



**HAL**  
open science

## Obtenir des simulations hydrodynamiques numériquement reproductibles

Rafife Nheili, Philippe Langlois

► **To cite this version:**

Rafife Nheili, Philippe Langlois. Obtenir des simulations hydrodynamiques numériquement reproductibles. 2016. lirmm-01309785

**HAL Id: lirmm-01309785**

**<https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-01309785>**

Submitted on 30 Apr 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Photo © Thierry Leclerc

## Obtenir des simulations hydrodynamiques numériquement reproductibles

**DALI - LIRMM** Rafife NHEILI, rafife.nheili@univ-perp.fr - Philippe LANGLOIS, langlois@univ-perp.fr  
Financements : Erasmus Peace 2, EDF R&D (Chatou)

### La simulation numérique de phénomènes hydrodynamiques : enjeux et principes

Les barrages et les centrales exploitées en bord de mer ou de rivières, interagissent avec l'environnement aquatique, qu'il faut protéger, et dont il faut se protéger. Ainsi l'hydrodynamique est stratégique pour EDF R&D qui, depuis plus de 20 ans, développe Telemac-Mascaret : un logiciel (libre) de simulation numérique de phénomènes hydrodynamiques. Ses 300 000 lignes de Fortran 90 résolvent, par la méthode des éléments finis, les équations de Saint-Venant qui décrivent les

écoulements à surface libre en eaux peu profondes. Ces simulations calculent principalement la hauteur d'eau et sa vitesse en chaque point d'un maillage du domaine d'étude : une vallée, une côte, un bassin, ... Les phénomènes de taille réelle génèrent des volumes de simulation très importants qui sont rendus possibles grâce au *calcul parallèle*. Il permet de traiter simultanément ces calculs en les distribuant entre plusieurs processeurs pour ainsi effectuer le plus grand nombre d'opérations en un temps le plus réduit possible. En pratique, le maillage du domaine est décomposé et distribué entre autant d'unités de calcul que nécessaire.

Deux types de points apparaissent alors : ceux, internes, traités indépendamment par chaque processeur, et les points d'interfaces situés sur les frontières des sous-domaines et pour lesquels les processeurs doivent communiquer entre eux. Ses simulations, complexes et de grandes tailles, ont par exemple permis d'éviter récemment une dépense de 12 millions d'euros pour l'étude de l'impact d'un ouvrage d'art en situation de crue<sup>1</sup>.

### L'arithmétique des nombres à virgule flottante et ses propriétés

Ces calculs sont réalisés avec des

nombres à virgule flottante que nous allons maintenant présenter. Ils permettent d'exprimer les réels sous la forme  $x=m.b^{exp}$ , où  $m$  est la mantisse,  $b$  la base et  $exp$  l'exposant. Ainsi par exemple  $\pi$  peut s'écrire, approximativement en base 10 et avec 6 chiffres de mantisse, comme 3,14159 ou  $314,159 \cdot 10^{-2}$  ou tout autre combinaison qui déplace la virgule en mettant à jour l'exposant. Une telle écriture ne représente exactement qu'un nombre fini de réels : pour les autres se pose le problème de leur approximation, de leur *arrondi*. Sur les ordinateurs, ces nombres flottants respectent depuis 1985 la norme IEEE-754 qui réalise un compromis entre codage puissant et calculs efficaces. Elle définit par exemple deux précisions, sur 32 et 64 bits, qui sont couramment utilisées en informatique.

A cause de l'arrondi, leurs opérations arithmétiques ne sont pas exactes. En général, le résultat d'un calcul informatique est différent de son résultat mathématique : si, en théorie  $a+b=c$ , on obtient en pratique  $a+b=c+e$  où  $e$  est l'erreur (petite) d'arrondi de l'addition de  $a$  et  $b$ . Parfois, si ces deux opérandes sont trop différents (en ordre de grandeur, c'est-à-dire en exposant), alors la plus petite valeur sera absorbée par la plus grande et aura disparue du calcul. A cause de ces imperfections, l'associativité des opérations mathématiques n'est plus valide en arithmétique flottante :  $(a+b)+c \neq a+(b+c)$ . Et ceci est inévitable même sur l'ordinateur le plus puissant du monde.

