

Laboratoire de rattachement	LBMC
Encadrant référent Ifsttar	Laure-Lise GRAS (Maitre de conférences, LBMC)
Titre de la thèse en français	Caractérisation et modélisation mécanique du fascia pour l'homme virtuel
Titre de la thèse en anglais	Characterization and modeling of fascia mechanical properties for virtual human
Disciplines de la thèse	Mécanique
Axe du COP 2017-2020	Axe 1 Transporter efficacement et se déplacer en sécurité
Lien avec les thématiques prioritaires de TS2	« L'homme virtuel », « la santé et la mobilité du quotidien »
Lien avec le projet fédérateur de TS2	/
Localisation principale (et secondaire, si besoin, avec temps passés)	LBMC - Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs, UMR_T 9406 IFSTTAR / UCBL1
Ecole doctorale (prévision)	MEGA
Etablissement d'inscription (prévision)	Université Claude Bernard Lyon 1
Directeur (et codirecteur) prévu(s) avec statut et affiliation	Directeur : Karine BRUYERE (DR, LBMC) Co-directeur : Laure-Lise GRAS (Maitre de conférences, LBMC)
Financement prévu	Allocation IFSTTAR
Co financeur ou financeur externe	
Employeur du doctorant	IFSTTAR

CONTEXTE ET OBJECTIF :

La modélisation numérique du corps humain est aujourd'hui un outil important pour mieux appréhender les phénomènes mis en jeu dans la mobilité ou le confort. De tels modèles permettent par exemple de modéliser la marche d'une personne selon différents schémas d'activation musculaire (Halloran et al. 2010 ; Moissenet et al. 2014), ou de modéliser une assise prolongée et d'aider par exemple à la prédiction de l'inconfort (Savonnet et al. 2016). Or pour arriver à ce niveau de description, une connaissance des propriétés mécaniques des différents constituants du système musculo-squelettique est nécessaire.

Au niveau du membre inférieur et en particulier de la cuisse et des fessiers, des recherches sont actuellement menées pour caractériser les propriétés mécaniques des principaux tissus mous du corps humain : la peau, les tissus adipeux et les muscles (Initiative ciblée CatiMouS - Caractérisation des Tissus Mous biologiques Superficiels pour la prédiction de l'inconfort dans les transports, portée par Laura Dubuis, LBMC). Une fois déterminées, ces données seront intégrées à un modèle en éléments finis pour la prédiction de l'inconfort.

Cependant les propriétés mécaniques seules ne sont pas suffisantes pour obtenir un modèle en éléments finis qui puisse rendre compte correctement du comportement du corps humain, notamment quand des mouvements doivent être reproduits. Les interactions entre les différents tissus sont aussi à considérer. En effet, dans le cadre de la thèse de Julien Stelletta (Modélisation volumique déformable du système musculo-squelettique du membre inférieur), et du projet ANR MIME (Approche multi-échelle pour la modélisation personnalisée du système musculo-squelettique porté par le LBMC de 2010 à 2015), une modélisation en éléments finis du membre inférieur a été développée avec comme principal atout la capacité contractile des muscles du modèle. Cependant, une des limites de ce modèle est sa difficulté à transmettre des efforts entre les muscles pendant l'activation musculaire. En effet, dans ce modèle, les muscles sont considérés comme des entités indépendantes les unes des autres, sans connexion directe et

donc sans interaction entre eux. Or comme la plupart des organes et des différentes structures du corps humain, les muscles et groupes de muscles sont entourés et liés par les fascias (Findley et al. 2012).

Les fascias sont des tissus conjonctifs, composés de fibres de collagène et d'élastine, qui peuvent être lâches ou denses selon leur rôle. Ici, nous nous intéressons aux fascias denses qui ont pour fonction principale de gagner les muscles (aponévroses) et les groupes de muscles (comme le fascia lata). Ils participent également à la stabilisation des articulations et à la transmission des efforts entre les muscles (Findley et al. 2012 ; Stecco et al. 2014). Toutefois, leur comportement reste peu connu car les études de caractérisation se focalisent majoritairement sur le muscle. Or une meilleure connaissance des propriétés mécaniques des fascias pourrait avoir plusieurs impacts sur les modélisations utiles à la simulation de la mobilité et à l'évaluation du confort, mais également dans le domaine de la santé. Par exemple les ostéopathes, kinésithérapeutes et médecins du sport qui travaillent sur ces tissus pour diminuer les tensions musculaires ou interviennent dans le cadre de traumatologies sportives, tireraient profit de cette connaissance pour améliorer leurs techniques.

