs, longueurs et diamètres seront testées en compression (radiale et longitudinale), ainsi qu'en torsion. Ces essais seront réalisés en conditions quasi-statiques et en fatigue sur un grand nombre de cycles. Les résultats permettront d'enrichir le modèle de comportement établi lors de la première phase et de mesurer des grandeurs mécaniques supplémentaires telles que la rigidité en compression, le flambement et la résistance en torsion. Enfin, les essais de fatigue permettront de tracer les courbes de Wöhler afin de définir un critère de rupture. Cette caractérisation est impérative pour prévoir la durée de vie du stent, celui-ci étant soumis à des millions de cycles liés aux battements cardiaques.

Les résultats de cette campagne de caractérisation de la première phase de la thèse constitueront le socle de l'optimisation de la géométrie du stent. La deuxième phase s'articulera autour de l'étude numérique par éléments finis et de sa validation par un ensemble d'essais mécaniques. L'objectif sera d'évaluer l'impact des paramètres géométriques des cellules unitaires (taille, longueur, épaisseur), de leur densité (longitudinale et circonférentielle), ainsi que de leur agencement au sein de la structure finale. Cette démarche est cruciale, car l'épaisseur importante des stents polymères actuels perturbe l'écoulement sanguin, augmentant ainsi le risque de thrombose [2]. Le concept de méta-structure vise à relever ce défi via l'optimisation topologique des mailles. Cette conception doit concilier plusieurs impératifs mécaniques : i) le maintien d'une force radiale suffisante pour assurer l'ouverture du canal sanguin, ii) la résistance à la torsion et iii) la tenue en fatigue. Par ailleurs, la prédictibilité de l'expansion de la méta-structure lors du déploiement sera étudiée, ainsi que le retour élastique (recoil) radial et longitudinal, afin de prévenir toute lésion artérielle locale. Un aspect fondamental de l'étude portera également sur la flexibilité du dispositif : le stent doit pouvoir se positionner dans des artères coronaires souvent de géométrie compliquée, sans causer de traumatismes vasculaires. À cet égard, le choix de la résine polymère et la géométrie des mailles seront déterminants et seront optimisés par simulation numérique. Celles-ci seront validées par des essais mécaniques (compression, fatigue, torsion) sur des prototypes optimisés, produits par impression 3D. Une collaboration avec des cardiologues du CHU de Brest permettra de garantir une démarche réaliste en termes de stent pour des applications cliniques. Parallèlement, l'étude intègre une dimension multiphysique dédiée à la simulation de l'ensemble stent + paroi endothéliale interne. Cette approche requiert des compétences en fluide et mécanique des milieux continus.

Dans la troisième phase, l'intégration d'une antenne et de capteurs MEMS permettra de documenter les anomalies mécaniques et de transmettre ces données en temps réel. L'enjeu est triple : garantir un compromis optimal entre biocompatibilité, conformabilité et résistance mécanique, tout en offrant, grâce à la connectivité, une médecine personnalisée qui renforce l'autonomie du patient.

Présentation des moyens

Les différents équipements expérimentaux et de modélisation sont disponibles au sein de deux unités porteuses du sujet, l'IRDL UMR CNRS 6027 et le Lab-STICC UMR CNRS 6285. La direction de thèse est assurée par un maître de conférences HDR et un professeur d'université (chacun associé à une des 2 UMR). L'encadrement de la thèse associe également un maître de conférences récemment recruté, un ingénieur d'étude et un technicien.

Profil recherché

La personne candidate doit être titulaire d'un diplôme ingénieur ou d'un Master Recherche ou équivalent dans une filière de Mécanique. Elle devra posséder de bonnes compétences en caractérisation expérimentale des matériaux (essais mécaniques, corrélation d'images, MEB). Des compétences dans le domaine de la fabrication additive, de la simulation numérique par éléments finis et de la biomécanique seront grandement appréciées.

