



## DOCTORAT EN MECANIQUE

Etablissement IMT Mines Alès (Ecole Nationale Supérieure des Mines d'Alès)

Affectation principale Centre d'Enseignement et de Recherche C2MA

Résidence administrative Alès (Département du Gard – Région Occitanie)

06/10/2025

### 1. Présentation IMT et IMT Mines Alès

L'institut Mines-Télécom (IMT), grand établissement au sens du code de l'éducation, est un établissement public scientifique, culturel et professionnel (EPSCP) placé sous la tutelle principale des ministres chargés de l'industrie et du numérique. Premier groupe d'écoles d'ingénieurs en France, il fédère 11 écoles d'ingénieur publiques réparties sur le territoire national, qui forment 13 500 ingénieurs et docteurs. L'IMT emploie 4500 personnes et dispose d'un budget annuel de 400M€ dont 40% de ressources propres. L'IMT comporte 2 instituts Carnot, 35 chaires industrielles, produit annuellement 2100 publications de rang A, 60 brevets et réalise 110M€ de recherche contractuelle.

Créé en 1843, IMT Mines Alès compte à ce jour 1400 élèves (dont 250 étrangers) et 380 personnels. L'école dispose de 3 centres de recherche et d'enseignement de haut niveau scientifique et technologique, qui œuvrent dans les domaines des matériaux et du génie civil (C2MA), de l'environnement et des risques (CREER), de l'intelligence artificielle et du génie industriel et numérique (CERIS). Elle dispose de 12 plateformes technologiques et compte 1600 entreprises partenaires.

### 2. Projet de recherche

Titre : Contribution à l'étude de la fatigue du tissu musculaire : Approche expérimentale, modélisation et applications en traumatologie du sport

Mots clés : Fatigue, Modélisation, Endommagement, Imagerie, Traumatologie sportive

Le tissu musculaire, essentiel au mouvement et à la stabilité du corps humain, est soumis à de multiples contraintes mécaniques dans divers contextes, notamment lors des activités sportives intenses pourvoyeuses d'altération et de remodelage des tissus musculaires actifs. Comprendre les mécanismes de fatigue<sup>1</sup>, d'endommagement et de rupture du tissu musculaire est crucial, en particulier pour la prévention et la prise en charge des lésions traumatiques. Il a été montré que les propriétés mécaniques du tissu musculaire, telles que la viscoélasticité, l'anisotropie, l'adoucissement et l'endommagement, jouent un rôle fondamental dans la réponse aux déformations imposées, influençant ainsi leur comportement en conditions extrêmes<sup>2,3</sup>.

Le rôle de la structure des fibres musculaires et de la matrice extracellulaire dans la fatigue des muscles squelettiques est de plus en plus reconnu. Des études récentes ont mis en évidence l'importance des composants intramusculaires, notamment le collagène et la matrice non fibrillaire, dans la transmission des efforts suite à une sollicitation<sup>4,5</sup>. En parallèle, les avancées en imagerie et les modèles micromécaniques offrent de nouvelles perspectives pour analyser la géométrie complexe des fibres musculaires et leur rôle dans les phénomènes de déformation, d'endommagement et de rupture<sup>6,7,8</sup>.

Les travaux s'articulent autour de trois axes :

- 1- **Caractérisation expérimentale** : Analyse fine des propriétés mécaniques et de la microstructure des tissus musculaires (essais mécaniques, histologie, imagerie avancée<sup>9</sup>)
- 2- **Modélisation numérique** : Développement de modèles hyperviscoélastiques intégrant l'effet Mullins<sup>10</sup> et l'effet Payne pour simuler les réponses des tissus sous des sollicitations intensives et répétées
- 3- **Applications cliniques** : Validation des modèles grâce à un démonstrateur (indenteur<sup>11</sup>) permettant une évaluation pratique de l'état de fatigue et d'endommagement musculaire en contexte sportif ou clinique.

Ce projet offre une approche interdisciplinaire combinant biomécanique, modélisation numérique et outils diagnostiques innovants pour répondre aux enjeux de la prévention et de la prise en charge des traumatismes musculaires.

