

Modélisation du comportement mécanique des muscles squelettiques basée sur la microstructure

A. Weisrock^{1,2}, L. Astruc¹, J.-F. Witz¹, L. Thorrez², P. Lecomte-Grosbras¹

¹ Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9013 - LaMcube - Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multi-échelle, F-59000 Lille, France

² Tissue Engineering Lab, Department of Development and Regeneration, KU Leuven, E. Sabbelaan 53, 8500 Kortrijk, Belgique

Résumé —

La modélisation des muscles squelettiques humains présente un intérêt majeur pour la recherche biomédicale, mais sa mise en œuvre pose de nombreux défis en raison de l'anisotropie du tissu musculaire et de la forte influence de sa microstructure. Afin de prendre en compte les caractéristiques uniques de chaque patient, l'objectif de ces travaux est de développer des modèles mécaniques de muscles humains intégrant des paramètres calculés à partir d'images de microstructure.

Mots clés — Muscle humain, Microstructure, Modèle mécanique

Les muscles squelettiques représentent plus de 50% de la masse du corps humain, et participent à la réalisation de nombreux processus vitaux comme la locomotion ou la régulation thermique. L'évaluation et la modélisation de leurs propriétés mécaniques sont donc d'un intérêt majeur en recherche biomédicale, aussi bien pour le traitement de pathologies [12], [19] que pour la modélisation du corps humain [6], [13] ou l'amélioration des techniques chirurgicales [4], [7].

La construction de modèles mécaniques des muscles humains pose cependant toujours de nombreux défis. D'un point de vue expérimental d'abord, comme tout matériau biologique, les muscles présentent une forte variabilité inter- et intra-donneurs [17]. Ils sont également très peu rigides, ce qui implique l'utilisation de moyens expérimentaux et de méthodes adaptées. Ensuite, les muscles présentent plusieurs caractéristiques qui compliquent considérablement leur modélisation. Premièrement, leur structure est fibreuse et très orientée, ce qui rend leur comportement fortement anisotrope [2]. Deuxièmement, les muscles peuvent être hétérogènes et voir leurs propriétés varier spatialement. Troisièmement, les muscles sont capables de se contracter et possèdent en tant que matériau des propriétés actives en plus de leurs propriétés passives. Enfin, leurs propriétés mécaniques macroscopiques sont fortement dépendantes de leurs caractéristiques de microstructure [11]. Du fait de la complexité expérimentale et théorique de la construction de modèles de muscles, un certain nombre de questions et problèmes restent ouverts à ce jour.

En particulier, l'intégration des propriétés de microstructure dans les modèles de comportement mécaniques des muscles squelettiques est un sujet récent dans le domaine. L'organisation des composants de la microstructure a une forte influence sur les propriétés macroscopiques du tissu, avec notamment une incidence sur l'anisotropie. La connaissance de la microstructure d'un tissu musculaire permet donc d'appréhender une partie de son comportement macroscopique, et les modèles musculaires doivent être adaptés en conséquence pour prendre en compte ces informations. En raison de la forte variabilité des propriétés des tissus ainsi que de leur architecture entre les patients, l'intégration de la microstructure (en particulier leur orientation et la densité de fibre) dans les modèles permet une meilleure représentativité des modèles dans le cadre de soins patient-spécifiques, pourvu que les images de microstructure puissent être acquises. L'amélioration constante de la précision et de l'accessibilité des techniques d'imagerie médicales rend désormais ces développements possibles.

Les modèles musculaires ne prenant pas en compte la microstructure se basent principalement sur des

démarches empiriques ou des considérations physiologiques [8], [9], [15]. Dans le but d'inclure des paramètres issus de la microstructure, plusieurs approches ont été proposées. Une première solution consiste à utiliser des modèles éléments finis à l'échelle microscopique pour déterminer le comportement de la microstructure sur un volume représentatif, puis à utiliser des techniques d'homogénéisation pour inclure les résultats dans un modèle macroscopique [11], [18]. Cette approche nécessite de connaître les propriétés mécaniques de chaque composant de la microstructure séparément (collagène, fibres musculaires). Elle est donc peu compatible avec une utilisation médicale à plus large échelle. Dans d'autres études, la géométrie de la microstructure est obtenue à partir de sections histologiques et reconstruite en 3D pour être incluse dans un modèle éléments finis [10], [16] (Figure 1). La nature destructive du procédé empêche cependant ici encore son utilisation en milieu médical pour des applications *in vivo*.

