

Titre de la thèse	Développement d'un modèle numérique de verge implantée, en vue de l'étude des performances des implants péniers gonflables
PhD title in English	Development of a calibrated numerical model of an implanted penis, in order to study the performances of inflatable implants
Lieu de travail principal	LBMC (Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs) UMR_T9406 Univ. Lyon, Univ. Eiffel
Encadrants	Karine Bruyère (karine.bruyere-garnier@univ-eiffel.fr), directrice de thèse Marc Gardegaront (marc.gardegaront@univ-eiffel.fr), co-encadrant Mélanie Ottenio (melanie.ottenio@univ-lyon1.fr), co-encadrante Paul Neuville (paul.neuville@chu-lyon.fr), co-directeur de thèse

Contexte :

La dysfonction érectile est une pathologie très fréquente ayant une incidence annuelle de 19,2 à 26 cas / 1000 hommes selon les études (Salonia et al., 2021). Elle peut être la conséquence d'athérosclérose, de diabète, de troubles neurologiques, de chirurgies pelviennes carcinologiques, de malformations ou de fibrose (maladie de Lapeyronie) (Yafi et al., 2016). Cette pathologie entraîne une souffrance importante chez les patients. Lorsque les traitements pharmacologiques oraux ou injectables s'avèrent inefficaces, le traitement de choix est l'implant pénien gonflable qui procure la possibilité d'une activité sexuelle avec pénétration sans modifier les fonctions urinaires, éjaculatoires ou orgasmiques (Levine et al., 2010). Malheureusement, de nombreux patients sous-utiliseraient leur dispositif en raison de difficultés d'utilisation de la pompe (préhension difficile, manque de force), entraînant une impossibilité d'obtenir une rigidité permettant une satisfaction optimale (Habous et al., 2018). Au-delà de l'évaluation de la capacité manuelle des patients, l'analyse des phénomènes mécaniques mis en jeu dans la mise en érection d'un pénis implanté est aussi essentielle en vue de l'optimisation des implants. Les comportements mécaniques des tissus biologiques en interaction avec l'implant - en premier lieu l'albuginée - qui expliquent largement la réponse mécanique de la verge lors du gonflement de l'implant, sont mal connus. Même si des études récentes ont permis de caractériser le comportement mécanique échantillons de tissus péniers (Berardo et al., 2024; Bielajew et al., 2023; Khorshidi et al., 2024), leur rôle in situ n'a pas été quantifié.

Dans ce contexte, des modèles numériques de verge avec implant gonflable prenant en compte le comportement complexe des tissus impliqués dans l'érection du pénis implanté permettraient de mieux comprendre et de quantifier les mécanismes biomécaniques en jeu lors du gonflement des implants. Quelques modélisations simples d'implant ou de verges saines ont été faites (Gefen et al., 2002; Timm et al., 2008; Udelson et al., 1998). Plus récemment, des modèles de pénis sain plus détaillés ont été publiés (Drlík et al., 2021; Fereidoonhezad et al., 2023). Cependant, les modèles numériques existants sont encore très inaboutis et n'impliquent pas d'implant pénien gonflable. En particulier, quantifier la raideur d'un pénis implanté en fonction de la pression dans l'implant est essentiel sur le plan clinique car la rigidité est directement liée à la satisfaction du patient et de sa partenaire. D'un point de vue mécanique, comprendre le rôle de l'arrangement des fibres de collagène de l'albuginée et le comportement des textiles incluent dans les parois d'implant lors du gonflement de l'implant est aussi un point important. Ainsi, l'utilisation d'un modèle de verge implantée permettrait d'établir un lien entre pression de l'implant et rigidité pénienne et ouvrirait la voie à une optimisation de l'implant et une meilleure prise en charge des patients.

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre les biomécaniciens du LBMC et les urologues du service d'urologie et d'andrologie de l'hôpital Lyon Sud, premier service de chirurgie reconstructrice génito-urinaire et prothétique en France depuis plus de vingt ans, et à l'origine du développement industriel avec Mayor-group/ZSI de plusieurs implants génitaux. Les premiers travaux de cette collaboration ont été financés par Shapemed@Lyon dans le cadre d'un projet amorçage (OPTIMEG). Des expérimentations *ex vivo* de caractérisation du comportement des tissus péniers ont été réalisées et sont en cours de valorisation. Une étude clinique visant à mettre en relation les capacités manuelles des patients porteurs de prothèse pénienne gonflable et la rigidité de l'érection pouvant être atteinte, est aussi en cours de réalisation.

Objectifs :

L'objectif de cette thèse est la modélisation du comportement mécanique d'une verge implantée avec un implant pénien gonflable. Plus précisément, il s'agira de déterminer les déformations de la verge implantée lors du gonflement de l'implant et sa rigidité en fonction de la pression interne de l'implant. Ce travail s'appuiera sur des essais de caractérisation *ex vivo*, et nécessitera de construire des modèles analytiques et des modèles en éléments finis de la verge implantée pour

comprendre le comportement mécanique des composants majeurs (paroi d'implant, tissus péniens environnant, liaisons pelvienne et distale) et reproduire le comportement mécanique de l'ensemble.

Méthodologies :

Tout d'abord, une étude bibliographique permettra de s'approprier l'anatomie masculine de la zone pelvienne et les problématiques médicales liées à la pose d'implants péniens gonflables, et d'analyser les modélisations du pénis déjà réalisées. Une période de prise en main des outils nécessaires au développement de modèles analytiques et de modèle en éléments finis sera prévue.

