



## Thèse de doctorat 2017-2020

Modélisation 1D par lit (ISM) d'un réseau hydraulique ramifié maillé. Application au contexte opérationnel de la prévision des fortes crues et des crues de dimensionnement d'ouvrages.

\*

**Profil du candidat recherché :** compétences fortes en analyse numérique. Des connaissances en hydraulique et/ou mécanique des fluides seraient un plus.

### Résumé :

L'objectif principal de la thèse est de rendre opérationnelle une méthode 'recherche' de modélisation 1D+ des crues débordantes [Proust *et al.*, 2009], appelée méthode 1D par lit ou Independent Sub-sections Method (ISM), développée à Irstea pour des contextes simplifiés aux conditions limites parfaitement contrôlées. Contrairement aux approches 1D classiques, l'ISM résout 4 équations couplées (au lieu de 2), ce qui lui permet de modéliser plus finement les phénomènes physiques liés au débordement des rivières –notamment les échanges entre lits–, et in fine, de calculer avec plus de précision les hauteurs d'eau et les vitesses en lit majeur. Cette méthode a été validée à partir de mesures expérimentales pour des géométries variables (prismatiques, non-prismatiques), avec différents types d'occupation du sol des plaines d'inondation (prairie, arbres émergés). En revanche, elle n'a jamais été confrontée à des cas réels complexes et par conséquent validée à partir de données de terrain. Le travail de thèse va donc se diviser en trois grandes parties. La première partie portera sur l'opérationnalisation de l'ISM sur un réseau ramifié maillé (avec des questions méthodologiques clef telles que le traitement des confluences et diffuences, celui des ouvrages, y compris ceux de régulation, et la connectivité des branches entre elles). Les questions méthodologiques seront abordées en priorité en faisant progresser l'implémentation de l'ISM dans le code MAGE d'Irstea (initiée dans le cadre du projet ANR FlowRes 2015-2018 <http://flowres.irstea.fr/en/>). Les questions liées à l'enchaînement des modèles et à la régulation des ouvrages sera abordée dans un second temps par implémentation de l'ISM dans le code CRUE10 de la CNR. La deuxième partie portera sur la validation de l'ISM à partir : (a) de données de terrain existantes (régime permanent débordant sur le bief de Beauchastel, sur le Rhône) ; et (b) de données à acquérir (expériences en régime transitoire avec variation de l'occupation du sol des lits majeurs dans le canal large d'Irstea-Lyon ; expériences en régime permanent sur modèle à grande échelle représentatif d'une situation de terrain au CACOH, CNR ; données de terrain en régime transitoire sous réserve de l'occurrence d'un évènement pertinent avec mesure du débit en lit majeur). Enfin, la troisième partie de la thèse consistera à exploiter les résultats : inter-comparaison de différentes méthodes 1D et 1D+ de modélisation des pertes d'énergie après débordement sur des cas opérationnels ; et comparaison à des simulations 2D sur des biefs exploités par la CNR.

### I - Contexte et enjeux :

La modélisation numérique des fortes crues (crue décennale,  $Q_{10}$ , crue centennale,  $Q_{100}$ , crue millénaire,  $Q_{1000}$ ) est requise dans deux types de contexte pour lesquels les enjeux se révèlent extrêmement différents :

1. le dimensionnement d'ouvrage ;
2. la maîtrise des risques hydrauliques.

Dans le premier cas, les études à mener sont prospectives et permettent l'utilisation de moyens de calculs coûteux. Les enjeux de précision et de fiabilité des résultats de calcul dominant ceux liés au temps d'exécution.

Dans le second cas, les informations à communiquer aux instances décisionnelles peuvent nécessiter la réalisation de calculs en temps réels et nécessitent donc des méthodes robustes et rapides pour évaluer des ordres de grandeurs représentatifs de la situation.

Dans les deux cas, la simulation des fortes crues pose des problèmes méthodologiques importants liés à la rareté des données exploitables pour le calage des modèles et ce, pour deux raisons :

1. parce que les évènements étudiés sont rares par nature ;
2. parce que les périodes de retour des crues en question sont au moins du même ordre de grandeur que le temps caractéristique de l'évolution des fonds de la rivière.

De ce fait, les rares mesures qui seraient disponibles ont une probabilité plus faible encore d'être représentatives de la situation opérationnelle à traiter.