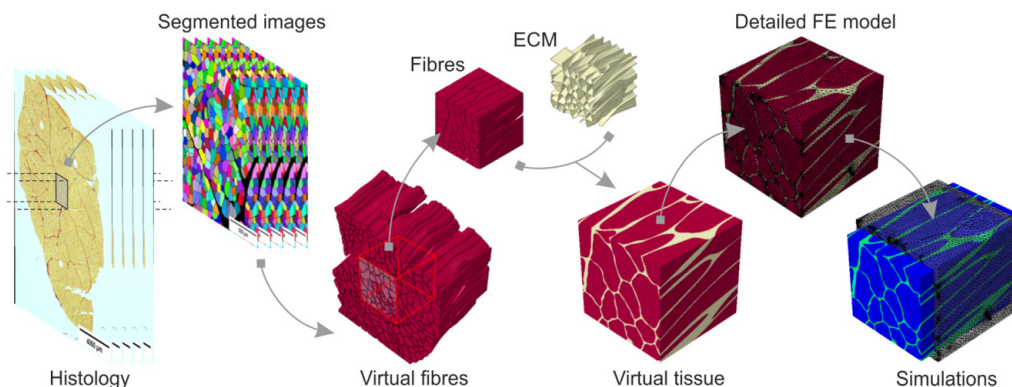


FIGURE 1 – Protocole permettant d'extraire la topologie de la microstructure à partir de sections histologiques.
Extrait de [10].

Une troisième façon d'inclure les informations de microstructure à l'échelle macroscopique consiste à les intégrer directement dans la loi de comportement, via des paramètres d'intérêts calculés à partir d'images microscopiques [1], [3]. Cette méthode présente l'avantage de ne pas nécessiter de simulation de la microstructure, et peut être mise en oeuvre de façon non destructive en utilisant des techniques d'imagerie médicale. Cependant, des améliorations peuvent y être apportées. Notamment, la méthode a été mise en oeuvre en estimant les paramètres de microstructure sur un volume élémentaire représentatif, et en supposant l'homogénéité de ces paramètres sur tout l'échantillon. La prise en compte de l'hétérogénéité des échantillons via une distribution spatiale des paramètres de microstructure constitue l'étape suivante pour l'amélioration de cette technique. Cette piste a déjà été explorée (voir Figure 2), mais jamais mise en oeuvre jusqu'au bout dans le cadre d'une étude sur la modélisation macroscopique de structure. L'utilisation de techniques d'imagerie plus adaptées à une mise en oeuvre en milieu médical que celle précédemment utilisée (microscopie bi-photonique) est également envisagée.

Notre objectif est donc de construire un modèle de comportement mécanique de muscles squelettiques incluant des informations de microstructure obtenues à partir d'images microscopiques, et prenant en compte la répartition spatiale des propriétés de microstructure. Cela implique plusieurs étapes, qui sont détaillées ici : (i) des images de microstructure doivent être acquises sur des échantillons via une technique d'imagerie médicale (ii) les images de microstructure doivent être analysées afin d'en extraire les paramètres d'intérêt (iii) des essais de traction doivent être conduits sur les échantillons, avec une acquisition en temps réel des champs de déformation (iv) une loi de comportement permettant la prise en compte de caractéristiques de microstructure doit être choisie (v) à partir des données d'essais, des images de microstructure et de la géométrie des échantillons, les paramètres matériaux doivent être calculés au moyen de simulations éléments finis (vi) les paramètres matériaux obtenus et la loi de comportement choisie doivent être validés sur des échantillons tests.

