

7 > Modélisation numérique des cours d'eau

Patric Rousselot, David Vetsch, Roland Fäh

Les cours d'eau sont l'objet d'intérêts divergents, visant d'une part leur exploitation et d'autre part leur protection. Il est donc essentiel d'avoir une vue d'ensemble de l'aménagement des cours d'eau. La simulation numérique aide à évaluer les différentes possibilités d'aménagement hydraulique et leurs répercussions. Cette fiche décrit les processus de mise en place d'une modélisation et présente le logiciel de simulation BASEMENT avec des exemples d'application.

Des simulations pour la protection contre les crues

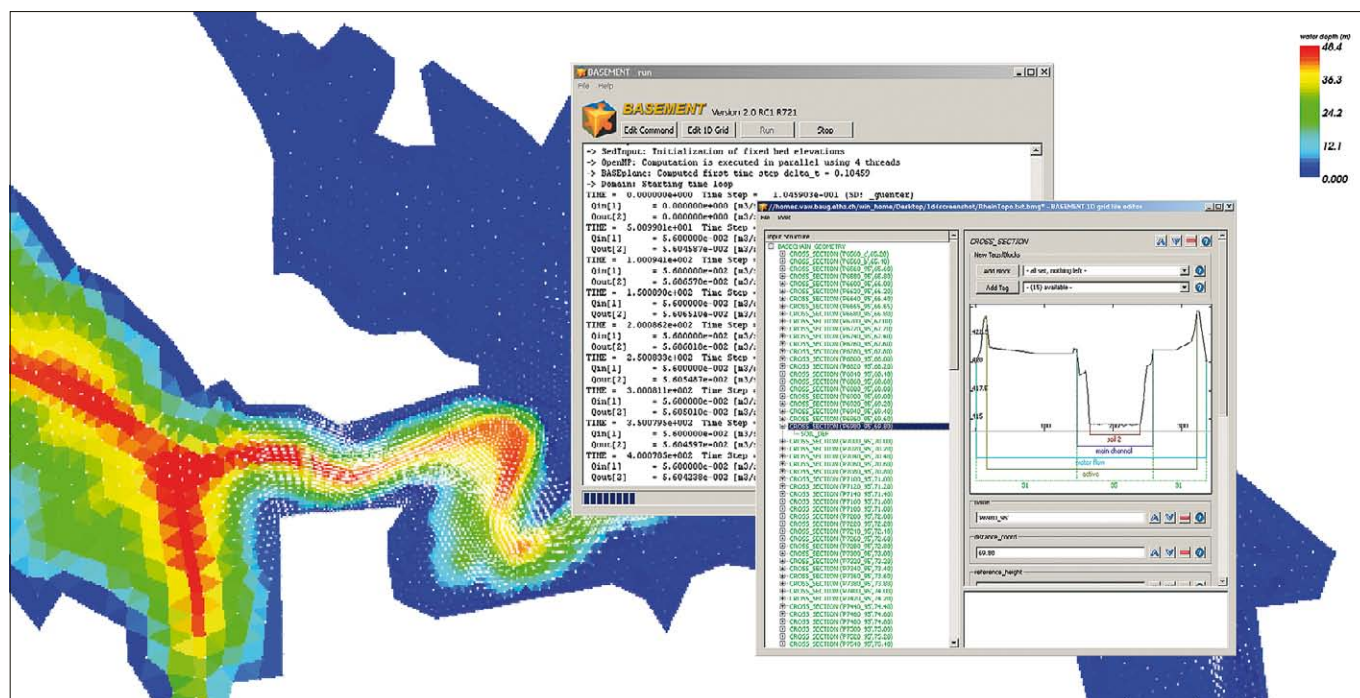
Depuis plusieurs années, les cours d'eau suisses sont revitalisés et améliorés au plan écologique. Les élargissements sont des mesures couramment mises en œuvre pour diversifier la morphologie et les habitats d'un cours d'eau. Ces aménagements posent toutefois de nouvelles exigences à la protection contre les crues. Face à ces défis, la simulation numérique permet de mieux gérer les projets: elle analyse les répercussions des travaux à planifier dans un souci d'équilibre des intérêts de toutes les parties.

La simulation numérique est particulièrement utile pour la prévention des crues, la réalisation de cartes des dangers, la régulation des cours d'eau et des lacs et le dimensionnement

des cours d'eau. Elle permet également d'analyser le développement morphologique et de définir, à l'aide d'indices, la diversité des habitats d'un cours d'eau. Enfin, grâce à la possibilité de modifier les paramètres, différentes variantes peuvent être testées, à des coûts bien inférieurs à ceux d'une expérimentation physique.

Des modèles destinés aux ingénieurs

Le type de simulation à utiliser dépend de la problématique à résoudre et de la taille de la zone concernée. L'application est d'abord limitée par la capacité de l'ordinateur. Les modèles à haute résolution spatiale ou portant sur une zone étendue nécessitent un temps de calcul important. Ce délai peut être



Interface de BASEMENT: visualisation de la profondeur et de la vitesse d'écoulement.

