Modélisation de l'évolution morphologique du Danube et de l'Isar

Ph. Belleudy

Laboratoire d'Hydraulique de France, BP 172XF, 38042 Grenoble Cedex

H. Schüttrumpf

Leichtweiss Institut für Wasserbau

1. Introduction

SEDICOU est un système de modélisation des écoulements, du transport de sédiments et de l'évolution morphologique des rivières.

Sa dernière version est le résultat de près d'une décennie de recherches et de développements à l'IIHR (Iowa Institute of Hydraulic Research) et au LHF (Laboratoire d'Hydraulique de France) avec l'aide et le support de BAW (Bundesanstalt für Wasserbau).

Les étapes successives de développement du système ont été décrites dans plusieurs publications et communications successives :

- CUNGE et HOLLY [1] ont présenté le concept de cette nouvelle génération de logiciels.
- Les premières étapes de développement ont été décrites par HOLLY [2], où SEDICOU est aussi présenté comme la continuation des expériences antérieures de l'IIHR et du LHF dans ce domaine.
- HOLLY et RAHUEL [3] font une description détaillée de SEDICOU et présentent des tests qui permettent de juger du comportement du système dans des cas de modélisation délicats.

L'étude morphologique du Danube a été l'occasion de confronter SEDICOU avec des données de terrain et des mesures raffinées des phénomènes modélisés. Cette première application constitue une phase de développement à part entière pour un logiciel de simulation : elle permet de transformer un développement universitaire raffiné en un outil utilisable pour les études d'ingénieur. Cet article décrit cette expérience.

Après une brève présentation du système SEDICOU dans la configuration utilisée pour l'étude, on présentera les résultats de cette confrontation.

La communication a été présentée au Colloque de la SHF en même temps qu'une animation vidéo des premiers résultats de simulation d'exploitation du modèle.

2. Présentation de SEDICOU

2.1. Spécifications

Dans certains cas simples, une approche simplifiée permet parfois une modélisation satisfaisante des phénomènes morphologiques. Mais à part ces rares cas, cette

Modelling Danube and Isar rivers morphological evolution

SEDICOU is a modelling system for simulation of sediment transport and morphological changes of river beds. Its approach is focussed on a precise solution of unsteady flow and sediment transport situations and of grading and armouring processes.

The paper presents the validation stage of the modelling system and of the Danube model. The formulation from BAW, introduced in SEDICOU, and the modelling techniques are compared with field measurements and observations.

même approche simplifiée donne des prédictions qui s'écartent rapidement de la réalité.

Les spécifications à la base du système SEDICOU ont été rédigées pour que le futur logiciel soit particulièrement adapté à la simulation numérique de l'évolution des rivières au cours d'épisodes de régime hydraulique rapidement varié :

- le tri granulométrique et le phénomène de pavage sont rendus grâce à la décomposition du mélange granulométrique en classes de sédiments homogènes et grâce à l'utilisation du concept de couche de mélange pour décrire les sédiments du lit exposé au transport ;
- la résolution couplée de l'ensemble des phénomènes modélisés permet de se dégager de l'hypothèse habituellement faite de l'écoulement quasi stationnaire ;
- quand c'est nécessaire, le calcul des différents modes de transport (charriage ou suspension) est séparé.

2.2. Equations

Les équations de SEDICOU ont été déjà présentées et discutées dans d'autres publications [2], [3], [4].

Le système comprend les habituelles équations de Barré-de-Saint-Venant pour l'expression de la continuité liquide et pour la conservation de la quantité de mouvement.

Une équation de continuité solide, extension de l'équation d'Exner, traduit la continuité de la phase solide, toutes classes granulométriques confondues :

$$(1-p) \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial \sum_{k=1}^K G_k}{\partial x} = - \sum_{k=1}^K S_{sk} + \sum_{k=1}^K g_{lk} \quad (1)$$

où p est la porosité des matériaux du lit, A_s est l'aire de la section du lit alluvial, g_k est le débit solide volumique de la classe de sédiments k , x et t sont les variables dépendantes (distance longitudinale et temps), K est le nombre de classes granulométriques de la décomposition.

Les termes S_{sk} et g_{lk} sont respectivement, pour la classe de sédiments k , le taux d'échanges de matériaux avec le transport en suspension et l'apport latéral de matériaux charriés.

