Méthodes et outils numériques en mécanique des fluides

Computational modelling in fluid mechanics

A. Hauguel

EDF — Laboratoire national d'hydraulique
6, quai Watier, 78400 Chatou

La plupart des modélisations en mécanique des fluides, que cela soit dans le domaine de l'environnement ou dans le domaine industriel, conduisent à des équations du même type. L'avènement des ordinateurs a donc permis, ces dix dernières années, la mise au point de toute une gamme de modèles numériques de plus en plus complexes et couvrant un champ d'applications très variées. L'ensemble des codes présentés constitue maintenant un moyen d'étude complémentaire de l'approche expérimentale.

The modelling of the greatest part of environmental or industrial flow problems gives very similar types of equations. The considerable increase in computing capacity over the last ten years consequently allowed numerical models of growing complexity to be processed. The varied group of computer codes presented are now a complementary tool of experimental facilities to achieve studies in the field of fluid mechanics.

L'hydraulique et le numérique

Les problèmes de l'hydraulique et de la mécanique des fluides sont complexes. Pour les aborder au stade des études, on exploite des modèles. Depuis longtemps, les modèles physiques sont utilisés pour reproduire les phénomènes réels. La réduction d'échelle sous-entend un certain nombre d'hypothèses sur les comportements du fluide ou du problème.

Ces mêmes hypothèses ont permis depuis longtemps la mise en équations d'un bon nombre de problèmes de mécanique des fluides (Navier-Stokes, Saint-Venant,...). Sauf cas très simplifiés, on parlait alors de modèles mathématiques, on ne savait pas les résoudre. L'avènement des ordinateurs a permis de franchir ce pas. La mise au point de méthodes numériques performantes se doit de limiter les erreurs dues à ce pas supplémentaire dans la modélisation (biais numérique, amortissement, approximation des frontières,...).

La notion de modèle numérique comporte donc plusieurs facettes. C'est d'abord la recherche du *modèle mathématique le plus adapté* (l'équation). Comme pour les modèles réduits, l'expérience de l'hydraulicien y est fondamentale. C'est ensuite celle d'une révolution numérique aussi précise que possible (certains algorithmes peuvent masquer les phénomènes physiques recherchés). C'est enfin *l'étalonnage des paramètres* qui ne peut être crédible qu'après une longue et précise confrontation avec des mesures.

Il ne s'agit pas de présenter ici tous les modèles numériques de mécanique des fluides, mais plutôt de souligner les idées simples qui ont conduit à leur développement dans le département Laboratoire national d'hydraulique ces dix dernières années.

L'originalité de ces modèles réside principalement dans leur similitude du point de vue numérique et dans leur diversité du côté des applications.

Les méthodes

La plupart des modélisations en hydraulique, que cela soit dans le domaine de l'environnement ou dans le domaine industriel, conduisent à des *équations du même type*. En effet, pour les déterminer, on part généralement des équations de Navier-Stokes auxquelles on fait subir quelques simplifications. Elles expriment toujours le bilan de la masse du fluide, de sa quantité de mouvement et de celle d'un champ scalaire : température par exemple. Les mécanismes d'évolution de la vitesse du fluide et du champ scalaire traduits par les opérateurs mathématiques apparaissant dans ces équations sont toujours :

Il existe des différences fondamentales de comportement entre ces mécanismes, représentés par des opérateurs de nature mathématique différente.

La plupart des modèles numériques, développés au Département L.N.H. ces dix dernières années, exploitent cette idée simple qu'un algorithme n'est pas performant que s'il n'a qu'un seul but à atteindre. On a donc élaboré *différents algorithmes en découpant les équations en plusieurs parties et en appliquant une résolvante différente la mieux adaptée à chacune d'elles*.

Au cours du temps, des progrès ont été faits sur la précision du raccord entre ces résolutions; en partant de simples pas fractionnaires pour envisager maintenant des raccords qui n'introduisent aucune erreur supplémentaire.

Une attention toute particulière a été donnée à l'opérateur de convection pour lequel *une méthode de caractéristiques* a été continuellement perfectionnée (cf. [1], [2]). L'idée de départ consiste à suivre les trajectoires et à construire la solution point par point. Cette procédure a subi diverses améliorations et a montré des qualités indéniables pour diminuer les parasites inhérents à tout schéma numérique; la diffusion numérique et le déphasage. Ces travers sont, en effet, souvent difficilement décelables car la solution possède une allure correcte et très régulière. Toute modélisation de la loi de comportement turbulente est rendue inopérante par l'introduction d'une diffusion numérique bien trop grande.