La technique d'imagerie à utiliser pour l'acquisition de la microstructure est en cours d'investigation. Plusieurs possibilités sont à l'étude (microscopie confocale, scanner, IRM), et la technique permettant d'obtenir les meilleures informations de texture sera retenue. A partir des images microscopiques obtenues, les paramètres de microstructure envisagés pour l'intégration dans le modèle sont l'orientation locale des fibres musculaires, le facteur d'anisotropie quantifiant l'écart à la moyenne des orientations, ainsi que la densité locale de fibres. Dans les études précédentes, seuls l'orientation et le facteur d'ani-

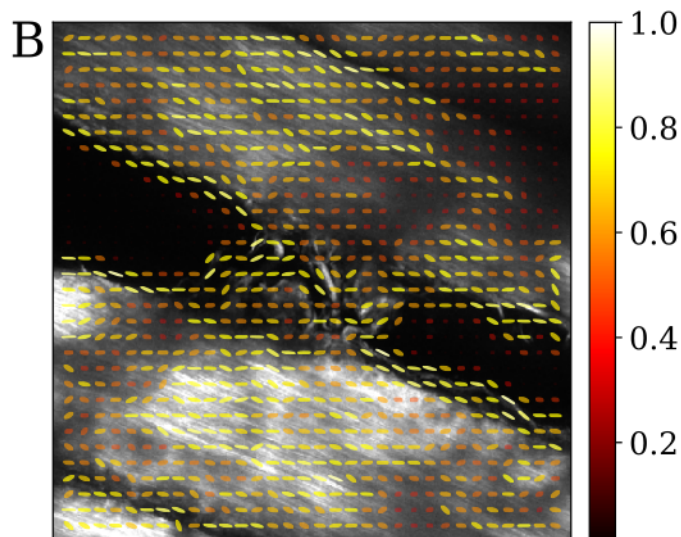


FIGURE 2 – Image 2D d'un échantillon de fascia humain, issue d'une image 3D de microscopie biphotonique, avec indication de l'orientation locale calculée (direction des ellipses) et du facteur d'anisotropie (couleur de l'ellipse). Extrait de [1].

sotropie étaient pris en compte. D'autres paramètres pourront être inclus, s'ils s'avèrent pertinents pour la modélisation du comportement mécanique des muscles. Les algorithmes pour l'analyse des images de microstructures sont déjà existants, mais nécessitent encore des améliorations.

Les machines d'essais pour la mise en oeuvre des essais de traction sont également existantes, et ont déjà servi dans plusieurs campagnes expérimentales [14]. Il en va de même pour le logiciel permettant l'acquisition et le traitement des données d'essais, notamment la corrélation d'images en temps réel pendant les essais pour la détermination des champs de déformation [5]. Pour construire le modèle de muscles, une loi de comportement hyperélastique et anisotrope sera choisie, en bonne adéquation avec les données expérimentales. Le modèle éléments finis des échantillons reste aussi à construire.

Les travaux décrits ici se dérouleront dans les mois à venir, et porteront sur des muscles humains. Dans un premier temps, seul le comportement mécanique passif sera pris en compte. L'intégration du comportement actif fera l'objet d'études ultérieures.

Références

- [1] L. ASTRUC, « Characterization and histologically-based modeling of the mechanical behavior of connective tissues constituting the human abdominal wall, » PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, avr. 2019.
- [2] L. ASTRUC, M. DE MEULAERE, J.-F. WITZ et al., « Characterization of the anisotropic mechanical behavior of human abdominal wall connective tissues, » *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, t. 82, p. 45-50, 2018, ISSN : 1751-6161. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.03.012>.
- [3] L. ASTRUC, A. MORCH, J.-F. WITZ et al., « An anisotropic micro-ellipsoid constitutive model based on a microstructural description of fibrous soft tissues, » *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, t. 131, p. 56-73, 2019, ISSN : 0022-5096. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2019.06.019>.
- [4] M. CHABANAS, V. LUBOZ et Y. PAYAN, « Patient specific Finite Element model of the face soft tissue for computer-assisted maxillofacial surgery, » *Medical image analysis*, t. 7, p. 131-51, juill. 2003. DOI : [10.1016/S1361-8415\(02\)00108-1](https://doi.org/10.1016/S1361-8415(02)00108-1).
- [5] V. COUTY, J.-F. WITZ, C. MARTEL, F. BARI et A. WEISROCK, « CRAPPY : Command and Real-Time Acquisition in Parallelized Python, a Python module for experimental setups, » *SoftwareX*, t. 16, p. 100 848, 2021, ISSN : 2352-7110. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100848>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711021001278>.
- [6] H. GEYER et H. HERR, « A Muscle-Reflex Model That Encodes Principles of Legged Mechanics Produces Human Walking Dynamics and Muscle Activities, » *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, t. 18, n° 3, p. 263-273, 2010. DOI : [10.1109/TNSRE.2010.2047592](https://doi.org/10.1109/TNSRE.2010.2047592).