Illustration: VAW, EPF Zurich

réduit si le modèle est simplifié ou si la région concernée est réduite.

Modèles 1D

Les modèles 1D basés sur des profils transversaux (fig. 1) sont réservés aux projets de simulation qui demandent peu de détails ou concernent des cours d'eau importants. Ils sont également exploitables pour des simulations sur de longues durées: ils analysent la variation, au cours du temps, du niveau de l'eau et du fond du lit, ainsi que la vitesse d'écoulement moyenne pour chaque profil transversal.

Modèles 2D

Les modèles 2D sont recommandés pour les processus locaux pour lesquels il faut disposer de données topographiques basées sur un modèle numérique de terrain (fig. 2). La simulation permet d'évaluer le niveau de l'eau et du lit, ainsi que la vitesse d'écoulement moyenne pour chaque élément de calcul. Ces modèles peuvent s'utiliser p. ex. pour calculer des inondations, pour réaliser une carte des dangers ou encore pour dimensionner des zones de rétention et des élargissements.

Modèles 3D

Les modèles 3D visent la résolution de problèmes concernant des dimensions spatiales réduites et où les courants turbulents jouent un rôle primordial. On utilisera ce type de modèle s'il s'agit p. ex. d'optimiser les conditions d'écoulement en amont d'une centrale hydroélectrique ou encore d'analyser un affouillement local sur un barrage ou une pile de pont.

La modélisation permet d'analyser non seulement les écoulements, mais aussi le transport des matériaux solides, afin d'identifier les modifications morphologiques du fond du lit. Ce calcul se base sur des formules empiriques et les résultats dépendent de la méthode choisie. Les modélisations physiques constituent une alternative aux simulations numériques. On y a recours si le changement d'échelle ne modifie pas les conditions d'écoulement. Les avantages de la modélisation physique résident dans la qualité des résultats. Les résultats d'une simulation numérique peuvent diverger selon la méthode, qui reste au libre choix de l'utilisateur. Avec un modèle physique, de telles incertitudes n'existent pas. En outre, certains calculs, comme celui d'écoulements complexes et turbulents, ne peuvent s'effectuer qu'à l'aide de modèles à haute résolution, qui sont coûteux et qui exigent des compétences techniques pointues. Toutefois, les modèles physiques présentent aussi des inconvénients: une modification en phase de projet est plus difficile à opérer qu'avec une modélisation numérique. En pratique, les deux modes de simulation sont souvent combinés dans un modèle hybride: le modèle numérique permet d'abord de préciser au maximum les dimensions et les conditions aux

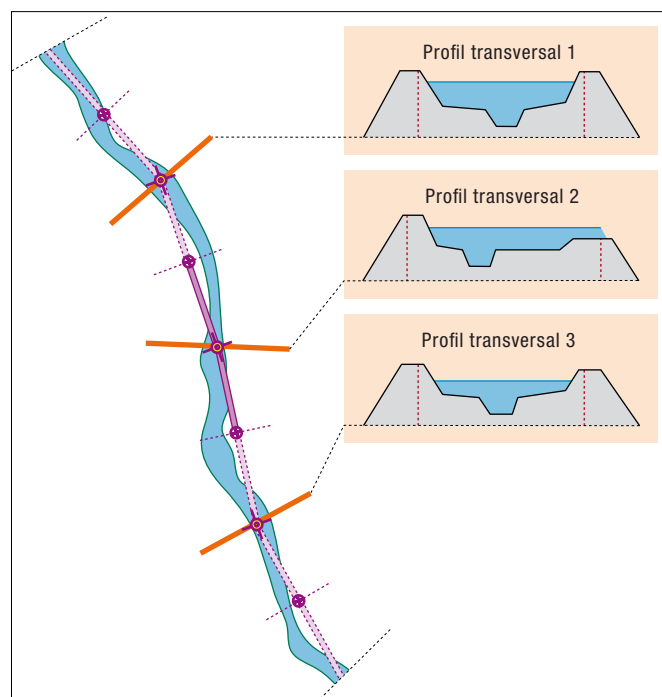


Fig. 1 Représentation schématique de la grille de calcul pour une simulation 1D. Des profils transversaux sont générés à plusieurs points du cours d'eau. Illustration d'après VAW, EPF Zurich

