Modélisation numérique des écoulements à surface libre

L'état de l'art au Laboratoire National d'Hydraulique (LNH)
de l'EDF à Chatou

J.-M. Hervouet (*) et P. Péchon (**)

Introduction

La protection de l'environnement, le calcul des marées, des ondes de tempête, l'impact et la stabilité des ouvrages, la sédimentologie, l'évaluation des ondes de submersion, l'étude des crues, autant de questions cruciales pour les activités d'EDF, autant de disciplines dont la mécanique des fluides à surface libre est le point de départ décisif, la pierre de Rosette.

Le problème est d'apparence simple, il tient en quelques lignes : les équations de Navier-Stokes ; il est resté longtemps indéchiffrable. L'hydraulique, maritime aussi bien que fluviale, a dû se contenter pendant longtemps de l'approche expérimentale, de la reproduction, en vraie grandeur ou en modèle réduit, des phénomènes à étudier.

Pour utiles qu'ils soient, les modèles réduits souffrent toutefois de quelques inconvénients, par exemple leur prix et les délais de mise en œuvre. De plus, les lois de similitude, obtenues par des considérations théoriques sur le choix des échelles, mettent en évidence des limitations insurmontables : certains phénomènes physiques, comme la propagation des vagues et la turbulence, ne peuvent être reproduits rigoureusement sur un même modèle, à moins bien sûr de choisir l'échelle 1. Songez enfin à la difficulté de recréer en laboratoire la tempête en mer du Nord du 14 octobre 1987 en tenant compte de la marée, du vent, et de la pression atmosphérique !

L'idée de la simulation numérique, portée par les progrès exponentiels de l'informatique, s'annonçait donc séduisante : plus de limitation théorique, des coûts et des délais bien inférieurs. Il y avait donc l'espoir de s'affran-

chir d'un coup de tous les défauts reprochés aux modèles physiques.

Les modèles réduits sont aujourd'hui encore des outils indispensables. Si l'on fait remonter à une trentaine d'années les débuts de la simulation numérique en hydraulique, force est donc de reconnaître que les espérances des premiers temps ont dû subir en route quelques déconvenues ; comme dans les domaines de la traduction automatique ou de la démonstration de théorèmes.

On met plutôt l'accent aujourd'hui sur la complémentarité des différentes approches. Il y a eu en effet une répartition des tâches. Nul ne sait encore dimensionner une cuillère de dissipation avec un ordinateur, ni mesurer la résistance d'une digue aux houles déferlantes. On sait par contre calculer des courants, suivre une tache thermique, évaluer l'impact d'un ouvrage d'art, prévoir des zones d'érosion.

Plus difficile que prévue, l'entreprise n'en est pas moins exaltante. Même si les acquis doivent être considérés comme modestes en regard des besoins, ils méritent d'être contés. Les efforts consentis et les progrès réalisés au Laboratoire National d'Hydraulique sur le thème des écoulements à surface libre amènent à un nouvel équilibre entre modèles physiques et modèles numériques. Le moment était donc venu de faire un nouvel état des lieux sur les possibilités actuelles de la simulation numérique.

(*) Ingénieur chercheur au Groupe Hydraulique fluviale du LNH.

(**) Ingénieur chercheur au Groupe Hydraulique maritime du LNH.

Numerical modelling of free surface flows State of the art at the Laboratoire National d'Hydraulique, EDF, Chatou

The experience acquired by LNH for about thirty years allows to set up powerful numerical methods, relying on new techniques developed by mathematicians and using the progress of computers. Numerical models could also benefit from an advanced knowledge in the physical processes. Some of these tools are presented here : NSL for wave propagation simulation, LIDO, TELEMAC and MITHRIDATE for modelling free surface flows. This article also emphasizes the evolution of the methods of work and the environment of computation.

Tableau I

Hypothèses et simplifications dans les codes
d'écoulements à surface libre

*Assumptions and simplifications in free surface
numerical models*

1. Application du code NSL à la propagation de houle.
Application of the code NSL to wave propagation.

Quelles équations, quelles hypothèses ?

Les équations de Navier-Stokes, qui traduisent le bilan de la quantité de mouvement et la conservation de la masse, s'écrivent :

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \text{grad}) \vec{u} = \frac{1}{\rho} \text{div} \vec{\sigma} + \vec{g} - 2 \vec{\omega} \wedge \vec{u} \quad (1)$$

$$\text{div} \vec{u} = 0 \quad (\text{pour un fluide incompressible}) \quad (2)$$

avec :

$\vec{u}$: vecteur de vitesse ;
 $\vec{\omega}$: rotation de la terre ;
 ρ : masse volumique de l'eau ;
 $\vec{\sigma}$: tenseur des contraintes ;

$$\vec{\sigma} = -p \vec{\delta} + 2 \rho \vec{v}_e \otimes \vec{D}$$

avec :

$\vec{\delta}$: tenseur unité ;
 p : pression ;
 $\vec{v}_e$: tenseur (en général scalaire) somme de la viscosité moléculaire et de la viscosité turbulente ;

$$\vec{D} = \frac{1}{2} (\text{grad} \vec{v} + \text{grad}^t \vec{v}) :$$

tenseur de taux de déformation ;

$\vec{g}$: accélération de la pesanteur.