La littérature rapporte quelques rares études in vitro pour la caractérisation des propriétés mécaniques des fascias, pointant un comportement anisotrope, non-linéaire et viscoélastique. Les travaux les plus avancés dans ce domaine sont ceux de Eng et al. 2014 et Pancheri et al. 2014. Ils ont réalisé des essais de traction unidirectionnelle et biaxiale dans le plan sur des fascias lata de chèvre et proposé une loi de comportement pour les caractériser. Néanmoins, cette modélisation suppose une déformation homogène du tissu, c'est à dire indépendante de sa localisation dans le corps, ne prend pas en compte les effets de cisaillement qui peuvent apparaître, et néglige le comportement viscoélastique. Par ailleurs, les sollicitations appliquées au tissu sont assez éloignées des sollicitations réelles et ne tiennent pas compte de l'état de contrainte initial du tissu qui pourtant a des conséquences sur la transmission des efforts entre les muscles.

Les objectifs de cette thèse sont donc de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les propriétés mécaniques des fascias denses ?
- Comment les modéliser et les intégrer dans les modèles complets du corps humain ou d'une partie du corps humain ?
- Comment quantifier le rôle des fascias dans la transmission des efforts entre les muscles, notamment en étudiant la précontrainte exercée par le fascia sur le tissu musculaire ?

En répondant à ces questions, les modèles du corps humain seront améliorés pour être utilisés dans des applications comme l'étude de la mobilité des piétons ou l'étude du confort de l'assise par exemple. Ces recherches s'inscrivent donc dans les thèmes stratégiques du département Transport Santé Sécurité de l'IFSTTAR : « l'homme virtuel en mouvement », « la santé et la mobilité du quotidien », ainsi que dans l'axe 1 « Transporter efficacement et se déplacer en sécurité » du COP 2017-2021, en contribuant au développement des modèles pour « renforcer la sécurité et l'ergonomie des déplacements, pour une mobilité sereine et respectueuse de la vie humaine » (Objectif 2 de l'axe 1).

METHODOLOGIE ET RESULTATS ATTENDUS :

Une approche couplée entre expérimentation et modélisation sera mise en œuvre tout d'abord sur échantillon isolés puis sur tissus in situ.

Sur échantillons isolés, l'objectif est la caractérisation du comportement mécanique des fascias par des essais de traction biaxiale par gonflement et des essais de cisaillement. Les protocoles seront développés en fonction des travaux de la littérature et du savoir-faire du LBMC (Brunon et al. 2011 ; Jayyosi et al. 2016). Ces expérimentations seront réalisées pour des éprouvettes localisées dans différentes zones du fascia, faisant l'hypothèse que la répartition des fibres varie et a un effet sur les propriétés mécaniques locales du tissu. Des moyens comme l'analyse histologique et la microscopie biphotonique (Equipex IVTV) seront mis en œuvre pour analyser la structure microscopique du tissu et faire un lien avec ses propriétés macroscopiques. Il est attendu ensuite l'identification par méthode inverse (méthode des éléments finis, et méthode des éléments discrets) des paramètres d'une loi de comportement du fascia à définir.

In situ, des essais de lacération du fascia sur muscle sont envisagés pour caractériser la précontrainte et la

pré-déformation exercées par le fascia sur le tissu musculaire. Elles seront déterminées en combinant expérimentation et modélisation en éléments finis. Ces données seront couplées aux résultats sur échantillons isolés pour modéliser le muscle et ses fascias dans les modèles d'être humain virtuel.

L'ensemble de ces méthodes et résultats constituera une étape importante dans la compréhension du rôle mécanique des fascias dans le système musculo-squelettique. Les connaissances et modélisations développées pourront être intégrées à des modèles musculo-squelettiques pour étudier la transmission des efforts musculaires et la stabilité des articulations. L'analyse expérimentale pourra éventuellement être étendue à des expérimentations in vivo.

