

# Vers l'évaluation du risque de rupture des anévrismes intracrâniens : caractérisation mécanique *in vivo* de la paroi artérielle

## Résumé

Les anévrismes intracrâniens constituent une pathologie critique de santé publique liée à la dégradation de la paroi d'artères cérébrales. Il n'existe actuellement aucune méthode permettant d'estimer le risque de rupture d'un anévrisme qui prenne en compte les propriétés mécaniques *in vivo* de la paroi anévrismale, pourtant reconnues comme essentielles dans le phénomène de rupture. Ce travail de doctorat s'inscrit dans un projet de grande envergure visant à améliorer les critères d'intervention, actuellement disponibles pour les praticiens, en développant un outil d'aide à la décision non invasif se basant sur l'état mécanique du tissu pour en évaluer la probabilité de rupture. Cet outil reposera sur la définition d'une relation entre la forme de l'anévrisme observé par imagerie clinique et une base de données contenant un ensemble d'images cliniques issues d'études préalables, associées aux propriétés mécaniques *in vivo* de la paroi et à une caractérisation de sa rupture. Pour produire cette base de données, un dispositif de déformation de la paroi anévrismale est développé dans le cadre du projet global. Ce travail doctoral se focalise sur (1) la calibration, l'optimisation et les tests *in vitro* de ce dispositif sur artères fantômes et (2) l'application *in vivo* du dispositif sur un modèle animal d'anévrisme intracrânien. Pour ce faire, un modèle numérique de l'expérimentation *in vitro* a été implémenté et validé au regard des résultats expérimentaux, grâce au développement d'une méthode de validation originale. Ce modèle éléments finis d'interaction fluide-structure a permis d'appréhender les incertitudes d'utilisation du dispositif au sein de l'anévrisme et d'aider au dimensionnement des artères fantômes. Le meilleur compromis en termes d'épaisseur et de souplesse de la paroi des artères fantômes a ainsi été identifié compte tenu des limites des techniques de fabrication. De plus, une procédure d'analyse inverse a été développée de sorte à estimer les caractéristiques mécaniques de la paroi anévrismale *in vivo*. Son utilisation repose sur la quantification de la déformation engendrée par le dispositif et visualisée par scanner spectral à comptage photonique, technique d'imagerie médicale émergente dont les résolutions spatio-temporelles permettent une sollicitation contrôlée du tissu sans risque accru de rupture. Les propriétés mécaniques identifiées sont cohérentes avec celles issues des caractérisations *ex vivo* d'anévrismes similaires disponibles dans la littérature. Enfin, un premier critère de rupture patient-spécifique de la paroi anévrismale, prenant en compte l'état de contrainte *in vivo* dans le tissu, a été proposé.

**Mots-clés :** anévrisme intracrânien, caractérisation mécanique, éléments finis, interaction fluide-structure, artères fantômes, modèle animal, scanner spectral à comptage photonique, analyse inverse, critère de rupture.

# Towards the rupture risk assessment of intracranial aneurysms: *in vivo* mechanical characterisation of the arterial wall

## Abstract

Intracranial aneurysms are a critical public health condition linked to the degradation of the cerebral artery wall. There is currently no method for estimating the risk of aneurysm rupture that takes into account the *in vivo* mechanical properties of the aneurysm wall, which are believed to be essential in the rupture phenomenon. This doctoral work is part of a large-scale project aimed at improving the intervention criteria currently available to practitioners by developing a non-invasive decision-support tool based on the mechanical state of the tissue to assess the probability of rupture. This tool will be based on the definition of a relationship between the shape of the aneurysm observed by clinical imaging and a database containing a set of clinical images from previous studies, associated with the *in vivo* mechanical properties of the wall and a characterisation of the rupture. To produce this database, an aneurysm wall deformation device was developed as part of the overall project. This doctoral work focuses on (1) the calibration, the optimisation and *in vitro* testing of this device on phantom arteries and (2) the *in vivo* application of the device on an animal model of intracranial aneurysm. To do this, a numerical model of the *in vitro* experiment was implemented and validated against the experimental results by developing an original validation method. This finite element model of fluid-structure interaction was used to understand the uncertainties involved in using the device within the aneurysm and to help for dimensioning the phantom arteries. The best compromise in terms of phantom artery wall thickness and flexibility was identified, taking into account the limitations of the fabrication techniques. In addition, an inverse analysis procedure was developed to estimate the mechanical characteristics of the aneurysm wall *in vivo*. Its use is based on quantifying the deformation generated by the device and visualised by spectral photon-counting computed tomography, an emerging medical imaging technique whose spatio-temporal resolutions allow controlled stressing of the tissue without increasing the risk of rupture. The mechanical properties identified were consistent with those derived from *ex vivo* characterisations of similar aneurysms available in the literature. Finally, a first patient-specific criterion for rupture of the aneurysm wall, taking into account the state of stress *in vivo* in the tissue, was proposed.

**Keywords:** intracranial aneurysm, mechanical characterisation, finite elements method, fluid-structure interaction, phantom arteries, animal model, Spectral Photon Counting Computed Tomography, inverse analysis, rupture criterion.