Résoudre d'emblée les équations de Navier-Stokes tridimensionnelles sur un domaine fluctuant (marées, inondations), surmonté d'une surface libre inconnue, oblige à quelques concessions, à quelques hypothèses. Historiquement, on a essayé de commencer par plus simple, et même beaucoup plus simple : les écoulements filaires, c'est-à-dire à une seule dimension ; ceux-ci paraissent cependant bien loin de la réalité et requièrent des explications préalables. Il nous faut donc d'abord évoquer toute la cascade des hypothèses simplificatrices menant aux écoulements filaires avant de remonter degré par degré les échelons franchis par la modélisation numérique.

Le *tableau I* montre la hiérarchie des hypothèses et mentionne les plus récents des codes du LNH qui s'y rapportent.

L'idée de simplification la plus immédiate est de réduire le nombre de dimensions. On aboutit alors aux équations de Navier-Stokes à surface libre bidimensionnelles verticales, représentées par le code NSL. Le problème de la surface libre, inconnue a priori, reste le même qu'en dimension 3 car le domaine de calcul en dépend (voir *figure 1*). NSL est indispensable si l'on veut traiter des écoulements où la cambrure de la surface libre n'est pas négligeable ; on peut aussi évaluer l'effort de l'eau sur des obstacles immergés. Des animations vidéo de résultats de NSL montrent un mouvement des vagues très réaliste. Malgré tout, la limitation des domaines de calcul à des tranches verticales d'écoulement est contraignante.

Une deuxième approche consiste à rechercher dans les équations les termes qui seraient négligeables, c'est-à-dire à faire de la physique ! C'est ainsi que dans beaucoup de cas les accélérations suivant la verticale sont faibles : la pression est hydrostatique, elle n'est due qu'au champ de pesanteur, au poids du liquide. Nous sommes toujours en dimension 3, mais avec des équations plus maniables.

A partir de ces équations de Navier-Stokes hydrostatiques, l'opération de moyenne des vitesses sur la verticale conduit aux équations de Saint-Venant bidimensionnelles :

Continuité :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Quantité de mouvement :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \text{grad } u + g \frac{\partial h}{\partial x} = D_x + S_x - g \frac{\partial Z_f}{\partial x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \text{grad } v + g \frac{\partial h}{\partial y} = D_y + S_y - g \frac{\partial Z_f}{\partial y}. \quad (5)$$

Les notations sont les suivantes :

- u, v : composantes de $\vec{u}$, vitesse moyenne sur une verticale ;
- Q_x, Q_y : composantes du débit ;
- h : hauteur d'eau ;
- Z_f : cote du fond ;
- D_x, D_y : termes de diffusion ;
- S_x, S_y : termes sources (frottement sur le fond, Coriolis, vent, etc.) ;
- g : accélération de la pesanteur.

Bien entendu, la notion de vitesse moyenne perd son sens physique s'il y a de trop grandes inhomogénéités des courants le long des verticales. Des gradients de vitesse sont toutefois inévitables, en particulier près du fond ; il apparaît ainsi dans les équations des termes dits de « dispersion » que l'on modélise comme une diffusion supplémentaire.

Avec les équations de Saint-Venant interviennent des changements fondamentaux :

- la surface libre devient une simple inconnue sur un maillage bidimensionnel, elle ne conditionne plus la forme du maillage ;
- les équations sont formellement des équations de fluide compressible, le rôle de la pression étant joué par la hauteur d'eau.

Le caractère propagatif de ces nouvelles équations s'accompagne d'un phénomène nouveau : les solutions sont parfois discontinues. Le ressaut hydraulique est ainsi l'équivalent du bang supersonique ; il met les méthodes numériques à rude épreuve. Il y a de plus deux régimes d'écoulement : fluvial et torrentiel, aux caractéristiques et aux exigences bien différentes.

A partir des équations de Saint-Venant bidimensionnelles, il est facile ensuite de supprimer une dimension pour trouver enfin les équations des écoulements filaires, particulièrement adaptées aux fleuves et rivières qui sont représentés par une courbe où l'on recherche en chaque

point la hauteur d'eau et le débit. Ces équations s'écrivent :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial z}{\partial x} = -gSJ. \quad (7)$$

Avec :

- S : section mouillée de l'écoulement ;
- Q : débit ;
- z : cote de la surface libre ;
- J est la ligne de charge, prise égale à $Q^2/K^2 S^2 R_h^{3/4}$;
- K est le coefficient de frottement de Strickler et R_h le rayon hydraulique.

