Modélisation hydraulique des crues et des inondations

Autor(en): **Boillat, Jean-Louis**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **91 (1999)**

Heft 9-10

PDF erstellt am: **23.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940085

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Modélisation hydraulique des crues et des inondations

■ *Jean-Louis Boillat*

1. Introduction

Même s'il est possible de faire des prévisions à court terme sur l'arrivée et l'intensité des précipitations, il n'existe pas encore de moyens pour les modifier. Le sol et sa couverture sont par contre susceptibles d'influencer la transformation pluie-débit, mais cet effet tend à s'annuler lorsque les terrains deviennent saturés. Devant ces évidences, l'effort de protection contre les inondations s'est donc tout naturellement orienté vers la maîtrise des écoulements. Les techniques classiques utilisées par le passé avaient souvent comme objectif d'accélérer l'évacuation des eaux. Il est progressivement apparu que ces interventions ne faisaient que reporter le danger à l'aval et qu'elles conduisaient localement à l'assèchement du sol et à l'appauvrissement des nappes phréatiques. Sans considérer cela comme une fatalité, il faut admettre qu'il est difficile de lutter contre les inondations sans inonder. La recherche de sécurité passe dès lors par une évaluation réelle des dangers et des besoins de protection. Concrètement, la démarche adoptée par l'ingénieur s'articule en quatre étapes principales:

- l'analyse des dangers;
- la définition des objectifs de protection;
- l'évaluation des besoins de protection;
- la recherche de solutions.

La modélisation hydraulique joue ici un rôle déterminant, car elle intervient avec la même importance en première et dernière étapes de ce processus.

2. Modélisation et modèles

Le développement des modèles numériques suit une évolution parallèle à celle des outils informatiques. Il est caractérisé par une augmentation quantitative et qualitative de l'offre dans tous les domaines d'application. En hydraulique, bon nombre de problèmes standard peuvent ainsi être résolus à l'aide de logiciels spécifiques. Dans l'état actuel de cette évolution, tous les phénomènes ne peuvent toutefois être maîtrisés par le calcul, laissant encore une large place à la simulation physique sur modèles réduits. Ces deux types de modélisation, souvent présentés comme concurrents, sont en réalité complémentaires. Ils peuvent être combinés avantageusement, dans une même étude, à la recherche de la solution optimale.

Le choix du modèle adéquat repose sur la définition préalable de la nature du problème à traiter et de l'échelle de l'étude. Il s'agit ensuite de trouver la bonne adéquation entre les besoins et les moyens. Les modèles numériques présentés dans le tableau 1 couvrent un large éventail de problèmes hydrauliques classiques relatifs à la simulation et à la gestion des crues.

Leur choix ne résulte pas d'une analyse sélective exhaustive, il repose essentiellement sur l'expérience acquise par leur utilisation au Laboratoire de constructions hydrauliques de l'EPF Lausanne.

Les exemples d'application présentés ci-après servent à illustrer l'application de ces modèles dans le contexte de la protection contre les crues (tableau 1).

Echelle *Problème*	*Bassin versant, réseau*	*Bief, tronçon*	*Ouvrage*
Formation des crues Routage hydraulique	MIKE11 RS	MIKE11 MIKE GIS	
Capacité hydraulique Courbes de remous	HEC-RAS	HEC-RAS	FLOW-3D Modèle physique
Laminage de crues Rétention	RS	MIKE11 RS	KALAMIN
Transport solide Erosion-dépôts		SEDRIV	Modèle physique

Tableau 1. Classification de quelques modèles hydrauliques.

3. Exemples d'application

3.1 Crues et inondations: La Savoureuse à Belfort

3.1.1 Contexte et méthodologie

La Savoureuse est le cours d'eau récepteur d'un bassin versant et ses principaux affluents ont pour noms «Le Rhôme», «La Rosemontoise» et «La Douce». Ces rivières françaises s'écoulent dans un milieu partiellement urbanisé et traversent en particulier les villes de Belfort et Sochaux.

