



Modélisation numérique de la déchirure des ménisques et des méniscectomies d'une articulation de genou humain

I. Fares, B. Aour*, I. Keddar

Laboratory of Applied Biomechanics and Biomaterials (LABAB), National Polytechnic School of Oran, Algeria

*Contact: ben_aour@yahoo.fr

Résumé-

Contexte. De nombreux auteurs ont suggéré que les niveaux élevés de contraintes de cisaillement et de traction qui apparaissent dans le cartilage articulaire après méniscectomie sont en partie responsables de pathologies cartilagineuses, telle que, l'arthrose.

Méthodes. Dans cet article, nous étudions l'effet des déchirures méniscales et des méniscectomies sur l'articulation du genou humain. Des modèles solides du tibia, du fémur, des ménisques et du cartilage ont été générés à partir d'images IRM. Un modèle d'éléments finis tridimensionnels a été développé qui comprenait le fémur, le tibia, les couches de cartilage, les ménisques et les ligaments. Le fémur et le tibia étaient considérés rigides, le cartilage articulaire et les ménisques étaient linéairement élastiques, isotropes et homogènes. Trois situations différentes ont été comparées: une articulation tibio-fémorale saine, une articulation tibio-fémorale avec fissure dans un ménisque et une articulation tibio-fémorale après méniscectomie.

Résultats. Les contraintes principales minimales correspondant à une charge de compression à 0° de flexion ont été obtenues pour la zone postérieure du ménisque médial et la région correspondante du cartilage articulaire. Sous une charge de compression fémorale axiale, la contrainte de contact maximale dans le cartilage articulaire après méniscectomie était environ deux fois celle d'une articulation saine.

Mots-clés: Biomécanique; Genou humain; Éléments finis; Ménisques; Méniscectomie; Cartilage, Déchirure.

Numerical modeling of the meniscus and meniscectomy tear of the human knee joint

Abstract-

Context. Many authors have suggested that the high levels of shear and tensile stresses that appear in the articular cartilage after meniscectomy are partly responsible for cartilage pathologies, such as osteoarthritis.

Methods. In this paper, we investigate the effect of meniscal tears and meniscectomies on the human knee joint. Solid models of the tibia, femur, menisci and cartilage were generated from MRI images. A three-dimensional finite element model was developed that included the femur, tibia, cartilage layers, menisci and ligaments. The femur and tibia were considered to be rigid, the articular cartilage and menisci to be linearly elastic, isotropic and homogeneous. Three different situations were compared: a healthy tibio-femoral joint, a tibio-femoral joint with tears in one meniscus and a tibio-femoral joint after meniscectomy.

Results. The minimal principal stresses corresponding to a compressive load at 0° flexion were obtained for the posterior zone of the medial meniscus and the corresponding region of the articular cartilage. Under an axial femoral compressive load, the maximal contact stress in the articular cartilage after meniscectomy was about twice that of a healthy joint.

Key words: biomechanics; Knee; Finite elements; menisci; meniscectomy; Cartilage, Tear.

I. Introduction

Une importante composante multifonctionnelle du genou est les ménisques. Ils sont eux-mêmes un système biomécanique complexe, avec un rôle fondamental dans la transmission de charge, l'absorption des chocs, la proprioception, l'amélioration de la stabilité et la lubrification [1]. Ils répartissent efficacement les forces de contact sur les surfaces articulaires en augmentant la surface de contact de l'articulation. La répartition des charges sur une surface articulaire incongrue est redistribuée par les ménisques en maintenant une congruence maximale. La fonctionnalité des ménisques et leur rôle dans la transmission de charge à travers le genou ont été discutés par de nombreux auteurs [2, 3].

L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle tridimensionnel d'éléments finis de l'articulation tibio-fémorale humaine comprenant le fémur, le tibia, les couches de cartilage et les ménisques afin d'estimer les zones de contact et les distributions de pression entre les

ménisques et le cartilage articulaire et la répartition des contraintes dans le cartilage articulaire. Cela pourrait aider à expliquer la dégénérescence du cartilage après une ménisectomie totale ou partielle [4, 5] sous l'effet des déchirures méniscales.

II. Matériau et procédure

II.1. Modèle de l'articulation tibio-fémorale saine

Les données géométriques du modèle développé ici ont été obtenues à l'aide de tomographie et d'images de résonance magnétique prises à partir d'un volontaire normal. Les images volumétriques consistaient en des images numériques parallèles séparées à des intervalles de 1,5 mm dans les plans sagittal, coronaire et axial. Les contours du fémur, du tibia, du cartilage articulaire et des ménisques ont été obtenus manuellement. Les lignes résultantes ont été transférées au code commercial RapidForm où les surfaces principales et la version solide du modèle ont été reconstruites (Fig. 1).