La prise en compte de profils en travers complique un peu les équations, par contre, dans le cas d'un écoulement permanent, le débit est constant et seule la hauteur d'eau reste à calculer.

Nous allons maintenant présenter dans le détail 3 codes utilisés au LNH.

- Le système LIDO : équations de Saint-Venant unidimensionnelles.
- Le code TELEMAC : équations de Saint-Venant bidimensionnelles.
- Le code MITHRIDATE : équations de Navier-Stokes à surface libre.

Le système unidimensionnel LIDO

Il s'agit d'un ensemble de logiciels qui tendent progressivement à devenir un code unique, d'une part par l'harmonisation des procédures de saisie des données et de traitement des résultats, d'autre part par l'unification des noyaux de calcul. On distingue encore :

- * LIDO : écoulement dans un bief unique, en écoulement permanent ou non permanent.
- * SARA : s'applique à un réseau ramifié, avec un algorithme de résolution spécialement adapté à la structure du réseau.
- * REZO : s'applique à des réseaux maillés de structure quelconque.
- * CASIER : calcul d'écoulement de crue dans des plaines d'inondation représentées par des casiers interconnectés.
- * CASTOR : calage des coefficients de Strickler.
- * CERBERE : détermination des lois de consigne et des paramètres de régulation du niveau d'une retenue de barrage.
- * MASCARET : écoulements en régime fluvial ou torrentiel.
- * COURLIS : érosion et sédimentation dans les réservoirs.

La figure 2 donne un exemple de bief déjà traité avec LIDO, le bief de Strasbourg en aval de l'usine de Gerstheim sur le Rhin. Dans de telles études, les coefficients de rugosité du fond qui entrent dans la loi de Strickler sont des paramètres importants qui influent sur le calcul des lignes d'eau. Ces coefficients sont toujours difficiles à estimer et compliquent les phases d'étalon-

PLAN

Profil en long

2. Le bief de Strasbourg, en aval de l'usine de Gerstheim sur le Rhin.

The reach of Strasbourg, downstream the station of Gerstheim on the Rhin River.

nage d'un modèle numérique. Le module de calage CASTOR est fondé sur les méthodes de contrôle optimal, il trouve les coefficients de frottement qui cadrent au mieux avec les mesures, en régime permanent aussi bien que non permanent.

Le projet TSAR (*) (transport solide en rivière), s'appuiera sur les résultats de LIDO pour évaluer l'évolution des fonds de rivières à court terme (quelques heures à quelques jours) et à long terme (une saison ou quelques années).

Le système LIDO est utilisé intensivement ; citons, parmi d'autres, l'étude des 27 biefs du Neckar, base d'une régulation complète du fleuve. LIDO fait l'objet d'un contrat de développement avec le Ministère des Transports, où il est déjà employé. On s'intéresse surtout maintenant, signe de maturité, à l'interface homme-machine, à l'aide que l'on peut apporter à un utilisateur novice ou occasionnel. Est-ce à dire pour autant que l'on est entré dans une phase de routine ? Certes non, et l'on travaille à l'heure actuelle à l'algorithme mis au point dans le code MASCARET, capable de fonctionner en régime fluvial et torrentiel. La nouvelle méthode est conservative et ne requiert pas de traitement spécial des ressauts. La figure 3 est l'exemple d'une validation croisée de 2 algorithmes différents, celui du code MASCARET et celui du code RUPTUR 1D, dédié aux ruptures de barrage. Le système LIDO sera ainsi très prochainement capable de traiter les régimes torrentiels.

3. Onde de rupture de barrage dans une vallée. Cotes de surface libre calculées avec MASCARET et RUPTUR.
Propagation of a wave due to dam breaking. Free surface levels computed by MASCARET and RUPTUR.

(*) Convention
EDF-LNH/DEPPR/STCPMVN/LHF/SOGREAH.

Cette tendance au regroupement des spécialités auparavant dispersées dans plusieurs programmes se retrouve aussi en dimension 2, elle simplifie la maintenance des logiciels et de leur chaîne de traitement ; par contre elle exige des efforts en algorithmique car la diversité est née, à l'origine, de l'absence d'une approche unique satisfaisante.

