

## **SIMULATION NUMERIQUE DE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES RIVIERES DE MONTAGNE AU COURS DES CRUES**

### **1 OBJECTIFS DE L'ETUDE ET PROGRAMME DES TRAVAUX**

#### **Objectifs**

Les rivières de montagnes alluvionnaires forment un système fragile du point de vue de leur équilibre morphodynamique. Les excès ou les déficits de transport solide peuvent avoir un impact important sur cet équilibre, impact qui est surtout sensible en période de crues où les lits sont soumis à de fortes sollicitations.

Or, des événements, quelquefois naturels, mais souvent liés à l'activité humaine modifient l'équilibre originel des rivières. Il est donc de la plus haute importance de pouvoir anticiper, au moins qualitativement et si possible quantitativement, quels peuvent être les impacts sur les lits des rivières de ces modifications.

On explore dans le cadre de cette étude les possibilités qu'offrent les outils de simulation numérique, pour traiter ces problèmes. La modélisation numérique des rivières à fonds mobiles, qui est maintenant fréquemment utilisée pour les études des rivières de plaine, est appliquée ici au cas des rivières de montagne.

#### **Programme des travaux**

Le projet consiste en une étude de faisabilité de l'application d'un code prototype de modélisation des rivières à fonds mobiles au cas des crues débordantes en rivières de montagne.

Il se décompose de la façon suivante :

- Analyse bibliographique des avancées qui ont pu être réalisées récemment dans ce domaine ;
- Introduction de la prise en compte des champs d'inondation dans le code existant, sous une forme cohérente avec la simulation de la propagation des crues réalisée par les modèles à fond fixes ;
- Réalisation d'une maquette sur un tronçon de rivière alpine et étude de sensibilité permettant d'analyser les insuffisances du modèle existant, les spécificités des problèmes, et les développements ultérieurs nécessaires.

## **Acteurs du programme**

Le présent travail effectué par le LHF avec la collaboration du CEMAGREF et de l'Institut de Mécanique de Grenoble, LTHE et LEGI actuellement, fait partie du thème Risques de Crues en Rivières.

Il a été réalisé en synergie et en complémentarité avec d'autres actions de recherches et de développement engagées dans ces différents organismes, en particulier au LHF avec le développement des systèmes de modélisation de la morphologie fluviale SEDICOUP et TSAR.

Ces travaux de recherche de développement ont été aussi guidés et confortés par des applications et des études. Certaines rivières étudiées et simulées (l'Isar en Bavière, l'Allier) ont des caractéristiques hydrologiques, morphologiques et sédimentologiques semblables à de nombreuses rivières de piémont dans les Alpes. Les problèmes étudiés (érosion progressive, crues, aménagement) sont quelques uns des problèmes qui se posent dans ces mêmes rivières de piémont.

## **2 MODELISATION UNIDIMENSIONNELLE**

### **2.1 TURBULENCE, TRANSPORT SOLIDE ET DISSIPATION D'ENERGIE**

Le modèle numérique est basé sur des principes de conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Ces lois de continuité sont complétées par des formulations complémentaires de fermeture, en particulier pour l'expression de la dissipation d'énergie (perte de charge) et l'expression du transport solide.

Dès que les tronçons de rivière étudiés dépassent quelques kilomètres de longueur, l'approximation unidimensionnelle ne peut être évitée.

Plusieurs possibilités existent pour l'expression unidimensionnelle de la perte de charge dans les modélisations des écoulements à fond fixe. Les diverses méthodes sont cependant toutes des adaptations de la relation empirique de Manning-Strickler.

Toutes les questions ne sont pas résolues en présence de transport solide et en raison de la nouveauté de ce type de modélisation, l'extrapolation et la validation de méthodes empiriques n'existe pas.

Ces questions concernent en particulier la formation de formes du lit et la variabilité des contraintes de cisaillement en fonction des conditions d'écoulement et de la composition granulométrique des matériaux exposés au transport. S'ajoutent alors à ces questions les problèmes liés à l'hétérogénéité spatiale (dans une même section en travers du lit de la rivière) des contraintes de cisaillement et les problèmes relatifs au caractère instationnaire des phénomènes (les formes du lit par exemple ne se développent pas instantanément).

L'approche qui a été retenue est la décomposition de la section en tranches verticales indépendantes. La capacité totale de transport liquide (débitance) et la capacité totale de transport solide sont respectivement la somme des débitances et des capacités de transport pour chaque tranche verticale.

Cette approche a été retenue dans un premier temps parce que les hypothèses qu'elle utilise sont plus facilement vérifiables et parce qu'elle ne pose pas de problèmes d'étalonnage.

Une meilleure représentation des contraintes exercées par l'écoulement sur le fond est un préalable au raffinement de la méthode. Une première analyse a été faite dans le cadre même de ce projet par le CEMAGREF. Cette analyse montre que l'on peut dans une certaine mesure prendre en compte des phénomènes bidimensionnels dans une approche monodimensionnelle mais ses résultats ne sont pas directement généralisables à des sections quelconques.