Suite à la crue dévastatrice de février 1990, une étude intégrée sur la protection contre les inondations de la Savoureuse a été engagée par la Direction de l'environnement du territoire de Belfort.

L'approche conceptuelle utilisée dans cet objectif est basée sur la «méthodologie d'inondabilité» développée par le CEMAGREF de Lyon. La démarche proposée est comparable à celle exposée dans les «exigences 95» de l'Office fédéral de l'économie des eaux et peut se résumer comme suit:

- établissement d'un document cartographique incluant largement les zones susceptibles d'être inondées et attribuant de manière différenciée des «taux d'objectifs de protection» (TOP);
- à partir d'hydrogrammes synthétiques générés selon la méthode «débit–durée-fréquence» (QdF), le routage hydraulique permet de définir les limites d'inondation correspondant à différentes «périodes de retour T du risque» (TRI);
- superposition des cartes TOP et TRI pour révéler les zones souffrant de déficit de protection;
- proposition et modélisation d'aménagements visant à supprimer les déficits de protection.

3.1.2 Modélisation des zones inondées

La simulation hydraulique pour la détermination des cartes d'inondations a été conduite en trois étapes [1]:

Etape 1: Simulation stationnaire

La simulation des crues a tout d'abord été réalisée en régime stationnaire pour deux raisons essentielles:

- la longueur du réseau hydrographique à modéliser (env. 70 km), caractérisé par plus de 600 profils en travers, ne permet pas une simulation transitoire complète avec des temps de calcul raisonnables sur PC;
- les modèles non stationnaires rencontrent des difficultés à calculer l'écoulement au passage de sections complexes, en particulier les ponts et les jonctions de cours d'eau où des instabilités numériques apparaissent fréquemment.

La simulation stationnaire réalisée avec le programme HEC-RAS [2] a ainsi permis de valider les données géométriques utilisées pour la modélisation, en particulier grâce à la visualisation graphique des lignes d'eau et des profils en travers (figure 1). Elle a également servi à l'élaboration des relations «niveau d'eau–débit» aux ponts et aux jonctions en vue de leur utilisation dans la modélisation non stationnaire.

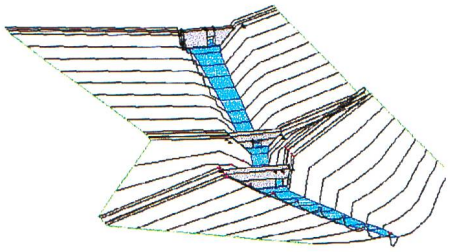

Figure 1. Succession de ponts sur le Rhome.

Etape 2: Simulation non stationnaire ou transitoire

La simulation transitoire des écoulements permet de suivre l'évolution spatio-temporelle des crues tout en considérant l'effet de rétention dans le cours d'eau et dans les zones inondées.

Pour une géométrie et des hydrogrammes d'entrée donnés, MIKE11 [3] calcule la variation temporelle du niveau d'eau, dans les sections. Pour cette étape de simulation, les conditions aux limites calculées dans l'étape 1 ont été introduites.

Etape 3: Génération des cartes d'inondation

Le programme MIKE-GIS [3] permet d'établir un lien entre le programme de calcul MIKE11 et le système d'information géographique ArcView, dans le but de générer des cartes d'inondation de manière automatique (figure 2). Cette génération passe par les trois opérations suivantes:

- Un modèle numérique de terrain (MNT) des zones inondables est constitué sur la base d'un levé photogrammétrique. Il convient de remarquer que la précision du MNT dépend essentiellement de la densité et de la répartition judicieuse du semis de points.
- Le tracé du cours d'eau et les sections du calcul hydraulique doivent être positionnés sur la base topographique du MNT. Cette opération est rendue nécessaire par le fait que MIKE11 est un modèle filaire non géoréférencé.
- L'interprétation des niveaux d'eau calculés en comparaison des niveaux du terrain permet d'identifier les zones inondées à un instant choisi. Cette méthode met en évidence l'intérêt qu'il y a à générer des profils intermédiaires pour densifier la trame des niveaux calculés. Cela peut être fait de manière automatique par MIKE11.

