Simulation numérique d'IRM de flux 4D pour la caractérisation d'erreurs de mesures

Thomas Puiseux[1,2], Ramiro Moreno[1,2], Morgane Garreau[1,3], Simon Mendez[3], Franck Nicoud[3]

[1]Spin Up, ALARA Group, Strasbourg, France), [2]I2MC (INSERM UMR 1297, Toulouse, France), [3]IMAG (Université de Montpellier, CNRS, France)

Objectifs : Ce travail présente une approche numérique permettant de simuler efficacement une séquence d'IRM de flux 4D utilisée en pratique clinique. L'objectif est ici d'utiliser la modélisation de séquences d'IRM, par définition exempte d'erreurs expérimentales, pour identifier les sources d'erreurs de mesures dues au design de la séquence, et ainsi mettre en place des stratégies d'optimisation de séquence.

Matériels et Méthodes : Les équations de Bloch et de la mécanique des fluides (MFN) sont résolues simultanément selon un formalisme Eulérien-Lagrangien. Une stratégie d'ensemencement périodique de particules ainsi qu'une méthode de résolution semi-analytique sont implémentées pour réduire le coût de calcul. Une séquence d'IRM de flux 4D est simulée dans une configuration d'écoulement pulsé typique du régime cardiovasculaire (Fig. 1). Les images synthétiques reconstruites par simulation sont comparées aux champs de vitesses imposés par la MFN, sous-échantillonnées à la résolution spatiale de l'IRM pour reproduire l'effet de troncature et échantillonnage de l'espace de Fourier. Enfin, cette configuration est reproduite expérimentalement au moyen d'un banc d'essai, et plusieurs acquisitions d'IRM de flux 4D sont comparées aux images reconstruites synthétiquement par la simulation d'IRM.

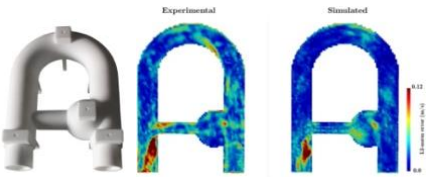


Figure 1: (a) Image du fantôme de flux conçu [1]. Cartographie d'erreur de vitesse, obtenue au pic systolique, entre l'IRM simulée et l'IRM expérimentale (b) ; entre la MFN et l'IRM simulée (c).

Résultats : La comparaison entre le champ de vitesse obtenu par simulation (IRM synthétique) et le champ de vitesse de référence (MFN) donne lieu à une corrélation moyenne de 0.966. On montre qu'une partie du pic d'erreur observé sur la Figure 1c provient d'un artéfact de déplacement de vitesse inhérent au design de la séquence, et qui est correctement reproduit par la simulation IRM. Au contraire, la comparaison avec l'acquisition IRM expérimentale dévoile des sources d'erreurs additionnelles, provenant des limitations matérielles (inhomogénéité du champ statique, non linéarité des gradients, …).

Conclusion : Ce travail préliminaire montre que la simulation d'IRM peut permettre de discriminer les erreurs logicielles (design de séquence, reconstruction) des erreurs d'origine matérielle. Une application directe est détection des dysfonctionnements de l'équipement et l'optimisation de séquences constructeurs.

Références : [1] Puiseux, T. et al., Reconciling PC-MRI and CFD: an in-vitro study. NMR Biomed. 2019.