La modélisation en éléments finis de l'implant dans son environnement anatomique sera réalisée sur le solveur LS-Dyna. En parallèle une modélisation analytique sera aussi réalisée. Dans un premier temps, des géométries idéalisées seront utilisées. Il s'agira de sélectionner et d'identifier des lois de comportement non linéaires anisotropes pour modéliser l'albuginée et la paroi d'implant à partir des résultats expérimentaux obtenus précédemment. La modélisation analytique sera exploitée pour étudier le rôle de l'arrangement des fibres de l'albuginée et des orientations des textiles utilisés dans les parois d'implants dans les mécanismes de déformations de la verge lors du gonflement de l'implant. Au-delà de l'identification des lois de comportements des matériaux dans la simulation du gonflement, la modélisation en éléments finis permettra des analyses de la transmission des efforts lors de la compression axiale et de la flexion de la verge implantée avec des géométries plus réalistes (intégration du l'embout de l'implant et du gland, liaison de l'implant avec le pelvis). Ces géométries seront extraites d'imagerie IRM.

Le développement de ces modèles s'accompagnera de la réalisation de nouvelles expérimentations ex vivo (sur corps légués à la science). Ces expérimentations viseront à quantifier in situ les mécanismes et niveaux de déformation de l'albuginée lors du gonflement de l'implant, et à quantifier le comportement de la verge implantée sous des chargement de type compression axiale et flexion pour différents niveaux de pression de l'implant. Ces données expérimentales permettront d'une part de positionner le niveau de déformation de l'albuginée in situ par rapport au comportement de ce tissu biologique évalué sur échantillons isolés, et d'autre part de valider les simulations réalisées.

Profil du candidat ou de la candidate

Etudiant ou étudiante de niveau M2, ou équivalent, en Mécanique; des compétences en programmation (pré-post-traitement des données) et en simulation par éléments finis seront appréciées.

Contact :

Envoyer CV et notes de master 2 à karine.bruyere-garnier@univ-eiffel.fr, avant le 9 mai 2025

Bibliographie

- Berardo, A., Mascolini, M.V., Fontanella, C.G., Contran, M., Todesco, M., Porzionato, A., Macchi, V., De Caro, R., Boscolo-Berto, R., Carniel, E.L., 2024. Mechanical Characterization of the Male Lower Urinary Tract: Comparison among Soft Tissues from the Same Human Case Study. *Appl. Sci.* 14, 1357. <https://doi.org/10.3390/app14041357>
- Bielajew, B.J., Nordberg, R.C., Hu, J.C., Athanasiou, K.A., Eleswarapu, S.V., 2023. Tissue anisotropy and collagenomics in porcine penile tunica albuginea: Implications for penile structure-function relationships and tissue engineering. *Acta Biomater.* 169, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2023.08.017>
- Drlik, P., Červenka, V., Červenka, J., 2021. Biomechanical Simulation of Peyronie's Disease. *Appl. Bionics Biomech.* 2021, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2021/6669822>
- Fereidoonzhad, B., Akbarzadeh Khorshidi, M., Bose, S., Watschke, B., Mareena, E., Nolan, D., Cooney, S., Lally, C., 2023. Development of in silico models to guide the experimental characterisation of penile tissue and inform surgical treatment of erectile dysfunction. *Comput. Biol. Med.* 166, 107524. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2023.107524>
- Gefen, A., Elad, D., Chen, J., 2002. Biomechanical aspects of Peyronie's disease in development stages and following reconstructive surgeries. *Int. J. Impot. Res.* 14, 389–396. <https://doi.org/10.1038/sj.ijir.3900866>
- Khorshidi, M.A., Bose, S., Watschke, B., Mareena, E., Lally, C., 2024. Characterisation of human penile tissue properties using experimental testing combined with multi-target inverse finite element modelling. *Acta Biomater.* 184, 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2024.06.035>
- Levine, L., Benson, J., Hoover, C., 2010. Inflatable Penile Prosthesis Placement in Men with Peyronie's Disease and Drug-resistant Erectile Dysfunction: A Single-Center Study. *J. Sex Med.* 7, 3775–3783. <https://doi.org/10.1111/j.1743-6109.2010.01971.x>
- Salonia, A., Bettocchi, C., Boeri, L., Capogrosso, P., Carvalho, J., Cilesiz, N.C., Cocci, A., Corona, G., Dimitropoulos, K., Gül, M., Hatzichristodoulou, G., Jones, T.H., Kadioglu, A., Martínez Salamanca, J.I., Milenkovic, U., Modgil, V., Russo, G.I., Serefoglu, E.C., Tharakan, T., Verze, P., Minhas, S., EAU Working Group on Male Sexual and Reproductive Health, 2021. European Association of Urology Guidelines on Sexual and Reproductive Health-2021 Update: Male Sexual Dysfunction. *Eur. Urol.* 80, 333–357. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2021.06.007>
- Timm, G.W., Elayaperumal, S., Hegrenes, J., 2008. Biomechanical analysis of penile erections: penile buckling behaviour under axial loading and radial compression. *BJU Int.* 102, 76–84. <https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2008.07569.x>
- Udelson, D., Nehra, A., Hatzichristou, D.G., Azadzi, K., Moreland, R.B., Krane, J., Saenz de Tejada, I.S., Goldstein, I., 1998. Engineering analysis of penile hemodynamic and structural-dynamic relationships: Part I—Clinical implications of penile tissue mechanical properties. *Int J Impot Res* 10, 15–24. <https://doi.org/10.1038/sj.ijir.3900310>
- Yafi, F.A., Jenkins, L., Albersen, M., Corona, G., Isidori, A.M., Goldfarb, S., Maggi, M., Nelson, C.J., Parish, S., Salonia, A., Tan, R., Mulhall, J.P., Hellstrom, W.J.G., 2016. Erectile dysfunction. *Nat. Rev. Dis. Primer* 2, 16003. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2016.3>