3.1.3 Modélisation des bassins de rétention

La recherche de solutions aux problèmes d'inondation tend à privilégier la rétention par rapport aux endiguements.

Dans le cas de la Savoureuse, l'ordre prioritaire des interventions a été fixé comme suit:

- affectation, en termes d'aménagement du territoire, des zones inondables ne souffrant pas d'un déficit de protection;
- création de zones de stockage supplémentaires;
- réalisation de protections locales.

En application de ce concept, les possibilités de rétention ont été inventoriées sur l'ensemble du territoire et le principe d'un stockage par dérivation dans des bassins aménagés en parallèle du cours d'eau a été adopté.

La modélisation et l'optimisation de ce système incluant l'ouvrage de dérivation, les organes de contrôle des bassins de rétention et la restitution dans le bief aval ont été réalisées à l'aide du programme RS [4].

RS constitue l'outil idéal pour modéliser et optimiser ce genre de système dont la construction par assemblage d'objets est rapide et facilement modulable (figure 3).

Un exemple de calcul pour cinq retenues de volumes compris entre 30 000 et 100 000 m^3 est présenté à la figure 4. Le résultat met bien en évidence le fonctionnement des bassins en parallèle dans l'opération de laminage de la crue.

3.2 Transport solide: La Broye à l'aval de Payerne

La modélisation du transport solide par charriage est une opération délicate, qu'elle soit réalisée numériquement ou physiquement. L'exemple présenté ci-après montre toutefois l'importance de ce type de problème.

3.2.1 Contexte et méthodologie

Dans le cadre du projet de recherche sur les changements climatiques et catastrophes naturelles (PNR31) une étude a été entreprise sur «l'influence des changements climatiques sur le régime hydrologique des bassins versants et sur le comportement hydraulique des cours d'eau» [5].

L'impact d'une modification des précipitations sur le régime hydrologique du bassin versant de la Broye à Payerne et sur le régime hydraulique de son cours jusqu'au lac de Morat, a été évalué sur la base des scéna-

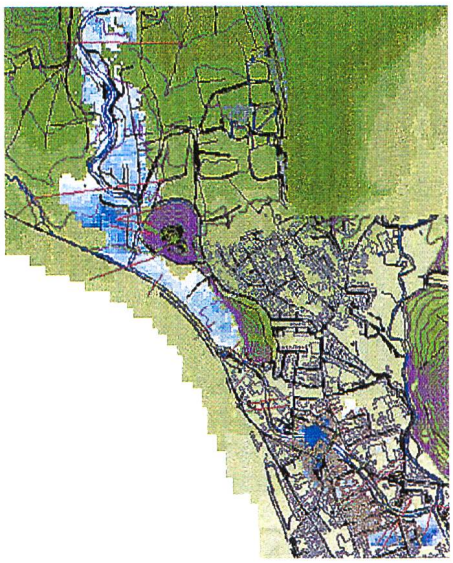

Figure 2. Cartographie de zones inondées par la crue de février 1990 sur la Savoureuse.

