

Sujet de thèse : Modélisation multi-échelle du comportement mécanique des tissus mous du disque intervertébral humain et des mécanismes de couplage associés

Etablissement : Institut catholique d'arts et métiers (Icam Lille) et Université de Lille (ULille)

Directeur de thèse : Pr. Fahmi ZAIRI (LGCgE-ULille)

Encadrant : Dr. Karim KANDIL (Icam Lille et LGCgE-ULille)

Laboratoire : Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) - ER1 : Modélisation et caractérisation multi-échelle des problèmes couplés

Descriptif du sujet

Pour une création précise de modèles numériques des disques intervertébraux, la stratégie de modélisation doit être basée sur une relation fiable et réaliste entre microstructure, morphologie et caractéristiques mécaniques intrinsèques (incluant forte non-linéarité, viscosité et anisotropie) tout en considérant l'effet régional, le couplage avec l'environnement biochimique environnant ainsi que les mécanismes de dégénérescence qu'ils soient d'origine mécanique et/ou biologique. L'objectif est de proposer in-fine des méthodologies de calcul de pointe pour une meilleure compréhension de l'effet de l'âge et de la dégénérescence sur la réponse des différents disques de la colonne vertébrale.

Ce projet de thèse repose sur le triptyque expérimentation/modélisation/simulation permettant de développer une approche de modélisation physiquement fondée, basées sur des observations expérimentales, d'en vérifier ses capacités prédictives et d'utiliser l'outil de simulation dans des configurations variées de chargements mécaniques.

Il s'agira dans un premier temps de caractériser in vitro des tissus du disque intervertébral dans des conditions variées de chargements multi-axiaux (monotones et cycliques) et d'environnement.

Le/La candidat(e) participera ensuite à la formulation d'un nouveau modèle de comportement faisant le lien direct entre la microstructure et la réponse mécanique du disque à partir d'une démarche multi-échelle formalisée dans le cadre de la mécanique des milieux continus. Le modèle tiendra compte des différents mécanismes de couplage multiphysique associés à la réponse chimio-mécano-biologique du disque.

Ce travail sera suivi de l'implantation du modèle de comportement dans un code éléments finis et de sa vérification expérimentale à différentes échelles (à l'échelle microstructurale monolamellaire, à l'échelle régionale multi-lamellaire et à l'échelle d'un disque intervertébral complet) dans des conditions variées de chargements multi-axiaux (monotones et cycliques) et d'environnement. Cette vérification multi-échelles permettra de garantir la reproduction la plus réaliste possible du comportement mécanique du disque intervertébral en lien avec sa microstructure régionale.

Phases de travail

- Phase 1 (Expérimental) : Analyse in vitro expérimentale de la réponse mécanique des tissus mous du disque intervertébral sous différents cas de chargement.

- Phase 2 (Modélisation constitutive) : Elaboration d'un modèle de comportement multiphysique et multi-échelle des tissus mous du disque intervertébral.
- Phase 3 (Simulation) : Implantation du modèle de comportement dans un code éléments finis et réalisation de modèles numériques d'échantillons et d'unités fonctionnelles de la colonne vertébrale à partir de clichés IRM de vrais patients.
- Phase 4 (Vérification de l'outil) : Comparaison numérique/expérimental et validation des capacités prédictives de l'outil de simulation.
- Phase 5 (Optimisation) : Optimisation de l'outil développé afin de pouvoir reproduire des modèles personnalisés du disque. Réalisation de cas pratiques en situation réelle pour prédire l'évolution dégénérative sur des scénarii de chargement et de dégradation type donnés.

La thèse se déroulera principalement dans les locaux du LGCgE et de l'Icam (site de Lille).

Références

- [1] K. Kandil, F. Zaïri, A. Derrouiche, T. Messenger, F. Zaïri, 2019. Interlamellar-induced time-dependent response of intervertebral disc annulus: A microstructure-based chemo-viscoelastic model, *Acta Biomaterialia* 100, P. 75-91.
- [2] A. Derrouiche, F. Zaïri, F. Zaïri, 2019. A chemo-mechanical model for osmo-inelastic effects in the annulus fibrosus, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology* 18, 1773- 1790.
- [3] K. Kandil, F. Zaïri, T. Messenger, F. Zaïri, 2020. Interlamellar matrix governs human annulus fibrosus multiaxial behavior, *Scientific Reports* 10, 19292.
- [4] F. Feki, R. Taktak, K. Kandil, A. Derrouiche, M. Moulart, N. Haddar, F. Zaïri, F. Zaïri, 2020. How osmoviscoelastic coupling affects recovery of cyclically compressed intervertebral disc, *Spine* 45, P. 1376-1385.
- [5] K. Kandil, F. Zaïri, T. Messenger, F. Zaïri, 2021. A microstructure-based model for a full lamellar-interlamellar displacement and shear strain mapping inside human intervertebral disc core, *Computers in Biology and Medicine* 135, 104629.

Expérience/profil souhaité

Le/La candidat(e) devra être titulaire d'un Master 2 ou d'un diplôme d'ingénieur en mécanique, biomécanique, science des matériaux, ou équivalent. Bonne compétence en mécanique des milieux continus et en mécanique des matériaux. Bonne maîtrise des outils de programmation (Matlab et/ou Fortran). Rigueur scientifique et qualité rédactionnelle. Bonne maîtrise de l'anglais. Une première expérience en analyse numérique et/ou expérimentale des matériaux serait un plus.

