

# Modélisation de la dépendance et analyse de sensibilité en dynamique sédimentaire

Aurélien Alfonsi, Julien Reygner

Proposition de stage de M2 en mathématiques appliquées, ou 3ème année d'école d'ingénieur.

**Durée** : 6 mois, à partir de mars 2022.

**Déroulement** : CERMICS (École des Ponts ParisTech, Marne-la-Vallée), en collaboration avec le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE, EDF R&D, Chatou).

**Mots-clés** : probabilités, modélisation statistique, copules, indices de sensibilité, simulation numérique, dynamique sédimentaire.

Possibilité de **poursuite en thèse CIFRE** à EDF R&D.

**Contact** : [aurelien.alfonsi@enpc.fr](mailto:aurelien.alfonsi@enpc.fr), [julien.reygner@enpc.fr](mailto:julien.reygner@enpc.fr).

## 1. Contexte

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre le CERMICS et le département LNHE d'EDF R&D, visant à développer la prise en compte des incertitudes<sup>1</sup> dans les codes de calcul utilisés dans la modélisation de la dynamique sédimentaire en hydraulique.

Depuis une trentaine d'années, l'industrie a développé des codes de calcul en hydraulique environnementale souvent complexes, imbriquant de multiples processus physiques en interaction les uns avec les autres. L'augmentation de la complexité conceptuelle d'un modèle numérique a le potentiel d'améliorer la précision des résultats à mesure que de nouveaux processus sont pris en compte, mais en même temps l'incertitude sur la sortie du modèle peut augmenter en raison de l'incertitude de modélisation du phénomène physique intégré (incertitude des nouvelles données d'entrée, processus décrit par des lois empiriques, paramètres à caler, etc.) [1]. En effet, toute inférence demeure basée sur des modèles imparfaits (incertitude structurelle) dont les facteurs d'entrée à prescrire (e.g. paramètres, conditions initiales, conditions aux limites) sont incertains car solutions d'un autre modèle ou/et estimés à l'aide d'observations entachées d'erreurs. Il en résulte des mécanismes relativement complexes d'amplification des erreurs mais aussi d'interaction et compensation des différentes sources d'incertitude.

L'analyse de ces incertitudes permet la spécification des hypothèses et des facteurs d'incertitude apportant des éléments nécessaires pour permettre la discussion (par exemple, quantification de la variabilité des résultats en sortie de modèle induite par les facteurs incertains d'entrée, caractérisation du scénario le plus pénalisant quelle que soit la valeur prise par les aléas, etc.), ainsi que la mise en évidence des points de l'évaluation où un effort supplémentaire (acquisition de données et/ou travail de modélisation) peut réduire l'incertitude entourant le résultat (identification des paramètres incertains d'entrée qui ont une forte influence sur les sorties d'un modèle, etc.).

Une question importante à traiter en préalable des approches citées précédemment concerne la quantification des sources d'incertitude et les éventuelles dépendances qui peuvent exister entre les paramètres incertains. En effet, si un même phénomène physique influe sur plusieurs grandeurs incertaines alors leurs valeurs sont statistiquement liées, comme par exemple, le vent influençant les surcotes météorologiques et les vagues (statistiquement, on parle d'événements corrélés, obéissant donc à des statistiques conjointes). Si de telles dépendances sont jugées plausibles, une analyse multi-dimensionnelle des sources d'incertitudes est requise pour ne pas fausser les résultats de l'étude. Dans le cas contraire

---

1. On pourra par exemple se référer à la page web du GDR MASCOT-NUM pour un aperçu des travaux menés en France sur la prise en compte des incertitudes dans les codes de calcul industriels.

(sources d'incertitude indépendantes), une analyse source par source est suffisante. Jusqu'à maintenant, les études de quantification des incertitudes en hydraulique fluviale ou maritime menées au LNHE font l'hypothèse de sources d'incertitude indépendantes. Dès lors que nous considérons des processus physiques couplés avec l'hydraulique comme le transport sédimentaire par exemple, cette notion de dépendance statistique est d'autant plus importante à considérer que les facteurs d'entrée susceptibles d'interagir les uns avec les autres sont plus nombreux. Négliger ces dépendances peut, dans le meilleur des cas se révéler conservatif, dans le pire des cas induire des sous-estimations des risques.

## 2. Objectifs et programme du stage

Le stage proposé se donne deux objectifs.

- (1) Proposer un modèle probabiliste décrivant le comportement statistique, et en particulier les dépendances, des paramètres des modèles hydro-sédimentaires utilisés dans le développement des codes de calcul du LNHE.
- (2) Implémenter et comparer les performances de diverses méthodes récentes d'analyse de sensibilité sur les sorties de ces codes de calcul, tenant compte de la dépendance des paramètres d'entrée ainsi que de l'aspect fonctionnel de ces sorties, qui sont des processus spatio-temporels.

Le programme suivant permettra d'atteindre ces deux objectifs.

- Revue des différentes lois de comportement proposées dans la littérature physique décrivant les relations (généralement déterministes) entre les paramètres des modèles hydro-sédimentaires [2, 3, 4].
- Remise de ces modèles physiques dans un cadre probabiliste et construction d'un modèle de dépendance statistique, possiblement fondé sur la notion de copule.
- État de l'art et expérimentations numériques sur l'analyse de sensibilité dans le cas de variables d'entrée dépendantes et de sorties fonctionnelles [5, 6].

Ce programme sera suivi en collaboration proche avec les chercheurs du LNHE et des autres services de EDF R&D partenaires de ce projet. Des visites régulières sur le campus EDF de Chatou permettront la prise en main progressive des codes de calcul du LNHE, sur lesquels les expérimentations numériques seront réalisées, à partir de deux jeux de données correspondant respectivement à un cas hypothétique simple et un cas réel.

## Références

- [1] Cea, L., Bermúdez, M., Puertas, J. Uncertainty and sensitivity analysis of a depth-averaged water quality model for evaluation of Escherichia Coli concentration in shallow estuaries. *Environmental Modelling and Software*, 12:1526–1539, 2011.
- [2] Villaret. C., Kopmann, C., Wyncoll, D., Riehme, J., Merkel, U., Naumann. First-order uncertainty analysis using Algorithmic Differentiation of morphodynamic models. *Computers & Geosciences*, 90:144–151, 2016.
- [3] Do, N. C., Razavi, S. Correlation effects? A major but often neglected component in sensitivity and uncertainty analysis. *Water Resources Research*, 56, 2020.
- [4] Oliveira, B., Ballio, F., Maia, R. Numerical modelling-based sensitivity analysis of fluvial morphodynamics. *Environmental Modelling and Software*, 135, 2021.
- [5] Razavi, S., Jakeman, A., Saltelli, A., Prieur, C., Iooss, B., Borgonovo, E., Plischke, E., Lo Piano, S., Iwanaga, T., Becker, W., Tarantola, S., Guillaume, J.S.A., Jakeman, J., Gupta, H., Melillo, N., Rabitti, G., Chabridon, V., Duan, Q., Sun, X., Smith, S., Sheikholeslami, R., Hosseini, N., Asadzadeh, M., Puy, A., Kucherenko, S., Maier, H.R. The Future of Sensitivity Analysis: An essential discipline for systems modeling and policy support. *Environmental Modelling & Software*, 137, 2021.
- [6] Perrin, T., Roustant, O., Rohmer, J., Alata, O., Naulin, J.-P., Idier, D., Pedreros, R., Moncoulon, D., Tinard, P. Functional principal component analysis for global sensitivity analysis of model with spatial output. *Reliability Engineering & System Safety*, 211, 2021.