

Avis de Soutenance

Madame Sibylle GREGOIRE

Ingénierie biomédicale

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Elastographie passive des vaisseaux sanguins par ondes de pouls de flexion et micro-élastographie.

Travaux dirigés par Monsieur Stefan CATHELIN

Soutenance prévue le **vendredi 17 avril 2026** à 14h00

Lieu : Lyon 1 Université Salle de Conférence LabTAU 151 Cours Albert Thomas 69003 Lyon

Composition du jury proposé

M. Stefan CATHELIN	Directeur de recherche	INSERM Lyon	Directeur de thèse
Mme Sabine BENSAMOUN	Directrice de recherche	CNRS Compiègne	Rapporteuse
M. Emmanuel BOSSY	Professeur des universités	Université Grenoble Alpes	Rapporteur
M. Michel CAMPILLO	Professeur émérite	Université Grenoble Alpes	Examineur
Mme Charlotte RIVIERE	Professeure des universités	Université Lyon 1	Examinatrice
M. Mickael TANTER	Directeur de recherche	INSERM Paris	Examineur
Mme Elisa KONOFAGOU	Professeure	Université Columbia New-York Etats-Unis	Examinatrice
M. Fabrice LEMOULT	Maître de conférences	ESPCI Paris	Examineur

Mots-clés : Elastographie dynamique, Elastographie par ultrasons, Ondes de pouls, Elasticité des vaisseaux sanguins, Caractérisation mécanique de la matière molle, Micro-élastographie

Résumé :

L'élastographie étudie les ondes élastiques pour caractériser mécaniquement la matière molle. Cette thèse s'intéresse aux objets mésoscopiques, allant de quelques centaines de micromètres pour des biopsies d'endomètre à quelques millimètres pour des vaisseaux sanguins. Les ondes élastiques sont détectées par des méthodes optiques, ultrasonores ou radiographiques. L'élasticité des artères est un biomarqueur de la santé cardiovasculaire. Les ondes de pouls, qui sont des ondes guidées dans les parois des artères, sont générées par le battement cardiaque et se propagent dans tout le système vasculaire. L'onde de pouls standard, décrite par la formule de Moens-Korteweg, est classiquement étudiée pour déterminer l'élasticité des artères. Récemment, une onde de pouls de flexion correspondant à des déplacements antisymétriques des parois artérielles a été observée in vivo. Ce mode se caractérise par une vitesse plus lente que le mode standard ce qui est prometteur pour la mesure de l'élasticité. Cette thèse explore les possibilités de son utilisation pour

l'élastographie des vaisseaux sanguins de la rétine, du cou et du cœur. Un dispositif expérimental d'élastographie optique permettant de caractériser les ondes de flexion dans des modèles d'artères en polymère est utilisé pour proposer un modèle de propagation pour ces ondes. Basé sur la théorie des poutres, il permet de relier les mesures expérimentales au paramètre d'intérêt clinique : l'élasticité. Les résultats d'élastographie passive sont comparés à des mesures actives, pour lesquelles les ondes de flexion ne sont pas générées par le battement cardiaque, mais par un vibreur en contact avec la peau. Le modèle de propagation est appliqué in vivo et les limites de sa validité sont discutées. Les ondes de pouls de flexion sont ensuite étudiées pour le développement de la radio-élastographie. Bien que largement étudiée en imagerie ultrasonore, par résonance magnétique et optique, l'élastographie n'a pas été étendue à l'imagerie par rayons X en raison de défis techniques: la faible cadence d'échantillonnage et l'intégration d'informations volumiques dans le plan d'imagerie. On montre expérimentalement qu'une solution possible consiste à étudier une onde lente le long d'une structure unidimensionnelle : une onde de flexion le long d'un tube. On applique cette méthode in vivo, permettant ainsi d'estimer l'élasticité coronarienne. Ces premiers résultats ouvrent la voie à la radio-élastographie des vaisseaux sanguins. On s'intéresse ensuite à la vitesse de l'onde de pouls rétinienne, qui est étudiée comme biomarqueur de diagnostic précoce des maladies cardiovasculaires. L'onde de pouls de flexion a été observée pour la première fois sur des images de la rétine acquises par holographie laser Doppler. On réalise la même mesure en remplaçant l'imagerie interférométrique complexe par un ophthalmoscope, et en utilisant un smartphone pour acquérir les images. La faisabilité de la mesure de la vitesse d'ondes de pouls est démontrée. Il s'agit de science low-tech, portable et peu coûteuse. En parallèle des travaux sur l'onde de pouls, la micro-élastographie à l'échelle mésoscopique de la biopsie est étudiée puis appliquées dans le cadre d'un essai clinique sur l'endométriome. Cette pathologie se caractérise par la présence de tissu endométrial en dehors de l'utérus, formant des lésions appelées endomètre ectopique. On caractérise tout d'abord l'élasticité de l'endomètre dans un contexte sain et pathologique. On étudie ensuite l'élasticité de l'endomètre comme potentiel biomarqueur de l'endométriome. Les résultats montrent que l'endomètre eutopique, i.e à sa place physiologique, ne semble pas être un biomarqueur de la pathologie. Dans le groupe endométriome, l'endomètre ectopique est significativement plus rigide que l'endomètre eutopique. Cette étude ouvre la voie à l'utilisation de l'élasticité de l'endomètre ectopique comme biomarqueur prédictif de l'efficacité des traitements.