Le code bidimensionnel TELEMAT

CY THERE, STYX, VAGALAM, CEFALO... le créneau des équations de Saint-Venant bidimensionnelles était fort occupé au LNH, toutefois la spécificité des algorithmes s'est révélée un frein sévère à l'évolution. Tout en s'appuyant sur l'indéniable acquis de ces logiciels, il a paru préférable, pour regrouper les compétences, de bâtir sur du neuf. En 1987 a commencé la construction d'un nouveau logiciel, TELEMAT, fondé à l'origine sur une structure de données adaptée aux maillages curvilignes. Le but était de mettre au point, pour des maillages d'éléments finis, un algorithme capable de surmonter les difficultés classiques rencontrées jusqu'alors : écoulements torrentiels, bancs découvrants, turbulence, instabilité en présence de pentes du fond trop grandes, ressauts. Une thèse réalisée au LNH, (voir réf. [5]) et soutenue en 1986, a fourni l'algorithme de base. Plusieurs nouvelles méthodes ont ensuite été inaugurées, dans le domaine de la programmation et de l'algorithmique :

- un logiciel de calcul symbolique, REDUCE, a été employé pour écrire directement en FORTRAN les parties du programme comportant des calculs ou des formules complexes où il y avait un risque important d'erreur humaine. Une conséquence a été l'abandon des fameuses quadratures de Gauss, classiques des éléments finis, mais plus lourdes que les formules exactes fournies par le calcul symbolique ;

- un choix d'inconnues inhabituel (la hauteur d'eau a été remplacée, dans le noyau de calcul du programme, par la célérité des ondes) a facilité la résolution des systèmes d'équations obtenus ;

- des variantes de la formulation variationnelle classique en éléments finis ont conduit à un traitement simple des conditions aux limites. L'exemple de la condition d'imperméabilité est significatif : cette condition, qui exprime qu'aucun flux de liquide ne passe à travers une paroi, couple les composantes du vecteur vitesse puisqu'elle est exprimée par la relation $\vec{u} \cdot \vec{n} = 0$, où $\vec{u}$ est le vecteur vitesse et $\vec{n}$ la normale à la paroi. Dans TELEMAT, la condition d'imperméabilité est obtenue sans couplage, ce qui simplifie la résolution ; ce résultat surprenant montre toute la puissance du formalisme des éléments finis. Avec d'autres méthodes, les différences finies par exemple, cette condition d'imperméabilité reste un problème épineux.

En 1989, la conception d'une nouvelle structure de données pour les matrices en éléments finis a assuré une transition en douceur entre les maillages structurés et les maillages non structurés. Deux conséquences fondamentales, qui n'avaient pas été entrevues au prime abord, sont alors successivement apparues :

- les algorithmes adaptés à cette nouvelle structure sont plus simples que les traitements classiques ; ainsi les opérations d'assemblage et de stockage d'une matrice, de produit matrice par vecteur, de traitement des points de bord, etc., sont soit accélérées, soit purement et simplement supprimées ;

- la simplification s'est accompagnée, sur des machines telles que les CRAY, de la vectorisation qui a permis des gains en temps substantiels.

L'année 1989 a ainsi été fertile en rebondissements et le passage aux éléments finis s'est paradoxalement accompagné d'une chute des coûts. Un calcul de marée dans un port fait au début de l'année en 2 heures de CRAY XMP pouvait être refait en fin d'année en 10 minutes, puis, après l'arrivée du CRAY YMP, en 5 minutes. Le mythe des éléments finis complexes et lourds est donc fortement entamé ; le cadre mathématique rigoureux de la méthode s'est révélé un guide sûr pour la construction d'algorithmes de résolution, et l'on possède aujourd'hui un code dont les performances en temps rivalisent avec les codes aux différences finies. Nous allons voir maintenant quelles en sont aujourd'hui les applications en hydraulique maritime ou fluviale.

Les applications maritimes :

Le domaine maritime apporte son lot de difficultés particulières, ou, selon les goûts, de sujets passionnants. Lorsqu'on calcule une marée sur un grand domaine, il est impossible d'ignorer que la terre est ronde et qu'elle tourne : coordonnées sphériques et force de Coriolis sont de rigueur. Le découvrant de plages à marée basse est un autre problème : le domaine de calcul fluctue au rythme du flux et du reflux. Numériquement, deux solutions se présentent : soit le maillage suit le trait de côte dans ses mouvements, soit l'on résout les équations même là où il n'y a pas d'eau ! Au LNH on a choisi la seconde, car elle évite une gestion des changements de maillage qui donne vite... le mal de mer ; par contre, il faut un algorithme solide qui supporte les hauteurs d'eau nulles, fonctionne bien à tous les régimes (torrentiel et fluvial) et s'accommode des ressauts.

La figure 4 illustre, en coupe, le retrait de la mer sur une plage ; de l'eau reste prisonnière dans un repli du terrain et le reste de la plage est découvert. Résoudre les équations de Saint-Venant sans eau a exercé, on l'imagine, une sélection sévère parmi les algorithmes.

On le sait depuis les travaux de Newton, l'étude des potentiels lunaire et solaire ne suffit pas à expliquer l'amplitude des marées. Les ondes sont en fait déformées et amplifiées par le relief et la fréquence propre des bassins océaniques. Si l'on simule par exemple la marée dans la Manche, il faut tenir compte de ces ondes qui doivent entrer dans le domaine de calcul et en sortir librement. Ceci est assuré par la condition dite « d'onde incidente », ou de radiation, et que nous écrivons sous la forme :

$$\vec{Q} \cdot \vec{n} = c(Z - Z_0) - (1 - \vec{n} \cdot \vec{n}_{inc}) c A \cos \left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi \right)$$

où :

$\vec{Q} \cdot \vec{n}$ est le flux à travers la frontière du domaine.

