

Sujet de Thèse

Amélioration des surfaces de prothèses métalliques de nouvelle génération par grenailage ultrasonique

Mots clés : microstructures, alliage de titane, acier inox 316L, hyper-déformation, SMAT, traitement chimio-mécanique, surface, prothèse médicale

Contexte et Problématique

L'intérêt principal du projet Icarus Fall concerne les problèmes de vieillissement de la population et les surcoûts liés aux infections post-opératoires lors de la pose de prothèse. Les infections du site opératoire en chirurgie traumatologique sont peu fréquentes (1-2 % pour la chirurgie programmée) mais pourvoyeuses de complications sévères (nécrose osseuse, infection généralisée...) dans 33 % des cas en moyenne et un taux de mortalité de près de 5 %. Ces problématiques représentent des coûts économiques très importants qui atteindront, aux Etats-Unis, près de deux milliards de dollars d'ici 2030. La recherche de nouvelles technologies permettant de palier à ces infections est donc primordiale. En France, bien que la Haute Autorité de Santé n'avance aucun chiffre dans son rapport, la chute du taux d'infection ostéoarticulaires périprothétiques sous le seuil des 0,5 % induirait un gain financier considérable pour l'Etat et pour les assurances, se chiffrant en millions d'euros par an.

Dans certaines prothèses, (I) une enveloppe métallique plus ou moins fine vient englober l'extérieur de la prothèse et sert de frontière infranchissable entre les tissus vivants et les lattices afin de pouvoir facilement réaliser son remplacement chirurgical en cas de besoin. À l'opposé, (II) d'autres prothèses vont volontairement conserver la structure poreuse au contact du tissu afin de favoriser l'ostéointégration. Dans les deux cas, les lattices permettent de proposer des modules apparents d'élasticité contrôlés en fonction de la densité et du motif. L'objectif étant d'adapter le module d'élasticité de l'implant à celui de l'os afin de diminuer le « stress shielding ».

Dans le premier cas (lattices avec enveloppe), les enveloppes constituent la partie fragile car leur finesse permet la propagation rapide des fissures de fatigue, sièges d'infection en site osseux. Il existe un traitement de surface permettant de retarder la fissuration appelé SMAT (Severe Mechanical Attrition Treatment) et qui consiste à grenailer la surface d'une pièce placée dans une chambre fermée. Cette chambre est posée sur une sonotrode mettant en mouvement les billes par vibrations ultrasoniques. Les chocs répétés à la surface vont d'une part engendrer une nano-structuration de la microstructure de surface par écrouissage sévère et d'autre part créer un gradient de contraintes de compression en sous-surface. Le couplage de ces deux aspects permet d'augmenter la résistance en fatigue en empêchant l'amorce et la propagation des fissures. Les premiers résultats de la thèse de Tania Sola Saiz montrent qu'il est possible de grenailer des couches minces de 0,4 mm d'épaisseur sans les endommager, ce qui permet d'alléger les prothèses tout en augmentant leur résistance. Les

essais de flexion rotative ont également montré une augmentation importante de la tenue en fatigue (jusqu'à 400 % dans certains cas). Le consortium du présent projet a également montré, via le projet Resem HypOs, que le SMAT permet de s'affranchir d'un usinage de finition sur les pièces à géométrie complexe en diminuant la rugosité de surface et en supprimant les défauts (poudres infondues, bourrelets...). Néanmoins, les impacts répétés entraînent une pollution croisée entre les billes et la surface. Ainsi, après SMAT, la surface peut présenter une chimie modifiée, nocive pour la biocompatibilité et/ou propice au développement de biofilms bactériens. Une pollution contrôlée permettrait d'augmenter la bio-intégration, d'augmenter le caractère antibactérien et de favoriser ultérieurement la cinétique et la qualité d'un dépôt de nanoparticules de ZnO.