### 3. Encadrement

Centre de Recherche et d'enseignement : C2MA  
Unité de recherche : DMS/LMGC  
Ecole doctorale : I2S 166, Informations, Structures et Systèmes.

#### Direction de thèse:

Caro Anne-Sophie, Professor, IMT Mines Alès, LMGC, DMS  
Perrey Stéphane, Professor, EuroMov Digital Health in Motion

#### Encadrement de thèse :

Cavinato Cristina, Associate Professor, Université de Montpellier, LMGC, BIOTIC  
laquinta Sarah, Associate Professor, IMT Mines Alès, LMGC, DMS

### 4. Profil recherché

Le candidat devra posséder une solide formation en mécanique des matériaux, idéalement complétée par une expérience ou un fort intérêt pour la biomécanique des tissus biologiques. Des compétences en modélisation numérique (éléments finis, programmation) sont essentielles, ainsi qu'une aptitude à mener des expérimentations en laboratoire. Une expérience ou un intérêt pour les sciences du sport et la physiologie musculaire sera un atout. Le candidat devra démontrer une capacité à travailler en équipe et à contribuer activement aux échanges interdisciplinaires nécessaires à la réussite de ce projet.

### 5. Références bibliographiques

1. Denis R, Bringard A, Perrey S. Vastus lateralis oxygenation dynamics during maximal fatiguing concentric and eccentric isokinetic muscle actions. *J Electromyogr Kinesiol Off J Int Soc Electrophysiol Kinesiol.* 2011;21(2):276-282. doi:10.1016/j.jelekin.2010.12.006
2. Lamsfuss J, Bargmann S. Skeletal muscle: Modeling the mechanical behavior by taking the hierarchical microstructure into account. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2021;122:104670. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104670
3. Zöllner AM, Abilez OJ, Böl M, Kuhl E. Stretching skeletal muscle: chronic muscle lengthening through sarcomerogenesis. *PLoS One.* 2012;7(10):e45661. doi:10.1371/journal.pone.0045661

4. Purslow PP. The Structure and Role of Intramuscular Connective Tissue in Muscle Function. *Front Physiol.* 2020;11(495):1-15.
5. Fung YC. *Biomechanics.* Springer; 1993.
6. Sharafi B, Blemker SS. A micromechanical model of skeletal muscle to explore the effects of fiber and fascicle geometry. *J Biomech.* 2010;43(16):3207-3213. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.07.020>
7. Blemker SS, Delp SL. Three-dimensional representation of complex muscle architectures and geometries. *Ann Biomed Eng.* 2005;33(5):661-673. doi:10.1007/s10439-005-1433-7
8. Gillies AR, Lieber RL. Structure and function of the skeletal muscle extracellular matrix. *Muscle Nerve.* 2011;44(3):318-331. doi:10.1002/mus.22094
9. Maillet M, Kammoun M, Avril S, Ho Ba Tho MC, Trabelsi O, Non-destructive Characterization of Skeletal Muscle Extracellular Matrix Morphology by Combining Optical Coherence Tomography (OCT) Imaging with Tissue Clearing. *Annals Biomed. Engng.* 2023 (51):2323–2336. <https://doi.org/10.1007/s10439-023-03274-2>
10. Caro-Bretelle AS, Gountsop PN, Lenny P, et al. Effect of sample preservation on stress softening and permanent set of porcine skin. *J Biomech.* 2015;48(12). doi:10.1016/j.jbiomech.2015.07.014
11. Caro A, Iaquina S, Chean S et al, Monitored indentation for the detection of inclusions in elastomer material, *J. Applied Polym. Sci.* 2024, 141 (6).

## 6. [Contacts](#)

- ▶ Sur le projet de recherche : Anne-Sophie CARO [anne-sophie.caro@mines-ales.fr](mailto:anne-sophie.caro@mines-ales.fr); Sarah Iaquina [sarah.iaquina@mines-ales.fr](mailto:sarah.iaquina@mines-ales.fr)
- ▶ Sur les aspects administratifs : Anne-Catherine Denni ([anne-catherine.denni@mines-ales.fr](mailto:anne-catherine.denni@mines-ales.fr))