### Qu'est-ce que la reproductibilité numérique ?

Un logiciel calcule de façon *reproductible* quand tous les bits de ses résultats sont identiques pour plusieurs exécutions successives, et ce même pour un nombre de processeurs qui varie. En parallèle, les ordres de calcul sont indéterminés et, à cause de la perte de

l'associativité de l'addition flottante, les résultats peuvent être différents entre les exécutions séquentielle (sur 1 seul processeur) et parallèle (sur plusieurs processeurs), et entre les parallèles elles-mêmes. Les points blancs de la figure 1 sont les résultats qui diffèrent dans la simulation de l'impact de la chute d'une goutte d'eau, calculée avec Telemac-Mascaret sur un ou deux processeurs, et ce pour deux instants arbitraires. Le nombre de valeurs différentes entre exécutions séquentielle et parallèle, ici sur 2 processeurs, augmente au point que presque plus aucun résultat ne coïncide en ses 2 simulations a priori identiques.

### Des simulations numériques maintenant reproductibles ... mais toujours approximatives !

Les travaux de DALI-LIRMM ont montré que ces différences sont dues aux erreurs d'arrondis des calculs qui impliquent les points d'interface. Nous avons rétabli la reproductibilité numé-

rique au sein du logiciel Telemac-Mascaret pour des premiers cas simples, comme celui de la chute de la goutte d'eau ou l'impact sur la baie de Nice, de la houle de sillage générée par les navires grande vitesse qui relient la Corse au continent. Plusieurs méthodes ont été introduites dont une, très efficace, qui augmente la précision uniquement pour les calculs défailants.

La confiance en ces simulations rendues numériquement reproductibles est clairement renforcée. Il a fallu cependant convaincre les ingénieurs que les calculs séquentiels utilisés comme *la référence* depuis 20 ans n'étaient pas complètement exacts : en effet, les simulations reproductibles diffèrent des résultats séquentiels du logiciel d'origine. Pourtant, bien que plus précises et reproductibles, ces nouvelles simulations restent ... approximatives !

<sup>1</sup> Jean-Michel Hervouet. Hydrodynamics of free surface flows. Modelling with the finite element method. John Wiley & Sons, 2007.

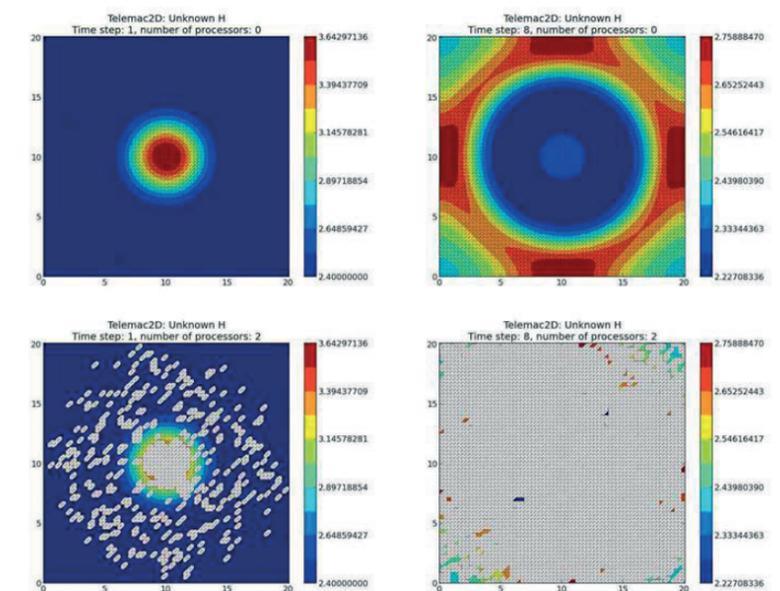


Figure 1 : simulation avec Telemac-Mascaret de l'impact de la chute d'une goutte d'eau sur la surface d'un bassin carré. Les points blancs sont des hauteurs d'eau non-reproductibles entre les exécutions séquentielles (haut) et parallèles avec 2 unités de calcul (bas), à impact+0.2 seconde (gauche) et impact+1.6 seconde (droite).