Simulation numérique de l'érosion des vases de retenue par les crues

Applications aux retenues de l'Escale et Saint-Lazare, sur la Durance

J. P. Bouchard, M. Cordelle Laboratoire national d'hydraulique

J. Lorin Ingénieur conseil

1. Introduction

L'envasement des retenues est connu comme étant à l'origine de nombreux problèmes et de nuisances tant pour l'exploitation des réservoirs, que lors des vidanges qui peuvent entraîner une pollution importante du cours d'eau à l'aval. Parmi les nombreux problèmes que suscitent la présence de quantités importantes de vase dans un réservoir, certains peuvent s'exprimer par les questions suivantes :

- Une retenue envasée est-elle susceptible d'être déblayée partiellement par une crue moyenne ?
- Existe-t-il une gestion du plan d'eau en crue qui puisse favoriser cet entraînement des vases ?
- S'il y a effectivement érosion, quelles seront les hauteurs d'eau réellement atteintes lors de la crue compte tenu de l'élargissement de la section d'écoulement produite par l'érosion ?

La réponse à ce type de question suppose de disposer d'un outil de calcul couplant la simulation de l'écoulement à celle de l'érosion et de la déformation des fonds qui en résulte. Cette communication présente le développement de cet outil et l'application qui en a été faite aux retenues de l'Escale et Saint-Lazare situées sur la moyenne Durance et qui sont connues pour avoir subi un envasement important, ayant entraîné, en quelques années, une réduction de leur capacité à environ 20 % de leur volume initial.

Cette étude a été financée par le GRPH Méditerranée qui exploite les retenues de la Durance et par la Direction des Etudes et recherches d'EDF. Les investigations sur le terrain et mesures en laboratoire ont été réalisées par le Laboratoire central d'hydraulique de France (LCHF) de Maisons-Alfort : [1], [2], [3]. Le développement du code et la modélisation des retenues ont été faits au Laboratoire national d'hydraulique (LNH) : [4].

2. Méthodologie d'étude

La simulation des écoulements en rivière par des modèles filaires est classique, par contre le couplage avec un modèle sédimentaire se heurte à la complexité et à la méconnaissance des lois de comportement des sédiments cohésifs.

Une des difficultés résulte de la multiplicité des facteurs conditionnant les propriétés érosives des vases. Alors que pour les sédiments non cohésifs un seul paramètre (le diamètre du grain) détermine les lois d'érosion ; pour les vases celles-ci dépendront de : la *granulométrie*, la *composition minéralogique*, la *teneur en eau du sédiment ou concentration*, le *pourcentage de sable dans la vase*, la *salinité de l'eau interstitielle*.

La nécessité de réaliser un grand nombre de mesures dans les sédiments souvent très hétérogènes des retenues

Computation of the volume of mud eroded in reservoirs by floods

The aim of the study is to compute the volume of mud which can be eroded in reservoirs by floods. This study has involved site investigations by means of sample drills and the determination of mud erosion laws through flume tests. The modelisation consists in a 1 D. model for flow and the resolution of an advection-diffusion equation for the suspended matter concentration. The flow of erosion and deposition are computed on a 2 D. grid of the bottom.

1. Variation de la rigidité initiale en fonction de la concentration intergranulaire de la vase, à partir de [2].

2. Vitesse critique d'érosion de diverses vases en fonction de leur rigidité initiale (d'après [5]).

oblige à limiter les investigations sur le site aux seuls facteurs susceptibles de présenter le plus de variabilité dans la retenue à savoir la concentration des vases et le pourcentage de sable. Les autres facteurs (granulométrie et minéralogie) n'étant mesurés qu'en quelques points pour s'assurer de leur constance. Les lois d'érosion des vases du site sont ensuite déterminées en laboratoire et exprimées en fonction des paramètres concentration et pourcentage de sable mesurés en nature. Il en découle le déroulement de l'étude en trois étapes qui seront développées dans la suite de cet article :

- Connaissance des dépôts de vase en termes de concentration-pourcentage de sable.
- Etablissement en laboratoire des lois d'érosion en fonction de ces deux paramètres.
- Modélisation mathématique des phénomènes.

