

Sujet de thèse - Modélisation multi-échelle et multi-physique de matériaux et structures souples : du matériau à la simulation EF et à la prédiction assistée par IA

Directeur de thèse : Fahmi ZAIRI

Etablissement : Université de Lille

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

Descriptif du sujet

Les matériaux et structures souples présentent des comportements mécaniques complexes, résultant d'interactions étroites entre leur architecture microstructurale, les phénomènes dissipatifs et les couplages multi-physiques auxquels ils sont soumis [1-4]. Ces systèmes se caractérisent par des réponses fortement non linéaires, anisotropes et dépendantes du temps, gouvernées par des mécanismes internes évolutifs et sensibles aux conditions environnementales, ce qui rend leur modélisation particulièrement délicate dans une perspective prédictive.

L'objectif de cette thèse est de développer un cadre de modélisation reliant explicitement les mécanismes physiques multi-échelles aux réponses macroscopiques. Le travail s'inscrira dans une approche multi-échelle et multi-physique intégrant, au sein de formulations cohérentes, les effets de la microstructure, des interactions fluide-structure et des phénomènes dissipatifs tels que la viscoélasticité et l'endommagement, dans une démarche physiquement interprétable favorisant la généralité des modèles.

Une attention particulière sera portée à la description de couplages complexes entre mécanismes physiques de nature différente, en s'inspirant notamment de systèmes biologiques caractérisés par des interactions multi-échelles. À titre d'exemple, les tissus musculaires mettent en jeu des couplages électromécaniques et chimio-mécaniques, où la réponse macroscopique résulte de l'interaction entre architecture interne, activation et phénomènes dissipatifs dépendants du temps [2]. Ce cadre constitue une base pertinente pour développer des modèles généralisables à une large classe de matériaux souples fonctionnels (hydrogels, polymères, tissus structurés), avec des perspectives d'application notamment en ingénierie biomédicale, en robotique souple et plus largement dans des systèmes adaptatifs à forte composante multi-physique.

Les modèles développés seront physiquement fondés et intégreront des variables internes décrivant l'évolution des mécanismes microstructuraux. Ils seront implémentés dans des codes éléments finis via des lois utilisateurs afin de simuler des structures tridimensionnelles soumises à des chargements complexes. En parallèle, des approches d'identification et de réduction de modèles assistées par l'IA (réseaux contraints par la physique, modèles hybrides) seront explorées afin d'exploiter efficacement les données et d'améliorer les capacités prédictives. Une attention particulière sera accordée à la robustesse numérique, à la stabilité des algorithmes et à l'efficacité computationnelle.

Une partie de la thèse sera également consacrée à des travaux expérimentaux visant à caractériser le comportement mécanique de systèmes représentatifs et à alimenter l'identification et la validation des modèles, en lien étroit avec les développements numériques et les approches d'apprentissage. Ces investigations permettront de mieux appréhender les mécanismes physiques en jeu et d'assurer la pertinence des approches développées, en favorisant des boucles itératives entre expérimentation, modélisation et apprentissage.

Les développements méthodologiques réalisés dans ce cadre s'inscrivent dans une dynamique de modélisation avancée de systèmes complexes à forte valeur applicative, où la compréhension fine des interactions entre structure, propriétés et environnement constitue un enjeu central, en particulier dans le contexte des jumeaux numériques, ouvrant la voie à des approches intégrées de type "modèle-données".

Phases de travail

Phase 1 (Expérimental et données) : Caractérisation du comportement mécanique de matériaux et structures souples sous différents chargements (monotones, cycliques, dépendants du temps) et constitution de bases de données expérimentales structurées.

Phase 2 (Modélisation multi-échelle et multi-physique) : Développement de modèles de comportement physiquement fondés intégrant les effets microstructuraux, les couplages multi-physiques et les mécanismes dissipatifs.

Phase 3 (Apprentissage et identification) : Mise en œuvre de stratégies d'identification assistées par l'IA et développement de modèles hybrides (physique-données) pour l'exploitation des données et l'amélioration des capacités prédictives.

Phase 4 (Simulation numérique EF) : Implémentation des modèles dans un code éléments finis (lois utilisateurs) et réalisation de simulations sur des structures soumises à des chargements complexes et dépendants du temps.

Phase 5 (Validation et optimisation) : Validation des modèles par comparaison numérique/expérimental, évaluation des performances prédictives et optimisation des approches développées pour des cas représentatifs.

Références

- [1] Lionel Ogouari, Qiang Guo, Fahmi Zaïri, Thanh-Tam Mai, Yong Zheng, Jian Ping Gong, Kenji Urayama, 2026. Multiscale FE modeling of double-network gels with viscoelastic and anisotropic damage coupling. International Journal of Plasticity 200, 104666.
- [2] Maxime Hoyaux, Abderrahman Tamoud, Tang Gu, Fahmi Zaïri, Fahed Zaïri, 2026. A multiscale sarcomere-to-fiber modeling approach for time-dependent uniaxial skeletal muscle mechanics. Acta Biomaterialia 212, 496-515.
- [3] Ugo Cachot, Karim Kandil, Fahmi Zaïri, Fahed Zaïri, 2025. A multiscale finite element model of fluid-microstructure interactions in human intervertebral disc compression. Acta Biomaterialia 207, 398-413.
- [4] Afshin Anssari-Benam, Fahmi Zaïri, 2025. Modelling the finite deformation of thermoplastic polymers via hyperinelasticity. Part I: A semi-crystalline polymer under varying crystallinity ratios and deformation rates. International Journal of Non-Linear Mechanics 175, 105091.