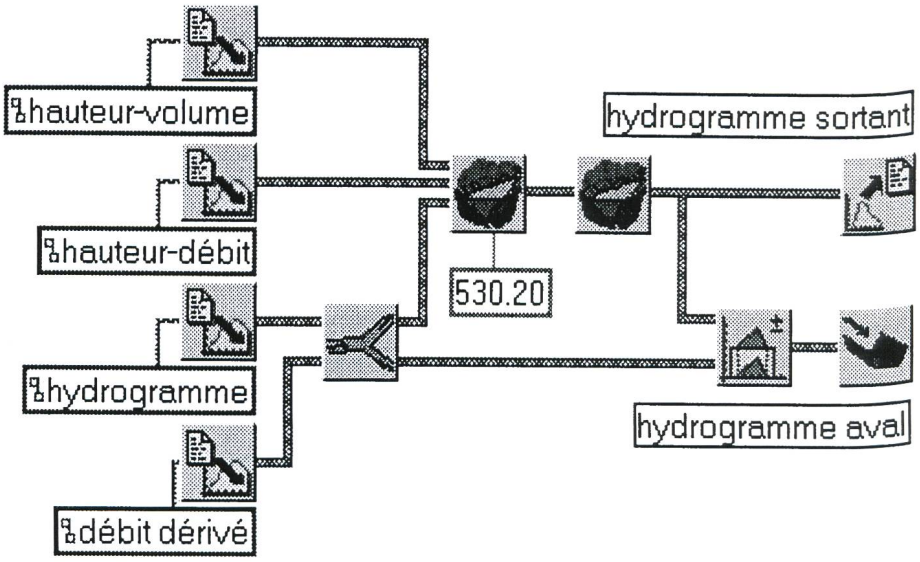

Figure 3. Schéma de modélisation de deux bassins en dérivation parallèle, avec le programm RS.

rios de changements climatiques de l'International Panel and Climate Change (IPCC).

Une étude de sensibilité a été effectuée en deux étapes:

- modélisation stochastique des pluies couplée à une modélisation hydrologique déterministe;
- modélisation hydraulique couplée du transport solide par charriage.

La deuxième étape de ce projet est utilisée ici pour illustrer l'importance du transport solide sur l'équilibre des cours d'eau à court et à long terme.

3.2.2 Modélisation numérique du transport solide

Le programme de calcul non stationnaire SEDRIV [6] permet la modélisation unidirectionnelle des écoulements et du transport solide. Le tronçon quasi rectiligne et prismatique de la Broye entre Payerne et le lac de Morat est ainsi particulièrement bien adapté à l'utilisation de cet outil.

Dans la perspective d'une généralisation à d'autres cours d'eau similaires, les conditions locales de la Broye ont été modifiées de manière fictive comme suit:

- le pavage artificiel grossier qui caractérise le tronçon a été remplacé par des alluvions naturelles dont la composition granulométrique correspond à celle rencontrée à l'amont;
- l'influence de la courbe de remous du lac de Morat a été réduite par l'abaissement du niveau de ce dernier.

Pour définir l'état d'équilibre de cette Broye «modifiée», la simulation continue d'une série hydrologique de 60 années a été réalisée à pas de temps horaire (figure 5). La principale difficulté de la modélisation ne réside pas ici dans la résolution numérique des équations mais dans la définition de la relation «débit solide – débit liquide» à la limite amont du tronçon.

Cette relation a pu être établie sur la base d'une modélisation préalable de l'ancien lit de la Broye en admettant que celui-ci avait atteint son état d'équilibre. Les formules classiques de charriage qui conduisent à des apports jugés trop importants ont ainsi été pondérées en conséquence.

Les scénarios climatiques modélisés à partir de cet état de référence ont été sélectionnés parmi ceux présentant soit un accroissement, soit une diminution sensibles de la fréquence d'apparition des forts débits. Ces modifications du régime hydrologique ont conduit à des changements significatifs sur l'état d'équilibre du lit qui se manifestent dans certains cas par une tendance à l'affouillement, dans d'autres par un alluvionnement.

Les situations d'érosion liées au passage des crues représentent une menace pour la stabilité des ouvrages implantés dans le cours d'eau, en particulier les ponts et les prises d'eau. A l'opposé, les situations d'alluvionnement conduisent à une réduction de la capacité d'écoulement et en corollaire à une augmentation de la fréquence des débordements.