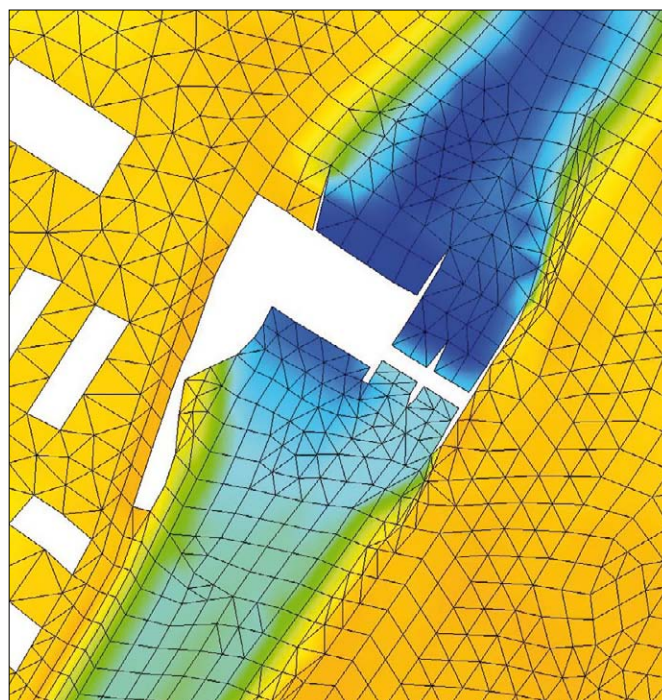


Fig. 2 Grille de calcul 2D, composée de triangles et de losanges. Les couleurs reflètent la topographie. Les bâtiments sont représentés en blanc. Le débit au-delà d'un barrage est modélisé comme condition aux limites intérieures. Illustration: VAW, EPF Zurich

limites. Le modèle physique est ensuite utilisé pour affiner le dimensionnement de l'ouvrage.

Logiciel de simulation BASEMENT

BASEMENT est un programme gratuit développé en 2002 par le Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques (VAW) de l'EPF Zurich (encadré 1), à partir de la résolution des équations de Saint-Venant pour les modèles 1D et des équations d'écoulement en eaux peu profondes pour l'hydrodynamique des modèles 2D. Ces équations posent le postulat d'une répartition hydrostatique des pressions. Ils ne sont donc valables que si la composante verticale de la vitesse peut être ignorée. Pour le calibrage, le programme utilise les lois du frottement pour définir la rugosité du lit. Il est également possible de générer un modèle de turbulences.

BASEMENT propose différentes conditions aux limites pour le calcul de l'écoulement: hydrogrammes d'entrée, écoulement normal, structures hydrauliques telles que barrages et écluses. Ces structures peuvent également être utilisées au sein de la zone de calcul. *BASEMENT* permet par ailleurs de paramétrer automatiquement les barrages et les ouvrages de chute selon des critères cibles au choix. La figure 3 schématise le processus de modélisation de *BASEMENT*. Le transport des sédiments est divisé en transport par charriage et en transport par suspension. Le calcul du transport par charriage s'effectue à partir de formules empiriques, celui du transport par suspension au moyen d'une équation d'advection/diffusion. Il est ainsi possible de simuler à la fois la diffusion de produits toxiques et le transport de matériaux en suspension dans le cours d'eau. Différentes méthodes permettent de décrire l'échange des matériaux en suspension entre le fond du lit et l'eau. *BASEMENT* résout les équations de transport de manière à ce que les matériaux solides transportés puissent être classés en autant de catégories que l'utilisateur le souhaite.

Dans un cours d'eau, les sédiments sont principalement déplacés par la force horizontale du courant. Les matériaux du lit peuvent aussi être générés par des processus gravitationnels tels qu'une rupture de berge. Ce type de processus est représenté à l'aide d'un modèle géométrique basé sur un degré critique de déclivité.

L'efficacité de la simulation sur une grande zone géographique peut être accrue en couplant plusieurs modèles (fig. 4). Ainsi, il est possible d'évaluer un tronçon à l'aide d'un modèle 1D et d'intégrer un modèle 2D pour simuler un débordement. Par ailleurs, le logiciel est compatible avec tous les ordinateurs courants équipés de processeurs multi-core.

BASEMENT offre d'autres fonctionnalités: d'une part, la modélisation est paramétrable à partir du « Command File Editor ». Tous les paramètres y sont expliqués et illustrés par des exemples. Les champs de saisie sont clairement identifiés comme tels. D'autre part, l'utilisateur peut créer la grille des

> Encadré 1: BASEMENT, logiciel de modélisation des cours d'eau

BASEMENT est un logiciel calculant les processus dans les cours d'eau en tenant compte de l'écoulement et du transport solide. Les processus peuvent être modélisés en une ou plusieurs dimensions, les différents modèles pouvant être combinés à loisir. Les effets d'ouvrages hydrauliques peuvent également être reproduits. Le transport des sédiments est subdivisé en transport par charriage et en transport par suspension. Le diamètre des grains peut être paramétré. La configuration des modèles s'effectue via une interface graphique. Il est prévu à terme de faire évoluer *BASEMENT* vers des fonctions permettant de modéliser les eaux souterraines, de simuler les écoulements de densité et de modéliser les écoulements en trois dimensions. Le programme et sa documentation (Fäh *et al.* 2011) sont téléchargeables gratuitement sur le site www.basement.ethz.ch. Vous trouverez à la même adresse des fichiers avec différents exercices et cas qui permettent de se familiariser avec la modélisation numérique.