Compétences recherchées

- Formation en mécanique des solides et mécanique des matériaux
- Solides bases en mécanique des milieux continus
- Intérêt marqué pour : modélisation multi-échelle et multiphysique, méthodes numériques et éléments finis, approches hybrides physique-données / machine learning
- Compétences en programmation (Python, Fortran, C++ ou équivalent)
- Goût pour l'interface modélisation - simulation - expérimentation
- Capacité à travailler dans un environnement interdisciplinaire

Rémunération

Type de contrat : CDD (36 mois)

Rémunération : 2300 € brut mensuel

Dépôt de candidature

Envoyer CV, dernier relevé de notes, lettre de motivation et lettres de recommandation à :

fahmi.zairi@univ-lille.fr

Date limite de dépôt des candidatures : 5 mai 2026

PhD Position - Multiscale and multiphysics modeling of soft materials and structures: from material behavior to finite element simulation and AI-assisted prediction

Supervisor: Fahmi ZAIRI

Institution: University of Lille, France

Laboratory: Civil and Geo-Environment Engineering Laboratory (LGCgE) - Research Group ER1: Multiscale modeling and characterization of coupled problems

Project description

Soft materials and structures exhibit complex mechanical behaviors arising from strong interactions between their microstructural architecture, dissipative phenomena, and multiphysics couplings [1-4]. These systems are characterized by highly nonlinear, anisotropic, and time-dependent responses governed by evolving internal mechanisms and environmental conditions, making their predictive modeling particularly challenging.

The objective of this PhD is to develop a predictive modeling framework that explicitly links multiscale physical mechanisms to macroscopic responses. The work will follow a multiscale and multiphysics approach integrating, within consistent formulations, the effects of microstructure, fluid-structure interactions, and dissipative processes such as viscoelasticity and damage, in a physically interpretable framework promoting model generality.

Particular attention will be devoted to the description of complex couplings between physical mechanisms of different nature, inspired by biological systems exhibiting multiscale interactions. For instance, muscle tissues involve electromechanical and chemo-mechanical couplings, where the macroscopic response results from the interplay between internal architecture, activation processes, and time-dependent dissipative phenomena [2]. This framework provides a relevant basis for developing models applicable to a wide range of functional soft materials (e.g., hydrogels, polymers, structured tissues), with applications in biomedical engineering, soft robotics, and more broadly in adaptive multiphysics systems.

The developed models will be physically based and will incorporate internal variables describing the evolution of microstructural mechanisms. They will be implemented in finite element codes through user-defined material laws to simulate three-dimensional structures under complex loading conditions. In parallel, AI-assisted strategies for model identification and reduction (e.g., physics-informed neural networks, hybrid models) will be explored to efficiently exploit data and enhance predictive capabilities. Particular attention will be paid to numerical robustness, algorithm stability, and computational efficiency.

Experimental work will complement these developments to characterize the mechanical behavior of representative systems and support model identification and validation, in close interaction with numerical modeling and data-driven approaches. This will enable iterative loops between experimentation, modeling, and learning.

This research is part of a broader effort toward advanced modeling of complex systems with high application potential, particularly in the context of digital twins and integrated “model-data” approaches.

Work plan

Phase 1 (Experimental and data): Mechanical characterization of soft materials and structures under various loading conditions (monotonic, cyclic, time-dependent) and construction of structured experimental datasets.

Phase 2 (Multiscale and multiphysics modeling): Development of physically-based constitutive models incorporating microstructural effects, multiphysics couplings, and dissipative mechanisms.

Phase 3 (Learning and identification): Implementation of AI-assisted identification strategies and development of hybrid (physics-data) models for data exploitation and improved predictive capabilities.

Phase 4 (Finite element simulation): Implementation of models into finite element codes (user-defined material laws) and simulation of structures under complex loading conditions.

Phase 5 (Validation and optimization): Validation through numerical/experimental comparison, assessment of predictive performance, and optimization for representative applications.

References

- [1] Lionel Ogouari, Qiang Guo, Fahmi Zaïri, Thanh-Tam Mai, Yong Zheng, Jian Ping Gong, Kenji Urayama, 2026. Multiscale FE modeling of double-network gels with viscoelastic and anisotropic damage coupling. *International Journal of Plasticity* 200, 104666.
- [2] Maxime Hoyaux, Abderrahman Tamoud, Tang Gu, Fahmi Zaïri, Fahed Zaïri, 2026. A multiscale sarcomere-to-fiber modeling approach for time-dependent uniaxial skeletal muscle mechanics. *Acta Biomaterialia* 212, 496-515.
- [3] Ugo Cachot, Karim Kandil, Fahmi Zaïri, Fahed Zaïri, 2025. A multiscale finite element model of fluid-microstructure interactions in human intervertebral disc compression. *Acta Biomaterialia* 207, 398-413.
- [4] Afshin Anssari-Benam, Fahmi Zaïri, 2025. Modelling the finite deformation of thermoplastic polymers via hyperinelasticity. Part I: A semi-crystalline polymer under varying crystallinity ratios and deformation rates. *International Journal of Non-Linear Mechanics* 175, 105091.

Required skills

- Background in solid mechanics and materials mechanics
- Strong knowledge of continuum mechanics
- Strong interest in: multiscale and multiphysics modeling, numerical methods and finite element analysis, hybrid physics-data / machine learning approaches
- Programming skills (Python, Fortran, C++ or equivalent)
- Interest in modeling-simulation-experiment interaction
- Ability to work in an interdisciplinary environment

Salary and contract

Contract: Fixed-term (36 months)

Salary: ~€2300 gross per month

Application

Send CV, latest academic transcript, cover letter, and recommendation letter(s) to:

fahmi.zairi@univ-lille.fr

Application deadline: May 5, 2026