Le développement considérable de la puissance des ordinateurs a également permis le traitement de problèmes de plus en plus complexes. Résolues d'abord en dimension 1 puis 2, on résout maintenant des problèmes tridimen-

sionnels, mais on est dans ce contexte, et pour quelques années encore, à la limite de la puissance. Aujourd'hui, les résolutions de 40 points au cube ne sont possibles qu'avec un traitement particulier de l'étape de continuité qui découple les trois composantes de la vitesse et de la pression (cf. [3], [4]).

Les progrès réalisés dans la modélisation de la turbulence qui se développe surtout au voisinage des parois, ont été réalisés de pair avec une meilleure description de la géométrie de celles-ci. On est ainsi passé des différences finies en mailles rectilignes, aux différences finies en mailles curvilignes pour travailler maintenant avec des éléments finis. Ceci s'est accompagné bien sûr d'un surcoût de traitement numérique à la limite des ordinateurs actuels en tridimensionnel.

Notons enfin, qu'il est commode de conserver pour le numérique le caractère transitoire en temps, y compris lorsque l'on cherche un état stationnaire. Il s'est avéré que, pour traiter les non linéarités (convection, turbulence), c'est une méthode efficace et robuste. Le pas de temps est donc un choix pour l'utilisateur et, dans un souci de robustesse, les méthodes choisies sont toutes inconditionnellement stables. Ce choix peut être, dans certains cas, plus coûteux. Si l'on souhaite modéliser correctement les phénomènes physiques à leur échelle de temps (et non à celle du maillage), c'est la solution qui s'impose. Il apparaît également que, sur un éventail de cas traités, c'est la procédure la plus économique.

Les outils développés

Bien que construits sur les mêmes principes numériques, les différents codes utilisés pour les applications du département Laboratoire National d'Hydraulique couvrent des domaines très divers. On peut distinguer deux grandes familles.

L'une regroupe les cas où le fluide est incompressible, les applications y sont plutôt dans le domaine industriel; l'autre, les cas où il y aura propagation d'ondes dans le domaine, les applications relèvent plutôt de l'environnement.

Dans les deux domaines, la méthodologie utilisée est la même. A partir d'un outil de base résolvant un système d'équations donné (Navier Stokes pour l'industriel, Saint Venant pour l'environnement) que nous appellerons code, différents modèles spécifiques aux applications ont été élaborés.

Le tableau de la *figure 1* présente les différents outils mis au point et leur imbrication (modèles liés aux codes de base). Les codes de base les plus anciens : SBIRE et CYTHERE bidimensionnels en différences finies à mailles rectilignes ont donné naissance à toute une série de modèles spécifiques. Les codes de base plus récents, mailles curvilignes, éléments finis bidimensionnels ou différences finies traditionnelles, entrent progressivement dans le domaine des applications à travers leurs dérivés.

L'industriel (incompressible)

Le système SBIRE :

L'outil de base est constitué par un code à deux dimensions en différences finies sur un maillage rectangu-

Figure 1

laire (Code SBIRE). Il prend en compte une loi de turbulence assez fine. De très nombreuses applications ont été réalisées à l'aide de ce code (cf. [5]).

Il s'agit par exemple de l'étude des panaches d'un réfrigérant dans un vent traversier (modèle PANACH). Ce modèle fournit en absence de relief la forme et la longueur du panache issu d'une ou plusieurs tours de refroidissement pour des conditions atmosphériques différentes (vent, température, humidité). Au total, une dizaine d'études de sites ont été faites pour les besoins d'E.D.F. (ceci correspond à environ deux cents calculs).

Les études de thermohydraulique des réacteurs rapides ont également été réalisées à l'aide d'un modèle dérivé de SBIRE (Modèle CORA, cf. figure 2). Il s'agit de déterminer les températures des coques de cuves des réacteurs rapides lors de transitoires thermiques. La figure 2 présente à titre d'exemple les résultats de l'étude du champ thermique dans le collecteur chaud du réacteur Super Phénix 2 lors d'un arrêt d'urgence.