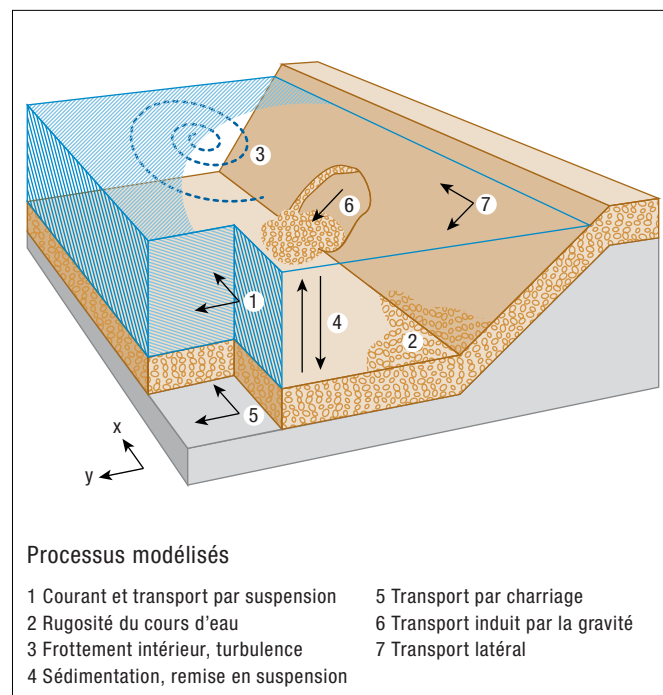


Fig. 3 Vue d'ensemble des processus simulés dans un modèle 2D. Illustration d'après VAW, EPF Zurich

modèles 1D. Cette opération s'effectue dans le « 1D-Grid Editor », qui restitue graphiquement les profils transversaux avec toutes leurs caractéristiques. Pendant le calcul, des résultats tels que la profondeur, la vitesse d'écoulement, ou encore les différences de hauteur du lit, peuvent être visualisés.

Procédure

La modélisation (fig. 5) commence par l'acquisition des données. Il est indispensable p. ex. de connaître les conditions initiales et les conditions aux limites. Les lignes d'eau, les traces de crues, la distribution granulométrique ou la composition de la végétation sont des données qui facilitent le calibrage du modèle. Une base de données bien fournie peut améliorer fortement la qualité des simulations.

Sur la base de ces informations, le programme crée une grille de calcul correspondant aux dimensions du modèle. C'est à partir de cette grille et des conditions aux limites sélectionnées que commence la simulation à proprement parler. Dans une première étape, le modèle numérique est calibré à l'aide d'un événement documenté et, dans la mesure du possible, validé sur d'autres événements. Puis le logiciel calcule les variantes. Enfin, les résultats sont évalués et présentés.

Conditions initiales: topographie

La plupart du temps, les informations topographiques sur un cours d'eau sont extraites des profils transversaux. Or souvent, les données ont été relevées sur des profils très espacés et il y a peu d'informations sur les secteurs intermédiaires. L'orthophotographie et la connaissance de la situation sur place sont de bons moyens pour améliorer la qualité du modèle. Pour les modèles 2D en particulier, les données des profils transversaux peuvent être interpolées pour obtenir un modèle de terrain plus dense. Hors de la section mouillée, en revanche, on dispose souvent de données haute résolution (données scannées au laser, p. ex.).

Pour les modèles 1D, la grille de calcul s'obtient directement à partir des différents profils transversaux. Pour les modèles 2D, une grille constituée de triangles et de losanges doit être créée à partir des informations concernant le terrain. Lors de la création de la grille, il convient de faire attention aux lignes de cassure existantes.

Conditions aux limites: écoulement et transport des sédiments

Les hydrogrammes des stations de mesure de l'OFEV ou les résultats d'un modèle hydrologique peuvent servir de conditions aux limites pour les débits. Pour les conditions aux limites de bord, plusieurs éléments peuvent être utilisés, tels que les relations niveaux d'eau/débits ou les structures hydrauliques (barrages et écluses).

Les conditions aux limites pour le transport de sédiments sont rarement connues. Souvent, il faut évaluer l'apport annuel

