

Application of the PFEM to the study of blood flows and their interactions with artery walls

Auteur : Delhez, Jeanne

Promoteur(s) : Ponthot, Jean-Philippe

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil biomédical, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20394>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Application of the PFEM to the study of blood flows and their interactions with artery walls

Jeanne Delhez

Supervisor - J.-P. Ponthot

Master of Science in Biomedical Engineering - University of Liège

Academic year 2023-2024

Abstract

Keywords: cardiovascular diseases, biomechanics, aneurysm, aortic valve, wall shear stress, atherosclerosis, hemodynamics, flexible artery wall, Casson fluid, Mooney-Rivlin material, fluid structure interaction, PFEM, numerical modeling.

Cardiovascular diseases are a leading cause of mortality in Belgium and worldwide, with projections indicating a concerning rise in related deaths. Understanding the hemodynamics and biomechanical mechanisms underlying vascular failure is essential for advancing diagnostic and therapeutic strategies. In this context, computational models offer a promising tool that can really improve patient care. In particular, fluid-structure interaction algorithms have found significant applications in cardiovascular engineering, in coupling simulations of blood flows with the mechanical responses of blood vessels.

This thesis focuses on the computational modeling of the fluid-structure interaction of artery walls and blood flows as a means of assessing different biomechanical aspects. For this, the flow-structure interaction problem is addressed using a partitioned approach with a strong coupling of PFEM (for the fluid) and FEM (for the solid) models. This work relies on the PFEM3D and Metafor codes and exploits the synchronization and communication framework FSPC, all developed in the LTAS-MN2L lab of ULiège. This marks the first application of the PFEM to such biomechanical simulations.

Axisymmetric models of arteries are developed by incorporating both the Newtonian and Casson fluid models, as well as linear elastic, Neo-Hookean, and Mooney-Rivlin hyperelastic models for the deformation of blood vessels. The numerical simulations successfully describe a wide range of situations and problems, from the ejection of blood from the left ventricle and the blood flow in the healthy aortic artery to the dynamics of an abdominal aortic aneurysm and, ultimately, its rupture. The different models provide valuable insights into the corresponding dynamics and help to identify the different aspects that still need to be improved. In particular, the results explain why local defects of the artery wall must be compensated by biological remodeling processes, with the replacement of elastin by stiffer collagen, to avoid further development and rupture of an aneurysm.

Overall, this work underscores the potential of PFEM3D, Metafor, and their coupling within the FSPC framework to advance our understanding of hemodynamics and biomechanical processes, and to contribute to the improved handling of cardiovascular diseases.

Application de la méthode PFEM pour l'étude des écoulements sanguins et leurs interactions avec les parois artérielles

Jeanne Delhez

Promoteur - J.-P. Ponthot

Master of Science in Biomedical Engineering - Université de Liège

Année académique 2023-2024

Résumé

Mots-clés : maladies cardiovasculaires, biomécanique, anévrisme, valve aortique, contrainte de cisaillement, athérosclérose, hémodynamique, paroi artérielle déformable, fluide de Casson, loi de Mooney-Rivlin, interaction fluide-structure, PFEM, modélisation numérique.

Les maladies cardiovasculaires sont l'une des principales causes de mortalité en Belgique et dans le monde, avec des projections indiquant une augmentation préoccupante des décès associés. Une bonne compréhension de l'hémodynamique et des mécanismes biomécaniques sous-jacents à l'insuffisance vasculaire est essentielle pour améliorer les stratégies de diagnostic et de traitement. Dans ce contexte, les modèles numériques offrent un outil prometteur qui peut réellement améliorer les soins apportés aux patients. En particulier, les algorithmes d'interaction fluide-structure sont largement utilisés en ingénierie cardiovasculaire, en couplant des simulations de flux sanguins avec les réponses mécaniques des vaisseaux sanguins.

Ce travail de fin d'études se concentre sur la modélisation numérique de l'interaction fluide-structure des parois des artères et des écoulements sanguins afin d'évaluer différents aspects biomécaniques. Pour ce faire, le problème d'interaction fluide-structure est abordé en utilisant une approche partitionnée avec un couplage fort des modèles PFEM (pour le fluide) et FEM (pour le solide). L'implémentation pratique est basée sur les codes PFEM3D et Metafor et exploite le cadre de synchronisation et de communication FSPC, tous développés dans le laboratoire LTAS-MN2L de l'ULiège. Ceci marque la première application de la méthode PFEM à de telles simulations biomécaniques.

Des modèles axisymétriques d'artères sont développés en incorporant à la fois les modèles de fluide newtonien et de Casson, ainsi que des modèles linéaires, Néo-Hookeen et Mooney-Rivlin hyperélastiques pour la déformation des vaisseaux sanguins. Les simulations numériques décrivent avec succès une large gamme de situations et de problèmes, depuis l'éjection du sang du ventricule gauche et l'écoulement sanguin dans l'artère aortique saine jusqu'à la dynamique d'un anévrisme de l'aorte abdominale et, finalement, sa rupture. Les différents modèles fournissent des informations précieuses sur les dynamiques correspondantes et aident à identifier les différents aspects qui doivent encore être améliorés. En particulier, les résultats expliquent pourquoi tout défaut local de la paroi artérielle doit être compensé par des processus de remodelage biologique, avec le remplacement de l'élastine par du collagène plus rigide, pour éviter le développement ultérieur et la rupture d'un anévrisme.