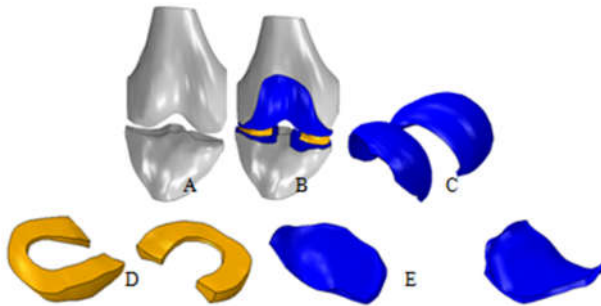


Fig. 1. Modèle entier de l'articulation tibio-fémorale et ses composants: (A) Os, (B) modèle solide, (C) cartilage fémoral, (D) ménisque, et (E) cartilage tibial.

II.2. Modèle de déchirures méniscales et de ménisectomies

La déchirure verticale/longitudinale peut être située à n'importe quelle position le long de la longueur ou de la largeur du ménisque (Fig. 2.a). Les déchirures de bec oblique et de perroquet peuvent être situées à n'importe quel endroit du ménisque (Figs. 2.b et 2.d). La déchirure radiale est typiquement située à l'intersection des tiers moyens et postérieurs du ménisque (Fig. 2.c). Tous ces types de déchirures méniscales ont été supposés apparaître dans le ménisque médial [6].

Afin d'étudier l'effet de la ménisectomie sur l'articulation du genou humain, en particulier sur le cartilage articulaire, différents modèles d'éléments finis du ménisque médialisé menisectomisé ont été développés pour les déchirures longitudinales, obliques, du bec de

perroquet et des déchirures transversales. Le code d'éléments finis ABAQUS a été utilisé pour modéliser le problème.

On considère que le tibia et le fémur sont des corps rigides. On considère que le cartilage articulaire se comporte comme un matériau linéaire monophasique élastique et isotrope avec un module élastique $E = 5 \text{ MPa}$ et un coefficient de Poisson $\nu = 0.46$ [7] et les ménisques ont également été supposés être composés d'une seule phase élastique linéaire et isotrope avec les propriétés moyennes matérielles suivantes: $E = 59 \text{ MPa}$ et $\nu = 0.49$ [5]. Une force de compression verticale de référence de 1150 N a été appliquée à la surface supérieure du fémur, ce qui correspond à la force du cycle de la marche pour une position d'extension complète [8].

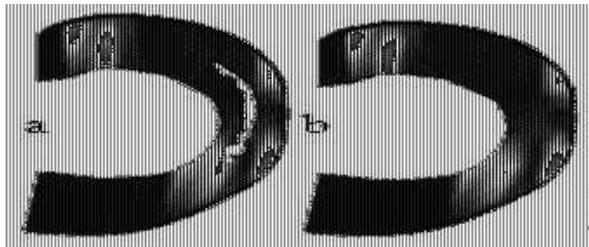


Fig. 2. Modèles d'éléments finis de déchirures méniscales: (a) longitudoale, (b) oblique, (c) transversale, et (d) bec de perroquet.

III. Résultats et discussion

Bien que l'objectif principal de cette étude soit de comprendre l'effet mécanique des méniscectomies partielles sur la biomécanique de l'articulation du genou, il est également important de comprendre pourquoi les méniscectomies partielles obtiennent de meilleurs résultats que les méniscectomies totales.

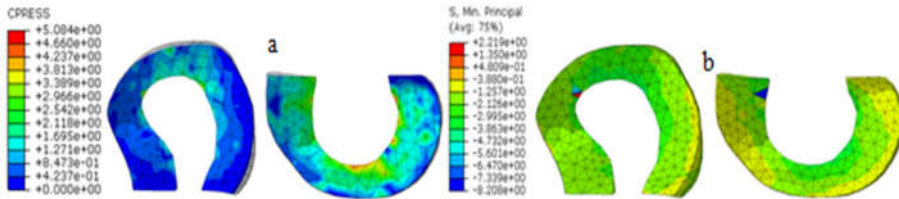


Fig. 3. Résultats de l'articulation tibio-fémorale saine: (a) pressions de contact et (b) contraintes maximales de compression.

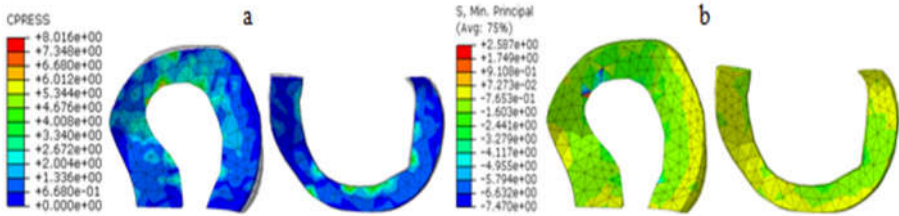


Fig. 4 Résultats de l'articulation longitudinale partielle du genou ménisectomisé: (a) pressions de contact et (b) contraintes maximales de compression.