Pour candidater

Pour candidater, envoyer CV et lettre de motivation aux adresses ci-dessous :

- Dr. Georgios Stamoulis (MdC, HDR), e-mail: georgios.stamoulis@univ-brest.fr
- Pr. Christian Brosseau, e-mail: christian.brosseau@univ-brest.fr
- Dr. Victor Popineau (MdC), e-mail : victor.popineau@univ-brest.fr

Références

- [1] Z. Rui, X. Yang, L. Shiyi, H. Ping, H. Wenbin, H. Qingyuan et S. Chunlai, Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material, *Composites Part B*, vol. 99, 506, 2016.
- [2] C. Brosseau, G. Nocchiero et J. Ville, The future of 3D printing in instrumented implantable polymer meta-stents, *Annals of 3D Printed Medicine*, vol. 19, 100211, 2025.

Subject	Instrumented stent engineering produced by stereolithography 3D printing
Thesis Director(s)	Georgios Stamoulis, Associate Professor HdR, IRDL Christian Brosseau, Full Professor, Lab-STICC
Supervisor(s)	Victor Popineau, Associate Professor, IRDL Jérémy Thoraval, Research Engineer, Lab-STICC
Collaborative Environment	Collaboration between 2 UMR CNRS Lab-STICC et IRDL Collaboration with CHU and its innovation centre W.INN
Funding 1(50%)	50% CDE ED SPI
Funding 2 (50%)	50% CDE ED S3M
Keywords	3D Printing, Mechanical Characterization, MEMS, Meta-structure, Numerical Modelling, Optimisation, Polymers, Stent

Subject description

Atherosclerosis is a disease characterized by the progressive accumulation of a lipid core and cellular debris within the arterial wall, resulting in the formation of an atheromatous plaque. This inflammatory process leads to stenosis, limiting oxygen supply to tissues, or to plaque rupture, triggering an acute thrombotic event. To restore normal hemodynamics, blood flow has historically relied on angioplasty. This procedure involves introducing a balloon catheter that inflates to crush the plaque and widen the artery. However, angioplasty alone has limitations: the artery often undergoes immediate elastic recoil or medium-term cicatricial restenosis. To overcome these mechanical failures, stent implantation has become the standard of care.

A stent is a mesh tubular prosthesis, generally made of metal or biodegradable polymer. Its thickness varies from 60 to 80 μm for metal, compared to 120 to 170 μm for biodegradable polymers. Its length ranges from 10 to 30 mm for coronary arteries and can reach 80 mm for peripheral arteries. Its diameter ranges from 1 to 5 mm for the coronary network and up to 12 mm in the periphery. Crimped onto the catheter balloon, the prosthesis is deployed against the arterial wall during balloon inflation and remains fixed there. Its role is to maintain the diameter of the arterial lumen and stabilize the atheromatous plaque. To limit the cellular proliferation responsible for restenosis, stents are often equipped with an active polymer coating that releases a drug in a controlled manner. Despite these advances, current geometries require a complex compromise between mechanical properties (flexibility, radial strength, durability), conformability, and biocompatibility. The transition to biocompatible polymer materials accentuates these structural challenges. Based on these facts, this thesis aims to explore new architectures based on polymer meta-structures to optimize the vascular behaviour of coronary arteries.

In this study, stents will be produced by additive manufacturing (stereolithography). In the first phase, the polymer resin will be selected, followed by the validation of printing and manufacturing protocols. To this end, several types of resins will be tested using dogbone-type specimens. These will be manufactured at different printing angles (from 0° to 90°) [1] by varying process parameters (resin temperature, layer thickness), as well as cleaning and post-treatment steps (UV exposure duration and temperature). The objective is to perform quasi-static tensile tests (monotonic and loading-unloading cycles) on these specimens and examine their time-dependent response (relaxation, creep, and/or fatigue tests). The results will allow for the identification of elastic parameters (Young's modulus and Poisson's ratio) and the estimation of the anisotropy induced by the printing orientation. A constitutive model capable