Les évènements hydrauliques majeurs sont donc étudiés par extrapolation en se basant sur des modèles calés en régime permanent à faible débit ou sur des crues de faibles ampleurs (débordantes ou non).

Un des enjeux majeurs de cette problématique consiste donc à évaluer puis à réduire la marge d'incertitude inhérente à cette méthode d'estimation. Or, comme il a été dit plus haut, les exigences de la prévision opérationnelle des crues (calcul en temps réel) réduisent le champ des méthodes et des outils permettant d'explorer des évènements et excluent, par exemple, les systèmes de modélisation les plus coûteux en temps de calcul (tels que la modélisation 2-D ou 3-D).

Dans ce contexte, la 'modélisation 1D par lit', ou 'Independent Sub-sections Method' (ISM), développée à Irstea depuis 2005 [Proust, 2005], offre des perspectives prometteuses.

En régime stationnaire, l'ISM, qui est constituée de 4 équations (1 équation de conservation de la masse et 3 équations de conservation de la quantité de mouvement formulées dans les 3 lits : lit mineur, lits majeurs gauche et droit), prédit les hauteurs d'eau et les vitesses en lit majeur avec plus de précision que les modèles 1D classiques [Proust et al., 2009]. Ceci est dû au fait que ces derniers résolvent une seule équation de quantité de mouvement (ou d'énergie) sur la section totale de la rivière, les obligeant à formuler des hypothèses contraignantes lorsque l'écoulement est non-uniforme dans le sens longitudinal (voir, par exemple, les hypothèses liées à la méthode Debord [Nicollet and Uan, 1979] utilisée par plusieurs codes français, dont Mascaret d'EDF et MAGE d'Irstea). L'ISM a été validée pour des situations expérimentales simples en laboratoire : écoulements débordants permanents uniformes/non-uniformes en géométrie prismatique/non-prismatique ([Proust et al., 2009], [Proust et al., 2010], [Bousmar et al., 2016]); et écoulements avec changements d'occupation du sol des lits majeurs [Proust et al., 2016]. Il s'agit maintenant de qualifier l'ISM sur des aménagements réels.

**L'objectif principal de la thèse est donc de rendre opérationnel cet outil de recherche (avec de nombreuses questions méthodologiques pour des réseaux ramifiés maillés) et de le valider à partir de données de terrain.**

C'est à cette fin que la CNR, intéressée au premier chef par les possibilités offertes par l'ISM, offre de soutenir ce projet de thèse (financement d'une demi-bourse), et d'apporter son expertise, des données expérimentales et de terrain permettant de franchir cette étape.

L'unité de recherche HHLY à Irstea, quant à elle, a commencé à rendre plus opérationnelle la méthode ISM dans le cadre du projet ANR FlowRes (2015-2018) : 'Predicting the flow in the floodplains with evolving land occupations during extreme flood events', <http://flowres.irstea.fr/en/>

L'UR HHLY est en train d'implémenter une version instationnaire de l'ISM dans le code d'hydraulique 1D MAGE (dans le cadre du projet FlowRes 2015-2018). La nouvelle version de MAGE vient d'être validée avec succès à partir de données expérimentales de la thèse de Victor Dupuis [Dupuis, 2016]. Outre les travaux techniques imposés par l'implémentation de l'ISM en instationnaire (comme la refonte complète de la structure de données permettant de représenter la géométrie d'un tronçon de rivière), le travail pour le projet Flowres permet de faire un catalogue des questions scientifiques engendrées par cette implémentation et qui sont incontournables pour réaliser des simulations d'écoulements en milieu naturel anthropisé :

- Prise en compte des confluences et diffuences : comment mélange-t-on les débits des 3 lits d'écoulement de chacune des branches amont d'une confluence ? Inversement comment répartit-on les 3 débits

sortant d'une branche dans les 2 ou plus branches aval ? Dans les 2 cas, les sous-sections de même type des différents biefs ne se correspondent pas forcément naturellement.

