Titre de la thèse : Modèle substitut d'apprentissage profond informé par la physique pour l'estimation non invasive en quasi temps réel de la réserve de flux fractionnaire coronaire

Doctorant : Mohamed Lotfi MOUKNECHE
Encadreurs : Ladjel Bellatreche (ISAE-ENSMA), et Nam LE (DFM-Europe)

La dynamique des fluides numérique (CFD) à haute-fidélité permet une estimation physiologiquement fondée de la chute de pression coronaire et de la réserve de flux fractionnaire (FFR), mais son coût de calcul élevé limite sa scalabilité. L'apprentissage profond informé par la physique peut permettre une simulation hémodynamique en quasi temps réel tout en préservant la cohérence physiologique.
Nous avons développé un modèle substitut supervisé entraîné sur des simulations CFD en régime hyperémique stationnaire portant sur 1014 géométries coronaires paramétriques. Le réseau prédit les champs spatiaux de pression et de vitesse en utilisant une fonction de perte composite combinant la précision de reconstruction et une régularisation guidée par la physique. La chute de pression spécifique à la lésion (ΔP) et la FFR ont été calculées à partir des champs de pression prédits en utilisant le même protocole d'échantillonnage que celui de la CFD. Les performances ont été évaluées sur un ensemble de test indépendant (n = 102) à l'aide de métriques d'erreur, d'analyses de corrélation, de l'accord de Bland–Altman et d'une classification diagnostique au seuil FFR $\leq$ 0,80.
Le modèle substitut a reconstruit avec précision les champs de pression et de vitesse. L'estimation de ΔP a montré une déviation minimale par rapport à la CFD (MAE = 0,154 mmHg ; MAPE = 0,66 % ; R^2 = 0,9999, $p < 0,001$). Les prédictions de FFR ont présenté une erreur négligeable (MAE = 0,0017 ; MAPE = 0,42 %) et une corrélation quasi parfaite avec les valeurs dérivées de la CFD (R^2 = 0,9999, $p < 0,001$), avec une sensibilité et une spécificité de 100 %. Le temps moyen d'inférence était de 58,6 ± 11,2 ms par cas.
L'apprentissage profond informé par la physique peut reproduire l'hémodynamique coronaire à haute-fidélité avec une précision proche de la CFD tout en réduisant le temps de calcul de plusieurs ordres de grandeur, permettant ainsi une évaluation fonctionnelle coronaire en quasi temps réel.

Publication :

1. Mohamed Lotfi Moukneche, Nhat-Tuong-Minh Ho, Frédéric Plourde, Ladjel Bellatreche: Physics-informed deep learning surrogate for near-real-time non-invasive coronary fractional flow reserve estimation. Biomed. Signal Process. Control. 127: 111024 (2026)