Une équation de conservation exprime la continuité des sédiments de chaque classe granulométrique dans la couche mélangée et en transport :

$$(1-p) \frac{\partial (\beta_k A_m)}{\partial t} + \frac{\partial G_k}{\partial x} - \varepsilon_1 (\varepsilon_2 \beta_k + (1-\varepsilon_2) \beta_{lk}) \times \\ \times (1-p) \left(\frac{\partial A_m}{\partial t} - \frac{\partial A_s}{\partial t} \right) + S_{sk} - g_{lk} = 0 \quad (2)$$

où β_k est la fraction volumique des sédiments de classe k dans la couche mélangée, A_m est l'aire de la couche mélangée dans la section transversale, β_{lk} est la fraction volumique des sédiments de classe k dans la strate sous-jacente du lit, la valeur de ε_1 et ε_2 ($= 0$ ou $= 1$) dépend de la possibilité d'échange de matériaux entre la couche mélangée et le lit et du sens de ces échanges.

Une équation de convection/diffusion exprime le transport en suspension des sédiments de classe k :

$$\frac{\partial}{\partial t} (C_k A) + \frac{\partial}{\partial x} (C_k Q) = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Psi A \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) + S_{sk} + C_{lk} q_l \quad (3)$$

où C_k est la concentration volumique en suspension, A est l'aire de la section mouillée, Q est le débit liquide, Ψ est le coefficient de diffusion longitudinale, $C_{lk} \cdot q_l$ est le flux latéral de matériaux en suspension.

Enfin, pour chaque classe granulométrique, une loi de chargement lie le débit solide charrié effectif G_k au débit solide à l'équilibre G_k^* :

$$\frac{\partial G_k}{\partial x} = P_k (G_k^* - G_k) + \frac{G_k}{G_k^*} \frac{\partial G_k^*}{\partial x} \quad (4)$$

La signification du coefficient de chargement P_k est discutée par HOLLY et RAHUEL [3].

Le nombre de variables dépendantes pour chaque point de calcul se monte donc à $N = (3 + 3K)$ dans le cas général. L'utilisateur a cependant la possibilité de simplifier le système complet d'équations présenté ci-dessus dans le cas où un ou plusieurs phénomènes peuvent être négligés (transport en suspension ou loi de chargement par exemple).

Les N équations correspondantes sont discrétisées aux différences finies selon le schéma de Preissmann et résolues sur l'ensemble des points de calcul par une généralisation de l'algorithme classique de double balayage. On trouvera plus de détails de cette résolution dans HOLLY et RAHUEL [4].

2.3. Adaptation aux études

L'adaptation de SEDICOU aux études est illustrée en particulier par la souplesse que permet sa programmation modulaire : par exemple trois prédicteurs sont disponibles pour le calcul du débit solide d'équilibre : MEYER-PETER et MÜLLER (charriage seul), ENGELUND et HANSEN, et VAN RYN (transport en suspension et par charriage).

Pour l'étude du Danube, le transport en suspension est négligeable pour l'évolution morphologique. Une relation simplifiée lie le débit solide charrié à l'équilibre G_k^* et sa valeur g_{sk}^* :

$$G_k^* = \beta_k g_{sk}^* \quad (5)$$

La formulation de g_{sk}^* est dérivée de la formulation de MEYER-PETER et MÜLLER. Elle a été mise au point par BAW à partir d'une analyse détaillée des phénomènes mis en jeu (SÖHNGEN *et al.* [6]). Cette formulation qui inclut un facteur d'exposition ζ_k pour le calcul de la contrainte critique d'érosion est exposée en annexe.

SEDICOU est un système de modélisation unidimensionnel. Pour reproduire une partie de l'hétérogénéité de la section en travers, celle-ci est divisée en sous-sections : le lit actif où se produisent les phénomènes d'érosion, de dépôt et le transport par charriage, les berges qui peuvent échanger des sédiments avec le lit actif par l'intermédiaire de termes sources, et le champ d'inondation qui contribue à la capacité de l'écoulement en crue. D'éventuels aménagements tels que les épis transversaux sont modélisés dans les zones de berges.

Le lit actif est décrit verticalement par plusieurs strates, définie chacune par son épaisseur, sa composition granulométrique et sa cohésion. La couche mélangée est conçue comme une réalité physique : c'est l'ensemble des sédiments susceptibles d'être mis en mouvement à un instant donné. Elle prend aussi une signification plus numérique en tant que volume de contrôle dans l'équation de tri granulométrique.

Un substratum rocheux inérodable est modélisé comme une strate particulière. Quand l'érosion l'atteindra, ses matériaux ne pourront pas rejoindre la couche mélangée ($\epsilon_1 = 0$ dans l'équation 2). Cette dernière diminuera jusqu'à satisfaire le seul transit des matériaux au-dessus de l'affleurement rocheux.