- [7] B. HERNÁNDEZ-GASCÓN, E. PEÑA, H. MELERO et al., « Mechanical behaviour of synthetic surgical meshes : Finite element simulation of the herniated abdominal wall, » *Acta Biomaterialia*, t. 7, n° 11, p. 3905-3913, 2011, ISSN : 1742-7061. DOI : 10.1016/j.actbio.2011.06.033.
- [8] A. V. HILL, « The maximum work and mechanical efficiency of human muscles, and their most economical speed, » *The Journal of Physiology*, t. 56, n° 1-2, p. 19-41, fév. 1922. DOI : 10.1113/jphysiol.1922.sp001989.
- [9] T. JOHANSSON, P. MEIER et R. BLICKHAN, « A Finite-Element Model for the Mechanical Analysis of Skeletal Muscles, » *Journal of Theoretical Biology*, t. 206, n° 1, p. 131-149, sept. 2000. DOI : 10.1006/jtbi.2000.2109.
- [10] R. KURAVI, K. LEICHSENRING, M. BÖL et A. E. EHRET, « 3D finite element models from serial section histology of skeletal muscle tissue – The role of micro-architecture on mechanical behaviour, » *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, t. 113, p. 104-109, jan. 2021. DOI : 10.1016/j.jmbbm.2020.104109.
- [11] J. LAMSFUSS et S. BARGMANN, « Skeletal muscle : Modeling the mechanical behavior by taking the hierarchical microstructure into account, » *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, t. 122, p. 104-670, 2021, ISSN : 1751-6161. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104670>.
- [12] L. MARCUCCI, M. BONDI, G. RANDAZZO, C. REGGIANI, A. NATALI et P. PAVAN, « Fibre and extracellular matrix contributions to passive forces in human skeletal muscles : An experimental based constitutive law for numerical modelling of the passive element in the classical Hill-type three element model, » *PLOS ONE*, t. 14, e0224232, nov. 2019. DOI : 10.1371/journal.pone.0224232.
- [13] O. MAYEUR, J.-F. WITZ, P. LECOMTE-GROSBRAS, M. BRIEU, M. COSSON et K. MILLER, « Influence of Geometry and Mechanical Properties on the Accuracy of Patient-Specific Simulation of Women Pelvic Floor, » *Annals of biomedical engineering*, t. 44, p. 202-212, juill. 2015. DOI : 10.1007/s10439-015-1401-9.
- [14] A. MORCH, B. POUSEELE, G. DOUCÈDE et al., « Experimental study of the mechanical behavior of an explanted mesh : The influence of healing, » *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, t. 65, p. 190-199, 2017, ISSN : 1751-6161. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.07.033>.
- [15] O. RÖHRLE, J. B. DAVIDSON et A. J. PULLAN, « Bridging Scales : A Three-Dimensional Electromechanical Finite Element Model of Skeletal Muscle, » *SIAM Journal on Scientific Computing*, t. 30, n° 6, p. 2882-2904, jan. 2008. DOI : 10.1137/070691504.
- [16] B. SHARAFI et S. S. BLEMKER, « A micromechanical model of skeletal muscle to explore the effects of fiber and fascicle geometry, » *Journal of Biomechanics*, t. 43, n° 16, p. 3207-3213, déc. 2010. DOI : 10.1016/j.jbiomech.2010.07.020.
- [17] J. A. SIMONEAU et C. BOUCHARD, « Human variation in skeletal muscle fiber-type proportion and enzyme activities, » *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, t. 257, n° 4, E567-E572, 1989. DOI : 10.1152/ajpendo.1989.257.4.E567.
- [18] L. SPYROU, M. AGORAS et K. DANAS, « A homogenization model of the Voigt type for skeletal muscle, » *Journal of Theoretical Biology*, t. 414, p. 50-61, 2017, ISSN : 0022-5193. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2016.11.018>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022519316303836>.
- [19] K. VIRGILIO, K. MARTIN, S. PEIRCE et S. BLEMKER, « Multiscale models of skeletal muscle reveal the complex effects of muscular dystrophy on tissue mechanics and damage susceptibility, » *Interface focus*, t. 5, p. 20140080, avr. 2015. DOI : 10.1098/rsfs.2014.0080.