3. Connaissance des dépôts de vase [1]

La campagne de prélèvement a comporté 14 sondages carottés réalisés en divers points des deux retenues sur une profondeur maximale de 3 m. Des prélèvements étaient effectués sur les carottes tous les 12 cm pour analyse de la concentration et du pourcentage de sable. Au total 212 échantillons ont ainsi été analysés, ils révèlent la forte hétérogénéité du massif de vase dont la structure ne peut être décrite que par un grand nombre de mesures.

3. Evolution du coefficient d'érodabilité en fonction de la concentration de la vase, à partir de [3].

4. Etude des propriétés physiques des vases [2]

4.1. Nature des matériaux

A l'analyse minéralogique, les vases de Durance apparaissent composées de 38 % d'Illite, 32 % de Smectite, 15 % de Kaolinite, 15 % de Chlorite.

Le sédiment a un diamètre moyen de l'ordre de 4 μm , ce qui le fait classer parmi les limons. Il présente une faible variation de la granulométrie entre l'amont et l'aval (variation de 4,7 μm à 3,4 μm sur les deux retenues).

4.2. Propriétés rhéologiques

Elles sont caractérisées par la rigidité initiale τ_y mesurée au viscosimètre qui traduit l'importance des forces de cohésion s'opposant à la remise en mouvement. Sur la figure 1 est reproduite la courbe d'évolution de la rigidité initiale en fonction de la concentration de la vase intergranulaire c'est-à-dire la concentration de vase déduction faite du volume et du poids du sable qu'elle contient.

Bien que les essais correspondent à plusieurs pourcentages de sable différents on voit que l'introduction de cette correction permet de regrouper tous les points sur la même droite. Ce fait, signalé par C. MIGNIOT [5], a permis de simplifier la description du massif de vase qui peut ainsi être ici caractérisé par un seul paramètre : la concentration de la vase intergranulaire, au lieu de deux : la concentration et le pourcentage de sable.

4.3. Détermination des lois d'érosion

Les essais d'érosion ont été réalisés dans un canal vitré de 12 m de long et 0,4 m de large muni d'une fosse de 1 m² où étaient déposées les vases à éroder. L'essai consistait à réaliser des paliers de vitesse croissante et à mesurer la concentration de l'eau en sortie du canal. On pouvait donc ainsi faire correspondre au débit d'érosion une valeur de la contrainte de cisaillement τ (ou la grandeur équivalente, vitesse de frottement u_* , selon la formule $\tau = \rho u_*^2$).

Les essais ont concerné une quinzaine d'échantillons de vase de concentration allant de 225 g/l à 878 g/l dont certains comportaient une fraction sableuse.

Les résultats des mesures ont été interprétés en les calant sur la loi d'érosion définie par PARTHÉNIADÈS [6]

$$Q_e = M \left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right)$$

Q_e : débit d'érosion surfacique (kg/s.m²) ; τ : contrainte de cisaillement (N/m²) ; τ_c : contrainte critique à partir de laquelle commence l'érosion (N/m²) ; M : coefficient d'érodabilité (kg/s.m²).

Les valeurs des paramètres τ_c et M obtenues pour différentes concentrations de vase sont reportées sur les figures 2 et 3.

En ce qui concerne le coefficient d'érodabilité, peu de résultats ont été publiés dans la littérature, de plus ce paramètre est décrit selon les auteurs tantôt comme

étant constant, tantôt comme dépendant de la concentration (cf. [7] à [11]).

La large gamme de concentrations testées ici permet d'expliquer ces contradictions. Ce paramètre apparaît en effet croître avec la concentration pour les vases fluides puis décroître et se stabiliser pour les vases plus consolidées. Le changement d'évolution devant correspondre à un changement de mode d'érosion, LORIN [3].

5. Modélisation mathématique : le code Courlis [4]

5.1. Principes du modèle

Le modèle couple un calcul monodimensionnel de l'écoulement avec une description bidimensionnelle des échanges sédimentaires avec le fond.

— Module d'écoulement :

Il s'agit d'un modèle filaire classique. Sur l'axe de la rivière sont définis des profils en travers où sont calculés les caractéristiques moyennes de l'écoulement dans la section : vitesse et cote de la surface libre. A chaque pas de temps ce calcul est fait en permanent, un hydrogramme de crue est donc décrit comme une succession d'états permanents.

