

## Modélisation numérique hydrosédimentaire

# Au service de la gestion durable des sédiments

La gestion des sédiments revêt une importance croissante pour l'exploitation des voies navigables et nombre de projets de construction de barrages et de complexes hydroélectriques. L'impact des apports en matériaux solides se manifeste tant par des effets à long terme, telle la réduction de la capacité du réservoir, que par des conséquences à plus court terme, telle l'usure prématurée des turbines. L'étude détaillée des effets sédimentaires s'impose donc de plus en plus tôt dans la conception de nouveaux aménagements. Elle est aussi un objectif tout au long de l'exploitation des ouvrages, dans une perspective de gestion sécuritaire et durable.



Benjamin Dewals fait partie de l'équipe qui met au point le système de modélisation numérique hydrosédimentaire Wolf.

Dans un tel contexte, il convient de disposer d'outils d'analyse prédictifs, notamment sous la forme de modèles numériques, capables de fournir des éléments quantitatifs et rationnels d'aide à la décision. Ces modèles numériques doivent prendre en compte la très grande hétérogénéité des échelles spatiales et surtout temporelles affectant les divers phénomènes à simuler. Il s'agit, par exemple, de l'alluvionnement d'une retenue endéans\* plusieurs décennies ou des remaniements topographiques intenses au cours d'une opération de chasse programmée sur quelques heures. De plus, le type d'écoulements à reproduire, en particulier d'éventuels changements de régime, n'est pas sans conséquence sur la nature du couplage à assurer entre la résolution des sous-modèles hydrodynamique et sédimentaire, ainsi que

sur les schémas numériques de résolution à mettre en œuvre pour produire une solution stable et précise en un temps CPU réaliste.

Le groupe de recherches HECE de l'université de Liège développe depuis plus de dix ans les systèmes de modélisation hydrosédimentaire Wolf. Intégrant des modules de simulation 1D, 2D-horizontale, 2D-verticale et 3D, ces systèmes Wolf apportent la modélisation intégrée des diverses phases d'écoulement depuis le ruissellement hydrologique sur les bassins versants jusqu'aux écoulements fluviaux et au voisinage des structures hydrauliques. Ces outils de modélisation d'écoulement permettent, par exemple, d'objectiver le gain en matière de risque d'inondation à la suite de travaux de dragage de cours d'eau. (figure A). Le système de modélisation offre également la possibilité de simuler une

vaste gamme de processus hydrosédimentaires, parmi lesquels l'alluvionnement progressif de réservoirs et le déroulement d'opérations de chasse destinées à remobiliser les sédiments déposés. L'accent est mis ici tant sur les développements numériques innovants sous-jacents, que sur le volet applicatif en matière de prédiction de l'engravement de réservoirs (aménagements hydroélectriques) et la simulation de mesures de gestion de ces sédiments.

### Modélisation mathématique et numérique

Le système de modélisation est basé sur une approche de type « volumes finis » qui offre une haute précision de résolution et garantit la conservation de la solution. Le maillage de calcul peut comporter plusieurs zones

caractérisées par des finesses de discrétisation différentes selon la géométrie et les écoulements qui s'y développent. Cette approche conduit au meilleur compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats hydrodynamiques générés.

Les modèles numériques hydrosédimentaires Wolf prennent en compte la très grande hétérogénéité des échelles temporelles qui caractérisent les divers processus de transport solide à simuler. Pour ce faire, différents niveaux de couplage entre sous-modèles sont prévus : calcul hydrodynamique stationnaire, quasi stationnaire ou instationnaire complet. Ils couvrent la majorité des échelles de temps pertinentes au moyen d'approches numériques spécifiquement adaptées.

En particulier, le système de modélisation effectue la simulation 2D instationnaire des écoulements et du transport solide, de manière soit totalement couplée, soit adéquatement découplée, selon que les temps caractéristiques hydrodynamiques et sédimentaires soient comparables (par exemple, les chasses) ou sensiblement différenciés (par exemple, l'alluvionnement) et selon les régimes d'écoulement. Le système de modélisation offre aussi la possibilité de prédire très efficacement en 2D le profil d'équilibre du fond pour des conditions d'écoulement données.