Le code SBIRE a également donné lieu à un modèle simulant l'écoulement axisymétrique dans un réfrigérant à tirage naturel (Modèle STAR, cf. figure 3). Celui-ci a montré la nécessité d'une meilleure représentation de la géométrie.

Enfin, le code SBIRE a donné lieu à un modèle qui a apporté une aide appréciable dans le dimensionnement des échangeurs de la filière rapide (modèle CYPRES). On a introduit pour cela dans le code des pertes de charge pour simuler l'effet des tubes sur l'écoulement, en ne cherchant à déterminer qu'un écoulement moyen bidimensionnel entre les tubes.

Figure 2. — Modèle CORA — Transitoires de fonctionnement dans le collecteur chaud du surgénérateur Super Phénix II.

Figure 3. — Modèle STAR — Fonctionnement des aéroréfrigérants.

Figure 4. — Modèle ULYSSE — Stratifications dans les conduites.

Figure 5. — Modèle ESTET — Grands collecteurs des réacteurs.

Figure 6. — Modèle TRIGEVE — Générateurs de vapeur.

Figure 7. — CODE N3S — Ecoulement autour d'une tour de réfrigération.

Le système PENELOPE ULYSSE :

Dans le cas d'une géométrie plus complexe (parois courbes...), il a fallu développer un outil différent utilisant un maillage curviligne quelconque. Ce code (PÉNÉLOPPE et ULYSSE) est l'outil de base pour tous les problèmes où la géométrie a une influence prépondérante (cf. [6]).

En même temps qu'une bonne description de la géométrie, un effort de modélisation a été nécessaire dans le cas des stratifications thermiques dans les conduites pour bien simuler l'effet de blocage de la turbulence par les stratifications thermiques. Cet effet devient très important pour prédire les créations de poches de fluide (cf. figure 4).

ULYSSE est maintenant dans sa phase industrielle. Il a été notamment appliqué au fonctionnement des aéroréfrigérants. Différentes formes de linteaux ont été étudiées du point de vue des pertes de charge induites. De même, la forme de la sortie de la coque a pu être optimisée.

Le système ESTET :

Dans le cas de géométries tridimensionnelles, il existe un code au Département L.N.H. qui repose sur les mêmes principes et qui intègre les équations de la mécanique des fluides en différences finies avec une simulation de la turbulence fine (code ESTET). La prise en compte de parois obliques par rapport au maillage est effective, mais une paroi courbe doit être décomposée en plusieurs obliques (cf. [7]).

Ce code permet de traiter un grand nombre de points dans des temps acceptables sur le CRAY. Plusieurs applications ont déjà été réalisées ou sont en cours; notons principalement le calcul de transitoires thermiques dans la cuve chaude du réacteur Super Phénix où les comportements mis en évidence sur modèle réduit ont pu être retrouvés (stratifications), le calcul du collecteur froid de Super Phénix, ainsi que celui de l'écoulement dans l'espace annulaire « Down Comer » d'un générateur de vapeur.

L'étude thermohydraulique des grands collecteurs des réacteurs (par exemple collecteur froid de Super Phénix II) nécessite une approche tridimensionnelle d'une géométrie complexe. Le modèle ESTET constitue un premier moyen d'étude dans ce domaine (cf. figure 5). Complété par une équation sur l'entropie, ESTET a permis d'aborder l'écoulement dans un bas de générateur de vapeur de réacteur à eau pressurisée. Le mélange eau-vapeur est supposé à l'équilibre (modèle TRIGEVE). Une approche bidimensionnelle (modèle BIGEVE) de ce problème avait été réalisée à l'aide du code SBIRE et on a pu ainsi chiffrer les effets tridimensionnels. Les deux codes ont été appliqués aux générateurs de vapeur de BUGEY 4 (cf. figure 6).

En lien avec le Département Mécanique et Modèles Numériques, on a élaboré et validé un code de propagation linéaire des ondes de pression dans un espace à trois dimensions. L'objet du modèle PRESSUR est de déterminer les surpressions dues à une explosion au voisinage d'une centrale. Ce code est à trois dimensions en différences finies. Il prend en compte les parois courbes d'une façon analogue à celle réalisée dans le code ESTET et il a été validé par des expériences bidimensionnelles. Il a permis de traiter le cas d'une centrale complète.