## 2.2 CHAMPS D'INONDATION

Les questions évoquées ci-avant prennent une importance extrême en crue. La section d'écoulement est alors composée de régions très diverses en ce qui concerne les caractéristiques de l'écoulement (profondeur, vitesse), les conditions de frottement (état de surface en particulier), le transport de matériaux et les phénomènes d'érosion.

Cette méthode de décomposition en régions du lit indépendantes est étendue en considérant autant de sous-sections du lit que de régions homogènes pour l'écoulement et le transport : lit mineur actif où se produit le transport par charriage, zones de berges et lit majeur qui participe à l'écoulement et à l'expansion de la crue (stockage) mais où les phénomènes de transport sont limités (suspension).

## 2.3 EVOLUTION DE LA SECTION EN TRAVERS

Les mêmes difficultés se retrouvent quand on veut répartir l'érosion ou le dépôt calculé dans une section d'écoulement sur les différentes zones de cette section. Là encore une meilleure connaissance de la répartition de la contrainte de cisaillement sur le fond est nécessaire.

L'approche qui a été retenue est cohérente avec la décomposition faite de la section d'écoulement :

- a) Le **lit mineur actif** est la partie du lit où s'effectue exclusivement le transport par charriage. C'est la zone d'emprunt des matériaux transportés.

C'est donc la partie du lit où l'on va appliquer dans la modélisation les notions de tri granulométrique, de formes de fond, etc.

En l'absence de conclusions pratiques sur la répartition des contraintes et du transport dans cette zone et aussi du caractère souvent tridimensionnel de ces phénomènes dans les rivières réelles (importance des courants hélicoïdaux si la sinuosité est importante), on limite clairement la portée des résultats calculés en posant l'hypothèse suivante dans le calcul : le profil en travers de cette sous-section ne se déforme pas ; la sous-section se réhausse (dépôt) ou s'abaisse (érosion) de façon globale au cours des simulations.

- b) Il n'y a pas de transport solide par charriage dans le lit majeur. Les sédiments en suspension atteignent le lit majeur en cas d'inondation. Le volume de dépôt équivalent est négligeable et ne modifie pas les capacités hydrauliques du lit majeur. On pourra le comptabiliser pour chiffrer leur impact sur la qualité de sol.
- c) **Les berges** : C'est la zone frontière (à gauche et à droite) du lit mineur actif où l'on va considérer tous les phénomènes annexes d'érosion ou de dépôt qui ne sont pas modélisés dans le lit mineur.

Les berges participent éventuellement à la débitance liquide. Le transport solide par charriage y est nul. Ces sous sections sont susceptibles de se déformer de différentes façons, simulant l'érosion ou l'engraissement des berges, l'élargissement du lit mineur, la stabilisation artificielle du lit (épis), etc.

Les matériaux concernés par cette évolution des zones de berges proviennent ou rejoignent le lit mineur. Du point de vue du calcul, ils sont comptabilisés sous forme de termes sources empruntés ou déposés au fond du lit actif (couche mélangée).

#### 2.4 SINGULARITES

Les rivières de montagne ou de piémont comportent aussi des singularités qui doivent être prises en compte par la modélisation : par exemple une discontinuité dans le profil ou la section, la présence de structures existantes ou projetées (radiers, ponts), la possibilité d'affleurements rocheux inérodables, etc.

Les simulations numériques, surtout si elles sont utilisées pour répondre aux questions que pose l'aménagement des rivières doivent pouvoir prendre en compte de telles singularités.

Du point de vue de la simulation, il s'agit de reconnaître ces éléments, et d'appliquer des lois de comportement (perte de charge, caractéristiques du transport) qui ne sont pas les lois physiques utilisées pour les tronçons de calcul habituels.

Les méthodes au LHF dans ce domaine ont été précisées à l'occasion de l'étude morphologique du Danube et de l'Isar. On a introduit à cette occasion la possibilité de modéliser un radier inérodable et sa construction en fonction de l'évolution morphologique ; on a aussi introduit la possibilité de modéliser les affleurements rocheux.

Au cours des travaux de la troisième année du présent programme, on a développé la mise en œuvre de ces procédures pour un ouvrage écrêteur de crues.

### 3 APPLICATION ET DEMONSTRATION

#### APPLICATION

Une situation particulière est fréquemment rencontrée dans les rivières de montagne : c'est la conjonction de crues avec le transport de sédiments par charriage.

En application et en conclusion des travaux de recherche et de développement qui sont l'objet de ce présent programme, on a réalisé une étude fictive de l'impact sédimentologique d'un barrage écrêteur de crues.

On a utilisé le modèle hydraulique existant d'une rivière de piémont pour cette démonstration. Les caractéristiques hydrauliques et hydrologiques et sédimentologiques sont résumées par les données suivantes :

- pente moyenne : 0,06 % ;
- débit caractéristique maximum (dépassé 10 jours/an) : 550 m<sup>3</sup>/s ;
- débit moyen caractéristique (dépassé 6 mois/an) : 100 m<sup>3</sup>/s ;
- débit caractéristique d'étiage (dépassé 355 jours/an) : 25 m<sup>3</sup>/s ;
- inondation du lit majeur à partir de 400 m<sup>3</sup>/s à 1500 m<sup>3</sup>/s selon les secteurs ;
- granulométrie des sédiments entre 0,1 mm et 31,5 mm. diamètre moyen environ 7 mm. Cette granulométrie est représentée dans la modélisation par 4 classes granulométriques homogènes. Dans ces calculs on ne tient pas compte des matières en suspension (granulométries inférieures à 0,1mm). Les calculs qui sont présentés ici utilisent la formule de transport de Engelund et Hansen étendue à un mélange granulométrique.