Les données d'entrée nécessaires pour effectuer le calcul comprennent la topographie de la vallée et la bathymétrie des réservoirs. La précision globale des résultats est évidemment tributaire de la qualité des données topographiques. Si elles sont disponibles, des modèles numériques de terrain de très haute résolution peuvent être utilisés par le modèle. Le coefficient de frottement peut être distribué spatialement en fonction de l'occupation du sol. Le diamètre caractéristique des sédiments ainsi que les hydrogrammes et sédimentogrammes d'entrée dans la zone de modélisation doivent être fournis.

## Résultats, présentation et utilisation

Au terme de la modélisation, les résultats sont présentés sous la forme de cartes bidimensionnelles montrant l'évolution temporelle de la topographie et de l'écoulement, mais aussi de limnigrammes, hydrogrammes et sédimentogrammes en différents points ou en sections distribués le long de la vallée. Finalement, des courbes d'évolution du volume disponible dans la retenue sont générées pour représenter tant la perte graduelle de capacité de stockage au cours de l'alluvionnement de la retenue que le gain en capacité de stockage au cours d'une opération de chasse. La courbe d'efficacité de la chasse (rapport entre le volume de sédiments remobilisés et celui d'eau consommée au cours de l'opération) compte également parmi les résultats. Bien entendu, l'ensemble de ces informations s'avère particulièrement précieux pour estimer la qualité du dimensionnement des structures et optimiser leur mode de gestion.

Le modèle hydrosédimentaire a fait l'objet de nombreuses opérations de validation. Il a notamment été confronté à une solution analytique donnant la vitesse de propagation d'un front raide de sédiments. Il s'est montré à même de reproduire fidèlement

les phénomènes de migration de dunes ou d'antidunes, quel que soit le régime d'écoulement. De plus, de nombreux résultats disponibles dans la littérature ont pu être simulés avec succès.

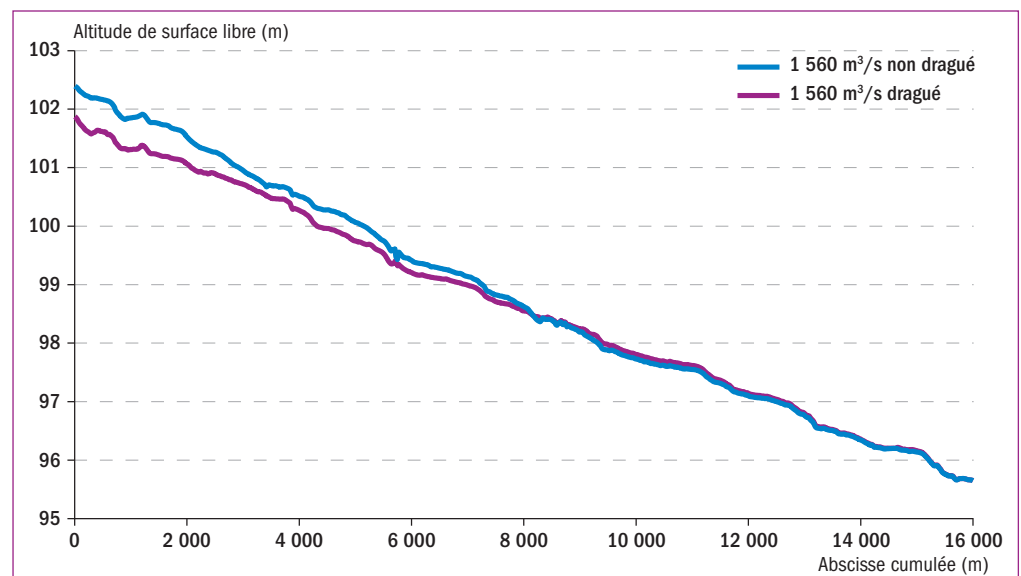
Le système de modélisation se révèle apte à produire des éléments quantitatifs essentiels pour orienter certaines décisions cruciales tant au stade de la conception que de la gestion de grands ouvrages hydrauliques affectés par des processus de dépôts et d'érosion. Les modèles ont d'ores et déjà été exploités à plusieurs reprises pour contribuer tant à la conception de grands ouvrages hydrauliques qu'à l'élaboration de leurs lois de gestion.