Le système N3S :

Bien que le code ESTET possède un traitement des parois courbes qui évite de les modéliser par des marches d'escalier, il apparaît que, pour certaines applications, un maillage s'appuyant sur une grille n'est pas réalisable. Ceci a poussé à entamer la réalisation, en lien avec le Département mécanique et Modèles Numériques, d'un code tridimensionnel en éléments finis (code N3S) : c'est le projet Grand Code (cf. [8]).

L'expérience acquise avec le code ESTET montre que si l'on sait utiliser sur le domaine la régularité du maillage, il est possible en éléments finis de gagner beaucoup de temps et d'avoir les mêmes performances qu'un code différences finies.

L'idée essentielle consiste donc à découper le domaine de calcul en sous-domaines dont certains pourraient être maillés régulièrement. Un algorithme de raccord vient ensuite rendre transparent ce découpage.

Les grandes lignes de la structure informatique et des algorithmes ont été testées dans une version bidimensionnelle de développement : le code SOLVSTO. On est en train d'introduire dans celui-ci une modélisation de la turbulence. Ainsi amélioré, le code SOLVSTO est une structure de base pour tester toute nouvelle idée d'algorithme.

La structure informatique d'un grand code tridimensionnel de mécanique des fluides est donc définie : il se baptise N3S. Le calcul d'écoulements laminares est d'ores et déjà opérationnel. Ainsi le calcul d'un rejet vertical dans un courant traversier a été réalisé (cf. figure 7). L'introduction de modélisations plus sophistiquées notamment en ce qui concerne la turbulence et la thermohydraulique a déjà débuté.

L'environnement (surface libre)

Le système CYTHERE

L'outil de base est constitué par le code CYTHERE qui calcule en bidimensionnel les courants de marée par une méthode en différences finies; il prend en compte les zones de découvrant-recouvrant.

Le code CYTHERE a été initialement développé au Département L.N.H., puis par S.O.G.R.E.A.H. qui l'a complété : c'est maintenant un outil commun aux deux laboratoires (cf. [9]).

Le modèle CYTHERE permet d'obtenir les courants et les niveaux de la mer pendant une période de marée. Outre les bancs découvrants qu'il peut simuler, des obstacles peuvent être introduits : ceci permet l'étude de la courantologie dans les ports. Avec cet outil, la bonne description des frontières reste malgré tout difficile (cf. figure 8).

Le code CYTHERE, couplé à une équation de transport-diffusion de la thermique (modèle TACHE), a été utilisé pour étudier la tache thermique des centrales en bord de mer. Une série de modèles « gigognes » a permis de ramener les conditions aux limites en Manche au domaine d'influence de la centrale.

Au total, une trentaine d'études de courants de marée sur toutes les côtes de France, réalisées pour E.D.F., mais aussi dans le cadre de projets d'aménagement, et une

Figure 8. — Modèle CYTHERE — Courantologie autour du port de Dunkerque.

Figure 9. — Modèle REZO — Réseau maillé des rivières de la plaine de Tananarive.

Figure 12. — Modèle RIVER — Aménagement du musoir du barrage de Gamsheim.

Figure 10. — Modèle VAGALAM — Glissement de terrain sous-marin de Nice.

Figure 11. — Modèle TRANSO — Estuaire de la Canche. Courants de marée.

dizaine d'études d'impact thermique ont été menées à bien avec ces codes.

Pour examiner la propagation des crues en rivière, une version unidimensionnelle a été réalisée. Une modélisation particulière a été faite pour représenter des zones de débordement et l'influence du lit majeur sur l'écoulement. Le code de calcul peut être appliqué également à un réseau maillé (modèle REZO), en employant une méthode de sous-structuration d'un principe semblable à celui utilisé pour le code N3S. Cet outil a été appliqué en particulier à la plaine de Tananarive (Madagascar) (cf. figure 9).

A partir du code CYTHERE, divers modèles ont été élaborés. Tout d'abord, on peut enrichir les équations en introduisant des termes supplémentaires permettant de simuler les houles longues et cambrées du type de celles que l'on rencontre pendant les tempêtes. Le modèle VAGALAM obtenu a pu être utilisé pour déterminer l'agitation dans un port lorsque les amplitudes sont importantes (FECAMP). VAGALAM reste réservé aux houles de tempête et complète la série des codes classiques (réfraction, diffraction,...).

