

## Sujet de thèse financé par une bourse Ministérielle

### Modélisation des phénomènes électromécaniques au sein de biomatériaux et de structures osseuses siège de phénomènes de remodelage

**Encadrants LEM3 :** Jean-François Ganghoffer, Jean-François Schmitt

**Contexte :** l'os présente une structure hiérarchique (figure 1) et il est le siège de phénomènes de remodelage de l'échelle cellulaire à l'échelle tissulaire, se traduisant par la formation d'os nouveau par apposition d'hydroxyapatite.

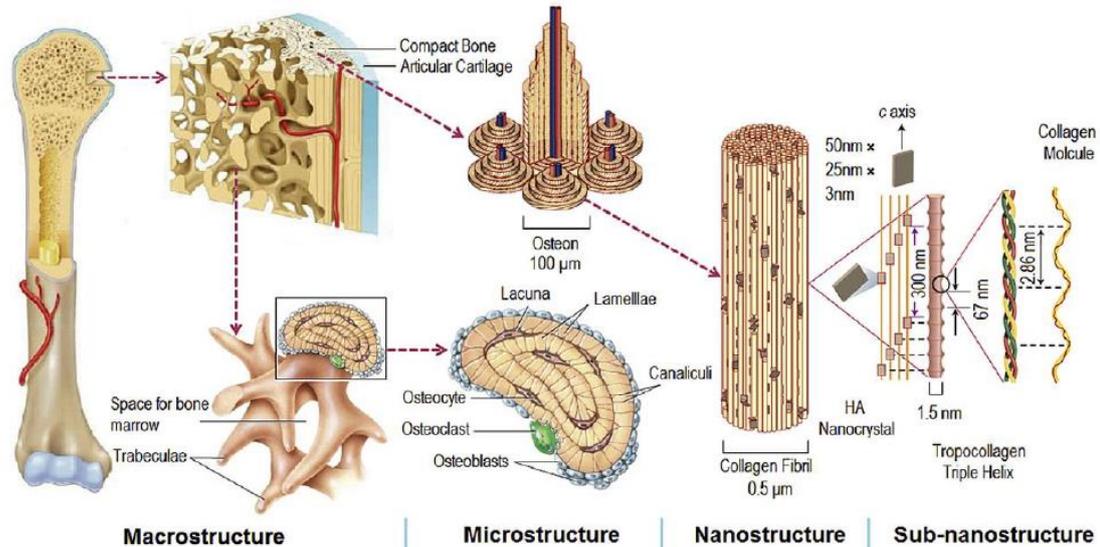


Figure 1 : Multiscale aspects of bone (Wegst et al., 2015)

L'os comporte des microfissures qui génèrent des contraintes élevées ainsi que des gradients de déformation intenses au voisinage du front de fissure. Le remodelage est un phénomène permanent qui permet de réguler les contraintes par résorption de l'os microfissuré suivi d'apposition d'os nouveau. S'il est bien connu que l'os se remodèle sous l'action de stimuli mécanique, l'effet des stimuli électriques a été moins quantifié dans les travaux de la littérature. L'action de stimuli de nature mécanique et électrique aux différentes échelles, l'amplification des champs au voisinage des microfissures, l'identification des propriétés piézoélectriques et flexoélectriques des biomatériaux testés, le couplage entre les champs mécaniques et électriques avec le remodelage, la mise en place d'un protocole de mesure sur matériaux modèles (biomatériaux) afin de valider les modèles, constituent autant de verrous scientifiques qui seront abordés dans la thèse.

**Travail de thèse :** Le sujet de thèse a essentiellement pour objectif le développement de modèles théoriques et numériques dans un contexte multiphysique et multiéchelles afin de pouvoir mener des études de sensibilité. Les études de sensibilité numérique auront pour objectif de dégager la gamme de stimuli propres à stimuler la fermeture de fissures (cicatrisation) et d'apposer de l'os nouveau de façon efficace. Les propriétés piézoélectriques et flexoélectriques de biomatériaux mimant l'os qui ne pourront être mesurées seront calculées par dynamique moléculaire. Un code de calcul des propriétés flexoélectriques de matériaux en présence de fissures sera mis au point. Le travail

expérimental sera limité à des biomatériaux (Figure 2) en fin de thèse afin de valider les modèles numériques développés.



Figure 2 : Biomatériaux fissurés ensemencés de cellules d'os (Vasquez-Sancho, 2018)

Une collaboration avec le laboratoire BIOS (Reims, URCA) et IMOPA (UL) sera mise à profit pour aborder la partie biologique en fin de thèse.

### **Calendrier prévisionnel de la thèse :**

1<sup>ère</sup> année : bibliographie sur le sujet – étude des stimulations électriques et mécaniques sur des matériaux micro fissurés via le développement de modèles. Simulation de la diffusion de cellules osseuses en présence de microfissures et sous stimuli électromécaniques.

2<sup>ème</sup> année : poursuite des activités de modélisation – Identification d'une loi de comportement piézoélectrique / flexoélectrique en présence de remodelage à l'échelle tissulaire. En fin d'année, mise en place d'un banc d'essais sur biomatériaux micro-fissurés (dont dentine et enamel) sans cellules, puis avec cellules osseuses. Rédaction d'un article.

3<sup>ème</sup> année : essais sur biomatériaux ensemencés de cellules (BIOS, Reims). Validation des modèles numériques. Synthèse des analyses numériques et expérimentales. Rédaction d'articles et de la thèse.

**Prérequis et profil du doctorant :** le doctorant recruté devra avoir un profil de mécanicien ayant une aptitude pour la modélisation et la simulation numérique. Des compétences dans les domaines de l'expérimentation constituent un plus, mais ne sont pas indispensables.

**Modalité de candidature :** les candidats pourront envoyer un CV, une lettre de recommandation ainsi que leur relevé de notes théoriques de master par mail à l'encadrant principal de la thèse :

[Jean-francois.Ganghoffer@univ-lorraine.fr](mailto:Jean-francois.Ganghoffer@univ-lorraine.fr)

### **Références bibliographiques**

Wegst UGK, Bai H, Saiz E, et al. Bioinspired structural materials. *Nat Mater* 2015; 14: 23–36.

Lemaire T, Capiiez-Lernout E, Kaiser J, et al. What is the importance of multiphysical phenomena in bone remodeling signals expression? A multiscale perspective. *J Mech Behav Biomed Mater* 2011; 4: 909–920.

Vasquez-Sancho F, Abdollahi A, Damjanovic D, et al. Flexoelectricity in Bones. *Advanced Materials* 2018; 30: 1705316.

Fukada E, Yasuda I. On the Piezoelectric Effect of Bone. *J Physical Soc Japan* 1957; 12: 1158–1162.

A variational approach of homogenization of piezoelectric composites towards piezoelectric and flexoelectric effective media. N Mawassy, H Reda, JF Ganghoffer, VA Eremeyev, H Lakiss, 2021. *International Journal of Engineering Science* 158, 103410

A variational approach of homogenization of heterogeneous materials towards second gradient continua. JF Ganghoffer, H Reda, 2021. *Mechanics of Materials* 158, 103743

Gradient of mechanical properties in polymer nanocomposites: From atomistic scale to the strain gradient effective continuum. H Reda, A Chazirakis, N Savva, JF Ganghoffer, V Harmandaris, 2023. *International Journal of Solids and Structures* 256, 111977

Ganghoffer JF, Do XN, Ibrahimbegovic A., 2021. Thermodynamic formulations of the growth of solid bodies subjected to electromechanical interactions and application to bone external and internal remodeling. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. DOI: 10.1007/s00161-021-00986-5.