

SUJET DE STAGE

Modélisation 3D de réseaux vasculaires.

2020 - 2021

1) Sujet

Introduction

La modélisation physique de l'écoulement du sang dans les artères par résolution numérique des équations de dynamique des fluides permet de comprendre la survenue et l'évolution de pathologies graves comme l'accident vasculaire cérébral ou la rupture d'anévrisme. Il s'agit dans un premier temps de définir le domaine 3D dans lequel on veut modéliser l'écoulement sanguin. Cela est fait communément en utilisant un maillage surfacique en trois dimensions de la paroi artérielle. Ce domaine doit ensuite être divisé en un ensemble de petits éléments appelés cellules, formants un maillage volumique dans lequel les équations physiques pourront être résolues numériquement [1]. Cette résolution permet d'obtenir une estimation de la pression et la vitesse du sang dans chacune des cellules du maillage, comme illustré figure 1.

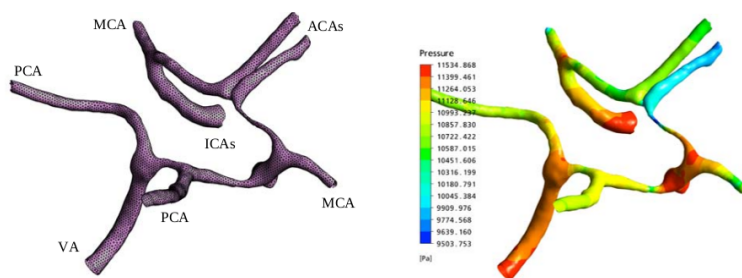


Figure 1: Maillage 3D d'un réseau d'artères du cerveau, et champ de pression obtenu par simulation numérique.

Problématique

La justesse de la résolution dépend des propriétés du maillage utilisé. Pour que les résultats obtenus soient optimaux, le maillage doit respecter certaines contraintes. D'une part, le maillage surfacique des vaisseaux doit respecter au mieux l'anatomie réelle du patient, dont les seules informations proviennent de l'imagerie médicale. D'autre part, la forme des cellules internes joue également un rôle important. Il a été montré que diviser le domaine en utilisant des cellules hexahédriques plutôt que tétraédriques donnait de meilleurs résultats [3]. De même, les cellules doivent être orientées de manière homogène et parallèle au flux quand cela est possible (Figure 2). Mais cela complique beaucoup l'étape de maillage, car obtenir de telles propriétés sans intervention de l'utilisateur est difficile.

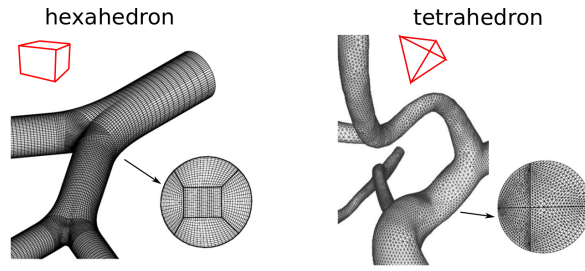


Figure 2: Maillage volumique composé de cellules hexahédriques (gauche) et maillage volumique composé de cellules tétraédriques (droite).

Objectif

Nous avons récemment implémenté un algorithme permettant d’obtenir un maillage structuré hexahédrique de l’arbre vasculaire à partir d’informations de ligne centrale avec rayon, basé sur les travaux de [2]. Le stage proposé vise à compléter le pipeline existant par de nouvelles fonctionnalités. Il consistera principalement en la programmation du code permettant de réaliser les deux objectifs décrits ci-après. Le code devra s’intégrer dans le framework déjà existant, il sera donc codé en python, en utilisant des bibliothèques graphiques comme VTK ¹.

1 - Déformation du maillage

L’algorithme actuel produit des maillages tubulaires - les sections sont donc circulaires-. Il s’agit d’une approximation qui est cohérente avec l’anatomie dans la plupart des cas, mais il serait intéressant de pouvoir mailler également des artères avec une section non circulaire.

Pour cela, nous souhaiterions déformer le maillage surfacique tubulaire produit par l’algorithme pour le faire correspondre à la surface d’un autre maillage (tétraédrique) obtenu par segmentation d’images médicales (Figure 3). Cela peut être fait par projection des noeuds du premier maillage vers la surface du maillage de référence.

Dans un deuxième temps, et une fois les maillages subdivisés en cellules, le maillage volumique hexahédrique produit par notre méthode sera comparé avec un maillage volumique tétraédrique produit par une méthode de maillage classique. Pour cela, des critères de qualité géométriques sur la forme des cellules seront utilisés.

