

English summary (3996/4000 caractères) :

Total hip arthroplasty (THR) involves the complete replacement of the hip joint with a prosthetic device and is currently the only solution for numerous age-related hip pathologies. However, prostheses have a limited lifespan, typically requiring replacement after about 20 years. As life expectancy increases and the average age at first implantation decreases, the number of patients needing hip replacements continues to grow. In this context, extending the lifespan of hip prostheses poses both economic and societal challenges. The primary cause of revision surgery is aseptic loosening, often attributed to bone resorption at the bone-implant interface. This bone loss leads to implant instability and is mainly driven by stress shielding, a phenomenon resulting from stiffness discrepancies between titanium implants and bone. Inadequate stress transmission then causes bone resorption through disuse. Within the broader scientific movement toward personalized medical technologies, this research investigates the concept of mechano-biofidelic prostheses—femoral stems designed to mimic both the geometry and mechanical properties of natural bone. While the geometric aspects of this concept were previously studied by I. Brăileanu (2020), this work focuses on identifying optimal mechanical properties of implant materials tailored to individual patients. The study builds on previous work by E. Perrin (2018) and M. Coffigniez (2021) regarding bone poroelasticity modeling and the additive manufacturing of titanium scaffolds. Its central objective is to link these two approaches by developing a numerical poroelastic model of bone that integrates both healing and remodeling simulations, then comparing the predictions against results from additive manufacturing experiments. Because healing and remodeling are distinct biological processes, there is currently no numerical model that addresses both simultaneously. Consequently, two existing models were chosen from the literature and implemented in a simplified, axisymmetric finite element model of the bone-implant system through UMAT subroutines. By using an external document and a predefined field, the remodeling calculations begin where the healing calculations end, effectively coupling the two models. Both underwent rigorous validation to ensure mesh insensitivity, accurate stress evaluation, and stable asymptotic stiffness behavior over increasing cycles. Their accuracy was further assessed by comparing numerical outcomes to clinical observations in three female patients, scanned at 5 months, 4 years, and 12 years post-implantation. Early results were encouraging, with numerical predictions matching clinical stiffness distribution patterns and maximum stiffness errors of 6%, 24%, and 11%, respectively. Nonetheless, certain limitations warrant attention. The simplified geometry lacks accuracy in the femoral head region, and the remodeling models tend to overestimate stiffness, indicating sensitivity to initial conditions and possible overprediction by the intrinsic remodeling model. Future studies would benefit from incorporating preoperative imaging. Preliminary investigations into material properties centered on titanium and polymers. Controlling porosity in titanium implants can reduce stiffness mismatch, mitigate stress shielding, and promote osseointegration by facilitating vascularization and cellular colonization. A preliminary porous titanium stem was successfully produced via stereolithography, although polymeric stem fabrication was constrained by the available technology's dimensional limits. Moving forward, research should explore alternative polymer processing methods for creating stiffness gradients and evaluate robocasting technology to better control titanium scaffold porosity. Comprehensive mechanical testing, accompanied by biological evaluations, will be essential next steps.

Résumé en français (3994/4000 caractères) :

L'arthroplastie totale de la hanche (THA) est en un remplacement complet de l'articulation de la hanche par un implant. Il s'agit du seul traitement disponible pour de nombreuses pathologies de la hanche liées à l'âge. La durée de vie de la prothèse est limitée, nécessitant souvent une nouvelle intervention au bout de plusieurs années. L'augmentation de l'espérance de vie et la baisse de l'âge de première implantation contribuent à l'accroissement du nombre de patients concernés. Le prolongement de la durée de vie des prothèses de hanche constitue un enjeu à la fois économique et sociétal. La principale cause de réintervention est le descellement aseptique, caractérisé par une résorption osseuse à l'interface os-implant. Cela entraîne une instabilité de l'implant et est attribué au « bouclier de contrainte » (stress shielding), qui résulte de la différence de raideur entre le titane et l'os. Cela réduit la transmission des contraintes dans l'os et favorise la résorption osseuse liée au désusage. Dans un contexte médical plus large, où les solutions personnalisées sont privilégiées, cette thèse explore le concept de tige fémorale mécano-biofidèle, c'est-à-dire une tige imitant la géométrie et les propriétés mécaniques de l'os naturel. Alors que l'aspect géométrique a déjà été étudié par Bräileanu (2020), ce travail se concentre sur la détermination de propriétés mécaniques optimales pour adapter l'implant à chaque patient. Il s'appuie sur les travaux antérieurs de Perrin (2018) et de Coffigniez (2021), qui portaient respectivement sur une modélisation poroélastique de l'os et sur la fabrication additive de supports en titane destinés à la croissance osseuse. L'objectif principal est de créer un modèle poroélastique de l'os incluant la simulation de la cicatrisation et du remodelage, puis de confronter ses résultats à ceux obtenus par fabrication additive. La cicatrisation et le remodelage étant deux processus biologiques distincts, aucun modèle numérique ne les simule simultanément. Deux modèles issus de la littérature ont été sélectionnés et implémentés dans un modèle éléments finis simplifié, axisymétrique, du système tige-fémur à l'aide de sous-routines UMAT. Grâce à un document externe et à l'utilisation d'un `predefine field`, les calculs de remodelage reprennent au dernier pas de calcul de cicatrisation, assurant ainsi la continuité entre les deux processus. Une procédure de validation a été appliquée pour vérifier l'insensibilité au maillage, la justesse des calculs de contraintes et le comportement asymptotique de la raideur avec un nombre croissant de cycles. Pour évaluer la précision du modèle, les résultats de la simulation numérique ont été comparés à ceux de trois patientes scannées respectivement 5 mois, 4 ans et 12 ans après l'implantation. Les résultats préliminaires sont encourageants, avec une même distribution de raideur et des écarts maximaux de 6 %, 24 % et 11 %. Ils mettent en évidence certaines limites, notamment l'approximation géométrique qui réduit la précision dans la zone de la tête fémorale. La surestimation de la raideur dans le modèle de remodelage suggère une sensibilité aux conditions initiales et une possible surestimation inhérente au modèle lui-même. L'utilisation d'images préopératoires offrirait certainement des améliorations pour les futures études. Enfin, une première étude des matériaux a montré que l'introduction de porosité dans le titane permet de diminuer la raideur, de réduire l'effet de bouclier de contrainte et de favoriser la colonisation cellulaire. Un prototype poreux en titane a pu être fabriqué par stéréolithographie, tandis qu'aucune éprouvette en polymère n'a pu être produite en raison de contraintes dimensionnelles imposées par les techniques disponibles. Des recherches complémentaires sur les procédés de mise en forme des polymères seront donc nécessaires. La prochaine étape de ce travail consistera en une caractérisation mécanique et biologique de l'éprouvette en titane.

Résumé vulgarisé (966/1000 caractères):

Pour maintenir un poids et une résistance optimaux, l'organisme ajuste en permanence la microstructure osseuse. Les zones peu sollicitées sont résorbées tandis que les zones sursollicitées se renforcent. Lorsqu'on implante une prothèse de hanche, plus rigide que l'os, l'os environnant subit

moins de contraintes et se résorbe, entraînant parfois des complications et la nécessité d'une réintervention. Pour limiter ce phénomène, ce travail propose de concevoir une prothèse personnalisée, imitant le comportement mécanique de l'os d'origine. Nous avons développé une simulation numérique permettant de prédire la réaction de l'os selon le matériau, afin d'en sélectionner les propriétés mécaniques optimales. Ce matériau pourra ensuite être produit par fabrication additive, en titane ou en polymère.

Vulgarized summary (865/1000 caractères) :

To maintain an optimal balance of weight and mechanical strength, bone microstructure is constantly remodeled. In areas of disuse, bone is resorbed, while in overused regions, it is reinforced. Because a femoral stem is stiffer than natural bone, it deforms less after implantation, leading to local bone disuse and subsequent resorption. This phenomenon often causes complications and necessitates revision surgeries. To mitigate this, the present study explores the design of a tailored femoral stem that mimics the bone's mechanical behavior. A numerical simulation was developed to predict how bone adapts to different materials and to identify optimal mechanical properties. Such materials can then be manufactured additively, using titanium or polymers.