Rémunération

Type de contrat : CDD (36 mois)

Rémunération : 2632,5€ brut mensuel

Dépôt de candidature et renseignements

Envoyer CV + dernier bulletin de notes + lettre de motivation + recommandations (lettres ou références du contact) à :

Fahmi ZAÏRI – Mail : Fahmi.Zairi@polytech-lille.fr et Karim KANDIL – Mail : Karim.Kandil@icam.fr

Date limite de dépôt des candidatures : 17 mai 2023

PhD subject: Multi-scale modeling of the mechanical behavior of human intervertebral disc soft tissues and associated coupling mechanisms

Institution: Icam School of Engineering (Icam Lille) and University of Lille (ULille)

Thesis Supervisors: Prof. Fahmi ZAIRI (LGCgE-ULille) and Dr. Karim KANDIL (Icam Lille and LGCgE-ULille)

Laboratory: Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) - ER1: Multi-scale modeling and characterization of coupled problems

Description of the project

For a precise creation of numerical models of intervertebral discs, the modeling strategy must be based on a reliable and realistic relationship between microstructure, morphology, and intrinsic mechanical features (including strong non-linearity, viscosity, and anisotropy), while considering the regional effect, the coupling with the surrounding biochemical environment, and the degeneration mechanisms whether they are of mechanical and/or biological origin. The objective is to ultimately propose advanced calculation methodologies for a better understanding of the effect of age and degeneration on the response of the different discs of the vertebral column.

This thesis project is based on the experimentation/modeling/simulation triptych making it possible to develop a physically based modeling approach, based on experimental observations, to verify its predictive capacities and to use the simulation tool in various configurations of mechanical loadings.

Initially, the candidate will characterize in vitro intervertebral disc tissues under various multi-axial loading conditions (monotonic and cyclic) and environments.

The candidate will then participate in elaborating a new constitutive model that directly links the microstructure and the mechanical response of the disc based on a multi-scale approach formalized in the framework of continuum mechanics. The model will consider the different multiphysics coupling mechanisms associated with the chemo-mechano-biological response of the disc.

This work will be followed by the implementation of the constitutive model into a finite element code and its experimental verification at different scales (the monolayer microstructural scale, the regional multilayer scale, and the scale of a complete intervertebral disc) under various multi-axial loading (monotonic and cyclic) and environmental conditions. This multi-scale verification will ensure the most realistic possible reproduction of the mechanical behavior of the intervertebral disc in relation to its regional microstructure.

Work phases

Phase 1 (Experimental): In vitro experimental analysis of the mechanical response of the soft tissues of the intervertebral disc under different loading conditions.

Phase 2 (Constitutive modeling): Development of a multiphysics and multiscale constitutive model of the soft tissues of the intervertebral disc.

Phase 3 (Simulation): Implementation of the constitutive model into a finite element code and creation of numerical models of samples and functional units of the spinal column from MRI scans of real patients.

Phase 4 (Tool verification): Numerical/experimental comparison and validation of the predictive capabilities of the simulation tool.

Phase 5 (Optimization): Optimization of the developed tool in order to reproduce personalized models of the disc. Performance of practical cases in real situations to predict degenerative evolution under given loading and degradation scenarios.

The thesis will take place primarily at the LGCgE and the Icam (Lille headquarter).

References

- [1] K. Kandil, F. Zaïri, A. Derrouiche, T. Messenger, F. Zaïri, 2019. Interlamellar-induced time-dependent response of intervertebral disc annulus: A microstructure-based chemo-viscoelastic model, *Acta Biomaterialia* 100, P. 75-91.
- [2] A. Derrouiche, F. Zaïri, F. Zaïri, 2019. A chemo-mechanical model for osmo-inelastic effects in the annulus fibrosus, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology* 18, 1773- 1790.
- [3] K. Kandil, F. Zaïri, T. Messenger, F. Zaïri, 2020. Interlamellar matrix governs human annulus fibrosus multiaxial behavior, *Scientific Reports* 10, 19292.
- [4] F. Feki, R. Taktak, K. Kandil, A. Derrouiche, M. Moulart, N. Haddar, F. Zaïri, F. Zaïri, 2020. How osmoviscoelastic coupling affects recovery of cyclically compressed intervertebral disc, *Spine* 45, P. 1376-1385.
- [5] K. Kandil, F. Zaïri, T. Messenger, F. Zaïri, 2021. A microstructure-based model for a full lamellar-interlamellar displacement and shear strain mapping inside human intervertebral disc core, *Computers in Biology and Medicine* 135, 104629.

Experience/Profile Required

The candidate must hold a master's degree or an engineering degree in mechanics, biomechanics, materials science, or equivalent. Good knowledge of continuum mechanics and mechanics of materials. Good command of programming tools (Matlab and/or Fortran). Scientific rigor and excellent writing skills. Good level of English proficiency. A first experience in numerical and/or experimental analysis of materials would be appreciated.

Remuneration

Contract type: Fixed-term contract (36 months)

Salary: €2632.5 gross per month

Application and information

Please send your CV + latest transcript of records + motivation letter + recommendations (letters or contact information) to:

Fahmi ZAÏRI – Email: Fahmi.Zairi@polytech-lille.fr and Karim KANDIL – Email: Karim.Kandil@icam.fr

Application deadline: May 17, 2023.