COLLABORATIONS ET VALORISATIONS :

Pour mener à bien ces travaux, la collaboration avec l'Institut de Biomécanique Humaine Georges Charpak sur la partie modélisation en éléments discrets des fascias se poursuivra ; d'autres seront initiées avec des physiologistes et biologistes pour la partie histologie et compréhension de la microarchitecture et de la composition des fascias ; et avec des ostéopathes, médecin du sport ou kinésithérapeutes pour la mise en place de protocoles expérimentaux in vivo et la compréhension de la transmission des forces.

Ces travaux seront valorisés par des publications dans des revues scientifiques internationales couvrant le domaine de la biomécanique (Journal of Biomechanics, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, ...) et à des communications en congrès internationaux de biomécanique (European society of biomechanics, international society of biomechanics, ...) ou de recherche sur les fascias (Fascia research congress).

PROFIL DU CANDIDAT :

Titulaire d'un master en mécanique ou biomécanique ou d'un diplôme équivalent, le/la candidat(e) devra avoir de bonnes connaissances en mécanique, notamment en matériaux, mécanique des milieux continus et modélisation en éléments finis. Il devra faire preuve d'une forte motivation et de compétences en communication, rédaction et gestion du temps. Une première expérience en expérimentation ou en modélisation sera appréciée.

REFERENCES :

- Brunon A. et al. 2011. J Mech Behav Biomed Mater, 4(8):1572-81. doi: 10.1016/j.jmbbm.2010.12.016
Eng C.M. et al. 2014. Ann Biomed Eng, 42(6):1224-1237. doi: 10.1007/s10439-014-0999-3
Findley T. et al. 2012. J Bodyw Mov Ther, 16(1):67-75. doi: 10.1016/j.jbmt.2011.09.004
Halloran J.P. et al. 2010. J Biomech, 43(14):2810-5. doi: 10.1016/j.jbiomech.2010.05.036
Jayyosi C. et al. 2016. J Mech Behav Biomed Mater, 54:229-43. doi: 10.1016/j.jmbbm.2015.09.031
Moissenet F. et al. 2014. J Biomech, 47(1):50-8. doi: 10.1016/j.jbiomech.2013.10.015
Pancheri F.Q. et al. 2014. J Mech Behav Biomed Mater, 30:306-323. doi: 10.1016/j.jmbbm.2013.12.002
Savonnet L. et al. 2016. Digital Human Modeling conference 2016, Montreal.
Stecco A. et al. 2014. Surg Radiol Anat, 36(1):25-32. doi: 10.1007/s00276-013-1152-y

MOTS CLEFS : Biomécanique, fascia, expérimentation, loi de comportement, modélisation

CONTEXT AND OBJECTIVE:

Human body models are important tools to better understand what phenomena are at stake for instance during walking (Halloran et al., 2010, Moissenet et al., 2014), or for different postures such as sitting (Savonnet et al., 2016). However, to reach this level of description, knowledge on mechanical properties of the musculoskeletal system components is necessary.

At the lower limb level and in particular the thigh and buttocks, research is currently conducted to characterize the mechanical properties of the main soft tissues of the human body: skin, adipose tissue and muscles. Once mechanical properties are identified, they will be implemented in a finite element model for predicting discomfort. However, the mechanical properties alone are not enough to obtain a finite element model that can correctly account for the human body behavior, especially when movements have to be reproduced. Interactions between the different tissues are also to be considered. Indeed, a finite element model of the lower limb developed in our lab, and that can reproduce muscular activity, has to be improved in order to reproduce properly force transmission between muscles. This is related to the fact that for this model, muscles are considered as independent entities, without direct connection between them. While, like most organs and structures of the human body, muscles and muscles' groups are surrounded and connected by fascia (Findley et al., 2012).

Fascia is a connective tissue composed of collagen and elastin fibers, which may be loose or dense depending on its role. Here, we are interested in dense fascia whose main function is to sheath muscle (aponeurosis) and muscles' groups (such as fascia lata). It also contributes to joints stability and to force transmission between muscles (Findley et al., 2012 and Stecco et al., 2014). A better knowledge of fascia mechanical properties could have several impacts for models dedicated to mobility and comfort, but also in the field of health. For example, osteopaths or physiotherapists who work on these tissues to reduce muscular tension or sports trauma, could benefit from this knowledge in order to improve their techniques.

