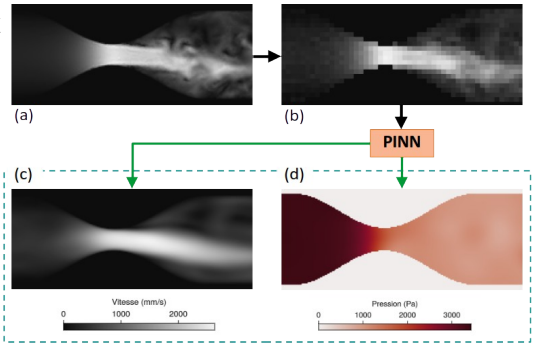
Mesure de pression sanguine par IRM de flux 4D : développement d'une approche Physics-Informed Neural Networks

Alexis Caltran[1,2], Thomas Puiseux[4], Barbara Garmy-Susini[1], Fatima Zohra Mokrane[1,3], Ramiro Moreno[1,4]

[1]I2MC, Inserm UMR 1297, Toulouse, France ; [2]Siemens Healthcare SAS, Courbevoie, France ; [3]Service de radiologie CHU Rangueil, Toulouse, France ; [4]Spin Up, ALARA Group, Entzheim, France

Objectifs: L'IRM de flux 4D permet une mesure non invasive du champ de vitesse sanguin, mais le calcul de biomarqueurs hémodynamiques comme la pression ou le frottement pariétal reste limité par la résolution spatio-temporelle et les contraintes computationnelles. Ces travaux proposent une méthode basée sur des réseaux de neurones régularisés par des lois physiques (PINN) pour effectuer simultanément super-résolution, débruitage des mesures de vitesse et calcul du champ de pression.

Matériels et Méthodes: Un écoulement continue a été simulé par mécanique des fluides numérique (MFN) à travers une sténose (diamètre initial de 26 mm, constriction de 75 %) à l'aide du logiciel YALES2BIO [2]. Le champ de vitesse obtenu a été discrétisé en une image 4D de haute résolution de 0.35 mm isotrope et 40 phases cardiaques (a). Ce champ a ensuite été tronqué et bruité dans l'espace fréquentiel, générant des images artificiellement sous-échantillonnées, similaires à des acquisitions de flux 4D (b). Après un entraînement sur les données de vitesse bruitées et sous-échantillonnées, un PINN basé sur les équations de Navier-Stokes, a été utilisé pour inférer, d'une part, le champ de vitesse à la résolution de référence (c), et d'autre part, le champ de pression sous-jacent (d).



Résultats: La méthode a été testée sur une image dégradée d'un facteur 4 avec un bruit de 20 dB (SNR). Les inférences du PINN sont comparées aux résultats MFN via la NRMSE (Normalized Root Mean Square Error), normalisée par la la norme maximale du vecteur vitesse et de la pression maximale. Les erreurs sont de 7,5 % pour la vitesse axiale, 5 % pour les vitesses transversales et 29 % pour la pression. Une sous-estimation systématique du pic de vitesse au niveau de la constriction maximale est observée. Bien que le réseau reproduise bien la topologie principale de l'écoulement, il ne parvient pas à capturer les petites structures turbulentes observées en MFN. Ces limitations pourraient expliquer l'erreur élevée sur la pression, en lien avec les pertes de charge principales dans cet écoulement. On note visuellement une réduction du niveau de bruit, difficile à quantifier en raison de l'erreur du PINN sur la turbulence.

Conclusion: Malgré des erreurs élevées à première vue, la méthode donne des résultats prometteurs. Un ajustement des hyperparamètres du PINN est nécessaire pour améliorer la super-résolution et l'inférence de pression.

Références: [1] Wang et al. « An Expert's Guide to Training Physics-informed Neural Networks ». [2] Mendez et al. YALES2BIO: A General Purpose Solver Dedicated to Blood Flows. In Biological Flow in Large Vessels.