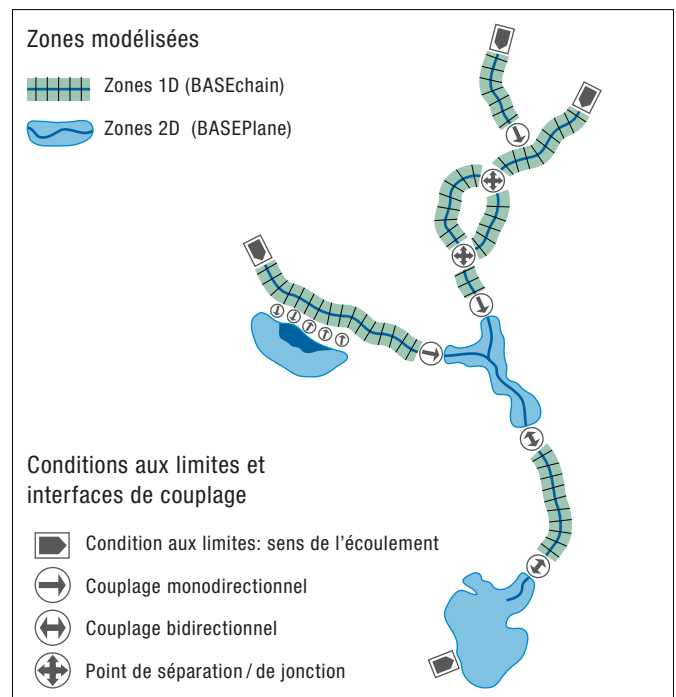


Fig. 4 Représentation schématique de zones modélisées en 1D et 2D pouvant être couplées de diverses manières. L'échange d'informations peut s'opérer dans un sens ou dans les deux sens. Illustration d'après VAW, EPF Zurich

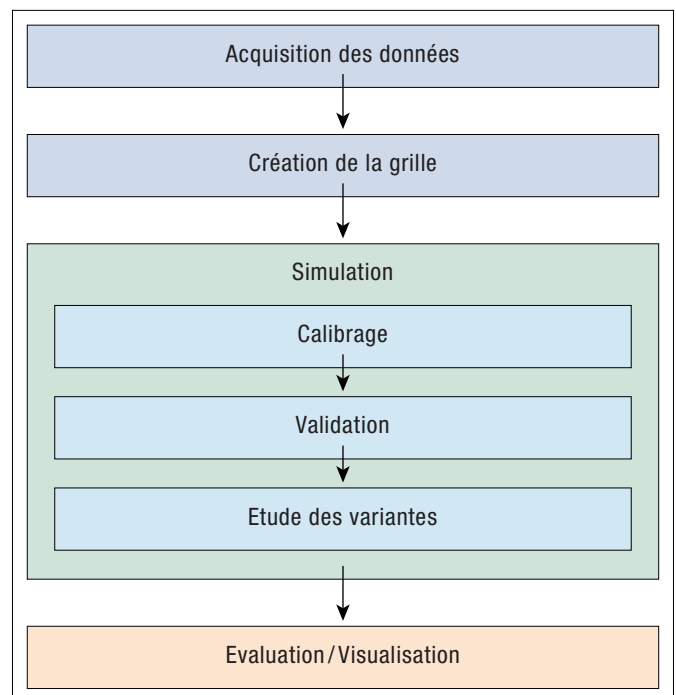


Fig. 5 Schéma du déroulement d'une modélisation numérique. Chaque processus peut être répété au besoin. Illustration d'après VAW, EPF Zurich

total de sédiments pour établir une fonction de transport liée à un hydrogramme. Cette fonction dépend pour l'essentiel de la formule de transport par charriage utilisée. Elle part souvent de l'hypothèse que la capacité de transport est exploitée à son maximum.

Calibrage et validation

Les modèles numériques contiennent des paramètres de calibrage qui permettent d'adapter les résultats de la simulation à la situation réelle. Les données relatives au niveau de l'eau, enregistrées à différents moments, sont les plus pertinentes pour calibrer l'hydraulique, mais il est rare d'en disposer. Si elles n'existent pas, on utilisera, le cas échéant, les traces de crue dont les débits de pointe sont connus. Le calibrage s'effectue à partir des coefficients de frottement du lit du modèle numérique: ils sont modifiés jusqu'à ce que les valeurs simulées du niveau de l'eau concordent avec les valeurs mesurées.

Des calculs supplémentaires sont nécessaires pour les modèles avec transport de sédiments: la topographie doit être mesurée à différents instants. Pour le calibrage du transport par charriage et du transport par suspension, différents paramètres peuvent être choisis. Le modèle est validé quand, à partir des paramètres calibrés, un événement différent du cas utilisé pour le calibrage peut être reproduit qualitativement et quantitativement.

Le modèle calibré et validé sert de point de départ aux simulations à proprement parler. Les scénarios sont calculés à partir des différentes conditions aux limites pour l'hydraulique et le transport des sédiments. Les projets d'aménagement peuvent être insérés dans la grille de calcul pour en analyser les répercussions.

Evaluation et représentation des résultats

La simulation numérique génère de gros volumes de données. Si les besoins en informations ne sont pas suffisamment ciblés, les fichiers de résultats seront extrêmement volumineux et le temps de calcul et de traitement sera très important. L'utilisateur doit donc identifier en amont les résultats dont il a besoin, car bien souvent, seuls certains aspects sont utiles. Les résultats sont compilés dans un fichier texte sous forme de tableau et peuvent être convertis dans un programme de visualisation. Pour les grandes représentations de données scalaires et vectorielles, le traitement des données s'effectue dans des programmes séparés commercialisés.