4. Découvrement d'une plage au cours de la marée. Code TELEMAC.

Drying simulation of an intertidal flat. Code TELEMAC.

Z est la surface libre, Z_0 la surface libre initiale.
 $\vec{n}_{inc}$ est la direction de l'onde incidente, A son amplitude.
 T est la période de l'onde incidente et φ sa phase.
 $\vec{n}$ est le vecteur normal à la frontière du domaine.

La figure 5 montre l'exemple d'une perturbation se propageant dans un bassin carré. En haut les frontières du domaine sont solides, elles réfléchissent l'onde, en bas elles sont rendues « transparentes » par la condition d'onde incidente.

On travaille actuellement au LNH sur un maillage de 32 000 éléments couvrant la Manche et la mer du Nord, et toute la façade Atlantique jusqu'à l'Espagne. L'objectif est de connaître les courants de marée, en particulier en Manche (voir figure 6, page suiv.), sur un cycle complet vive-eau morte-eau, soit 14 jours. Cette étude fait l'objet d'une collaboration avec le Ministère des Transports. Plusieurs jours de marée peuvent aujourd'hui être simulés en quelques minutes et l'outil de calcul s'efface maintenant devant les questions de physique : choix des ondes de marée entrant dans le domaine, influence du frottement, de la précision des fonds, etc.

En ajoutant aux équations de Saint-Venant l'influence de la pression atmosphérique et de la vitesse du vent, il est possible de reproduire les ondes de tempête, les surcotes, qui en mer se superposent aux effets de la marée. Le code CEFALO était jusqu'à présent dédié à cette tâche au LNH et à la Météorologie nationale où il a été intégré à la chaîne de prévision. Toutes les spécifications de CEFALO ont maintenant été intégrées à TELEMAC avec un gain de temps appréciable : une tempête simulée en 1 000 s par CEFALO est reproduite en 20 s par TELEMAC. Là encore, il reste beaucoup de questions de physique à résoudre, l'objectif étant une prévision à 10 % près des surcotes dans la Manche.

PAROIS REFLECHISSANTES

PAROIS TRANSPARENTES

5. Propagation d'une perturbation circulaire dans un bassin carré. Code TELEMAC.

Propagation of a circular perturbation in a square basin. Code TELEMAC.

6. Courants de marée dans la Manche. Code TELEMAC.
Tidal currents in the English Channel. Code TELEMAC.

7. Ecoulement autour de piles de pont. Code TELEMAC.
Flow around bridge piers. Code TELEMAC.

IMPACT D'UN PONT SUR LES CRUES DU RHONE A SERMENAZ

DETAIL DE L'ECOULEMENT AUTOUR DE DEUX PILES

8. Etude de l'influence d'un ouvrage d'art. Code TELEMAC.
Impact study of a bridge. Code TELEMAC.

Les applications fluviales :

Les calculs d'écoulements dans un bief de rivière sont maintenant monnaie courante, qu'il s'agisse d'étudier un rejet thermique ou l'influence d'un ouvrage d'art. La figure 7 montre un cas schématisé (les proportions sont peu réalistes) d'écoulement de l'eau autour de piles de pont. Ce cas fait partie du dossier de validation du

programme. La figure 8 correspond à une situation réelle, le Rhône à Sermenaz en amont de Lyon, où il s'agissait d'installer une seconde pile de viaduc dans le sillage de la première. L'évolution des fonds, le creusement de fosses d'érosion, sont des phénomènes importants qu'il convient d'évaluer, et où la connaissance précise de la courantologie est nécessaire.

ETUDE DE L'IMPACT D'UN DEPOT DE DRAGAGE

9. Calcul des courants dans le bief de Gamsheim. Code TELEMAT.

Computation of currents in the reach of Gamsheim. Code TELEMAT.

La figure 9 représente l'intensité des courants dans le bief de Gamsheim sur le Rhin, en présence d'un dépôt de dragage que l'on projette d'y installer. Là aussi la tenue des fonds est un critère important et la nécessité d'un couplage avec un modèle sédimentologique se fait sentir ; c'est pourquoi l'on a développé récemment le code TSEF, qui calcule le transport solide par charriage en fonction des courants fournis par TELEMAT. Le couplage entre les phénomènes hydrauliques et sédimentaires est nécessaire (courants et fonds sont étroitement dépendants) mais délicat : les échelles de temps sont fort différentes. De plus, les diverses lois de charriage déjà essayées ne donnent pas toujours des résultats très concordants ; il faudrait aussi traiter le transport en suspension, les sédiments cohésifs. Un sujet... à creuser et qui fait l'objet de l'important projet SISYPHE, où collaborent le Service Technique central de Compiègne, l'Université de Technologie de Compiègne, la SOGREAH, le Laboratoire d'Hydraulique de France et le LNH.