Dans l'ensemble, ce travail souligne le potentiel de PFEM3D, de Metafor et de leur couplage via FSPC pour faire progresser notre compréhension de l'hémodynamique et des processus biomécaniques, et ainsi contribuer à l'amélioration de la prise en charge des maladies cardiovasculaires.

Representative illustrations of the work

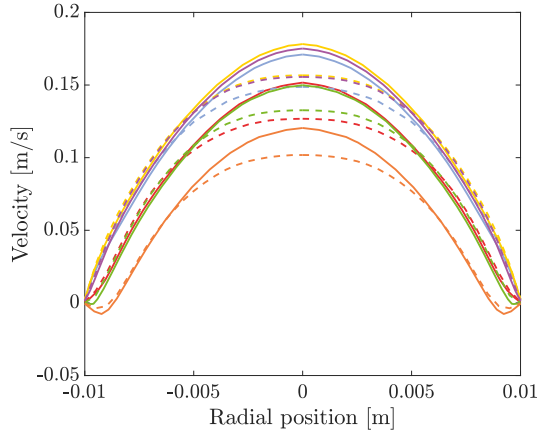


FIGURE 1 – Velocity profiles in the inferior vena cava at $t' = t - T = 0.4$ s (—), 0.48 s (—), 0.56 s (—), 0.64 s (—), 0.72 s (—), and 0.8 s (—). Comparison between Casson (---) and Newtonian fluid models (—).

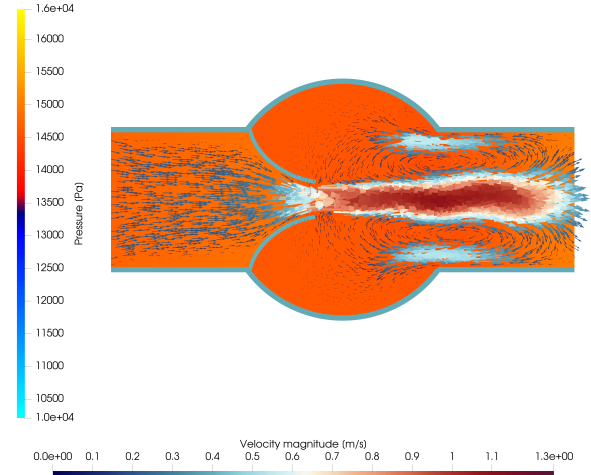


FIGURE 2 – Pressure (background) and velocity (arrows) fields in a two-dimensional aortic valve during systole.

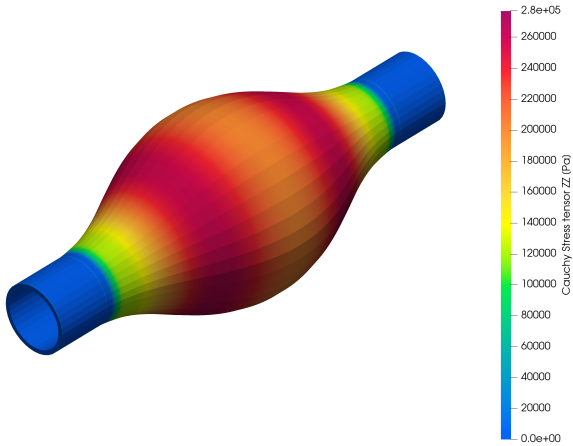


FIGURE 3 – Circumferential (hoop) stress of an aneurysm with a radius of 2.75 cm at systolic pressure.

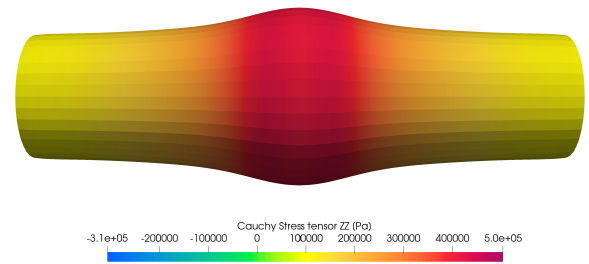


FIGURE 4 – Deformation and hoop stress in a straight artery segment with a local decreased thickness of 0.75 mm in the central section.

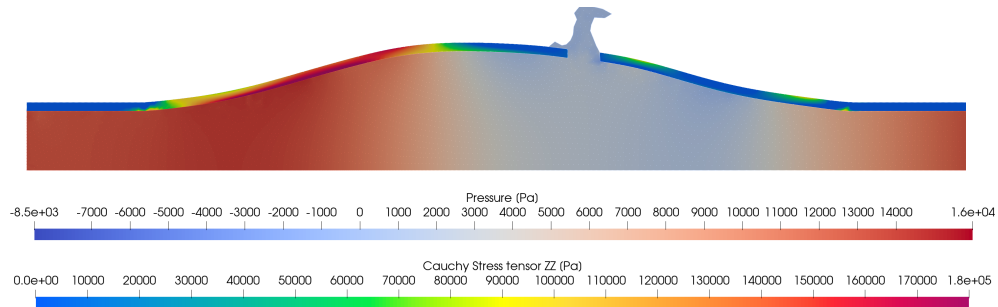


FIGURE 5 – Deformation and rupture of an axisymmetric abdominal aortic aneurysm.