of describing the material response under a wide range of loads will be proposed. The choice of the final protocol and material will be based on measurement repeatability and optimization of mechanical performance. In a second step, the study will focus on the characterization of thin tubular structures, which represent a crucial step regarding the intended application. Thus, several specimens with different thicknesses, lengths, and diameters will be tested in compression (radial and longitudinal), as well as in torsion. These tests will be carried out under quasi-static and high-cycle fatigue conditions. The results will enrich the constitutive model established in the first phase and measure additional mechanical quantities such as compressive stiffness, buckling, and torsional strength. Finally, fatigue tests will be used to plot Wöhler curves to define a failure criterion. This characterization is imperative to predict the stent's lifespan, as it is subjected to millions of cycles due to heartbeats.

The results of the characterization campaign of the first phase will form the foundation for optimizing the stent geometry, which will be realized during the second phase of the project. This second phase will revolve around a finite element numerical study and its validation through mechanical testing. The objective will be to evaluate the impact of the unit cells' geometric parameters (size, length, thickness), their density (longitudinal and circumferential), and their arrangement within the final structure. This approach is crucial because the significant thickness of current polymer stents disrupts blood flow, thereby increasing the risk of thrombosis. The meta-structure concept aims to meet this challenge through topological mesh optimization. This design must reconcile several mechanical imperatives: i) maintaining sufficient radial force to ensure blood canal patency, ii) resistance to torsion, and iii) fatigue strength. Furthermore, the predictability of the meta-structure's expansion during deployment will be studied, along with radial and longitudinal elastic recoil, to prevent any local arterial injury. A fundamental aspect of the study will also address the device's flexibility: the stent must be able to navigate coronary arteries that often have complex geometries without causing vascular trauma. In this regard, the choice of polymer resin and mesh geometry will be decisive and optimized through numerical simulation. These will be validated by mechanical tests (compression, fatigue, torsion) on optimized prototypes produced by 3D printing. A collaboration with cardiologists from the Brest University Hospital (CHU de Brest) will ensure a realistic approach for clinical applications. In parallel, the study integrates a multiphysics dimension dedicated to the simulation of the stent-internal endothelial wall assembly. This approach requires expertise in fluidics and continuum mechanics.

In the third phase, the integration of an antenna and MEMS sensors will allow for the documentation of mechanical anomalies and the transmission of this data in real-time. The challenge is threefold: to guarantee an optimal compromise between biocompatibility, conformability, and mechanical strength, while offering, through connectivity, personalized medicine that enhances patient autonomy.

Research facilities and resources

The various experimental and modelling equipment are available within the two units hosting the work, IRDL UMR CNRS 6027 and Lab-STICC UMR CNRS 6285. The thesis is supervised by an Associate Professor (HDR) and a University Professor (each associated with one of the two UMRs). The supervision team also includes a recently recruited Associate Professor, a research engineer, and a technician.

Candidate Profile

The candidate must hold an engineering degree or a Master of Research, or an equivalent degree in Mechanics. They should have strong skills in experimental material characterization (mechanical testing, image correlation, SEM). Skills in additive manufacturing, finite element numerical simulation, and biomechanics will be highly appreciated.

To apply

Send CV and cover letter to:

- Dr. Georgios Stamoulis (MdC, HDR), e-mail: georgios.stamoulis@univ-brest.fr
- Pr. Christian Brosseau, e-mail: christian.brosseau@univ-brest.fr
- Dr. Victor Popineau (MdC), e-mail : victor.popineau@univ-best.fr

References

- [1] Z. Rui, X. Yang, L. Shiyi, H. Ping, H. Wenbin, H. Qingyuan et S. Chunlai, Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material, *Composites Part B*, vol. 99, 506, 2016.
- [2] C. Brosseau, G. Nocchiero et J. Ville, The future of 3D printing in instrumented implantable polymer meta-stents, *Annals of 3D Printed Medicine*, vol. 19, 100211, 2025.