3.3 Ouvrages locaux: Prise d'eau sur le Rhône

3.3.1 Contexte et méthodologie

L'eau des fleuves est souvent utilisée à des fins industrielles, en particulier pour le refroidissement de processus de fabrication. Les installations de prise d'eau prévues à cet effet sont fréquemment sujettes à ensablement. Pour un ouvrage de prise, construit sur le Rhône dans la région de Viège, ce phénomène est particulièrement prononcé et gênant lors du passage des crues. Les sédiments charriés progressent alors sur un front dont le passage est à l'origine de fortes perturbations dans l'ouvrage précité. Celui-ci étant dans l'obligation de garantir une alimentation, une solution se devait d'être trouvée au problème de l'alluvionnement.

Les conditions d'écoulement au droit de la prise étant de nature tridimensionnelle, leur modélisation devait être réalisée en conséquence.

3.3.2 Modélisation physique et numérique des écoulements en 3D

L'analyse et le solutionnement du problème ont été abordés en parallèle à l'aide d'un modèle physique à l'échelle 1:10 [7] et par une modélisation numérique FLOW-3D [8].

La première phase de simulation a été consacrée au calage des modèles par la reproduction de l'état actuel. Les résultats ob-

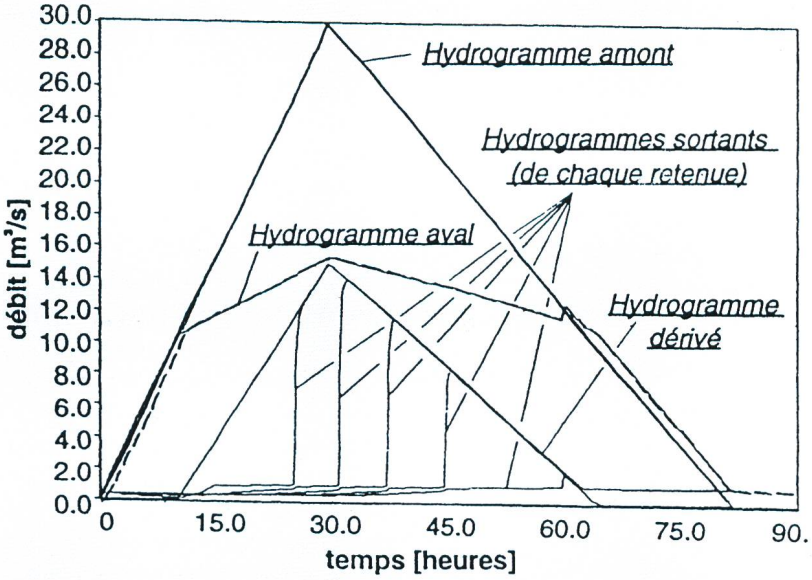

Figure 4. Exemple de laminage dans cinq retenues successives en parallèle du cours d'eau.

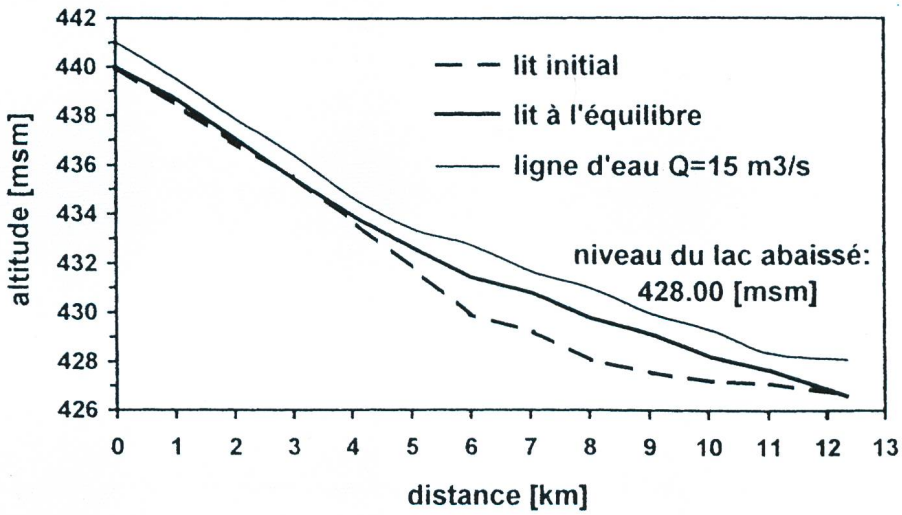

Figure 5. Profil en long de la Broye «modifiée» entre Payerne et le lac de Morat. Evolution du lit après simulation d'une série hydrologique de 60 années.