Des tronçons spéciaux peuvent être introduits pour modéliser les ouvrages ou les structures où les équations fluviales de l'écoulement et du transport solide ne sont pas valables. Dans la modélisation de l'Isar (affluent du Danube), on simule ainsi la construction et la mise en service de seuils de protection du lit, automatiquement pendant les simulations de longue durée quand le critère d'érosion prédéfini pour leur construction est atteint.

3. Confrontation de la modélisation avec les données de terrain

Le système SEDICOU et la formulation proposée par SÖHNGEN *et al.* (voir en annexe et [6]) sont ici validés par la reproduction de l'évolution passée des tronçons de rivière étudiés et des évaluations locales du débit solide.

3.1. Description du modèle

Avec l'objectif de conserver et d'améliorer les conditions de navigation, on étudie l'évolution à long terme d'un tronçon du Danube entre Straubing à l'amont (kilomètre 2 323,8) et Vilshofen à l'aval (kilomètre 2 247,0) de part et d'autre de la confluence avec l'Isar (kilomètre 2 281,0). L'Isar apporte au Danube une charge importante de sédiments grossiers (en moyenne 50 milliers de m³/an en volume brut). Une des principales questions est le devenir des conditions de navigation quand les ouvrages de protection projetés sur l'Isar seront réalisés.

Deux modèles séparés ont été construits : le Danube dans la zone étudiée et l'Isar entre Ettling (kilomètre 21,0) et la confluence avec le Danube (kilomètre 0,0). La pente importante de l'Isar permet le découplage des deux modèles et l'introduction des débits liquide et solide à l'aval du modèle Isar comme apport latéral dans les simulations sur le modèle Danube. Cette méthodologie a été contrainte par une limitation d'alors de SEDICOU. De récents développements du programme permettent maintenant de réaliser de façon couplée les calculs dans un tel réseau ramifié.

L'espacement moyen entre deux sections de calcul, 400 m, a été réduit jusqu'à 100 m pour le Danube au voisinage de la confluence avec l'Isar.

La décomposition de l'étendue granulométrique en quatre classes résulte d'un compromis entre la durée des calculs et une description satisfaisante du mélange dont la dispersion granulométrique joue un rôle fondamental dans le tri et la constitution du pavage.

On expose dans le *tableau 1* quelques valeurs typiques de la distribution granulométrique :

Tableau 1. — Granulométrie des sédiments du Danube et de l'Isar.

Numéro de la classe	1	2	3	4
Diamètres limites	0,25-1,0 mm	1,0-4,0 mm	4,0-16,0 mm	16,0-63,0 mm
Diamètre moyen	0,50 mm	2,0 mm	8,0 mm	31,7 mm
Surface du lit Isar	0,05	0,04	0,28	0,63
Lit sous-jacent Isar	0,10	0,07	0,39	0,44
Surface du lit Danube en amont de la confluence	0,22	0,15	0,41	0,22
Surface du lit Danube en aval de la confluence	0,09	0,06	0,36	0,49

On remarque en particulier que les sédiments de l'Isar sont plus grossiers que ceux du Danube (en amont de la confluence) et qu'ils sont très présents dans le Danube à l'aval de la confluence.

3.2. Conditions aux limites

Pour chacun des modèles, la condition hydraulique à la limite amont est le débit moyen journalier. La charge en sédiments est supposée être en équilibre avec les conditions locales de transport (écoulement et composition du lit).

La condition hydraulique à l'aval du modèle du Danube est une loi hauteur = f (débit). A l'aval du modèle de l'Isar, une relation du niveau en fonction du temps $y = f(t)$ a été établie d'après la relation $y = f$ (débit) observée et des débits du Danube et de l'Isar.

La simulation de validation reproduit 16 années de l'évolution du système entre 1971 et 1985. C'est sur les données de ces mêmes années que BAW a mis au point la formulation utilisée pour calculer le transport solide potentiel. La simulation ne prend pas en compte les dragages qui ont été réalisés pour maintenir les conditions de navigation malgré le dépôt de sédiments.

Le pas de temps de la simulation varie automatiquement entre $\Delta t = 3$ jours et $\Delta t = 3$ heures en fonction du débit maximum dans le modèle.

3.3. Résultats de la validation

Le seul ajustement qui a été fait alors est celui des paramètres de l'écoulement (coefficients de perte de charge) pour faire correspondre les lignes d'eau mesurées aux lignes d'eau calculées en régime permanent. La difficulté de cet ajustement a résidé dans la réduction des simplifications introduites par la modélisation unidimensionnelle. En particulier on a dû ajuster des lois rugosité = f (hauteur d'eau) pour prendre en compte le fonctionnement des épis transversaux et longitudinaux (zones de berges) et les dépressions du lit majeur (anciens méandres et zones d'emprunt de matériaux). La simulation de validation (1971 → 1985) a été réalisée à la suite de cet ajustement.