Objectifs

Le présent projet de thèse propose d'étudier les modifications de surface induites par grenailage ultrasonique sur des prothèses médicales métalliques élaborées par fabrication additive. Dans un premier temps, des échantillons massifs, découpés dans des plaques en alliage de titane TA6V et en acier 316L seront utilisés afin de préétablir une gamme optimale de paramètres (nature/taille/quantité de billes, durée de traitement...) avant de procéder, dans un second temps, à des essais sur des échantillons lattice avec enveloppe provenant de fabrication additive.

D'autre part, il s'agira d'améliorer la chambre de SMAT actuellement disponible au LEM3 afin de permettre des essais de modification contrôlée de chimie de surface à l'aide de métal d'apport (Cu, Zn...) sous diverses formes (paillette, poudre, clinquant...). Les modifications métallurgiques de sous-surface induites par la nouvelle chimie (phases, microstructures, texture, intermétalliques...) de même que la résistance en fatigue seront explorées. Les échantillons seront ensuite envoyés au LCPME pour des essais de dépôt de nanoparticules de ZnO et de corrosion.

L'évaluation des gammes de paramètres se fera par l'étude des gradients de microstructure, des modifications de surface et de la tenue mécanique. L'étude des gradients s'appuiera principalement sur des filiations de dureté ainsi que des techniques plus poussées d'imagerie électronique (MEB) et de diffractions (EBSD, DRX). Les modifications de chimie de surface seront étudiées par spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS) mais aussi par spectroscopie photoélectronique (XPS) donnant accès, par exemple, au taux d'oxydation. Les améliorations mécaniques attendues, notamment en termes de fatigue mécanique, seront quant à elles vérifiées par flexion rotative et/ou traction-compression.

Dans le cadre du projet ANR, les résultats obtenus par le doctorant seront corrélés à des mesures de polarisation potentiodynamique, de spectroscopie d'impédance électrochimique et de croissance de couche de ZnO (LCPME) ainsi qu'à des études biologiques (BIOS).

Profil

Le candidat devra justifier d'un diplôme universitaire (Ingénieur/Master) ouvrant l'accès à une inscription en thèse de doctorat et d'une connaissance approfondie en science des matériaux (métallurgie, mécanique) et des moyens de caractérisation associés. L'aspect multidisciplinaire du projet dans son ensemble (conception, matériaux, microstructure, mécanique, surface) nécessitera une certaine autonomie, une capacité de synthèse ainsi qu'un sens de la coordination et de la planification.

Equipe d'accueil et partenaires

Cette thèse s'inscrit dans le projet national ANR Icarus Fall impliquant la collaboration de trois laboratoires : le Laboratoire d'Etudes des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3) à Metz, le laboratoire de Chimie Physique et Microbiologie pour les Matériaux et l'Environnement (LCPME) à Nancy et le laboratoire Biomatériaux et Inflammation en site Osseux (BIOS) à Reims.

Elle se déroulera au sein du LEM3 qui est une unité mixte de recherche (UMR) rattachée à l'Université de Lorraine, au CNRS et aux Arts et Métiers. Son activité est organisée en trois départements scientifiques : (1) Mécanique des matériaux, des structures et du vivant (MMSV), (2) Ingénierie des microstructures, procédés, anisotropie, comportement (IMPACT), (3) Thermomécanique des procédés et des interactions outil-matière (TPRIOM). L'étudiant émergera dans l'axe "Développement et optimisation de procédés en lien avec les microstructures" du département IMPACT et sera amené à se déplacer dans les laboratoires partenaires au cours de sa thèse.

Salaire : 2300 € brut/mois

Date de début de thèse : 1^{er} octobre 2025

Personnes à contacter :

Laurent Weiss : laurent.weiss@univ-lorraine.fr

Marc Novelli : marc.novelli@univ-lorraine.fr

Candidature :

Les candidatures devront être envoyées par mail avant le 18 mai 2025. Le mail devra impérativement comprendre un CV, la copie des relevés de note de master (ou ingénieur) ainsi qu'une lettre de motivation en lien avec le poste.