Précision et temps de calcul

La précision des résultats est fonction de la méthode utilisée, des hypothèses de départ, de la qualité des données topographiques et des conditions aux limites. D'une manière générale, l'erreur est inversement proportionnelle à la résolution de la grille. C'est ce que l'on appelle la convergence. En pratique,

la résolution de la grille est restreinte par le temps de calcul. Le résultat d'une simulation numérique est donc toujours un compromis entre précision et temps de calcul.

Le temps à consacrer à la simulation numérique ne doit pas être sous-estimé. Certes, un modèle simple peut être créé en peu de temps, mais pour obtenir des résultats quantitativement et qualitativement fiables, il convient de bien poser le problème. La seule définition de la grille peut influencer sur la stabilité de la simulation, sur la durée du calcul et sur la qualité des résultats. Consacrer suffisamment de temps à la définition de la grille permet d'éviter par la suite des problèmes de simulation. Les principales lignes de cassure doivent être contrôlées et modifiées si nécessaire une fois les informations sur le terrain interpolées sur la grille de calcul; les conditions aux limites sont parfois positionnées à des endroits défavorables, ce qui peut entraîner des comportements irréguliers. Généralement, les conditions aux limites sont placées le plus loin possible de la zone analysée pour minimiser les effets secondaires.

Pour chaque donnée du problème, l'utilisateur doit se pencher sur les hypothèses de modèle sous-jacentes. Par exemple, pour les modèles 1D et 2D, l'hypothèse est une répartition hydrostatique des pressions. Il ne faut alors pas oublier que les équations ne sont valables que pour de faibles pentes. Les formules de transport par charriage, également, ne sont la plupart du temps valables que pour un domaine d'utilisation en ce qui concerne la taille des grains ou la pente du lit. Dans la pratique, ces hypothèses de base ne sont souvent pas respectées, ce qui entraîne localement des écarts entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées.

Quant aux modèles incluant le transport des sédiments, le calibrage est souvent extrêmement complexe. Les paramètres de calibrage sont plus nombreux que pour l'hydraulique pure. De plus, les conditions aux limites concernant le volume de sédiments charriés ne sont très souvent que des approximations sommaires, alors qu'elles influent fortement sur les résultats. Bien souvent, on ne dispose pas pour ces modèles de données topographiques à différentes périodes, ce qui rend le calibrage et la validation difficiles. Ce constat ne doit pas être oublié: les résultats numériques doivent être considérés sous un œil critique et leur plausibilité doit être vérifiée.

Applications

Les exemples d'application suivants illustrent les possibilités de *BASEMENT*.

Evolution du lit du Rhin alpin (1D)

Sur le Rhin alpin, l'objectif était de renforcer la protection contre les crues entre l'III (SG) et le lac de Constance, tout en tenant compte des contraintes liées à l'écologie, à l'utilisation des eaux souterraines, aux centrales hydroélectriques et aux activités de détente. Pendant la phase de planification, plusieurs variantes d'aménagement ont été simulées avec leurs répercussions à long terme sur l'évolution du fond du lit. Des modèles 1D ont été développés car la simulation devait porter sur une zone de 50 km et sur une longue période. Pour le transport par charriage, une méthode multigrain (8 diamètres de grain) a été utilisée. Le modèle a été calibré sur une période de 10 ans et validé sur une autre période de 20 ans. A l'aide du modèle validé, l'évolution du fond du lit a été simulée pour 7 variantes de mesures, pour une durée de 60 ans, et évaluée par rapport aux buts de protection contre les crues (fig. 6).

Régulation automatique des lacs (1D)

Les dégâts créés par les crues peuvent être réduits grâce à une régulation optimale des lacs et des barrages. A l'aide d'un exemple, il a été testé si *BASEMENT* était approprié pour réguler les structures hydrauliques sur un vaste territoire (fig. 7). Le modèle numérique comprenait les trois lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat, les canaux qui les relient entre eux ainsi que des tronçons de l'Aar et de l'Emme. La simulation a été réalisée à partir de modèles 1D couvrant chacun une partie de la zone et couplés pour un total de 800 profils transversaux. Les barrages sont soumis à différentes réglementations. Les données sur trois mois de 2005 ont permis de calibrer le modèle général, qui a ensuite été validé par des données de 2007. Le modèle validé a alors permis de calculer différents scénarios concernant les barrages et la régulation des lacs.

Diversité des habitats sur la Singine (2D)

La Singine (BE/FR) se trouve sur certains tronçons encore à l'état naturel. Les caractéristiques d'un tronçon de 2 km en tresses ont été simulées sur une année de débits.

Une simulation 2D a été réalisée pour représenter la diversité des structures de la topographie. Le modèle hydraulique a été calibré à partir de relevés du niveau d'eau. Les spécialistes ont ensuite étudié les répercussions des formules de transport par charriage (monograin et multigrain) sur la morphologie et sur la modification des habitats (fiche 3 Indice hydromorphologique de la diversité).