Les courbes de tarage de la figure 1 comparent les mesures réalisées par BAW à Plattling (kilomètre 9 de l'Isar) avec un échantillon aléatoire de couples (débit liquide, débit solide total) au cours de la simulation.

1. Courbe de tarage (débit solide/débit liquide) à Plattling (km 9,0 Isar).

On a aussi présenté sur la même figure le débit solide calculé pour chaque classe granulométrique : ce sont les classes les plus grossières, qui sont aussi les plus présentes, qui constituent la majeure part du transport solide.

L'évolution du lit à l'aval extrême de l'Isar suit les différences saisonnières de régime de l'Isar (nivo-pluvial) et du Danube (essentiellement pluvial). Ces variations sont portées sur la figure 2. La simulation reproduit cependant le caractère essentiel des observations : en moyenne sur plusieurs années, il n'y a pas d'évolution du lit de l'Isar au voisinage de la confluence.

2. Variations du talweg à l'aval de l'Isar.

Sur le profil de la figure 3, la courbe en tirets reproduit le flux moyen annuel de matériaux tel qu'il a été évalué par BAW d'après l'évolution des sections en travers et les volumes de sédiments qu'il a été nécessaire de draguer pour conserver les mêmes conditions de navigation.

3. Flux annuel de sédiments (volume brut).

On remarquera la brusque discontinuité de ce profil au kilomètre 2281,0 qui traduit l'apport moyen des sédiments par l'Isar. Le calcul reproduit cette moyenne de façon satisfaisante sur 16 ans. La distribution granulométrique des sédiments apportés par l'Isar (calculée) est comparable à la distribution mesurée des sédiments dans le lit (sous la couche mélangée) à l'aval de la confluence.

Les courbes pleines de la figure 3 montrent les profils du flux annuel calculé de matériaux pendant les premières années de la simulation. On retrouve la même tendance au dépôt de sédiments tout au long du tronçon étudié. Et en moyenne on retrouve l'évaluation faite par BAW (courbe en tirets). On confirme en outre la dispersion qui a été constatée du transport solide selon les années.

L'irrégularité longitudinale de ces profils calculés traduit l'hétérogénéité de terrain : selon que la section de calcul est située dans une courbe (zone d'érosion) ou dans une section rectiligne (zone de dépôt). Ces zones de dépôt demandent à être draguées régulièrement. Le fait que ces dragages ne soient pas pris en compte par le calcul est responsable de la détérioration de la qualité des résultats dans les dernières années de la simulation.

La validation est satisfaisante, étant donné les aspects innovants de cette modélisation et les incertitudes qui sont attachées aux données de réglage.

Les simulations de long terme qui sont réalisées dans la suite de cette étude comprennent une analyse de sensibilité de la modélisation : aux paramètres de la modélisation, aux incertitudes des données et aux aléas hydrologiques. La méthodologie de cette étude de sensibilité est abordée par LOY *et al.* [7].

L'objectif final sera alors mis en œuvre qui est la prévision de l'évolution à long terme de la rivière avec plusieurs scénarios pour l'aménagement.

4. Perspectives

SEDICOU a franchi dans cette application l'étape cruciale de développement d'un code de calcul qui se situe entre la fin des tests de validation et son utilisation régulière pour les études d'ingénieurs. Cette étape a bien entendu demandé de nombreux ajustements et corrections dans le logiciel.

Ces ajustements se sont poursuivis par une vraie industrialisation du programme qui comprenait la réduction du temps de simulation, la rationalisation du traitement des données, la rédaction de la documentation et enfin l'installation du programme et sa bonne opération sur d'autres sites et d'autres ordinateurs (et par d'autres utilisateurs) que ceux utilisés pour (impliqués dans) le développement.

La poursuite du programme de développement dans le domaine du transport solide en rivière présente deux directions distinctes (et complémentaires) : la réflexion méthodologique et l'extension des possibilités du programme.

SEDICOU est un outil puissant pour les études. Il reste paradoxalement un effort important à faire pour le connaître ; ou plutôt pour l'utiliser de la manière la plus efficace dans la résolution du problème de terrain. Une réflexion méthodologique doit porter sur la méthode de construction et de validation du modèle, sur les données nécessaires, sur le degré de confiance des résultats en fonction du degré de qualité des données et de la validation et des limitations de la modélisation.

