

Modélisation théorique et simulation numérique de la reconstruction osseuse par une approche de second gradient à microstructure évolutive

Directeur(s) de Thèse : Daniel GEORGE MCF (HDR, septembre 2013)
george@unistra.fr

Unité(s) d'Accueil(s) : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie (ICUBE).

Établissement de rattachement : Université de Strasbourg.

Collaborations internationales : INSA de Lyon, Université La Sapienza Rome, Polish Academy of Science.

Résumé :

Le sujet de thèse proposé s'intéresse au problème de reconstruction osseuse à travers un matériau biorésorbable. Lors d'opérations post accidentelles, de fractures, de poses d'articulations artificielles, des matériaux sont souvent utilisés pour renforcer la structure osseuse déficiente, pour la reconstruire ou la remplacer. Actuellement, des matériaux micro ou nanostructurés, de caractéristique poreuse, permettent d'envisager leur disparition progressive et leur remplacement par un os naturel. De nombreux travaux existent déjà sur la modélisation de la reconstruction osseuse en tenant compte des phénomènes biologiques mis en jeu. Certaines de ces modélisations utilisent des modèles continus de gradient élevés afin de prendre en compte, dans une certaine mesure, les phénomènes de microstructure existants. On peut citer en particulier les travaux des équipes romaines, polonaises et de l'INSA de Lyon qui ont conduit à des résultats très intéressants et à des simulations originales et performantes [Lekszycki 1999, 2005 et Madeo 2011, 2012]. Les modèles existants sont limités aux cas isotrope uni/bi-directionnel et ne prennent pas en compte les effets de la microstructure, son évolution et l'anisotropie. Le sujet s'inscrit dans une étude fondamentale faisant suite aux travaux effectués par ces équipes et en collaboration avec elles.

Le sujet s'intéresse particulièrement à la prise en compte et l'introduction de la microstructure et de l'anisotropie osseuse lors de sa reconstruction par une approche mécanique numérique théorique initialement mise en évidence par les travaux de Germain (1972, 1973), Mindlin (1964, 1968) et Toupin (1962). Cette approche théorique nous permet, à travers l'écriture du principe des puissances virtuelles, d'intégrer les effets locaux de la microstructure grâce à la prise en compte du second gradient du déplacement. Ces effets devront être intégrés de manière anisotropique locale en intégrant la prise en compte de l'évolution de la densité osseuse anisotrope durant la reconstruction en fonction de l'environnement biologique et des actions externes appliquées. Une approche par homogénéisation locale sera nécessaire afin de pouvoir être intégrée dans le modèle macroscopique homogène en second gradient. Il s'agit ici d'un sujet de recherche fondamentale en amont de toute application biomédicale immédiate et n'est donc pas compatible avec de possibles supports financiers à « transfert de technologie ». En revanche, un fort potentiel applicatif est envisagé car il n'existe, à l'heure actuelle, aucun modèle numérique permettant la prise en compte de la reconstruction anisotrope « réelle » de l'os dans son environnement biologique. Le sujet nécessitera un développement théorique et numérique de modèles en 2D et 3D couplant la résorption du matériau artificiel et son remplacement par l'os naturel. La principale difficulté concernant la validation du modèle consiste en l'identification précise d'un certain nombre de paramètres de modélisation qui pourront être obtenus de manière expérimentale in-vivo par nos collaborateurs. Par ailleurs, notre intégration dans le GDR AMORE (Advanced Model Order Reduction in Engineering and Sciences) nous permettra d'utiliser des modèles numériques comme celui développé par F. Chinesta et col. (2011) afin de prendre en compte les nombreux paramètres biologiques intégrés dans le modèle actuel.

Le sujet s'inscrit dans le cadre du passage d'une HDR et à forte intégration dans le développement des nouvelles activités de l'équipe dans le domaine des matériaux à microstructure évolutive pour la

biomécanique et le biomédical. Par ailleurs, les collaborations en cours avec l'INSA de Lyon, l'Université La Sapienza de Rome, l'Université médicale de Varsovie ainsi que le laboratoire de bioingénierie ostéo-articulaire (B2OA, Paris 7) et le groupe de biomécanique ostéo-articulaire (Marseille) nous permettent d'envisager de réels débouchés quant à la validation et la mise en situation réelle de ce nouveau modèle. Le sujet nécessite une bonne connaissance en mécanique théorique, physique et physique numérique. Idéalement, le profil du candidat (doctorant) retenu sera orienté mathématiques appliquées, physiques / mécanique numérique.

Collaborations nationales et internationales :

- INSA Lyon (Dr. Angela Madeo)
- GDR AMORE (Prof. Francisco Chinesta, Centrale Nantes)
- Laboratoire de bioingénierie et bioimagerie ostéo-articulaire (Prof. Hervé Petite, B2OA, Paris 7)
- Groupe interdisciplinaire en biomécanique ostéoarticulaire et cardiovasculaire (Prof. Patrick Chabrand, Université Aix-Marseille)
- Université La Sapienza, Rome (Prof. Francesco dell'Isola)
- Université médicale de Varsovie (Prof. Tomasz Lekszycki)

Références :

- Chinesta, F., Ammar, A., Leygue, A. and Keunings, R., 2011, An overview of the proper generalized decomposition with applications in computational rheology, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 166, pp. 578-592.
- Germain, P., 1972, Sur l'application de la méthode des puissances virtuelles en mécanique des milieux continus, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, vol. 274, pp. 1051-1055.
- Germain, P., 1973, La méthode des puissances virtuelles en mécanique des milieux continus : théorie du second gradient, *Journal de Mécanique*, vol. 12 (2), pp. 235-274.
- Lekszycki, T., 1999, Optimality conditions in modeling of bone adaptation phenomenon, *Journal of Theoretical Applied Mechanics*, vol. 37 (3), pp. 607-624.
- Lekszycki, T., 2005, Functional adaptation of bone as an optimal control problem, *Journal of Theoretical Applied Mechanics*, vol. 43 (3), pp. 120-140.
- Madeo, A., **George, D.**, Lekszycki, T., Nierenberger, M., Rémond, Y., 2012, A second gradient continuum model accounting for some effects of micro-structure on reconstructed bone remodeling, *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 340, pp. 575-589.
- Madeo, A., Lekszycki, T., Dell'Isola, F., 2011, A continuum model for the bio-mechanical interactions between living tissue and bioresorbable graft after bone reconstructive surgery, *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 339, pp. 625-640.
- Mindlin, R. D., 1964, Micro-structure in linear elasticity, *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, vol. 16, pp. 51-78.
- Mindlin, R. D., Eshel, N. N., 1968, On first strain-gradient theories in linear elasticity, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 4, pp. 109-124.
- Toupin, R. A., 1962, Elastic materials with couple-stresses, *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, vol. 11, pp. 385-414.