— Module sédimentaire :

Il est basé sur la résolution d'une équation de transport diffusif de concentration en matière en suspension :

$$\frac{\partial SC}{\partial t} + \frac{\partial SCV}{\partial x} = K \frac{\partial}{\partial x} S \frac{\partial C}{\partial x} + Q_{\text{érosion}} - Q_{\text{dépôt}}$$

(in KELLER [11]).

S : section mouillée ; C : concentration en matière en suspension ; V : vitesse d'écoulement moyenne dans la section ; K : coefficient de dispersion. $Q_{\text{érosion}}$ et $Q_{\text{dépôt}}$ représentent les débits de matière introduits (érosion) ou retirés (dépôt) de l'écoulement. Le massif de vase est décrit suivant un maillage bidimensionnel passant par les profils en travers eux-mêmes discrétisés transversalement. A chaque nœud du maillage on définit les cotes et les épaisseurs des différentes couches de vases présentant des propriétés érosives fixées (cf. fig. 4). Au total 5 couches de vase de nature différente peuvent être considérées.

En chaque nœud la contrainte de cisaillement exercée par l'écoulement sur les fonds vaseux est calculée à partir de la vitesse moyenne et du tirant d'eau local. Selon la valeur de la contrainte on détermine le débit d'érosion ou de dépôt conformément aux formules suivantes :

- Si $\tau < \tau_d$ contrainte critique de dépôt :

$$\text{débit de dépôt } Q_d = C_v \cdot W \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d} \right)$$

(formule de KRONE)

C_v concentration de la vase ; W vitesse de chute ;

- si $\tau > \tau_c$ contrainte critique d'érosion :

$$\text{débit d'érosion } Q_e = M \left(\frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)$$

(formule de PARTHÉNIADÈS).

4-5. Evolution d'un profil en travers, avant et après passage de la crue.

6. Localisation des érosions le long de la retenue.

A chaque pas de temps les épaisseurs des couches sont gérées en fonction des termes de dépôt et d'érosion, l'érosion entamant des couches de plus en plus profondes et le dépôt en faisant apparaître de nouvelles. La cote des fonds est ainsi actualisée pour servir à un nouveau calcul des vitesses.

5.2. Schématisation des vases des retenues

Cinq classes de concentration de vase ont été définies auxquelles sont associées des valeurs de la contrainte critique d'érosion et du coefficient d'érodabilité obtenues par extrapolation des courbes des figures 2 et 3. La gamme de concentration couverte s'étend des vases très compactes ($\tau_c = 27 \text{ N/m}^2$) ayant atteint leur tassement limite et qui constituent la plus grande partie des dépôts, aux vases de faible cohésion ($\tau_c = 6 \text{ N/m}^2$) des niveaux très sableux.

La cote des fonds, comme la géométrie des couches de vase ne peuvent être connues qu'en un nombre limité de profils en travers compte tenu de la lourdeur des mesures nécessaires. Le mode de résolution numérique réclame par contre une discrétisation beaucoup plus fine selon l'axe de l'écoulement. Le code comporte donc un module qui génère par interpolation la géométrie des couches de vases dans les sections de calcul à partir des sections mesurées. La mise au point d'un tel module d'interpolation de formes s'est révélée très délicate à réaliser.

5.3. Exploitation du modèle

Le modèle a été exploité pour la retenue de l'Escale en simulant le passage d'hydrogrammes de crues de 1 600 et 2 900 m^3/s qui correspondraient à des crues de fréquence décennale et centennale.

Ces simulations montrent que le volume de vase érodé par les crues reste modeste, de l'ordre de 100 000 m^3 pour la crue de 2 900 m^3/s ce qui représente moins de 1 % du volume stocké. Comme l'indique la figure 6 les érosions sont localisées dans le chenal à l'amont de la retenue lors de la montée de crue, puis à son maximum un pic d'érosion intense se forme à l'aval près des vannes du barrage du fait du passage de l'écoulement en régime torrentiel. Cependant la faible durée de la pointe de la crue ne permet pas que cette érosion intense se propage vers l'amont. La modification des fonds qui en résulte est illustrée par les figures 4 et 5.

L'abaissement des lignes d'eau permis par l'érosion des fonds pendant la montée de crue est également assez modeste avec une diminution des cotes de submersion de l'ordre de 10 cm par rapport à un calcul supposant la géométrie stable.