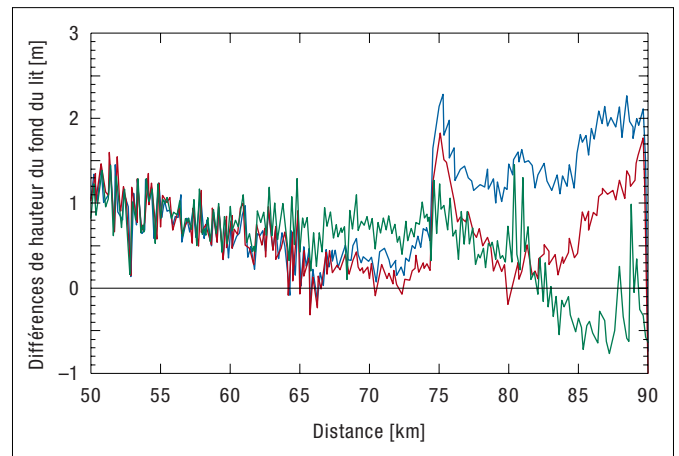


Fig. 6 Différences de hauteur du fond du lit du Rhin alpin simulées dans un modèle 1D avec différents aménagements, pour une période de 50 ans. La ligne 0 montre l'évolution du fond du lit si aucune mesure n'est mise en œuvre. Illustration d'après VAW, EPF Zurich

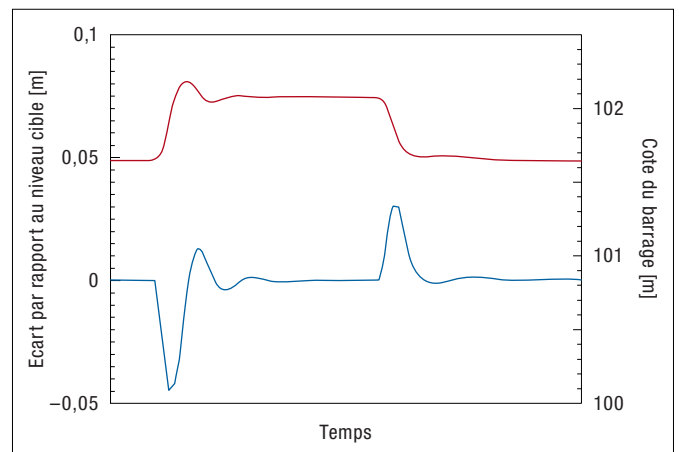


Fig. 7 Comportement d'un barrage régulé avec une diminution puis une augmentation brutales du débit. La ligne bleue montre l'écart entre le niveau réel et le niveau cible. La ligne rouge montre l'évolution de la cote du barrage. Illustration d'après VAW, EPF Zurich

Evolution de l'embouchure du Rhin alpin (2D)

C'est par un canal que le Rhin alpin pénètre dans le lac de Constance (fig. 8). De grandes quantités de sédiments à grains fins sont transportés à la fois dans le canal et dans le lac. Un modèle 2D du delta a été créé pour évaluer les modifications à long terme du lit du canal. Pour le transport des sédiments, les grains étant fins, la modélisation a été axée principalement sur le transport par suspension. La topographie du canal est connue à deux dates distantes de 500 jours. Le modèle numérique a été calibré à partir de la situation antérieure et a permis

de reproduire qualitativement et quantitativement les différences de hauteur du fond du lit.

Impact hydraulique d'un élargissement (2D)

Les élargissements permettent d'améliorer la biodiversité et de renforcer la protection contre les crues. Une simulation hydraulique 2D a permis de définir les effets d'un élargissement avec différents cas de charge (fig. 9). Les résultats peuvent être utilisés comme conditions aux limites d'un modèle physique pour les élargissements planifiés.

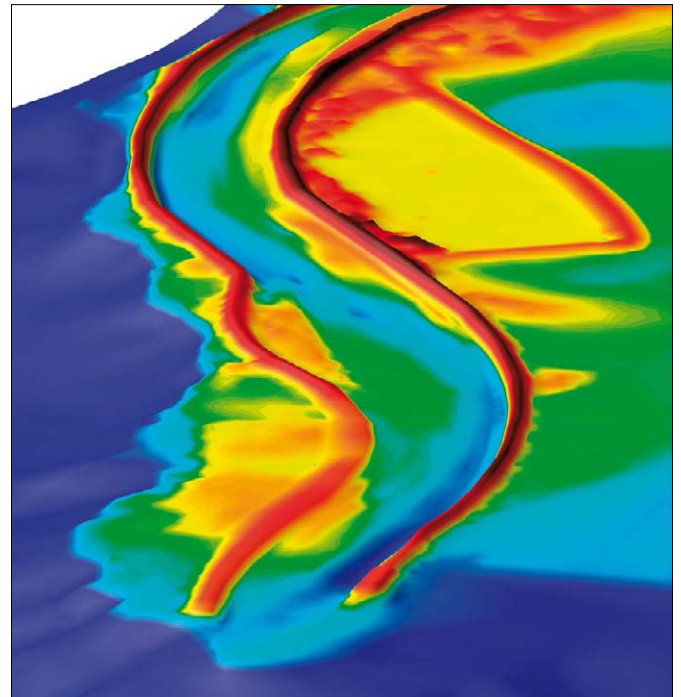


Fig. 8 Topographie du fond (2D) du canal amenant le Rhin alpin dans le lac de Constance. Illustration: VAW, EPF Zurich

