

Assimilation de données pour la simulation d'écoulements veineux cérébraux

Pierre MOLLO, Centre for Analysis, Scientific Computing and Applications - Eindhoven
Stéphanie SALMON, LMR UMR CNRS 9008 - Reims

Le liquide cérébro-spinal est un élément essentiel au bon fonctionnement de notre cerveau. Son renouvellement et son maintien dans des conditions physiologiques sont ainsi cruciaux et ont été récemment mis en relation avec le réseau veineux cérébral principal, via le système «glymphatique». Ce réseau présente une géométrie complexe induisant un écoulement tridimensionnel. De plus, il est sujet à une large variation inter-individuelle, sa modélisation nécessite donc un traitement personnalisé.

Dans ce contexte, nous développons un modèle numérique couplé à des données réelles issues d'IRM afin de produire des simulations aussi proches que possible de la réalité physique. Nous disposons à cet effet de séquences IRM classiques et d'IRM en contraste de phase, permettant respectivement d'extraire des informations structurales et physiologiques sur l'écoulement veineux. Cet écoulement est lui-même modélisé à l'aide des équations de Navier-Stokes incompressible et le couplage aux données s'effectue par l'intermédiaire des conditions de bord. Une partie des données est utilisée en entrée du modèle, via des conditions de bord de Dirichlet, pour imposer les débits réellement observés notamment. Des conditions de bord de type Windkessel sont imposées en sortie du modèle et permettent de prendre en compte la partie tronquée du réseau. Ces conditions dépendent de plusieurs paramètres : résistance, compliance, inertance, qu'il convient d'ajuster en utilisant d'autres données en guise de contrôle [Mollo et al., 2024].

Une fois le modèle établi, il est possible d'améliorer la qualité des simulations en utilisant des méthodes d'assimilation de données élaborées. Nous utilisons ici la méthode «parametrized background data-weak» introduite par [Maday et al., 2015]. Cette méthode permet d'exploiter les mesures locales de la vitesse d'écoulement contenue dans la séquence IRM en contraste de phase. Nous présentons des résultats très encourageants sur des données synthétiques. Un travail similaire a été développé en utilisant des mesures de Doppler ultrason [Galarce et al., 2021] mais là encore, l'approche se limite à des données synthétiques.

Le passage aux données réelles reste donc délicat du fait de certaines limitations techniques. Nous souhaitons étendre cette méthodologie à une séquence IRM-4D, très proche d'une séquence IRM-PC via notamment une collaboration avec Esther Fontaine doctorante sous la direction de Christophe Portefaix (ingénieur de recherche, CHU Reims) et Nicolas Passat.

Références

- [Galarce et al., 2021] Galarce, F., Lombardi, D., and Mula, O. (2021). Reconstructing haemodynamics quantities of interest from Doppler ultrasound imaging. *International journal for numerical methods in biomedical engineering*, 37(2) :e3416. Place : England Publisher : Wiley.
- [Maday et al., 2015] Maday, Y., Mula, O., Patera, A. T., and Yano, M. (2015). The Generalized Empirical Interpolation Method : Stability theory on Hilbert spaces with an application to the Stokes equation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 287 :310–334.
- [Mollo et al., 2024] Mollo, P., Dollé, G., Salmon, S., and Balédent, O. (2024). Accurate Cerebral Venous Blood Flow Simulations Compared to Real Data.