Le problème des bancs découvrants déjà rencontré en hydraulique maritime se pose avec plus d'acuité dans les vallées fluviales, en cas d'inondation par exemple. Une onde de crue se propage à la fois sur fond mouillé (le lit mineur) et sur fond initialement sec (le lit majeur), en régime torrentiel aussi bien que fluvial, avec de nombreux obstacles : ponts, remblais, etc. Bien reproduire une crue demande une simulation fine sur des domaines très grands, et sur de longues périodes. C'est donc un sujet où les difficultés se cumulent. C'est aussi là que peuvent se mesurer les progrès et que portent aujourd'hui les efforts.

Le code MITHRIDATE

Les codes LIDO et TELEMAT permettent de traiter une large gamme de problèmes rencontrés dans la nature. Mais il existe bien sûr des situations pour lesquelles la troisième dimension est nécessaire, par exemple lorsque de forts gradients de densité apparaissent, donnant naissance à des courants hétérogènes dans la masse fluide. Citons aussi les courants de structure hélicoïdale dans les coudes de rivière, les circulations dues à l'entraînement par le vent, l'étalement d'eau douce sur la couche d'eau salée à l'embouchure d'un fleuve, ou encore un rejet de polluant dans le milieu marin ou fluvial. Autant de situations fréquemment rencontrées où les aspects tridimensionnels doivent être considérés.

Pour simuler les écoulements tridimensionnels, le LNH utilisait jusqu'à maintenant le modèle ODYSSEE bâti sur une méthode numérique en différences finies (réf. [10]). La figure 10 en est une illustration : Il s'agit de la tache thermique de la centrale de Gravelines. Au voisinage du canal de rejet, le panache d'eau chaude flotte à la surface, puis il est dilué sous l'action des courants de marée au large. La confrontation des résultats de calcul et des mesures recueillies sur le site a confirmé la qualité de cet outil ; un seul point noir : le coût élevé du calcul ne permettait pas d'aborder avec ODYSSEE des projets de moindre envergure.

PHASES DE LA MAREE

COUPES DU PANACHE
DE FLOT

10. Simulation tridimensionnelle du panache d'eau chaude de la centrale de Gravelines. Vues en surface. Code ODYSSEE.

Tridimensional simulation of the heated water plume at the power station of Gravelines. Surface views. Code ODYSSEE.

MITHRIDATE

Application à un cas schématique
Le maillage de peau

Application to a schematical case
The skin mesh

MITHRIDATE

Application à un cas schématique
Champ de vitesses, $t = 20$ mn

Application to a schematical case
Velocity field, $t = 20$ mn

- 11.** Ecoulement tridimensionnel dans une darse en régime de marée. Code MITHRIDATE.
Tridimensional tidal currents in a basin. Code MITHRIDATE.

Compte tenu des nouvelles méthodes numériques élaborées au LNH, de la chute des coûts qu'elles entraînent, et devant l'accroissement des demandes d'études liées notamment à l'environnement, un nouveau projet de code tridimensionnel a été lancé au cours du second semestre 89, sous le nom de MITHRIDATE. Ce roi de l'Antiquité, connu pour s'immuniser contre les poisons en absorbant quotidiennement une dose d'arsenic, est donc aujourd'hui invoqué pour des études de pollution.

La possibilité de raffiner le maillage dans la zone d'intérêt tout en gardant une maille grossière au loin est cruciale pour un modèle tridimensionnel car la taille du système à résoudre devient rapidement énorme. Ainsi on rencontre des cas de rejets immergés où les mailles doivent être de l'ordre du mètre au voisinage des ouvrages pour bien représenter la dilution initiale, tandis que des mailles de plusieurs centaines de mètres sont suffisantes à quelques kilomètres du point de rejet. Les maillages non structurés s'imposent pour répondre à cet impératif.

Comme on l'a déjà remarqué plus haut, la surface libre est une inconnue évoluant au cours du temps. Dans MITHRIDATE, elle est calculée à chaque pas de temps en résolvant les équations intégrées sur la verticale, avec la bibliothèque TELEMAT (voir réf. [11]). Le besoin d'être compatible avec TELEMAT et d'avoir facilement accès aux grandeurs intégrées sur la verticale a conduit à utiliser des éléments de forme prismatique. La figure 11 présente un maillage et un champ de courant dans le cas schématique d'une darse avec un épi, en régime de marée. Dans ce test la hauteur des prismes évolue en fonction du temps.

Les lois physiques mises au point et validées dans le passé, telles que la contrainte de vent, le frottement aux parois ou la turbulence, seront bientôt implantées dans le modèle. La phase de développement s'achèvera après une validation du code sur une série de cas tests dont la solution analytique est connue ou pour lesquels des mesures recueillies sur modèle physique ou en nature sont disponibles. Ce n'est qu'après cette étape de validation que pourra être engagée l'exploitation industrielle du code, prévue avant fin 91.