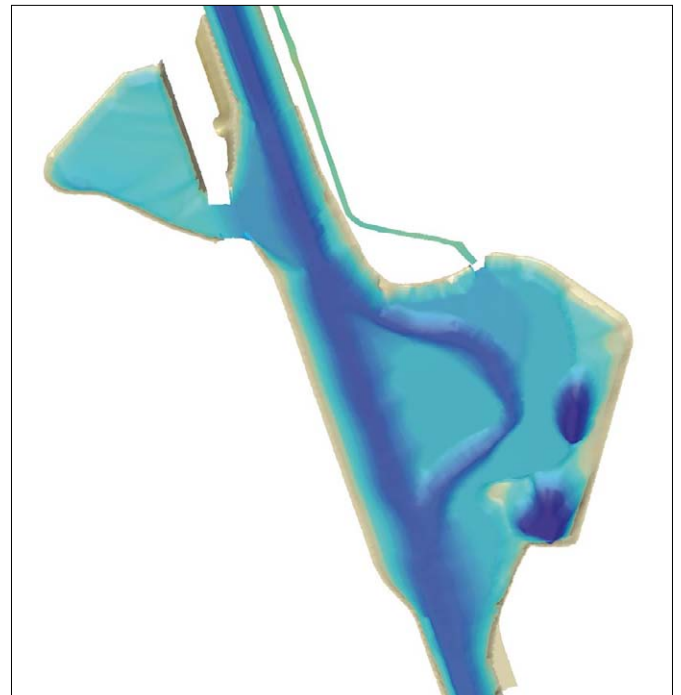


Fig. 9 Simulation (2D) des hauteurs d'eau dans un élargissement à proximité d'un évacuateur de crue sur un secteur canalisé. Illustration: VAW, EPF Zurich

Bibliographie

Fäh, R., Mueller, R., Rousselot, P., Veprek, R., Vetsch, D., Volz, C., 2006–2011: *BASEMENT* – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. VAW, EPF Zurich, Internet: www.basement.ethz.ch

Vetsch, D., Rousselot, P., Fäh, R., 2011: Flussgebietsmodellierung mit der Simulationssoftware *BASEMENT*. Eau énergie air: 4/2011, p. 313–319.

Impressum

Concept

Dans le cadre du présent projet, des spécialistes en aménagement des cours d'eau, des écologues et des représentants des autorités fédérales et cantonales ont été invités à élaborer des solutions conjointes visant à supprimer les déficits relevés au niveau des cours d'eau. Les intervenants ont ainsi exploré les possibilités de réaliser des habitats dynamiques et interconnectés, et développé des concepts innovants pour la mise en œuvre des mesures d'aménagement des cours d'eau. Pour plus d'informations: www.rivermanagement.ch

Projet

Financé par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), le projet a été mené sous l'égide des quatre institutions suivantes:

Armin Peter, Eawag, Ecologie et évolution des poissons, Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum, www.eawag.ch

Christoph Scheidegger, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Biodiversité et écologie de la conservation, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, www.wsl.ch

Anton Schleiss, EPF Lausanne, Laboratoire de constructions hydrauliques LCH-EPFL, Station 18, 1015 Lausanne, www.lch.epfl.ch

Roland Fäh, EPF Zurich, Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques (VAW/ETHZ), Gloriastrasse 37/39, 8092 Zurich, www.vaw.ethz.ch

Coordination

Sonia Angelone, Manuela Di Giulio

Suivi technique

OFEV: Paul Dändliker, Manuel Epprecht, Werner Göggel, Susanne Haertel-Borer, Daniel Hefti, Jean-Pierre Jordan, Stephan Lussi, Olivier Overney, Markus Thommen
Cantons: Lorenz Jaun (UR), Vinzenz Maurer (BE), Sandro Peduzzi (TI), Markus Zumsteg (AG)

Projet: Sonia Angelone, Tobias Buser, Manuela Di Giulio, Roland Fäh, Armin Peter, Christopher Robinson, Christoph Scheidegger, Anton Schleiss

Edition

Office fédéral de l'environnement (OFEV).

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Rédaction

Manuela Di Giulio, Sonia Angelone

Traduction et suivi linguistique

Aude Thalmann, Anne-Catherine Trabichet

Référence bibliographique

Rousselot, P., Vetsch, D., Fäh, R., 2012: Modélisation numérique des cours d'eau. In: Fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau, OFEV, Berne. Fiche 7.

Conception et illustrations

anamorph.ch: Marcel Schneeberger (AD), Patrik Ferrarelli

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uw-1211-f

Cette publication est également disponible en allemand (original) et en italien.

© OFEV 2012



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV