
Computational and Experimental Micromechanical Analysis of Proximal Tibia of Aging Rats

Auteur : Ska, Margaux

Promoteur(s) : Ruffoni, Davide

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil biomédical, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20870>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Computational and Experimental Micromechanical Analysis of Proximal Tibia of Aging Rats

Author: Margaux SKA

Supervisor: Davide RUFFONI

PhD student supervisor: Laura MÜLLER

The bone-cartilage interface plays an important biomechanical role by transmitting forces across the joint. This highly complex region undergoes notable structural and mechanical changes with aging, closely associated with the development of diseases such as osteoarthritis and incomplete growth plate fusion. Despite its significant clinical relevance, there is a lack of comprehensive data on how aging impacts the microarchitecture and biomechanical properties of subchondral bone. Consequently, studying the structure-mechanics relationship as well as the impact of aging on this one compared to the metaphyseal bone part is important.

This thesis investigates how age-related alterations in bone microstructure and stiffness influence the mechanical transfer in the proximal rat tibiae under load application. To this end, a computational study using micro-structural finite element analysis (micro-FE) was conducted alongside experimental analyses.

A first analysis of the impact of bone stiffness on bone mechanics demonstrates a clear impact on its overall mechanical behavior, though to a lesser extent in the subchondral region compared to the metaphyseal region. This variation in behavior between the two regions underscores the importance of examining specific sub-regions of the bone individually, rather than treating the bone as a homogeneous entity, to capture its different mechanical responses.

Further analysis of microstructural influence, in relation to aging, highlighted the importance of bone bridges in facilitating the transmission of mechanical forces throughout the bone, rather than forcing them to concentrate in the subchondral region when few bone bridges are present, as in young bones. Additionally, a significant degree of inter-sample variability was observed in the mechanical behavior of young bones, a phenomenon notably absent in older bones.

The impact of the presence or absence of a growth plate had a more pronounced effect on the mechanical behavior of young bones compared to older ones, given the higher amount of bone bridges connecting the subchondral to the metaphyseal regions in older samples. Simulating a pathological growth plate in young bones, characterized by a high value of Young's modulus, revealed deformation patterns that closely resembled those in old bones, suggesting that such changes might mimic age-related alterations in bone mechanics.

Although the computational analysis provided valuable insights into the redistribution of strains within the bone structure, it did not enable the assessment of failure loads. To address this limitation, experimental processes were developed to specifically determine failure loads in both old and young samples.

Overall, this study provides valuable insights into the relationship between bone microstructure and its underlying mechanical behavior as it ages, in the proximal tibia. It demonstrated how specific bone structures influence the mechanical properties in the subchondral trabecular, subchondral cortical, metaphyseal trabecular, and metaphyseal cortical bone regions, enhancing our understanding of how mechanical forces affect bone during the aging process and associated pathologies.

Keywords: Finite Element Methods, Mechanical Testing, Bone-Cartilage Interface, Mechanical Properties, Biomechanics, Microstructure.

Analyse Micromécanique Computationnelle et Expérimentale du Tibia Proximal de Rats en Fonction du Processus de Vieillessement

Auteur : Margaux SKA

Promoteur : Davide RUFFONI

Doctorante Superviseure : Laura MÜLLER

L'interface os-cartilage dans les articulations joue un rôle biomécanique important en transmettant les forces à travers l'articulation. Cette région très complexe subit des changements structurels et mécaniques notables avec le vieillissement, étroitement associés au développement de maladies telles que l'arthrose et la fusion incomplète de la plaque de croissance. Malgré son importance clinique, très peu de données concernant l'impact du vieillissement sur la microarchitecture et les propriétés biomécaniques de l'os sous-chondral sont recensées. Par conséquent, il est important d'étudier la relation structure-comportement mécanique ainsi que l'impact du vieillissement sur l'os sous-chondral par rapport à d'autres sites osseux.

Cette thèse étudie comment les altérations de la microstructure osseuse liées à l'âge influencent le transfert mécanique dans le tibia proximal du rat sous l'application d'une charge. À cette fin, une étude computationnelle utilisant l'analyse micro-structurale par éléments finis (micro-FE) a été menée parallèlement à des analyses expérimentales.

L'analyse des propriétés mécaniques de l'os a démontré un impact clair sur son comportement mécanique global, bien que dans une moindre mesure dans la région sous-chondrale par rapport à la région métaphysaire. Cette variation de comportement entre les deux régions souligne l'importance d'examiner individuellement des sous-régions spécifiques de l'os, plutôt que de traiter l'os comme une entité homogène, afin de saisir ses différentes réponses mécaniques.

Une analyse plus poussée de l'influence de la microstructure, en relation avec le vieillissement, a mis en évidence l'importance des ponts osseux reliant la partie sous-chondrale à la région métaphysaire afin de faciliter la transmission des forces mécaniques dans l'ensemble de l'os, plutôt que de les forcer à se concentrer dans la région sous-chondrale lorsque peu de ponts sont présents, comme dans les os jeunes. En outre, un degré significatif de variabilité inter-échantillons a été observé dans le comportement mécanique des os jeunes, un phénomène notablement absent dans les os plus âgés.

L'impact de la présence ou de l'absence d'une plaque de croissance a eu un effet plus prononcé sur le comportement mécanique des os jeunes que sur celui des os plus âgés, étant donné la plus grande quantité de ponts reliant les régions sous-chondrales aux régions métaphysaires dans les échantillons plus âgés. La simulation d'une plaque de croissance pathologique, caractérisée par un module de Young plus élevé dans des échantillons jeunes, a révélé des modèles de déformation qui ressemblaient étroitement à ceux des os âgés, ce qui suggère que de tels changements pourraient imiter les altérations de la mécanique osseuse liées à l'âge.

Bien que l'analyse computationnelle ait fourni des indications précieuses sur la redistribution des contraintes dans la structure osseuse, elle n'a pas permis d'évaluer les charges de rupture. Pour remédier à cette limitation, des processus expérimentaux ont été mis au point afin de déterminer spécifiquement les charges de rupture dans les échantillons jeunes et vieux.

Dans l'ensemble, cette étude fournit des informations précieuses concernant la relation entre la microstructure osseuse et son comportement mécanique sous-jacent au cours du vieillissement, en particulier au niveau de l'interface os-cartilage. Elle a démontré comment des structures osseuses spécifiques influencent les propriétés mécaniques dans les quatre zones définies, appelées trabéculaire sous-chondrale, corticale sous-chondrale, trabéculaire métaphysaire et corticale métaphysaire, améliorant ainsi

notre compréhension de la manière dont les forces mécaniques affectent l'os au cours du processus de vieillissement et des pathologies qui en découlent.

Mots-clés : Méthodes par Éléments Finis, Essais Mécaniques, Interface Os-Cartilage, Propriétés Mécaniques, Biomécanique, Microstructure.