

# Modélisation multi-échelle du comportement élasto-plastique de l'os trabéculaire sous sollicitations dynamiques

J. Halgrin<sup>2</sup>, J. Rahmoun<sup>1</sup>, H. Naceur<sup>1</sup>, E. Markiewicz<sup>1</sup>, P. Drazetic<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lab. LAMIH, University of Valenciennes, 59313 Valenciennes, France, [hakim.naceur@univ-valenciennes.fr](mailto:hakim.naceur@univ-valenciennes.fr)

<sup>2</sup> ISM - University of the Mediterranean Aix-Marseille II, Marseille

**Résumé** — L'objectif de ce travail porte sur le développement d'un modèle de comportement élasto-plastique de l'os trabéculaire. Ce travail est une suite de précédents travaux de développement d'un modèle de comportement élastique de l'os. La théorie du chargement radiale est adoptée ce qui permet d'aboutir à des relations explicites entre les composantes de déformations plastiques et les contraintes totales de Cauchy. La loi de comportement développée est basée sur une modélisation multi-échelle par un schéma d'homogénéisation du comportement mécanique non linéaire de l'os trabéculaire en tenant compte de l'anisotropie induite par sa microarchitecture sur ses propriétés homogénéisées.

**Mots clefs** — os trabéculaire, modélisation multi-échelle, élasto-plasticité, homogénéisation.

## 1 Introduction

De nos jours, le besoin d'accroître la sécurité des usagers de la route par une meilleure prédiction du risque lésionnel, pousse constamment les constructeurs automobiles à introduire l'utilisation de modèles virtuels de l'être humain. De nombreux travaux ont été faits à travers le monde pour développer des modèles biofidèles de segments anatomiques et tendre ainsi vers une intégration en modèles globaux de l'être humain décliné en familles. Les os humain se composent de deux types de tissus osseux, l'os cortical et l'os spongieux ou trabéculaire. L'os trabéculaire est un matériau composite complexe qui possède plusieurs hiérarchies d'anisotropie matérielle et structurale allant jusqu'au nanomètre. Cependant, les lois de comportement macroscopiques habituellement utilisées pour ce genre de matériau se heurtent à cette complexité du matériau et ne reflètent pas le comportement réel car elles ne tiennent pas compte de la microstructure. Il a été prouvé qu'une modélisation par des techniques de multi-échelles est mieux appropriée pour s'affranchir des limitations des modèles macroscopiques usuels.

Dans cet objectif, un premier modèle du comportement de l'os trabéculaire, basé sur les schémas d'homogénéisation linéaire [1], a été développé au sein de l'équipe C2S au LAMIH. Ce modèle micromécanique a permis de modéliser le comportement élastique anisotrope des matériaux poreux à microstructure aléatoire [2] et de considérer les effets de leur anisotropie matérielle et structurale [4], [5]. On présentera dans cette communication, une extension de ces travaux de recherche au cas de déformations élasto-plastiques anisotropes pour aller ensuite vers l'intégration de critère d'endommagement spécifiques à l'os afin de pouvoir simuler l'initiation de la rupture, ceci permettra une meilleure prédiction des lésions osseuses en cas de choc.

La loi de comportement de l'os trabéculaire basée sur des considérations micro-mécaniques étant relativement complexe, on présente dans ce travail le développement d'un modèle de comportement élasto-plastique [6] simplifié basé sur la théorie de chargement radial, ceci nous permettra d'aboutir à des relations explicites entre les composantes de déformations plastiques et les contraintes totales de Cauchy d'où une intégration simple et surtout moins onéreuse que celle classique basée sur la théorie d'écoulement plastique qui est précise mais exigerait beaucoup de ressources CPU et de temps de calcul.

## 2 Résultats

La loi de comportement développée basée sur une modélisation multi-échelle par un schéma d'homogénéisation du comportement mécanique non linéaire de l'os trabéculaire est implémentée dans un modèle EF de type solide-coque [3] permettant la prise en compte des effets 3D tout en bénéficiant de l'efficacité de la théorie de coques. Le modèle EF résultant a été appliqué pour la caractérisation du comportement de l'os trabéculaire sur des applications sur le crâne est le fémur.