Literature reports few in vitro studies dealing with fascia mechanical properties characterization. They point out its anisotropic, non-linear and viscoelastic behavior. The most advanced works in this area are by Eng et al. 2014 and Pancheri et al. 2014. They carried out unidirectional and biaxial tensile tests on goat fascia lata and proposed an associated constitutive law. Nevertheless, this modeling assumes a homogeneous strain of the tissue, does not take into account shear effects, and neglects the viscoelastic behavior. Moreover loadings applied to the tissue are quite far from the physiological loadings and tissue pre-stress which can affect its ability to transmit forces between muscles is not considered.

Therefore, the objectives of this work are to answer the following questions:

- What are dense fascia mechanical properties?
- How can we model and implement these properties into human body models?
- How can we quantify fascia's role in the transmission of forces between muscles, in particular by studying pre-stress exerted by fascia on muscular tissue?

By answering these questions, human body models will be improved for use in applications such as the study of pedestrian mobility or car seat comfort.

METHODOLOGY AND EXPECTED RESULTS:

Experimentation and modeling will be carried out together, first on isolated samples and then on larger samples in situ.

Regarding samples, the aim is to characterize the mechanical properties of fascia with biaxial tensile tests by swelling and shear tests. The experimental protocols will be developed according to the literature and the expertise of LBMC (Brunon et al. 2011 ; Jayyosi et al. 2016). These experiments will be performed on samples located in different areas of fascia, assuming that the distribution of fibers varies and has an effect on the fascia local mechanical properties. Techniques such as histological analysis and bi-photon microscopy (Equipex IVTV) will be used to analyze the microscopic structure of the tissue, and link these properties with macroscopic ones. It is expected that the parameters of a constitutive law will be identified

using an inverse approach with finite element modeling, or discrete element modeling.

In situ, fascia laceration tests on an isolated muscle are intended to characterize the pre-stress and pre-strain exerted by the fascia on muscle tissue. These characteristics will be determined by combining experimental and finite element analysis. These data will be useful to model the muscle and fascia in virtual human body models.

All these methods and results will contribute to the understanding of the fascia's role in joint stability, and will be extended to the study of force transmission between muscles thanks to musculoskeletal models and additional in vitro experiments or in vivo experiments.

COLLABORATIONS AND VALORIZATION STRATEGY:

To carry out this work, collaborations regarding discrete elements models, fascia's histology and microarchitecture, and muscle force transmission will be initiated with other research teams, including mechanics, biologists and physiologists, as well as osteopaths or physiotherapists.

Publications in international scientific journals covering the field of biomechanics (Journal of Biomechanics, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, ...) and participation at international congresses on biomechanics (European society of biomechanics, international society of biomechanics, ...) or fascia research (Fascia research congress) are expected to value the work.

CANDIDATE PROFILE: The candidate should hold a Master degree or equivalent in mechanics or biomechanics. He/she will have knowledge in continuum mechanics, materials and finite element modeling. He/she will have to demonstrate strong motivation and good writing and communicating skills. A first experience in modeling or experimentation will be appreciated.

REFERENCES:

- Brunon A. et al. 2011. J Mech Behav Biomed Mater, 4(8):1572-81. doi: 10.1016/j.jmbbm.2010.12.016
Eng C.M. et al. 2014. Ann Biomed Eng, 42(6):1224-1237. doi: 10.1007/s10439-014-0999-3
Findley T. et al. 2012. J Bodyw Mov Ther, 16(1):67-75. doi: 10.1016/j.jbmt.2011.09.004
Halloran J.P. et al. 2010. J Biomech, 43(14):2810-5. doi: 10.1016/j.jbiomech.2010.05.036
Jayyosi C. et al. 2016. J Mech Behav Biomed Mater, 54:229-43. doi: 10.1016/j.jmbbm.2015.09.031
Moissenet F. et al. 2014. J Biomech, 47(1):50-8. doi: 10.1016/j.jbiomech.2013.10.015
Pancheri F.Q. et al. 2014. J Mech Behav Biomed Mater, 30:306-323. doi: 10.1016/j.jmbbm.2013.12.002
Savonnet L. et al. 2016. Digital Human Modeling conference 2016, Montreal.
Stecco A. et al. 2014. Surg Radiol Anat, 36(1):25-32. doi: 10.1007/s00276-013-1152-y

KEY WORDS: Biomechanics, fascia, experimentation, constitutive law, modeling