## Trois niveaux de couplage numérique

Les trois volets suivants du comportement hydrosédimentaire d'un réservoir peuvent être analysés de manière adéquate au moyen du système de modélisation Wolf :

- la prédiction de la bathymétrie d'équilibre à long terme du réservoir, par une technique itérative ;
- la modélisation de la séquence d'alluvionnement du réservoir, par un modèle découplé ;
- la simulation d'opérations de chasse, par une modélisation hydrosédimentaire totalement couplée.

Figure A.  
Réduction des niveaux d'eau sur la haute Meuse à la suite de travaux de dragage (2011).



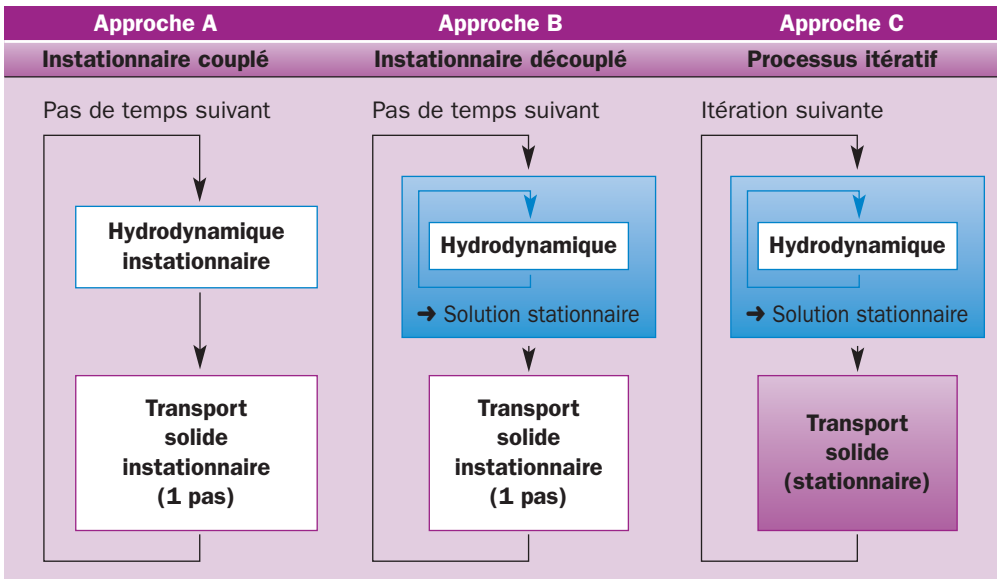


Figure B. Trois approches pour le couplage des sous-modèles hydrodynamique et sédimentaire.

Trois approches numériques distinctes et spécifiques sont mises en œuvre pour mener ces trois types d'analyses, comme le montre la figure B : *Trois approches pour le couplage des sous-modèles hydrodynamique et sédimentaire* et le détaillent les paragraphes ci-après.

#### Simulation de profils d'équilibre (approche C)

Une approche hydrosédimentaire stationnaire est mise en œuvre lorsqu'il s'agit de déterminer le profil d'équilibre d'une retenue. Le principe repose sur une procédure itérative en deux étapes séquentielles :

- calcul hydrodynamique bidimensionnel à topographie donnée jusqu'à l'obtention de champs stationnaires ;
- modification de la topographie en chaque point, en fonction des champs hydrodynamiques locaux simulés, des caractéristiques sédimentaires (propriétés des grains), ainsi que des apports en matériaux solides (condition limite à la frontière amont).

Le processus consiste ensuite à itérer sur ces deux étapes jusqu'à stabilisation du niveau du fond. Soulignons que si la deuxième étape se base sur une relation algébrique (déduite de la loi de capacité de transport) rapide à évaluer, au contraire la première étape implique à chaque itération une simulation hydrodynamique bidimensionnelle.

