

## CARACTÉRISATION ET PRISE EN COMPTE DES DÉPENDANCES STATISTIQUES DANS LE CADRE D'APPLICATIONS DE DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE

**Laboratoires d'accueil** : EDF R&D Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE, Chatou (France)) et le Centre d'Enseignement et de Recherche en Mathématiques et Calcul Scientifique (CERMICS, Marne la Vallée (France)).

**Encadrants** : Aurélien ALFONSI (CERMICS), Anne DUTFOY-LEBRUN (EDF-R&D PERICLES) Cédric GOEURY (EDF-R&D LNHE), Cédric GOEURY (EDF-R&D LNHE), Fabrice ZAOUI (EDF-R&D LNHE)

**Directeurs de thèse** : Kamal EL KADI ABDERRZZAK (EDF-R&D LNHE) & Julien REYGNER (CERMICS)

**Durée** : 3 ans (2021-2024)

### 1. Objectif de la recherche

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 lois empiriques, paramètres à caler, etc.) (Cea *et al.*, 2011). 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 solution 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.)
- 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 (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 département LNHE d'EDF-R&D 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.

**L'objectif de cette thèse est de caractériser et de prendre en compte des dépendances statistiques dans le cadre d'applications de dynamique sédimentaire.** Basée sur des outils de modélisation à base physique, **la thèse débouchera sur la mise en place d'une méthodologie permettant de caractériser les incertitudes qui sera directement intégrée dans les outils de modélisation numériques** (Plateforme SALOME-HYDRO intégrant les modules TELEMAC-2D (hydraulique) et Gaia (morphodynamique), du système de modélisation TELEMAC-MASCARET et les bibliothèques d'incertitude OPENTURNS (EDF R&D)).

## 2. Etat de l'art

La modélisation hydro-sédimentaire est toujours imprégnée d'une certaine incertitude. Celle-ci résulte à la fois des effets dus au grand nombre de variables impliquées et à la difficulté d'estimation de leurs valeurs respectives, mais également des effets non pris en compte ou simplifiés dans les processus morphodynamiques (Oliveira *et al.*, 2021). Malgré son importance, le problème de l'incertitude dans les modèles morphodynamiques a été peu abordé en comparaison à d'autres domaines environnementaux (modèle hydraulique (inondation,...), modèle hydrologique, etc.) pour des raisons à la fois pratiques et philosophiques (Villaret *et al.* 2016). Cette réticence peut être attribuée à une foi irréaliste dans la capacité des modèles numériques à représenter des processus naturels complexes basés sur la représentation des processus naturels et peut également être due au fait que les incertitudes peuvent s'avérer difficile à quantifier dans un cadre de moyen informatique restreint (temps et ressources CPU). De plus, comme mentionné par Do and Razavi (2020), à l'heure actuelle, très peu d'études dans le domaine de la modélisation de l'eau et de l'environnement abordent la question des dépendances statistiques lors de la prise en compte des incertitudes. Cependant comme le montre les résultats présentés par ces mêmes auteurs, la prise en compte des effets de corrélation peut être d'une importance critique en particulier en présence d'effets non linéaires.

## 3. Projet

Les modèles numériques hydro-sédimentaires permettent de calculer les évolutions bathymétriques dans la zone d'intérêt. Dans le système TELEMAC-MASCARET, Gaia est le code bidimensionnel en éléments finis et volumes finis qui résout les équations du transport par charriage et/ou de suspension (sédiments cohésifs ou non cohésifs) sous l'action du forçage hydrodynamique et une équation pour l'évolution du fond. Ses résultats principaux sont, en chaque nœud du maillage, l'évolution de la cote du fond et le flux solide.

Le travail se composera des étapes suivantes :

- Etape1 : étude bibliographique concernant la prise en compte des incertitudes dans les modèles hydro-sédimentaires, suivie par une quantification des paramètres incertains et de leurs dépendances. Cette quantification se fera sur deux jeux de données correspondant respectivement à un cas hypothétique simple et un cas réel.
- Etape 2 : réalisation d'une analyse de sensibilité lorsque les paramètres sont dépendants. Cette analyse vise à identifier les variables d'entrée qui ont une forte influence sur les sorties du modèle. Pour ce faire, de nombreuses méthodes peuvent être mises en place (Razavi *et al.*, 2021), et le choix parmi les approches existantes reposera sur la complexité du modèle étudié et le nombre de paramètres incertains. Par ailleurs, l'évolution hydro-sédimentaire étant un processus spatio-temporelle, les sorties de la modélisation numérique pourront faire l'objet

d'un traitement particulier (traitement de sortie fonctionnelle dans le cadre d'analyse de sensibilité (Perrin *et al.*, (2020)).

- Etape 3 : une fois les paramètres les plus influents déterminés, ceux-ci pourront être inférés à partir de mesures existantes afin de mieux les quantifier en valorisant l'ensemble des observations disponibles. Une fois cette démarche accomplie, des projections probabilistes d'ensablement par propagation des incertitudes pourront être déterminées.

## 4. Compétences recherchées

Connaissance de Linux et du Fortran, probabilités et statistiques, hydraulique à surface libre, Autonomie et curiosité indispensables.

## 5. Contacts

Cedric GOEURY, Fabrice ZAOUÏ et Kamal EL KADI ABDERREZZAK

EDF R&D, LNHE

E-mail : [cedric.goeury@edf.fr](mailto:cedric.goeury@edf.fr), [fabrice.zaoui@edf.fr](mailto:fabrice.zaoui@edf.fr) et [kamal.el-kadi-abderrezzak@edf.fr](mailto:kamal.el-kadi-abderrezzak@edf.fr)

6, quai Watier, 78400 CHATOU

Julien REYGNER et Aurélien ALFONSI

Laboratoire CERMICS

E-mail : [julien.reygner@enpc.fr](mailto:julien.reygner@enpc.fr) et [aurelien.alfonsi@enpc.fr](mailto:aurelien.alfonsi@enpc.fr)

6 et 8 avenue Blaise Pascal, 77455 Marne la Vallée

## Références

- 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.
- Do, N. C., Razavi, S. (2020). Correlation effects? A major but often neglected component in sensitivity and uncertainty analysis. *Water Resources Research*, 56.
- Oliveira, B., Ballio, F., Maia, R. Numerical modelling-based sensitivity analysis of fluvial morphodynamics. *Environmental Modelling and Software*, 135, 2021.
- Villaret, C., Kopmann, C., Wyncoll, D., Riehme, J., Merkel, U., Naumann. First-order uncertainty analysis using Algorithmic Differentiation of morphodynamic models. *Computers & Geosciences* 90 (2016) 144–151
- Razavi, S., Jakeman, A., Saltelli, A., Priour, 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*, Volume 137, 2021.
- 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. 2020