Enfin on a cherché à estimer le dévasement qui pourrait être obtenu en abaissant la cote de retenue pendant les crues. Pour cela, une baisse du plan d'eau de 2 m par rapport à la consigne actuelle a été simulée pendant le passage de la crue de 1 600 m^3/s . Le volume de vase érodée augmente alors de 20 000 à 32 000 m^3 , soit une augmentation faible vis-à-vis des quantités stockées.

6. Conclusions. Limites de la modélisation

Comme souvent dans les problèmes concernant la connaissance du transport solide, il convient de se poser la question de la précision des résultats obtenus. Le modèle utilisé ici présente la particularité de ne pas pouvoir être étalonné (on ne peut attendre le passage d'une crue majeure pour observer le dévasement produit). Tous les paramètres doivent donc être déterminés expérimentalement et la précision des mesures retentit directement sur la précision des résultats.

Deux sources d'imprécision peuvent être identifiées dans ce type d'étude :

La connaissance du massif de vase en place. L'hétérogénéité du dépôt avec ses couches de propriétés différentes formant une structure stratifiée complexe nécessite un grand nombre de mesures sur le terrain pour être décrite de façon précise.

La connaissance des lois d'érosion. Les vases du site se sont révélées atteindre des concentrations élevées dont

les plus fortes n'ont pas été étudiées en canal. Certaines lois établies au laboratoire ont donc dû être extrapolées ce qui nuit forcément à la précision des résultats de cette modélisation.

Bien que l'étude repose sur une quantité de mesures exceptionnellement importante, on ne peut encore espérer connaître dans le domaine de la simulation du transport solide que l'ordre de grandeur des phénomènes. Les résultats obtenus et les tendances mises en lumière n'en sont pas moins fort utiles pour l'exploitation des retenues. Par ailleurs, il est certain que l'expérience acquise dans cette étude permettra pour les suivantes de mieux définir les investigations à mener sur le site et en laboratoire et par là même d'augmenter la précision des résultats.

Enfin cette modélisation constitue un pas vers l'établissement d'un modèle complet du cycle sédimentaire, englobant la simulation du tassement et de l'érosion produite par les vidanges, et qui pourra permettre la définition d'une véritable gestion sédimentaire des retenues.

Bibliographie

- [1] J. LORIN : *Etude des vases de la Durance ; retenues de l'Escale et de Saint-Lazare. Campagne de prélèvements.* Rapport LCHF, 5 4256 R1, septembre 1987.
- [2] J. LORIN : *Etude des vases de la Durance. Propriétés physiques des vases.* Rapport LCHF, 5 4256 R2, octobre 1987.
- [3] J. LORIN, C. MULLER : *Etude des vases de la Durance. Détermination expérimentale d'une loi de débit solide d'érosion, résultats d'essais en canal.* Rapport LCHF, 5 4256 R3, janvier 1988.
- [4] J. P. BOUCHARD : *Synthèse des données recueillies sur les sédiments des retenues de l'Escale et de Saint-Lazare. Conséquences sur les possibilités de remise en mouvement lors des crues.* Rapport EDF, HE 43/88-01, janvier 1988.
- [5] C. MIGNIOT : « Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques ». *La Houille Blanche*, N° 7/1968.
- [6] E. PARTHÉNIADÈS : « Erosion and deposition of cohesive soils ». *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 91, HY1, janvier 1965.
- [7] R. BONNEFILLE, P. CORMAULT, KOVACS : *Etude expérimentale de la dynamique des sédiments fins, conditions de transport en suspension de la vase naturelle.* Rapport EDF, HC 042/25, septembre 1971.
- [8] P. CORMAULT : « Détermination expérimentale du débit solide de sédiments fins ». *AIRH Paris 1971*.
- [9] M. W. OWEN, A. J. HARRISON : « Siltation of fine sediments in estuaries ». *AIRH Paris 1971*.
- [10] R. ARIATHURAI, K. ARULANANDAN : « Erosion rate of cohesive soils ». *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, February 1978.
- [11] P. KELLER, J. P. BOUCHARD : *Etude bibliographique de l'alluvionnement des retenues par les sédiments fins. Mécanismes physiques et moyens de lutte.* Rapport EDF, E 43/83/26, 1983.