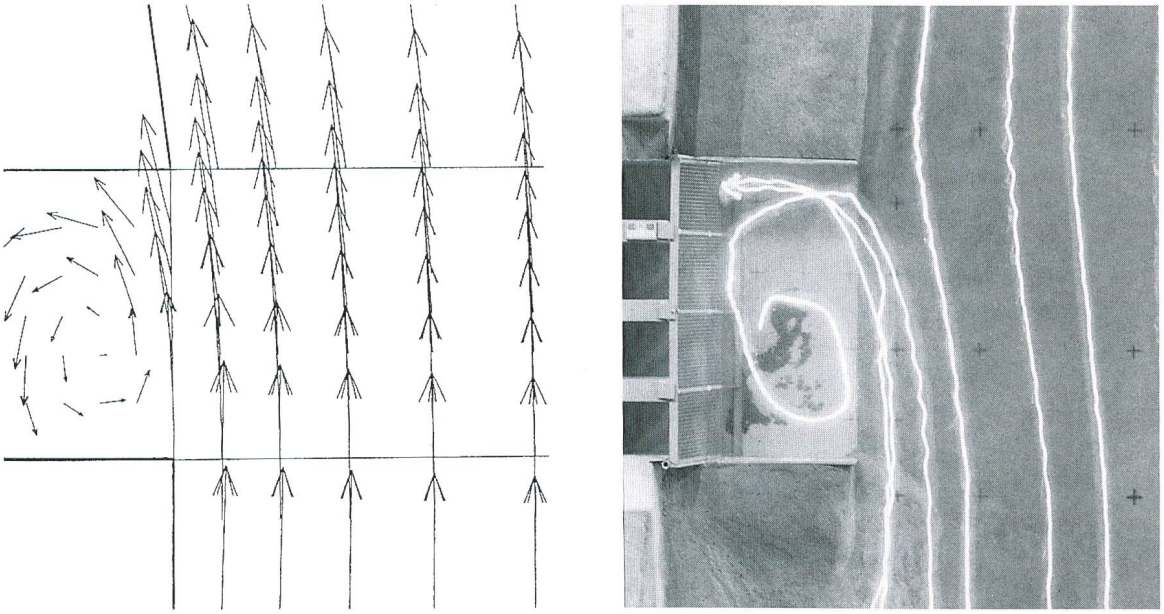

Figure 6. Lignes de courant et vitesses superficielles pour un débit du Rhône de 100 m^3s^{-1} et un soutirage de 2,5 m^3s^{-1}; a) Modélisation numérique FLOW-3D, b) Lignes de courant superficielles sur modèle physique.

tenus (figure 6) ont permis de mettre en évidence les causes de l'ensablement. Celles-ci découlent de la géométrie de la prise qui occasionne un arrêt de l'écoulement sur sa paroi aval.

En deuxième étape, plusieurs variantes d'aménagement ont été testées sur le modèle réduit. Il s'est avéré ici que la modélisation physique était particulièrement bien adaptée à la recherche de solutions. Elle offre l'avantage de bien visualiser les phénomènes locaux et d'expliquer leurs causes et leurs effets.

La variante retenue propose de disposer un obstacle comparable à une culée de pont à l'amont immédiat de la prise, conférant à cette dernière un pouvoir autonettoyant par modification locale des écoulements.