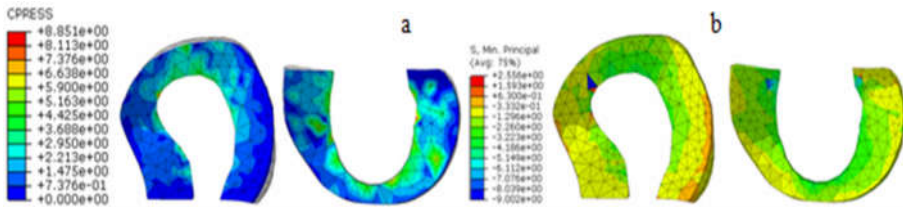


Fig. 5 Résultats de l'articulation partielle du genou ménisectomisé radiale: (a) Pressions de contact et (b) contraintes maximales de compression.

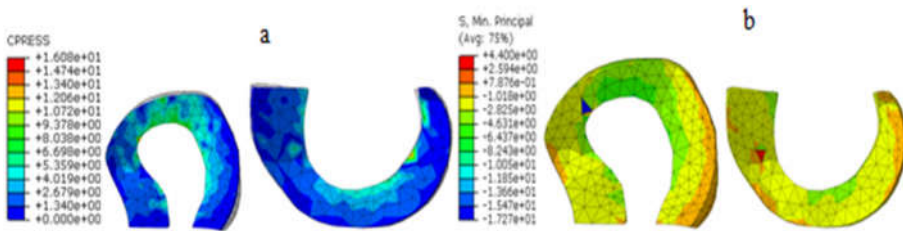


Fig. 6. Résultats de l'articulation du genou ménisectomisé oblique partielle: (a) pressions de contact et (b) contraintes maximales de compression.

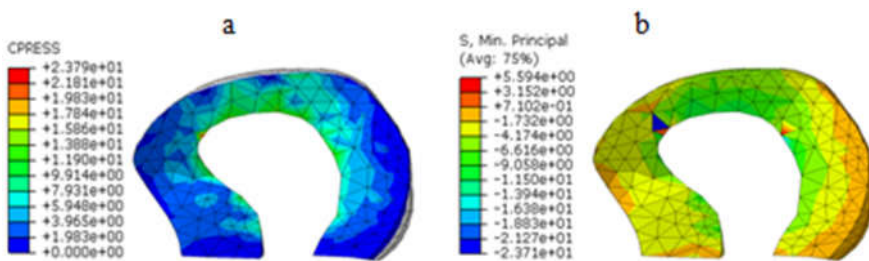


Fig. 7. Résultats dans la partie médiane d'une articulation de genou totalement ménisectomisé: (a) Pressions de contact et (b) Contraintes maximales de compression.

Conclusions

Un modèle 3D a été développé de l'articulation du genou tibio-fémoral humain incluant le fémur, le tibia, les couches de cartilage, les ménisques et les ligaments des articulations est analysé sous des forces de compression axiales. Il a permis de mieux comprendre le rôle des ménisques dans la transmission des forces sur le genou et d'étudier l'effet des déchirures méniscales et des méniscectomies sur la biomécanique de l'articulation du genou humain.

Le modèle a été comparé avec les résultats rapportés dans la littérature, avec des conclusions raisonnables. Bien que les résultats soient qualitatifs, ils aident à mieux comprendre le comportement mécanique de l'articulation et à comparer l'efficacité des différents traitements cliniques considérés ici. En fait, l'utilisation de modèles précis en éléments finis 3D peut bénéficier à de nombreux domaines du développement médical et industriel, tels que les simulations d'accidents, la conception d'équipements sportifs, la conception et l'essai d'implants orthopédiques et l'amélioration des techniques chirurgicales.

Références

- [1] Vedi, V., Williams, A., Tennant, S.J., Spouse, E., Meniscal movement. *J. Bone Joint Surg. B* 81, 37-41, 1999. Mompean, G., Thompson, R.L., Souza Mendes, P.R., *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 111:151-174, 2003.
- [2] Fithian, D.C., Kelly, M.A., Mow, V.C., Material properties and structure-function relationship in the menisci. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 252, 19-31, 1990.
- [3] Macnicol, M.F., Thomas, N.P., The knee after meniscectomy. *J. Bone Joint Surg.* 82, 157-159, 2000.
- [4] Andersson-Molina, H., Karlsson, H., Rockborn, P., Arthroscopic partial and total meniscectomy: A long-term follow-up study with matched controls. *Arthroscopy* 18, 183-189, 2002.
- [5] LeRoux, M.A., Setton, L.A., Experimental biphasic fem determinations of the material properties and hydraulic permeability of the meniscus in tension. *J. Biomech. Eng.* 124, 3 15-321, 2002.
- [6] Hulet, C.H., Locker, B.G., Schiltz, D., Texier, A., Tallier, E., Arthroscopic medial meniscectomy on stable knees. *J. Bone Joint Surg. B* 83, 29-32, 2001.
- [7] Li, G., Lopez, O., Rubash, H., Variability of a three-dimensional finite element model constructed using magnetic resonance images of a knee for joint contact stress analysis. *J. Biomech. Eng.* 123, 341-346, 2001.