La préparation des données

Avant tout calcul, il faut définir le contour du domaine à traiter, réaliser un maillage, préciser les conditions initiales, les conditions aux limites. Ces tâches essentielles (« garbage in, garbage out ») sont souvent fastidieuses et, pour un code opérationnel, représentent la majeure partie du travail. De plus, les erreurs de saisie, si elles sont détectées seulement à l'issue d'un calcul de courants, coûtent très cher. Pour fiabiliser et accélérer cette phase de préparation des données, le LNH a développé un logiciel de numérisation des fonds à partir de cartes bathymétriques, dénommé SINUSX ; il dispose du logiciel de maillage en éléments finis SUPERTAB (sous licence IDEAS). Ces outils fonctionnent sur station de travail et fournissent une visualisation instantanée des tâches en cours. L'investissement consenti pour ces

outils est lourd, en particulier lorsqu'il s'agit de développements nouveaux, il s'est malgré tout révélé fructueux, en regard du temps gagné pour les applications.

La représentation des résultats

En modélisation numérique, les efforts ont longtemps été concentrés sur le code de calcul lui-même, au détriment des logiciels de visualisation. On reconnaît aujourd'hui qu'il faut leur accorder une attention toute particulière, car ils répondent à deux fonctions essentielles :

- montrer rapidement, pendant l'étude, les résultats d'un calcul. Ce qui demandait une journée il y a une dizaine d'années prend maintenant quelques secondes. Champs de vecteurs, surfaces colorées, perspectives ont heureusement remplacé l'examen de tableaux de chiffres ;
- fournir au client de l'étude un produit fini et convaincant, support des explications et discussions. Il faut dans ce domaine surmonter le handicap de l'abstraction, qui biaise la comparaison entre modèle physique et numérique.

C'est dans cet esprit que le LNH a mis au point le post-processeur RUBENS, destiné à la visualisation des résultats des modèles bidimensionnels. Ce logiciel fonctionne sur des stations de travail, dont il met en œuvre toute la convivialité. Les images produites peuvent être employées dans des films vidéo.

Pour les domaines tridimensionnels, où toute représentation en plan est source de difficultés, le code MITHRIDATE a recours au logiciel GRAFN3S, développé à l'origine pour le code d'écoulements internes N3S. Ses multiples fonctions permettent par exemple d'étudier en détail des champs de courants et de reproduire des lâchers de particules. IRIDIUM, un important projet de post-processeur graphique, est par ailleurs en cours de construction à la Direction des Etudes et Recherches et devrait succéder à GRAFN3S ; un soin particulier est apporté à la convivialité et à l'ergonomie. Un seul danger : que la séduction des graphismes relègue au second plan la rigueur des calculs (« garbage in, garbage out, but it plots ! »).

Quelques remarques sur le génie logiciel

L'analyse numérique est aujourd'hui, et définitivement sans doute, indispensable en hydraulique. Par voie de conséquence, le génie logiciel l'est aussi. Entendons par là qu'un minimum de principes de construction doivent être respectés, qui ont fini par s'imposer à force de catastrophes informatiques, d'échecs célèbres, de projets abandonnés, enlisés, ou, dans le meilleur des cas, beaucoup trop coûteux (*). L'époque du Far-West numérique est donc révolue, mais il faut craindre, dans ce domaine, de voir le naturel revenir au galop.

(*) Lire à ce sujet « The mythical man-month » de F. P. Brooks Jr.

D'abord motivée par les enjeux du nucléaire, EDF a fait entrer l'Assurance Qualité dans les habitudes des développeurs de logiciels. Le plan-qualité de chaque projet décrit le cadre accompagnant les différentes étapes de la vie d'un logiciel, depuis la conception jusqu'à la phase de maintenance. Pour un code de calcul sous Assurance Qualité comme ceux que nous venons de présenter, cela signifie en particulier qu'on dispose d'une documentation complète : cahier des charges, note théorique, descriptif informatique, note de validation, notice d'utilisation. La version du programme (référéncée et archivée) que l'on utilise pour une étude est préalablement testée sur un ensemble de cas représentatifs qui permettent de bien évaluer les performances du logiciel et son domaine d'application. Sur les versions référencées, des efforts importants d'ergonomie sont consentis, afin de guider un utilisateur non spécialiste.

