Thèse doctorale aux instituts P' (UPR 3346, CNRS – Université de Poitiers – ENSMA) et I2M (UMR CNRS 5295, CNRS – Université de Bordeaux)

ÉTUDE NUMÉRIQUE ET PHYSIQUE DES CARACTÉRISTIQUES DE PROPAGATION ET D'ÉVOLUTION DES MASCARETS SUR DES BATHYMÉTRIES ÉRODABLES

Contexte du travail

BABA (BArre de flot et Bathymétrie Augmentée) est un projet de recherche qui vise à comprendre la dynamique hydro-sédimentaire liée à la propagation d'un mascaret (TB) dans les estuaires internes en abordant les questions non résolues du précédent projet ANR MASCARET. Un mascaret est un phénomène qui se produit dans les estuaires à marées importantes lorsque le front de la vague de marée se propage à contre-courant d'un fleuve. Il présente différentes géométries, allant d'une vague de très longue longueur d'onde perceptible uniquement avec des capteurs de pression [Bonneton et al., 2012], à une vague déferlante de 2 m de haut se propageant sur toute la largeur du fleuve et à des vitesses pouvant atteindre 4 m/s pendant les marées de vive-eau [Chanson, 2005] (voir Fig. 1).

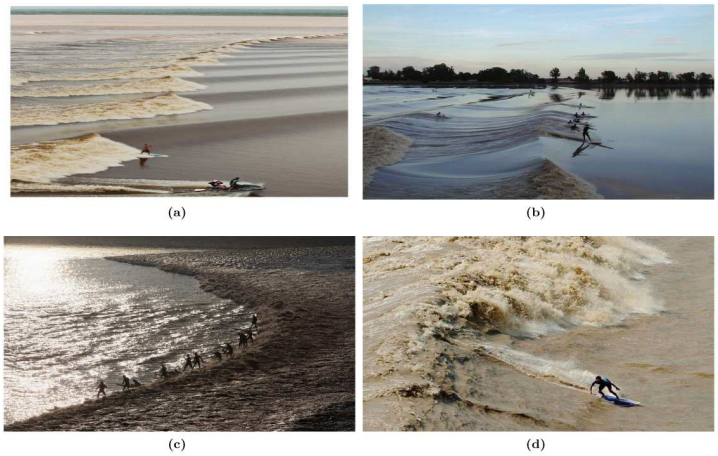


Figure 1 *– Plusieurs mascarets dans le monde : (a) Bono sur le fleuve Kampar en Indonésie, (b) Mascaret sur le fleuve Dordogne en France, (c) Tidal bore sur le fleuve Severn aux Royaumes Unis et (d) Porooca sur le fleuve Amazone au Brésil [Putra, 2018].*

Les conditions macrotidales ne suffisent pas à elles seules à expliquer le développement de ce front. Sa formation et sa dynamique sont également sensibles à la morphologie générale des estuaires en forme d'entonnoir [Jouy et al., 2024]. Son développement et ses caractéristiques seraient également sensibles à l'évolution spatiale de l'amplitude des marées dans les estuaires, à la forme de la vague de marée, à l'intensité du débit fluvial, à l'anthropisation et en particulier aux variations bathymétriques locales. Observation de formes différentes en fonction de la profondeur, de la pente des berges, du développement des bancs de sable ou de la sinuosité des méandres. À court terme, les variations bathymétriques sont principalement induites par les cycles d'érosion/dépôt contrôlés en partie par le

mascaret lui-même, ou par les périodes de haute ou de basse mer. Les estuaires sont des systèmes morphologiques en constante évolution qui s'adaptent aux variations de facteurs déterminants tels que l'emplacement du niveau de base, les cycles de marée à long terme, le débit fluvial, l'apport en sédiments et l'anthropisation [Grasso et al., 2021]. Bien que les facteurs de formation et de dynamique des TJ et TB soient identifiés, ils ne sont pas encore entièrement compris en raison de leur variabilité spatiale et temporelle. Dans un contexte de changement global, des modifications des systèmes estuariens sont attendues à l'avenir [Elliott et al., 2019]. Sensibles aux modifications, la TJ et la TB pourraient disparaître ou, au contraire, s'intensifier fortement dans des zones où elles n'ont actuellement aucun impact [Chanson, 2005 ; Bonneton et al., 2012].

Des recherches sont nécessaires pour caractériser les facteurs qui contrôlent le développement des TJ/TB dans les estuaires internes dont la bathymétrie change en raison de l'érosion induite par les TJ/TB. BABA étudiera les interactions dynamiques entre la bathymétrie, le transport des sédiments et les TJ/TB. Les processus physiques seront étudiés à l'échelle des canaux de laboratoire (cm) et des estuaires (km). L'échelle de temps variera de quelques secondes à plusieurs années. Le projet BABA repose sur quatre approches complémentaires : l'histoire, les mesures in situ, les expériences en laboratoire, la modélisation numérique et les simulations. Le sujet de la thèse porte sur la modélisation numérique et les simulations.

Travail proposé

De nombreux travaux ont porté sur le développement de modèles numériques pour l'étude de l'écoulement de l'eau et de l'érosion dans les rivières. La plupart des modèles numériques existants sont basés sur la résolution des équations d'Exner en eaux peu profondes [Kazhyken et al., 2021]. Lorsque la propagation des ondes dispersives est prédominante, les équations hydrostatiques en eaux peu profondes ne constituent plus un modèle pertinent et des variantes non hydrostatiques doivent être envisagées. La propagation des mascarets est riche en régimes d'écoulement présentant différentes caractéristiques. Une transition apparaît entre les mascarets ondulatoires dominés par des effets non hydrostatiques et les mascarets ondulatoires de type dispersif associés à un processus de réfraction des ondes hydrostatiques dû aux variations de la bathymétrie au sein de chaque section [Bonneton et al., 2012]. Une étude numérique et théorique de cette transition a été réalisée dans [Chassagne et al., 2019]. Dans cet article, les auteurs soulignent le processus dynamique de développement et de stabilisation des mascarets ondulatoires à longueur d'onde finie, dans lequel s'établit un équilibre entre non-linéarité, dispersion et dissipation. Dans [Jouy et al., 2024], une version modifiée des équations de Boussinesq moyennées par section a récemment été proposée en 1D. Les principales caractéristiques de la surface libre du train d'ondes ont été reproduites à l'aide de cas d'ondes de Favre en canal avec une géométrie fixe et linéaire, différente de celle de l'environnement naturel. L'absence de termes de dissipation explicites dans la propagation, tels que les équations non linéaires des eaux peu profondes, de Boussinesq et de Serre-Green-Naghdi, qui supposent généralement un écoulement idéal irrotationnel, nécessite une fermeture implicite ou explicite pour ces effets [Lannes, 2020]. L'interaction entre la modélisation et le calcul numérique devient alors pertinente. La dissipation numérique peut compenser l'absence de dissipation physique et permet en effet d'obtenir une description qualitativement correcte des processus sous-jacents, comme le montrent les résultats de [Chassagne et al., 2019]. Cependant, la dépendance à la taille du maillage rend cette approche moins fiable lorsqu'une prévision quantitative robuste de la dynamique des vagues est nécessaire.

Est-il possible de simuler la propagation de différents types de mascarets dans des rivières réelles à l'aide de modèles réels basés sur les équations non linéaires des eaux peu profondes, de Boussinesq et de Serre-Green-Naghdi ? La résolution du système d'équations des eaux peu profondes, de l'équation d'Exner et de l'équation d'advection-dispersion permet-elle d'étudier l'interaction entre la bathymétrie fluviale et les mascarets ?

Dans cette thèse, les travaux proposés tenteront d'aborder numériquement la question de la caractérisation des processus et régimes hydrodynamiques ayant le plus grand impact potentiel sur les modifications morphologiques. Comme déjà mentionné, les travaux de [Chassagne et al., 2019] ont mis en évidence l'existence de deux modes de propagation d'un mascaret, l'un essentiellement hydrostatique, l'autre totalement non hydrostatique. Le second mode, qui implique une cinématique verticale d'amplitude beaucoup plus importante, est clairement plus susceptible de produire des suspensions de particules et peut être plus intéressant pour les changements morphodynamiques. Il convient de noter que ces modes ont non seulement été produits dans des modèles numériques, mais également observés dans des mesures effectuées dans des environnements artificiels et naturels [Jouy et al., 2024]. En outre, il faut tenir compte de la dynamique de la vorticité et de l'interaction avec les couches limites, qui jouent sans aucun doute un rôle crucial dans les modifications morphologiques réelles dues à la houle. Pour répondre à ces questions, la modélisation numérique ajoute plusieurs niveaux de profondeur à la hiérarchie des outils d'investigation utilisés dans le projet BABA. Plus précisément, afin de compléter les mesures en laboratoire et in situ dans le cadre du projet BABA, elle prendra en compte trois familles de modèles de fidélité croissante. Le niveau de fidélité le plus bas est représenté par les modèles intégrés en profondeur pour lesquels nous utiliserons le solveur TELEMAC2D [Almoghayer et al., 2024]. Ce modèle présente l'avantage d'avoir un coût de calcul réduit, ce qui devrait permettre son utilisation pour tous les cas, y compris ceux étudiés in situ dans BABA. Afin d'inclure une description plus riche de la dynamique verticale, il envisagera d'utiliser le modèle multicouche implémenté dans TELEMAC3D (EDF) [Almoghayer et al., 2024]. Ce modèle fournit une prédiction de fidélité intermédiaire à un coût de calcul modéré, ce qui, d'une part, peut permettre d'inclure également des simulations réalistes, mais surtout, permet d'exploiter les fonctionnalités de TELEMAC3D en termes de modélisation des sédiments pour aller au-delà des prédictions purement hydrodynamiques et obtenir des estimations des changements morphodynamiques. Le solveur tridimensionnel Navier-Stokes NOTUS permet d'effectuer des simulations numériques traitant des processus dont l'échelle de longueur varie de plusieurs mètres à l'échelle submillimétrique, ainsi que tous les processus physiques allant de la propagation des vagues générées par le mascaret à la propagation des vagues secondaires en amont du chenal fluvial, y compris la dynamique de la vorticité et le développement et la séparation des couches limites [Simon et al., 2023].

Pour que la thèse soit couronnée de succès, il est tout d'abord nécessaire de définir des repères basés sur des géométries simples et des cas in situ (tâche 1). Les géométries simples seront tirées de la littérature scientifique (par exemple, les configurations de canaux trapézoïdaux rigides utilisées par Chassagne et al. (2019) et Jouy et al. (2024)) et du projet avec les données de laboratoire obtenues à BABA. Les cas in situ seront fournis par BABA. Ces repères, ainsi définis, seront utilisés pour effectuer une comparaison entre les codes et une comparaison avec les mesures sur le terrain et les expériences en laboratoire. Chaque modèle sera appliqué à tous les repères. Cela correspondra à une tâche par modèle, tâche 2 NOTUS, tâche 3 TELEMAC2D et tâche 4 NOTUS.

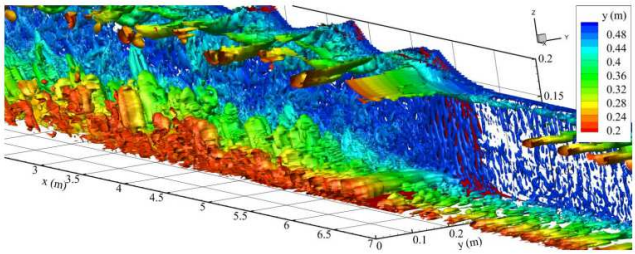


Figure 2 *– Mascaret simulé avec NOTUS [Simon et al., 2023].*

Références

[*Bonneton et al., 2012*] P. Bonneton, N. Bonneton, J.P. Parisot and B. Castelle, Tidal bore dynamics in funnel shaped estuaries, J. Geophys. Res. Oceans, vol. 120, no 2, p. 923-941, Feb. 2015, doi: 10.1002/2014JC010267.

[*Chanson, 2005*] H. Chanson, Mascaret, Aegir, Pororoca, Tidal Bore. Quid ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ?, La Houille Blanche, vol. 91, no 3, p. 103-114, May 2005, doi: 10.1051/lhb:200503014.

[*Yoga, 2018*] Putra, Y. S. (2018). *Contributions numériques pour l'étude du transport des sédiments sous les mascarets* (Doctoral dissertation, Université de Poitiers).

[*Jouy et al., 2024*] B. Jouy, D. Violeau, M. Ricchiuto, and M. Le, (2024). One dimensional modelling of Favre waves in channels. Applied Mathematical Modelling, 133, 170-194, doi:10.1016/j.apm.2024.05.020.

[*Grasso et al., 2021*] F. Grasso, E. Bismuth, et R. Verney, Unraveling the impacts of meteorological and anthropogenic changes on sediment fluxes along an estuary-sea continuum, Sci Rep, vol. 11, no 1, p. 20230, Oct. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-99502-7

[*Elliott et al., 2019*] M. Elliott, J. W. Day, R. Ramachandran, et E. Wolanski, A Synthesis: What Is the Future for Coasts, Estuaries, Deltas and Other Transitional Habitats in 2050 and Beyond?, in Coasts and Estuaries, Elsevier, 2019, p. 1-28. doi: 10.1016/B978-0-12-814003-1.00001-0.

[*Kazhyken et al., 2021*] K. Kazhyken, J. Videman and C. Dawson (2021). Discontinuous Galerkin methods for a dispersive wave hydro-sediment-morphodynamic model. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 377, 113684.

[*Chassagne et al., 2019*] R. Chassagne, A.G. Filippini, M. Ricchiuto and P. Bonneton (2019). Dispersive and dispersive-like bores in channels with sloping banks. Journal of Fluid Mechanics, 870, 595-616

[*Lannes, 2020*] D. Lannes (2020). Modeling shallow water waves. Nonlinearity, 33(5), R1

[*Almoghayer et al., 2024*] M.A. Almoghayer, R. Lam, B. Sellar, C. Old and D.K. Woolf, (2024). Validation of tidal turbine wake simulations using an open regional-scale 3D model against 1MW machine and site measurements. Ocean Engineering, 299, 117402.

[*Simon et al., 2023*] B. Simon, P. Lubin and H. Chanson (2023). Hydrodynamic shock in Rivers: Physical and numerical modeling of flow structures in tsunami-like bores. Physics of Fluids, 35(10).

Domaines scientifiques

Mathématique appliquée, Mécanique des Fluides, Calcul scientifique et Modélisation

Profil et compétences recherchées

Candidat(e) motivé(e) par le travail collaboratif dans un contexte universitaire réunissant des physiciens, des mécaniciens des fluides, des expérimentateurs de labo et/ou de terrain et des numériciens dans le cadre d'un projet collaboratif national. Un master en mathématiques appliquées, en mécanique ou en physique avec une spécialisation en simulation est préférable. Les compétences suivantes sont requises :

- Une forte curiosité scientifique est indispensable ;

- Des compétences en analyse numérique sont très importantes ;

- Des compétences en programmation sont appréciées, ainsi qu'une première expérience dans des projets impliquant des simulations numériques ;

- Une solide connaissance de la physique des transferts est indispensable ;

- Des déplacements de courte et longue durée chez des partenaires nationaux et la participation à des conférences et ateliers nationaux et internationaux sont envisagés ;

- Des compétences en communication sont requises.

Information générale

Type de contrat : CDD de 36 mois
Date de démarrage : Octobre 2026
Salaire : 1 800 euros (salaire net)
Niveau d'étude : Master 2 et/ou ingénieur
Encadrants : Pierre Lubin (pierre.lubin@bordeaux-inp.fr, Institut I2M) et Anthony Beaudoin (anthony.beaudoin@univ-poitiers.fr, Institut P')
Lieu : Institut P', Département Fluides, Thermique, Combustion, SP2MI Bât. H2, 11 Boulevard Marie et Pierre Curie, TSA 41123, 86073 Poitiers Cedex 9, France