- Prise en compte des singularités hydrauliques (seuils, vannes, ponts, etc.), y compris les ouvrages mobiles. Dans le cas de la modélisation Debord [Nicollet and Uan, 1979] implémentée dans MAGE pour rendre compte des pertes d'énergie après débordement, le choix est assez simple puisqu'il y a une seule variable débit qui représente le débit total dans la section d'écoulement ; dans le cas de l'ISM, nous avons 3 débits partiels à faire passer à travers un ou plusieurs ouvrages fonctionnant en parallèle.
- Définition des conditions aux limites amont. Dans le cadre d'une validation du modèle sur des expériences en canal de laboratoire, dans lesquelles les trois débits partiels sont imposés à l'amont, on peut reproduire numériquement ce même dispositif. En revanche quand il s'agit de simuler des écoulements naturels qui peuvent être débordants dès l'amont, il est illusoire de vouloir disposer de données aussi détaillées, on ne peut compter que sur un débit global à chaque entrée du réseau modélisé. Il faut donc trouver un moyen aussi peu coûteux que possible pour s'affranchir du besoin de fournir 3 débits à chaque entrée du modèle. Une des possibilités actuellement testée pour FlowRes est d'estimer la répartition des débits en utilisant la méthode Debord. Comme on peut s'y attendre il en résulte des instabilités numériques quand la répartition effective est assez éloignée de celle suggérée par la méthode Debord.
- La méthode Debord a le très grand avantage de permettre une implémentation très économique, ce qui ouvre la voie à des simulations sur des domaines de grande taille et pour de longues durées. On peut ainsi simuler le Rhône du Léman à la mer sur plusieurs décennies, faire de la simulation continue sur 1000 ans en quelques heures sur un domaine de la taille de l'Yzeron, ou encore faire de l'analyse de sensibilité automatique en réalisant plusieurs milliers de simulations. La possibilité d'obtenir des performances analogues avec l'ISM en instationnaire est pour l'instant une question ouverte et pour y répondre il faudra mobiliser en particulier les techniques de parallélisation des calculs.

## II - Descriptif des travaux :

- Mission 1 : Opérationnalisation de l'ISM sur un réseau ramifié maillé
  - Questions méthodologiques (explorées dans Mage dans un premier temps) :
    - Traitement des **confluences et diffluences**
    - Traitement des **lois d'ouvrage**, y compris les **ouvrages régulés, connectivité des branches** entre elles
    - Traitement des **conditions aux limites** propres à l'ISM, avec des données de terrain disponibles en routine
  - Questions numériques :
    - Choix de la **méthode de résolution** du calcul matriciel
  - Questions informatiques :
    - **Implémentation de l'ISM dans le code Crue** de la CNR
- Mission 2 : Validation de l'ISM sur un cas opérationnel
  - Processus de validation sur des données existantes :
    - **Validation en régime permanent sur un bief en exploitation** (bief de Beauchastel, BE, exploité par CNR) – données de validation : cotes
  - Validation sur des données à acquérir :
    - **Validation en régime transitoire sur des données mesurées** en canal (IRSTEA), avec occupation du lit majeur (arbres, maisons)
    - **Validation en régime permanent sur des configurations complexes** sur des modèles physiques de laboratoire grande échelle représentatifs de situation de terrain (CACOH, CNR, sous réserve de mesures en cours sur un site pertinent) – données de validation, cotes et répartition de débits
    - **Validation en régime transitoire sur des données terrain** sous réserve de l'occurrence d'un évènement pertinent) – données de validation, cotes et répartition de débits
- Mission 3 : Exploitation des résultats

- Par intercomparaison avec des modélisations différentes **sur des cas opérationnels** :
  - Avec des simulations 1D DCM [Lotter, 1933], EDM [Bousmar and Zech, 1999], Debord ;
  - Avec des simulations 2D sur des emprises de la concession CNR
- Étude de l'impact sur le temps de calcul

**Le/la doctorant(e) travaillera sur les deux sites (Irstea / CNR)** ; les développements du code Crue seront réalisés à la CNR. À noter que la priorité de la thèse est de répondre aux questions méthodologiques plutôt que de se focaliser sur les questions techniques de codage.