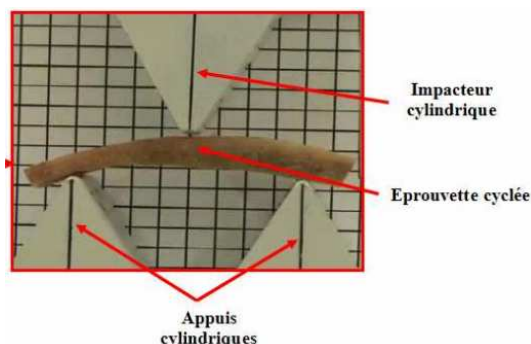


FIG. 1 – Protocole expérimental

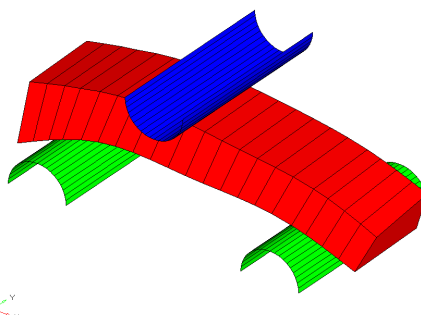


FIG. 2 – Modèle EF de l'éprouvette de l'os crânien

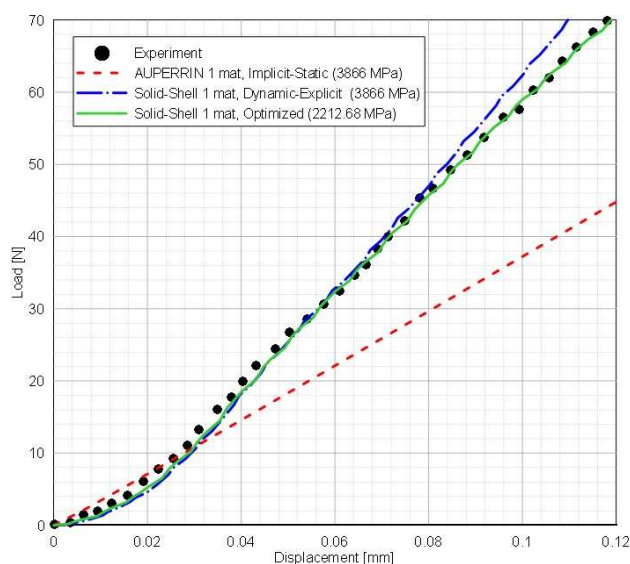


FIG. 3 – Résultat d'identification des paramètres matériau de l'os crânien

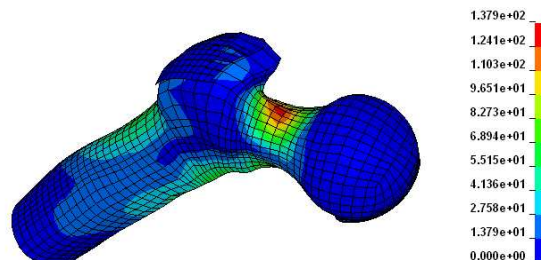
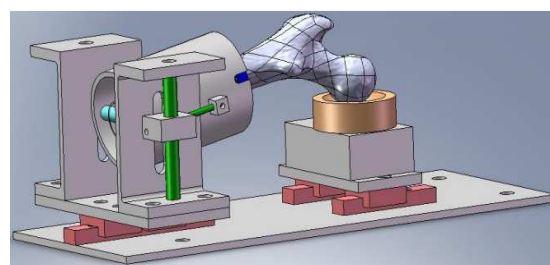


FIG. 4 – Modélisation du fémur Chargement par la tête fémorale

## Références

- [1] J.Rahmoun, F. Chaari, E. Markiewicz, P. Drazetic, "Micromechanical Modeling of the Anisotropy of Elastic Biological Composites", Multiscale Model. Simul. Vol. 8, Issue 1, pp. 326-336, 2009.
- [2] J.D. Eshelby, "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems", Proceedings of the Royal Society Series A, 252(A), 561 (1959).
- [3] M. Hannachi, H. Naceur, J. L. Batoz, "Continuum Based Solid-Shell Element Modeling for the Optimization of Composite Multilayered Structures", Int. Rev. of Mech. Eng., vol. 1, Issue 4, 2007
- [4] L.J. Walpole, "On the overall elastic moduli of composite materials", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 12, 235 (1969).
- [5] P. Ponte Castaneda, J.R. Willis, "The effect of spatial distribution on the effective behavior of composite materials and cracked media", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 43 (12), 1919 (1995).
- [6] Andreas Fritsch, Christian Hellmich, Luc Dormieux, "Ductile sliding between mineral crystals followed by rupture of collagen crosslinks: Experimentally supported micromechanical explanation of bone strength", Journal of Theoretical Biology, 260 (2009) 230-252