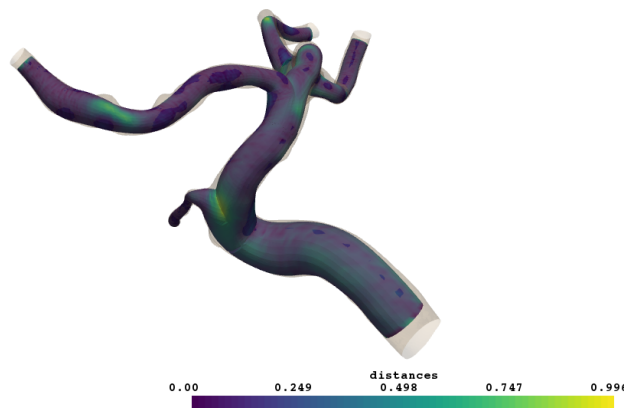


Figure 3: Distance entre la surface du maillage tubulaire et celle du maillage obtenu par l’imagerie médicale (en gris).

2 - Modélisation de la surface par des NURBS

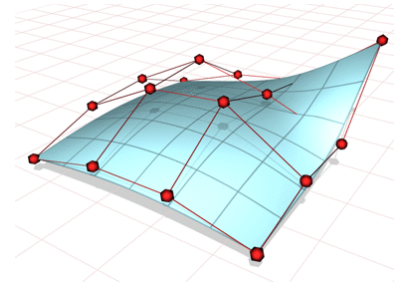
L’analyse isogeométrique est une méthode qui permet de réaliser des simulations physique en s’affranchissant totalement de l’utilisation d’un maillage volumique ². Avec cette approche, la surface du domaine d’étude est représentée mathématiquement par des fonctions B-splines rationnelles non uniformes (NURBS). Ce type de fonction se base sur un ensemble de points de contrôle pour représenter une surface de manière continue, comme

¹<https://docs.pyvista.org/index.html>

²<http://rafavzqz.github.io/geopdes/>

illustré par l'image ci-contre. Cette modélisation particulière présente l'avantage de réduire les erreurs de calcul dues à la discrétisation de la surface par les cellules d'un maillage lors de la résolution.

La structure en sections circulaires successives utilisée comme modélisation préliminaire dans notre algorithme de maillage est particulièrement adaptée pour permettre facilement l'approximation de la surface du réseau vasculaire par des NURBS. Ainsi, il serait intéressant d'ajouter au pipeline existant la possibilité de modéliser mathématiquement un réseau vasculaire plutôt que de le mailler. A cette effet, chaque section sera approchée par des NURBS à une dimension, reliées ensuite entre-elles par extrusion le long des vaisseaux pour former la surface 3D attendue.



2) Contexte

Environnement scientifique

Les laboratoires de l'INSA impliqués dans ce projet sont le LIRIS, laboratoire spécialisé entre autres dans la géométrie et la modélisation et CREATIS, laboratoire d'imagerie médicale. Encadrants : *Guillaume Lavoué (LIRIS)* et *Carole Frindel (CREATIS)*. Merci d'adresser les candidatures à l'adresse mail suivante : carole.frindel@insa-lyon.fr.

Compétences requises

- Programmation python
- Des notions en géométrie 3D et une expérience préalable avec des bibliothèques de visualisation/manipulation de maillages seraient un plus

Compétences développées

- Géométrie 3D, maillages surfaciques et volumiques
- Modélisation par NURBS
- Notions de résolution numérique d'équations et simulation physique
- Application au domaine du médical

Gratification

- Environ 550 euros net par mois

References

- [1] Juan R Cebal, Marcelo A Castro, Orlando Soto, Rainald Löhner, and Noam Alperin. Blood-flow models of the circle of willis from magnetic resonance data. *Journal of Engineering Mathematics*, 47(3-4):369–386, 2003.
- [2] Mahsa Ghaffari, Kevin Tangen, Ali Alaraj, Xinjian Du, Fady T Charbel, and Andreas A Linninger. Large-scale subject-specific cerebral arterial tree modeling using automated parametric mesh generation for blood flow simulation. *Computers in biology and medicine*, 91:353–365, 2017.
- [3] Samir Vinchurkar and P Worth Longest. Evaluation of hexahedral, prismatic and hybrid mesh styles for simulating respiratory aerosol dynamics. *Computers & Fluids*, 37(3):317–331, 2008.