La créativité du chercheur est-elle bridée ? L'Assurance Qualité distingue en fait les versions en développement et la version opérationnelle. Le chercheur peut donc travailler librement sur sa propre version sans saborder une étude en cours. Malheureusement, ou plutôt heureusement car c'est un des intérêts du sujet, nulle procédure n'explique dans le détail comment construire un logiciel d'analyse numérique qui marche. Faut-il des équipes nombreuses ou un programmeur unique ? guerre de tranchée, commando ou équipe chirurgicale, tous les scénarios ont déjà été joués, chacun étant adapté (ou pas !) à un cas particulier. Au LNH les modèles numériques sont élaborés par des équipes de projet comportant de trois à dix personnes, dont les compétences couvrent aussi bien l'analyse numérique que la physique. Beaucoup d'ingénieurs travaillent à plusieurs projets à la fois, les rôles étant parfois inversés d'un projet à l'autre. Des participants extérieurs à l'EDF peuvent être intégrés à une équipe ; l'Université de Hanovre collabore par exemple avec le LNH sur MITHRIDATE, dans le cadre d'un projet européen, afin de déterminer les mouvements de vases dans l'estuaire de la Weser.

L'effort de développement et de recherche est considérable mais les projets doivent garder une taille raisonnable ; les logiciels sont souvent conçus, réalisés et utilisés par les mêmes, l'idéal étant qu'une personne au moins, voire deux, connaisse entièrement un programme, de A à Z, afin d'en garder le contrôle et de faciliter à d'autres des interventions plus ponctuelles. Décrire dans le détail et à l'avance ce qu'on va faire au début d'un projet est apparu souvent irréaliste, d'une part parce que nombre d'avancées sont faites à l'occasion du développement d'un logiciel, d'autre part parce que les progrès des matériels modifient sans cesse les conditions d'utilisation. Le maître mot serait donc plutôt l'évolution, qu'il faut prévoir et favoriser.

Conclusion

L'emploi de méthodes numériques plus performantes conjugué aux progrès des matériels informatiques a donné un formidable essor à la modélisation numérique. Cela se traduit par une plus grande qualité des résultats et par une extension du domaine d'application. De

nouvelles techniques numériques, des outils et des procédures de génie logiciel permettent d'élaborer rapidement des modèles fiables et facilitent la maintenance.

Cette évolution était nécessaire. En effet, l'étude des phénomènes physiques reste primordiale et l'hydraulicien ne doit pas être absorbé corps et biens par des questions informatiques. Il faut savoir utiliser à bon escient l'outil numérique et en reconnaître les limites. Il faut aussi en reconnaître les possibilités. Un logiciel de mécanique des fluides est un peu plus qu'un banal successeur de la règle à calcul ; documenté et maintenu, il est un savoir qui se transmet.

Les travaux à venir s'orientent vers une description toujours plus fine de la physique ; de plus en plus il faudra coupler des phénomènes intéressants des disciplines différentes, comme la courantologie, la sédimentologie et l'écologie.

Bibliographie

- [1] J. ALLARD, A. LEBOSSE, M. UAN. — *Principe de résolution de modélisations filaires des écoulements à surface libre : « LIDO » et « SARA » version 1.0.*
- [2] A. LEBOSSE. — *Estimation of the Manning-Strickler roughness coefficient in Saint-Venant equations.* Rapport EDF HE-43/89.58.
- [3] J.-P. BOUCHARD, M. CORDELLE, G. LABADIE, J. LORIN. — Numerical simulation of mud erosion in reservoirs by floods. Application to reservoirs of the Durance river. Communication au congrès de l'AIHR à Ottawa en août 1990.
- [4] N. GOUTAL, F. LEPEINTRE. — A predictive-corrective scheme to solve the one-dimensional shallow water equations. *Proceedings of the International workshop on fluvial hydraulics of mountain regions.* Trente, 3-6 Oct. 1989.
- [5] N. GOUTAL. — *Résolution des équations de Saint-Venant en régime transcritique par une méthode d'éléments finis. Application aux bancs découvants.* Thèse de doctorat de l'Université Paris VI.
- [6] J.-M. HERVOUET. — Simplification et vectorisation des algorithmes en éléments finis. A paraître dans le « *Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches* ». Série C. *Mathématiques et Informatique*.
- [7] J.-C. GALLAND, N. GOUTAL, J.-M. HERVOUET. — TELEMAC, a new numerical model for solving shallow water equations. A paraître dans « *Advances in Water Resources* ».
- [8] O. DAUBERT, J.-M. HERVOUET, A. JAMI. — Description of some numerical tools for solving incompressible turbulent and free surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. Vol. 27, 3-20 (1989).
- [9] J.-M. HERVOUET. — Comparison of experimental data and laser measurements with the computational results of TELEMAC code (shallow water equations). Communication au congrès : « *Computational modelling and experimental methods in hydraulics* » (HYDROCOMP' 89, Dubrovnik).
- [10] M. DARRAS, P. DONNARS, P. PÉCHON. — Three dimensional numerical model for thermal impact studies. Communication au congrès : « *Three dimensional models of marine and estuarine dynamics* ». Liège 1987.
- [11] O. DAUBERT, B. GEST, F. LEPEINTRE. — *Code 3D à surface libre MITHRIDATE. Equations de base, note d'avancement.* Rapport EDF HE-41/89.38.