4. Conclusions

La modélisation hydraulique des crues et des inondations repose sur la résolution des relations classiques de la mécanique des fluides qui imposent la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. Dans ce contexte, les principales difficultés rencontrées ne sont pas liées prioritairement aux méthodes numériques et physiques mais plutôt à la définition des lois de matériaux relatives à la rugosité et au transport solide.

Le développement des réseaux d'acquisition de données (pluies, débits, température, terrain,...) et l'accroissement des séries historiques ainsi que la facilité d'accès à cette information contribuent dans une large mesure à l'avènement des modèles numériques.

Les développements actuels dans ce domaine se concentrent sur la gestion des données spatiales selon deux orientations différentes:

- La première propose le couplage entre les systèmes d'information géographique (SIG) et les outils de calcul, par le biais d'interfaces destinés à faciliter la représentation des résultats.
- La deuxième vise à intégrer au sein d'un SIG les outils de calcul requis. Ceux-ci sont alimentés et pilotés par le SIG qui gère également la conservation et la représentation des résultats.

D'une manière générale, les modèles numériques sont de plus en plus intégrés dans des interfaces utilisateurs simples et conviviales. Cela permet de faciliter et de réduire les phases de saisie et d'organisation des données ainsi que de valoriser la présentation des résultats. Les aspects cosmétiques ne doivent cependant pas masquer d'éventuelles erreurs de modélisation, mais plutôt servir à les mettre en évidence. Il s'agit dès lors de consacrer tout le temps nécessaire à l'analyse critique des résultats, pour que les outils informatiques deviennent véritablement profitables.

Parallèlement, la modélisation physique profite également des progrès réalisés dans les techniques de mesure, d'acquisition et de traitement. Les maquettes sont de véritables bancs d'essai capables de révéler les comportements les plus insoupçonnables. Ils contribuent à développer ce sens de l'eau dont le projeteur a si souvent besoin pour devancer les problèmes.

Remerciements

L'auteur tient à remercier les personnes qui ont contribué aux études présentées, tout particulièrement le professeur R. Sinniger, directeur du Laboratoire de constructions hydrauliques de l'EPF Lausanne ainsi que tous ses collaborateurs.

Bibliographie

[1] *Sinniger, R., Boillat, J.-L.:* «Etude intégrée sur la protection contre les inondations de la Savoureuse – Modélisation hydraulique», Rapport n° 18 (1996) et Rapport n° 7 LCH-EPF Lausanne, 1997.

[2] US Army Corps of Engineers: «HEC-RAS: Rivers Analysis System», Hydrol. Eng. Center, 1995.

[3] Danish Hydraulic Institute: «MIKE11, MIKE-GIS – Techn. Ref. & Users Guide», DHI Software, 1992.

[4] *Dubois, J.:* «Routing System – Users Manual», LCH-EPF Lausanne, 1996.

[5] *Overney, O., Consuegra, D., Musy, A., Lazaro, P., Boillat, J.-L., Sinniger, R.:* «Influence des changements climatiques sur le régime hydrologique et hydraulique des cours d'eau», Rapport final PNR31, Berne, 1997.

[6] *Zech, Y., Hartzell, U., De Cesare, G.:* «SEDRIV – Résumé théorique et mode d'emploi», LCH-EPF Lausanne, 1994.

[7] *Sinniger, R., Boillat, J.-L.:* «Rhonewasserfassung Visp – Hydraulische Modellversuche – Schlussbericht», Rapport n° 2, LCH-EPF Lausanne, 1996.

[8] Harwell Laboratory: FLOW-3D – CFX-F3D: Release 3.3, Users Manual, Computational Fluid Dynamics Services, Oxfordshire OX11 0RA, UK, 1994.

Adresse de l'auteur

Dr *Jean-Louis Boillat,* chargé de cours au Laboratoire de constructions hydrauliques, Département de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne.

Compte rendu préparé pour le séminaire «Protection contre les crues – objectifs et contraintes» du 21 novembre 1996 à Grangeneuve.