

Assimilation de données accélérée pour la biomécanique (2017-2020)

Laboratoire: LIMSI-CNRS, Bat. 508 Campus universitaire, Rue J. von Neumann, 91405 Orsay

Encadrement: D. Lucor (LIMSI-CNRS) directeur de thèse & L. Mathelin (LIMSI-CNRS) co-encadrant & O. Le Maître (LIMSI-CNRS) collaborateur

Mots clefs: problèmes inverses, probabilités, assimilation de données, quantification de l'incertitude, hémodynamique, modélisation cardiovasculaire

1. Descriptif de la thèse

La modélisation et la simulation numérique de la dynamique de systèmes mécaniques complexes fait intervenir des paramètres qui ne peuvent généralement pas être mesurés directement, et doivent être estimés à partir d'observations, souvent bruitées et limitées. L'estimation de paramètres apparaît dans de multiples domaines scientifiques et repose classiquement sur une approche visant à réduire l'écart entre les prédictions du modèle et les observations disponibles par la résolution d'un problème inverse. Ce problème inverse est souvent mal posé et sa résolution doit d'autre part être robuste vis à vis des erreurs d'observation. Une façon naturelle de régulariser le problème d'identification des paramètres est de le considérer sous l'angle d'une inférence statistique, dans un cadre probabiliste, en traitant les observations et les paramètres à inférer comme des quantités aléatoires pour lesquelles on dispose d'a priori. On mentionnera ici en particulier l'inférence bayésienne avec les filtrages particuliers, les différentes variantes du filtrage de Kalman, les méthodes d'assimilation de données,... qui visent à estimer la densité a posteriori des paramètres (après prise en compte des observations).

La majorité de ces approches sont hélas très coûteuses à mettre en oeuvre, principalement du fait du coût numérique de la résolution du modèle (par exemple dans le cas de problèmes multiéchelles et multiphysiques en géométries complexes). Une première contribution de cette thèse sera de proposer et développer des stratégies permettant de pallier ces coûts de calcul prohibitifs. En particulier, nous nous placerons dans le cadre de l'utilisation de modèles approchés — aussi appelés métamodèles — qui permettent de réduire de façon drastique le coût de calcul de l'inférence. Nous prévoyons d'explorer la construction de métamodèles adaptés à l'objectif d'inférence paramétrique et exploitant à la fois la structure des dépendances du modèle vis à vis des paramètres et l'information a priori apportée par les observations. Plus spécifiquement, nous prévoyons de combiner des méthodes d'apprentissage de dictionnaires et d'estimation de gain d'information pour obtenir des modèles réduits parcimonieux, faciles à évaluer, et permettant d'extraire des observations le maximum d'information sur les paramètres d'intérêt.

Un second volet de la thèse portera sur les méthodes d'inférences type Kalman (KF, EnKF,...) dont l'optimalité est prouvée dans le cas de modèles linéaires et gaussiens. Leur emploi dans

le cadre de modèles physiques complexes et non-linéaires pose parfois problème et peut conduire à des prévisions physiquement irréalistes, notamment du fait de la linéarité du filtre de Kalman. Dans cette thèse, nous chercherons de nouvelles approches de filtrage non-linéaire pour l'inférence paramétrique. En particulier nous souhaitons étudier la possibilité de redéfinir le filtrage de Kalman en substituant à la mesure de distance quadratique classique, des mesures alternatives, par exemple inspirée de la distance de Wasserstein. En particulier, dans le cas d'approches ensemblistes (EnKF), nous nous attendons à ce que cette mesure de distance conduise à une correction non-linéaire générant des solutions physiquement admissibles.

Les différents développements de la thèse seront appliqués à la modélisation cardiovasculaire personnalisée pour l'obtention non-invasive d'informations fonctionnelles. En complément du diagnostic clinique, ces modélisations visent une meilleure compréhension du développement des pathologies et cherchent à améliorer l'efficacité des traitements (par exemple l'augmentation des performances des organes artificiels, prothèses, greffes, etc). Ces modélisations font intervenir un grand nombre de paramètres incertains, tels que les caractéristiques des tissus et fluides biologiques, la géométrie du système cardiovasculaire, et divers paramètres de modélisations associés à des simplifications physiques. Dans le cadre de la thèse, nous considérerons des modèles numériques relativement simples d'écoulements sanguins, mais contenant les phénomènes fondamentaux de l'hémodynamique: les effets propagatifs liées à l'élasticité des parois, les effets dissipatifs liés à la viscosité du fluide et à la viscoélasticité des parois, ainsi que les phénomènes non-linéaires de convection et d'élasticité. Concernant les observations, le travail de thèse reposera sur des mesures en imagerie médicale (IRM, echo-doppler).

2. Références

[1] M.C. Rochoux, S. Ricci, D. Lucor, B. Cuenot, & A. Trouvé. *Reduced-cost Ensemble Kalman filter based on a Polynomial Chaos surrogate model for regional-scale wildfire spread*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2014.

[2] O.P. Le Maître & O.M. Knio. *Spectral methods for uncertainty quantification*. Springer, 2010.

[3] A. Brault, L. Dumas & D. Lucor. *Uncertainty quantification of inflow boundary condition and proximal arterial stiffness-coupled effect on pulse wave propagation in a vascular network*, Int. J. Numer. Methods Biomed. Eng., 2017.

[4] L. Mathelin, K. Kasper & A.-K. Hisham. *Observable dictionary learning for high-dimensional statistical inference*, arXiv:1702.05289, 2017.

[5] O.P. Le Maître, D. Lucor, and L. Mathelin. *Adaptive construction of polynomial surrogates for efficient Bayesian inference*. J. of Comp. Physics, (in preparation).

3. Profil candidat, date début

Ecole d'ingénieur ou université, master de mathématiques appliquées ou de mécanique des fluides. Compétences en probabilités/statistiques, calcul scientifique, méthodes numériques et mécanique des fluides seront appréciées.

Début prévu le 1er octobre 2017.