Il importe de cerner mieux ces limites même de la modélisation. Par exemple on connaît assez bien la signification de l'hypothèse unidimensionnelle pour les modélisations des écoulements. La représentativité de la

modélisation unidimensionnelle pour le transport solide à travers une section en travers nécessairement hétérogène (écoulement, état du fond) doit être maîtrisée.

L'extension des possibilités du programme concerne la réduction de certaines hypothèses et limitations. Un développement est actuellement en cours pour l'extension aux réseaux maillés. On réfléchira à la possibilité de réduction de l'hypothèse unidimensionnelle (évolution de la section en travers).

Enfin on cherchera à compléter le système de modélisation : en étendant ses possibilités (par exemple réalisation d'un programme de dragage) ou en facilitant sa mise en œuvre (intégration dans une plate-forme de pilotage multi-méthodes de modélisation fluviale).

Tous ces points de développement devront bien entendu s'appuyer sur l'expérience et le savoir acquis sur le terrain (proprement dit et celui des études).

Bibliographie

- [1] CUNGE J.A. and HOLLY F.M. (1986). — *Development strategy for one-dimensional mobile-bed modelling system*. 3rd Int. Symp. on River Sedimentation, Jackson MI, USA, 31 March-10 April.
- [2] HOLLY F.M. (1988). — *CHARIMA and SEDICOU codes for riverine mobile-bed simulation*. 2nd Seminar on Stream Sedimentation Models, Interagency, Advisory Committee on Water Data, Denver, CO, 10-20 October.
- [3] HOLLY F.M. and RAHUEL J.-L. (1989). — *Riverine mobile-bed modelling under nonequilibrium conditions*. HYDRO-COMP 89, Dubrovnik, Yugoslavia, June.
- [4] HOLLY F.M. and RAHUEL J.-L. (1990). — *New numerical/physical framework for mobile-bed modelling. Part 1 : Numerical and physical principles*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 28, N° 4.
- [5] HOLLY F.M. and RAHUEL J.-L. (1990). — *New numerical/physical framework for mobile-bed modelling. Part 2 : Test application*. Journal of Hydraulic Research, Vol. 28, N° 5.
- [6] SÖHNGEN B., KELLERMANN J., LOY G. (1992). — *Modelling Danube and Isar Rivers morphological evolution. Part 1 : Measurements and formulation*. 5th Int. Symp. on River Sedimentation, Karlsruhe, Germany, 6-10 April.
- [7] LOY G., BELLEUDY Ph., KELLERMANN J., SÖHNGEN B. (1992). — *Modelling Danube and Isar Rivers Morphological Evolution in Part 3 : Range of uncertainty caused by scattered field data with special respect to grain sorting*. 5th Int. Symp. on River Sedimentation, Karlsruhe, Germany, 6-10 April.

ANNEXE :

Formulation du transport solide à l'équilibre:

Formule de transport d'après Meyer-Peter & Müller:

$$g_{s,k}^* = 2.2 \beta_k \sqrt{g d_k^3 \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} (\theta_k - \zeta_k \theta_c)^{3/2}$$

Contrainte de cisaillement:

$$\theta_k = \theta_k \mu$$

$$\theta_k = \frac{h S_f}{\frac{\rho_s - \rho}{d_k \rho}}$$

Facteur de forme:

$$\mu = (K'_s / K_s)^{1/4}$$

Rugosité de grain équivalente:

$$K_s = (K'_s + K''_s)$$

Rugosité de grain (Günter) = d_{95} :

$$K'_s = d_m + 1.6 s_{dm}$$

Rugosité de forme (Höfer):

$$K''_s = 10 h_D^2 L_D$$

Longueur de dune: Hauteur de dune (Yalin):

$$L_D = 5 h \quad h_D = 1/6 \cdot h (1 - \theta_c / \theta_m) (1 - Fr^2)$$

Contrainte moyenne de cisaillement:

$$\theta_m = \frac{h S_f}{\frac{\rho_s - \rho}{d_m \rho}}$$

Nombre de Froude: Vitesse moyenne:

$$Fr = V / \sqrt{g h} \quad V = k_{str} h^{2/3} S_f^{1/2}$$

Facteur d'exposition (Söhngen, Loy d'après les mesures):

$$\zeta_k = (d_k / d_a)^{S_2}$$

Diamètre représentatif (Day):

$$d_a = S_3 d_{50} \delta_g^{-0.28}$$

(Ribberink/distribution log-normale):

$$\delta_g = e^{2 \sqrt{\ln \left(\left(\frac{s_{dm}}{d_m} \right)^2 + 1 \right)}}$$

Constantes:

$$\theta_c = S_1 = 0.043$$

$$S_2 = -0.935$$

$$S_3 = 1.6$$