

Thèse : Amélioration de la modélisation en hydraulique environnementale 3D avec TELEMAC-3D

1. Contexte industriel

EDF produit de l'électricité à partir d'un vaste panel de moyens de production. La majorité de l'énergie est générée à partir de centrales nucléaires, mais son offre de production couvre également les centrales hydro-électriques (barrages, usine marémotrice) et thermiques ; en parallèle, EDF développe les énergies renouvelables à partir du vent (éoliennes terrestres ou off-shore) ou de la mer (hydroliennes, systèmes houlomoteurs...).

Dans ce cadre, EDF a développé plusieurs codes de calculs afin de répondre par la simulation numérique aux nombreux défis industriels rencontrés. Parmi eux, le système hydro-informatique open source TELEMAC-MASCARET co-développé par le département LNHE d'EDF R&D permet la modélisation d'écoulements environnementaux dans des milieux divers - retenue d'eau/lacs, rivières ou mers/océans – et est ainsi utilisé quotidiennement dans de nombreuses applications liées au dimensionnement ou à l'utilisation des infrastructures gérées par EDF.

2. Le code de simulation en hydraulique environnementale TELEMAC-3D

Le code de simulation TELEMAC-3D est développé depuis plus de vingt ans par EDF et fait partie du système hydro-informatique TELEMAC-MASCARET. Ce code de calcul est dédié à la simulation numérique des écoulements pour lesquels la composante tridimensionnelle est importante. Actuellement, il est largement utilisé pour des études d'ingénierie (par exemple l'impact des rejets d'effluents ou thermiques d'ouvrages en rivière ou en bord de mer, la courantologie de zones maritimes, le transport sédimentaire avec les phénomènes d'affouillement en pieds d'ouvrage de production d'électricité, les vidanges de réservoirs, les courants de turbidité...). Il est bien adapté à certaines spécificités importantes de la modélisation de l'hydraulique environnementale à surface libre :

- Présence de zones sèches (ou bancs découvrants) ;
- Prise en compte de l'effet du vent en surface ;
- Représentation de la marée et des variations rapides de la surface libre à l'échelle de temps de la marée ;
- Traitement des conditions aux limites ouvertes.

Il s'agit d'un code d'hydrodynamique qui résout les équations de Navier-Stokes à surface libre, ainsi que les équations de transport-diffusion de traceurs, afin d'étudier le transport de sédiments et la qualité d'eau. Le problème est traité sous forme variationnelle et résolu numériquement grâce à une méthode des éléments finis (les fonctions d'approximation sont linéaires par morceaux). Le maillage du domaine 3D est construit par empilement de plusieurs couches d'un maillage non structuré du domaine 2D. Il est donc structuré dans la direction verticale, ce qui rend le code particulièrement performant au niveau temps de calcul. La surface libre variant dans le temps, le domaine est mobile et le mouvement du maillage est traité grâce à une formulation ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) uniquement sur la verticale. Le schéma numérique utilisé pour résoudre les équations de Navier-Stokes est semi-lagrangien et semi-implicite. Plusieurs types de schémas sont proposés pour résoudre les équations de convection-diffusion, notamment des schémas distribués de type MURD (multi-dimensional residual distributive schemes), qui permettent une discrétisation décentrée et conservative du terme de convection.

3. Verrous

La multiplication des études utilisant le code TELEMAC-3D ont récemment fait apparaître certaines limitations sur des phénomènes qui sont actuellement mal (ou pas suffisamment bien) représentés. Suite à ce constat, et dans le cadre d'une étude préliminaire, un état de l'art du code, ainsi qu'un benchmarking avec certains de ses concurrents a été réalisé sur la base de cas-tests représentatifs des applications visées. Ce travail a permis de lister les points qui nécessitent un réel investissement :