Summary:

Elastography uses elastic waves to analyse the mechanical properties of soft tissue. This thesis focuses on mesoscopic objects ranging in size from a few hundred micrometres for endometrial biopsies to a few millimetres for blood vessels. Elastic waves can be detected using optical, ultrasonic or radiographic methods. Arterial elasticity is a biomarker of cardiovascular health. Pulse waves are generated by the heartbeat and propagate throughout the vascular system; they are waves guided through the walls of the arteries. The standard pulse wave, described by the Moens-Korteweg formula, is traditionally used to determine arterial elasticity. Recently, a flexural pulse wave corresponding to antisymmetric displacements of the arterial walls has been observed in vivo. This mode is characterised by a slower velocity than the standard mode, making it promising for measuring elasticity. This thesis explores the potential applications of this wave for elastography of the blood vessels in the retina, neck and heart. An experimental optical elastography setup is used to characterise flexural waves in an arterial phantom. Thanks to this setup and finite element simulations, we propose a propagation model. Based on beam theory, this model links experimental measurements to the clinically relevant parameter of elasticity. The results of passive elastography are compared with active measurements, in which flexural waves are generated by a shaker in contact with the skin rather than by the heartbeat. The propagation model is then applied in vivo, and its limitations are discussed. Flexural pulse waves are then studied to develop

radioelastography. Although elastography has been widely studied in ultrasound, magnetic resonance and optical imaging, it has not yet been extended to X-ray imaging due to technical challenges such as low sampling rates and difficulties in integrating volumetric information into the imaging plane. We demonstrate experimentally that one possible solution is to study a slow wave along a one-dimensional structure, such as a flexural wave along a tube. We applied this method to *in vivo* coronary angiographies, thereby enabling the estimation of coronary elasticity. These initial results pave the way for radio-elastography of blood vessels. We then focus on the speed of the retinal pulse wave as a potential biomarker for the early diagnosis of cardiovascular disease. The flexural pulse wave was first observed in images of the retina acquired using laser Doppler holography. The same measurement can be performed using an ophthalmoscope and a smartphone instead of complex interferometric imaging. We have demonstrated the feasibility of measuring pulse wave velocity by acquiring the fundus of volunteers. This approach is low-tech, portable and affordable. In parallel with work on pulse waves, mesoscopic micro-elastography of biopsies is being studied and then applied in a clinical trial on endometriosis. Endometriosis is characterised by the presence of endometrial tissue outside the uterus, forming lesions known as ectopic endometrium. First, the elasticity of the endometrium is characterised in both healthy and pathological contexts. Next, its elasticity is studied as a potential endometriosis biomarker. The results show that the eutopic endometrium (i.e. the endometrium in its physiological location) does not appear to be a biomarker for the disease. In the endometriosis group, however, the ectopic endometrium is significantly stiffer than the eutopic endometrium. This study paves the way for the use of ectopic endometrial elasticity as a predictive biomarker of treatment efficacy.