Une application intéressante du modèle VAGALAM a été la simulation du glissement de terrain survenu en 1979 sur le chantier de l'aéroport de Nice, et le calcul de l'onde engendrée dans la Baie des Anges (cf. figure 10).

VAGALAM s'est révélé, en y adjoignant une modélisation du déferlement, être un outil intéressant pour étudier la génération des courants de houle instantanés dans la zone de déferlement. Les résultats obtenus vont sans doute permettre, dans un proche avenir, d'améliorer le modèle COUROUL qui calcule le courant de houle moyen sur une période.

Les courants de houle sont particulièrement importants si l'on souhaite connaître le transport solide dans une zone côtière. A partir de la détermination des courants (marée-houle), le modèle TRANSO estime le transport par charriage au fond et calcule l'évolution de fond qui en résulte. Ce modèle a été appliqué dans le cadre de différentes études d'aménagement, notamment celle de l'estuaire de la Canche (cf. figure 11).

Une autre application de la connaissance des courants marins a été faite à propos de l'étalement des nappes d'hydrocarbures lors des récentes catastrophes en France. Le modèle ETAL simule le transport par les courants et le vent d'une nappe d'hydrocarbure lorsque celle-ci est dans sa phase d'étalement gravitaire. Une équation supplémentaire est résolue; elle fournit l'épaisseur de la nappe en tout point, ainsi que sa limite.

Le système ULYSSE-PENELOPE :

Le code ULYSSE-PENELOPE déjà présenté, plus fin quant à la description des frontières (mailles curvilignes), est également un outil de base pour certains problèmes d'environnement.

Une option « épaisseur variable » permet l'utilisation d'ULYSSE pour les problèmes d'écoulements en rivière (modèle RIVER). Il donne également la pollution causée par un rejet éventuel. Plusieurs applications ont déjà été réalisées, en particulier celle du musoir du barrage de Gamsheim (cf. figure 12).

Une adaptation du code ULYSSE-PENELOPE a été faite pour permettre le calcul de l'écoulement dans un plan

vertical en présence d'une surface libre (modèle NSL). Ce modèle est en fin de développement et va être utilisé pour déterminer les efforts dus à la houle et la turbulence sur des obstacles bidimensionnels immergés. Ce même modèle a permis le calcul de l'écoulement sur un seuil noyé.

Le système CEFALO :

Dans le but de représenter plus fidèlement les frontières du domaine ou de mieux prendre en compte l'influence d'un ouvrage sur un domaine d'une emprise importante, un nouveau code en éléments finis à deux dimensions a été développé pour les problèmes maritimes (cf. [10]). Ce code (CEFALO) permet, également, de prendre en compte les décollements tourbillonnaires dus aux détachements des couches limites. Il est actuellement appliqué à la détermination des courants de marée et des surcotes en Manche. CEFALO devrait à terme devenir l'outil de base pour les problèmes maritimes en remplacement de CYTHERE, et donner naissance, à ce titre, à toute une gamme de modèles dérivés. On prépare actuellement l'introduction d'une meilleure simulation de la turbulence. Le traitement des bancs découvrants est par ailleurs examiné.

La souplesse des maillages de type « éléments finis » est particulièrement adaptée à la description des géométries maritimes naturelles. Ainsi le calcul des variations du niveau de la mer engendrées par les effets météorologiques, vents et pressions, a pu être réalisé sur toute l'emprise du plateau continental Manche-Mer du Nord (cf. figure 13).

Figure 13. — Modèle CEFALO — Surcotes en Manche-Mer du Nord.

Le système ODYSSEE :

L'approche tridimensionnelle des courants marins est nécessaire lorsque les fonds sont suffisamment variables pour engendrer une déviation importante entre le courant au fond et en surface. Le modèle ODYSSEE permet le calcul de ces courants. Il est bâti sur les mêmes principes que le code ESTET, mais avec une simplification importante sur le champ de pression supposé hydrostatique. On a pu montrer que l'on retrouvait assez bien avec cet outil les courants dans un chenal de navigation (port du Verdon). On cherche maintenant à en déduire le transport solide qui en découle.