### III - Planning :

- Nov 2017 – Mars 2018 : bibliographie, prise en main des codes Crue et MAGE, début du codage de l'ISM dans Crue.
- Printemps 2018 : expériences en laboratoire dans le canal large d'Irstea (Figure 1) pour des écoulements transitoires (injection de différents hydrogrammes de crue à l'amont du canal) en lit composé, en réutilisant toutes les géométries étudiées par Dupuis [2016] en régime permanent (transition longitudinale forêt / prairie sur les plaines d'inondations)
- Fin 2018 – Printemps 2019 : Mission 1
- Été 2019 – Fin 2019 : Mission 2
- 2020 : Mission 3 + Rédaction du manuscrit de thèse

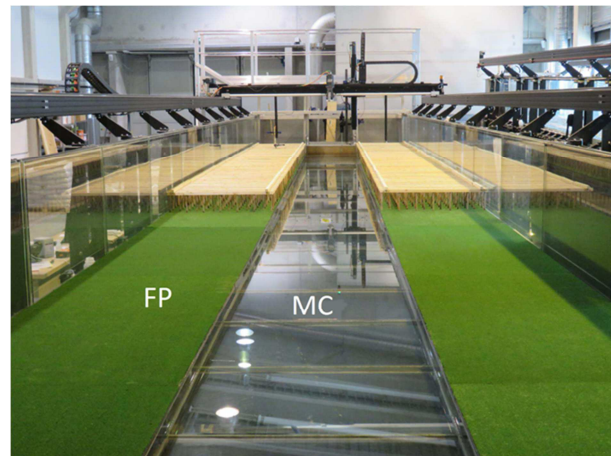


Figure 1 – Canal large 18m x 3m, Irstea lyon. Expériences de Dupuis [2016] et [Dupuis et al., 2016a]. Modélisation des arbres en lit majeur : (à gauche) distribution uniforme d'arbres ; (à droite) transition arbres / prairie.

### IV - Organisation :

- Encadrement : Jean-Baptiste Faure (Encadrant), François-Xavier Cierco (Encadrant), Sébastien Proust (Directeur de thèse)
- Financement : 50% Irstea / 50% CNR.

### Contacts pour plus d'informations :

[sebastien.proust@irstea.fr](mailto:sebastien.proust@irstea.fr) ; [jean-baptiste.faure@irstea.fr](mailto:jean-baptiste.faure@irstea.fr) ; [f.cierco@cnr.tm.fr](mailto:f.cierco@cnr.tm.fr)

### Références Bibliographiques :

- Bousmar, D., and Y. Zech (1999), Momentum transfer for practical flow computation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(7), 696-706.
- Bousmar, D., B. Mathurin, J. N. Fernandes, M. Filonovich, C. Hazlewood, F. Huthoff, J. B. Leal, A. Paquier, and S. Proust (2016), Uniform flow in prismatic compound channel: Benchmarking numerical models, in *River flow 2016, 8th International Conference on Fluvial Hydraulics*, edited by G. H. Constantinescu, pp. 272-280, Taylor & Francis Group, London, Saint-Louis, Missouri (USA).

Dupuis, V. (2016), Experimental investigation of flows subjected to a longitudinal transition in hydraulic roughness in single and compound channels., PhD thesis, 125 pp, Université de Lyon, École Doctorale ED162.

Dupuis, V., S. Proust, C. Berni, and A. Paquier (2016a), Combined effects of bed friction and emergent cylinder drag in open channel flow, *Environmental Fluid Mechanics*, 16(6), 1173-1193.

Lotter, G. K. (1933), Considerations on hydraulic design of channels with different roughness of walls, *Transactions, All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering*, 9(in russian), 238-241.

Nicollet, G., and M. Uan (1979), Ecoulements permanents à surface libre en lit composés, *La Houille Blanche*(1), 21-30.

Proust, S. (2005), Ecoulements non-uniformes en lits composés : effets de variations de largeur du lit majeur, PhD-Thesis, INSA de Lyon, n°2005-ISAL-0083, 362 p thesis, Lyon, France.

Proust, S., D. Bousmar, N. Rivière, A. Paquier, and Y. Zech (2009), Non-uniform flow in compound channel: a 1D-method for assessing water level and discharge distribution, *Water Resources Research*, 45(W12411), 1-16.

Proust, S., D. Bousmar, N. Rivière, A. Paquier, and Y. Zech (2010), Energy losses in compound open channels, *Advances in Water Resources*, 33, 1-16.

Proust, S., J. B. Faure, V. Dupuis, C. Berni, and A. Paquier (2016), 1D+ model for overbank flows with a transition bed friction – emergent rigid vegetation drag, in *River flow 2016, 8th International Conference on Fluvial Hydraulics*, edited, St. Louis, Mo., USA, July 12-15, 2016.