Le modèle reproduit 53 km de la rivière entre deux seuils (pont à l'amont et barrage régulateur de niveau à l'aval). 36 sections en travers représentatives décrivent pour le calcul le lit mineur et le lit majeur. Les paramètres hydrauliques de la modélisation sont réglés pour reproduire les lignes d'eau mesurées ainsi que la propagation d'une crue historique. Pour cette démonstration le réglage habituel des paramètres du transport n'est pas fait.

Un barrage écrêteur de crues est construit au km. 31,3 du modèle. On simule les règles d'opération du barrage (consigne de débit d'écrêtement, déstockage immédiat après la pointe de crue) et son comportement vis à vis des sédiments. En étiage, le barrage est effacé et ne présente plus que son radier inérodable.

Le programme de calcul gère automatiquement le fonctionnement du système en fonction du débit entrant à l'amont du modèle et du niveau calculé dans la retenue.

Le fonctionnement du système est démontré en détail dans un calcul qui reproduit une crue de période de retour 20 ans suivie d'une année hydrologique moyenne. L'évolution du système à long terme est étudiée par une simulation longue de 20 années hydrologiques historiques.

Nous ne détaillons pas ici les résultats de cette étude fictive qui sont présentés au moyen d'une animation vidéo. On signale seulement les deux difficultés majeures de cette étude qui sont d'une part le fort couplage des phénomènes d'écoulement liquide et des phénomènes d'érosion, et d'autre part l'importance des phénomènes de tri granulométrique et de pavage.

Cette étude montre l'adaptation des méthodes et de l'outil SEDICOUP pour le calcul des évolutions morphologiques de ce type de rivières.

Un effet direct de cette étude de faisabilité : le LHF a été chargé en 1993 de réaliser avec le programme SEDICOUP l'étude des impacts sédimentologiques du barrage du Veudre sur l'Allier.

#### **DEMONSTRATION**

On aborde aussi un aspect supplémentaire qui n'est pas exclusivement du ressort de la modélisation des évolutions morphologiques avec la présentation d'un film d'animation vidéo qui a été réalisé à partir de cet exemple d'application.

Il a paru intéressant à l'occasion de ce projet de mettre en œuvre une technique développée au LHF pour la communication des résultats de recherche et d'études en dehors d'un cercle réduit de spécialistes ; que ce soit vers le grand public mais aussi vers un public scientifique mais qui n'est pas directement spécialiste des phénomènes modélisés.

## **4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

### **CONCLUSIONS DE L'ETUDE**

Cette étude montre et résout quelques uns des problèmes de la modélisation des phénomènes morphologiques en rivières.

Elle montre les potentialités des système de modélisation récents.

On n'a certes peu abordé ici les questions de validation des modèles qui sont indispensables avant d'aborder une étude prédictive. L'expérience montre qu'une bonne validation est possible. Elle ne demande pas forcément une quantité de mesures et d'investigations très importante. Mais elle devra être conduite précisément en fonction de la modélisation qu'elle devra valider.

Cette modélisation est accessible pour les études courantes, avec des moyens de calcul courants. Si la validation et les hypothèses de calcul sont corrects, les résultats seront fiables.

Il faut en connaître cependant les limites : il s'agit d'une modélisation unidimensionnelle. On ne cherchera pas à reproduire des phénomènes dus au caractère bi- ou tri-dimensionnel de l'écoulement. Par exemple la déformation d'une section en travers dans un méandre ou les affouillements près d'une singularité. Mais la mise en œuvre de modélisations plus fines est maintenant à l'ordre du jour pour la modélisation de tels phénomènes.

#### **DEVELOPPEMENTS EN COURS**

Les développements engagés actuellement de l'outil SEDICOUP concernent d'une part un raffinement de l'expression des phénomènes physiques et d'autre part l'extension du domaine d'application.

En particulier on développe actuellement l'expression des contraintes de cisaillement en fonction de la granulométrie du fond et du développement de formes du fond. L'application du système est étendue aux réseaux ramifiés dans un premier temps puis aux topologies maillées (réseaux interconnectés).

Une réflexion est engagée à partir des expériences d'application sur la méthodologie des études, et en particulier sur la spécification des données nécessaires et sur le degré de validité des résultats de la simulation.

Les projets de recherche et développements dans le domaine de la simulation numérique des transports solides ne concernent pas seulement l'outil SEDICOUP. Ils sont aussi à signaler parce qu'ils concernent directement l'étude des risques dans les régions de montagne: production de sédiments à partir des caractéristiques du bassin versant et des conditions hydrologiques, calcul des évolutions morphologiques des rivières à forte pente, écoulements de densité et sédimentation dans les retenues.