Il existe également une version thermique du modèle ODYSSEE, où les effets de densité dus à l'évolution de

la température sont pris en compte. Cette version est exploitée pour le calcul du rejet en mer de la centrale de Gravelines.

Transposé d'ODYSSEE à la couche limite planétaire, le modèle d'écoulement météorologique à moyenne échelle (modèle WINDY) a permis de retrouver des situations météorologiques observées sur la plaine d'Alsace et de simuler une pollution éventuelle à cette échelle. D'autres sites sont en cours d'étude et une version plus générale sans hypothèse sur la pression et le relief est en développement en collaboration avec le Département Environnement Aquatique et Atmosphérique (modèle MERCURE dérivé d'ESTET).

En conclusion

Nous avons donc montré comment le concept de « séparation d'opérateurs », qui conduit à la création de modules adaptés à la résolution de chaque morceau d'équation, a permis la construction de codes de base, puis de modèles opérationnels spécifiques aux applications. Cette démarche se poursuit avec les derniers codes mis au point, notamment en éléments finis.

Ce travail a conduit à la constitution d'un ensemble auquel on peut accéder à différents niveaux :

- les modèles spécifiques sont disponibles pour une utilisation « boîte noire » dans une gamme d'applications pour laquelle ils ont été mis au point;
- les modèles de base — c'est-à-dire les morceaux d'équation — peuvent également être utilisés pour construire de nouveaux codes par assemblage d'éléments existants. On peut même envisager la création de nouveaux modules simplifiés quant aux maillages et à la géométrie, et donc moins sophistiqués mais plus rapides pour bâtir des codes de dégrossissage.

Références

- [1] J.P. BENQUE, J. RONAT. — Quelques difficultés des modèles numériques en hydraulique. *Fifth International Symposium on computing methods in applied sciences and engineering*. INRIA Versailles 1981 — NORTH-HOLLAND, p. 471-494.
- [2] J.P. BENQUE, G. LABADIE, J. RONAT. — A finite elements method for Navier Stokes equations coupled with a temperature equation. *Proceeding of the 4th International Symposium on finite elements in flow problems*, Tokyo, Japan 1982.
- [3] J.P. BENQUE, A. HAUGUEL, P.L. VIOLLET. — *Applications of Computational Hydraulics, Vol. 2* — PITMAN, London 1982.
- [4] J.P. BENQUE, O. DAUBERT, J. GOUSSEBAILE, A. HAUGUEL. — *Splitting up Techniques for computations of industrial flows*. Rapport EDF-LNH HE/41/84.09.
- [5] P.L. VIOLLET, J.P. BENQUE, J. GOUSSEBAILE. — 2D numerical modelling of non isothermal flows for unsteady thermalhydraulic analysis. *Nuclear Science and Engineering* 84, pp. 350-372 — 1983.
- [6] P.L. VIOLLET, J. GOUSSEBAILE. — Numerical modelling of buoyancy influenced flows in cavities with curved boundaries. *Symposium International sur la Modélisation Fine des Ecoulements*. Vol 1, p. 165, Presse ENPC, Paris Sept. 1982.
- [7] Ph. DEWAGENAERE, P. ESPOSITO, F. LANA, P.L. VIOLLET. — Three dimensional modelling of flows with application to the hot and cold plena of a pool type LMFBR. *3^e Conférence Internationale sur la thermohydraulique des réacteurs*, Newport, octobre 1985.
- [8] J.P. BENQUE, J.P. GREGOIRE, A. HAUGUEL, M. MAXANT. — Application des méthodes de décomposition aux calculs numériques en hydraulique industrielle. *Sixth International Symposium on computing methods in applied sciences engineering*. INRIA Versailles 1983. NORTH-HOLLAND.
- [9] J.P. BENQUE, J.A. CUNGE, A. HAUGUEL, F.M. HOLLY. — New Method for tidal current computations. *Water Way, Port, Coastal and Ocean Division, Proc. of the ASCE*, Vol. 108, No WW3, August 1983.
- [10] P. ESPOSITO, A. HAUGUEL, B. LATTEUX. — A finite elements method for storm surges and tidal computations. *5th International conference on Finite Elements in water Resources*, Vermont, 1984, published by SPRINGER-VERLAG, p. 477-494.