- la résolution des équations de Navier-Stokes était initialement basée sur l'approximation hydrostatique et une correction non-hydrostatique était proposée. Cette structure a ensuite été modifiée et les équations complètes (également appelées non-hydrostatiques) sont maintenant résolues directement. Cependant, la condition inf-sup nécessaire à la stabilité du problème de Stokes issu de la discrétisation en temps des équations de Navier-Stokes n'est pas satisfaite rigoureusement au niveau discret en espace. L'utilisation d'éléments finis stables pour la condition inf-sup doit donc être envisagée ;
- le choix des conditions aux limites aux frontières artificielles (non physiques) est un problème ouvert pour les équations de Navier-Stokes à surface libre sur domaine tronqué, autant du point de vue mathématique que numérique. Pour les équations de Saint-Venant, le choix proposé dans le code bidimensionnel TELEMAC-2D est basé sur l'utilisation des caractéristiques et permet d'imposer les valeurs du débit et/ou de la hauteur d'eau, selon le régime d'écoulement considéré (fluvial ou torrentiel), de façon à ne pas sur-contraire le problème hyperbolique sous-jacent. Cela donne des résultats numériques stables. Le choix des conditions aux limites purement 3D est cependant à améliorer. La modélisation du rejet d'effluents suite à l'accident de Fukushima a mis en lumière la difficulté d'imposer de telles conditions avec TELEMAC-3D ;
- la simulation de la propagation de la houle, par exemple dans les cas-tests de Dingemans, a mis en évidence des imperfections dans certaines configurations. Or l'étude de ce phénomène physique est importante pour le bon fonctionnement de nombreux systèmes de production d'énergie : protection contre le risque d'inondation par les vagues (houle en mer, clapot sur les fleuves ou lacs) et notamment dimensionnement des digues de protection de sites de production ; protection contre des niveaux d'eau trop bas qui peuvent empêcher les systèmes de refroidissement de centrales de fonctionner (cavitation par exemple pour la conjonction d'un niveau d'eau bas et d'un creux de vague) ; évaluation de la ressource houlomotrice (productible des systèmes de récupération de l'énergie des vagues) ; dimensionnement des installations off-shore en énergies marines (éoliennes off-shore, hydroliennes, systèmes houlomoteurs) vis-à-vis de la sollicitation de la houle et détermination de l'accessibilité de tels sites pour les phases d'installation ou de maintenance ; impact des courants de houle sur la morphodynamique côtière et le transport de sédiments qui pourrait colmater les systèmes de refroidissement de centrales...

EDF souhaite donc engager un travail de thèse dédié à l'amélioration de TELEMAC-3D pour reproduire ces phénomènes complexes.

Notons une contrainte supplémentaire, indispensable à une utilisation industrielle du code : un travail conséquent a été fait par le passé pour permettre le lancement de calcul avec TELEMAC-3D sur des machines massivement parallèles (jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de cœurs de calcul). Il sera donc important de s'assurer que l'ensemble des développements proposés pourra toujours fonctionner efficacement dans ce cadre.

4. Objectifs

Suite aux verrous scientifiques et industriels mis en évidence, le travail à réaliser couvre donc :

- un travail bibliographique et une analyse des hypothèses de modélisation (physiques, numériques...) utilisées dans les autres codes de simulation qui peuvent résoudre les équations de Navier-Stokes à surface libre en 3D : 1^e année ;
- un travail approfondi sur les hypothèses de modélisation, ainsi que les formulations mathématiques et les schémas numériques sur lesquels se base le code Telemac-3D, avec proposition de voies d'amélioration sur les choix actuellement faits : 1^e et 2^e année ;
- l'implémentation de nouvelles méthodes de résolution suite au diagnostic précédent : fin de 1^e année à milieu de 3^e année ;
- la construction de plusieurs cas-tests pour TELEMAC-3D afin de pouvoir discriminer les choix d'hypothèses de modélisation ou les méthodes de résolution employées, et la réalisation des simulations associées (dès la 1^e année) ;
- rédaction de rapports intermédiaires et du manuscrit (les 3 années et en particulier la dernière pour le manuscrit final).

5. Références

<http://www.opentelemac.org>

Abbas L. (2015). Rapport de fin de post-doc sur l'analyse des besoins pour le logiciel de simulation numérique TELEMAC-3D. Rapport EDF R&D-LNHE n° H-P74-2015-05098-FR.

Audusse E., Bristeau M.-O., Pelanti M., Sainte-Marie J. (2011), Approximation of the hydrostatic Navier-Stokes system for density stratified flows by a multilayer model, *J. Comput. Phys.* 230 (9), 3453-3478.

Casulli V. (2014), A semi-implicit numerical method for the free-surface Navier–Stokes equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 74 (8), 605-622.

Decoene A. (2006). Modèle hydrostatique pour les écoulements à surface libre tridimensionnels et schémas numériques. Thèse de doctorat.

Fouchet-Incaux J. (2014), Artificial boundaries and formulations for the incompressible Navier-Stokes equations, *SeMA Journal*, 64(1), 1-40.

Halpern L., Schatzman M. (1989). Artificial boundary conditions for incompressible flow. *SIAM J. Math. Anal.*, 20 (2), 308-353.

Hervouet J.-M. (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows. Modelling with the finite element method*, Wiley.

Hydraulics, WL Delft (2006). "Delft3D-FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments." *User Manual, Delft, Holland*.

Miglio E., Quarteroni A., Saleri F. (2003). Mathematical Modelling of Free Surface Flows. *Quaderni di Matematica* 10, 97-123.

Rickard G., O'Callaghan J., Popinet S. (2009), Numerical simulations of internal solitary waves interacting with uniform slopes using an adaptive model, *Ocean Modelling* 30 (1), 16-28.

Shui P., Valluri P., Popinet S., Govindarajan R. (2015), Direct Numerical Simulation Study of Hydrodynamic Interactions between Immersed Solids and Wall During Flow, *Procedia IUTAM*, 15, 150-157.

6. Modalités

Durée : 3 ans.

Compétences mises en œuvre : mathématiques appliquées, analyse numérique, mécanique des fluides numérique, équation de Navier-Stokes avec surface libre, Fortran, bibliographie.