#### Simulation instationnaire découplée (approche B)

Il est également possible de simuler toute la chronologie de l'évolution bathymétrique d'un réservoir alors que l'approche décrite ci-avant ne fournit que le profil d'équilibre final. Pour ce faire, l'écoulement hydrodynamique est modélisé par une succession d'états stationnaires, alors que les évolutions bathymétriques sont traitées à l'aide d'un modèle sédimentaire totalement instationnaire. Le découplage introduit de la sorte se justifie dès que la vitesse de propagation des perturbations de la topographie demeure, en règle générale, nettement inférieure à celle des perturbations de type hydrodynamique.

En effet, toutes les modifications du niveau du lit de la rivière s'établissent au terme d'un laps de temps beaucoup plus long que celui nécessaire à l'écoulement pour s'adapter à une nouvelle morphologie du lit. De plus, en ce qui concerne la prédiction de la décroissance de la capacité de stockage dans un réservoir au cours de son exploitation, les échelles de temps caractérisant l'hydrodynamique ne présentent pas un intérêt direct : elles sont donc moyennées par une approche telle que décrite ici.

#### Simulation instationnaire totalement couplée (approche A)

Les opérations de chasse se déroulent sur des périodes beaucoup plus courtes et impliquent des écoulements transcritiques (changements de régime) contrairement au processus d'alluvionnement progressif de la retenue par des sédiments entrant dans la retenue au cours des années successives d'exploitation. Par voie de conséquence, les temps caractéristiques des modifications topographiques sont susceptibles de prendre des valeurs du même ordre de grandeur que ceux régissant les phénomènes hydrodynamiques, de telle sorte qu'un couplage complet doit être assuré entre les pans hydrodynamique et sédimentaire du modèle. Afin de garantir une validité sans faille du modèle utilisé au cours de l'étude, une stratégie de résolution totalement couplée pour l'écoulement fluide et le transport solide concomitant est mise en œuvre pour la phase de simulation de chasse. Ce couplage complet affecte les propriétés mathématiques du système (célérités, etc.). Le coût CPU d'une telle approche peut s'avérer élevé, donc adapté à des simulations à relativement court terme.

#### Application 1 : complexe hydroélectrique en Inde

L'applicabilité du système de modélisation hydrosédimentaire est illustrée par plusieurs exemples réels relatifs à la fois au dimensionnement et à l'optimisation des modes de gestion d'un important aménagement hydroélectrique en Inde. Premier exemple, la construction d'un grand barrage en enrochements (hauteur : 163 m ; longueur de crête : 500 m) crée une retenue longue de plus de 40 km. Une usine hydroélectrique sera installée au pied du barrage (équipement de 800 MW et 784 m<sup>3</sup>/s). Un désableur est prévu pour limiter l'abrasion des turbines par les matériaux solides.

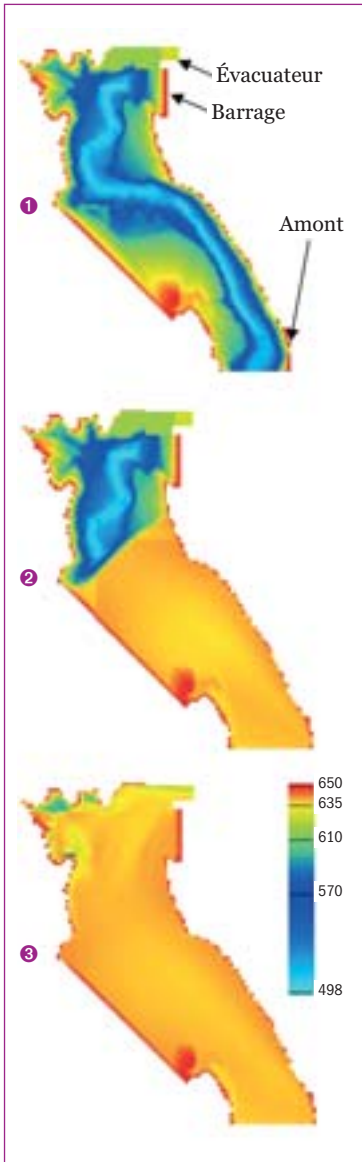


Figure C.  
 Vue en plan de la topographie aval de la retenue (en mètres) :  
 ❶ avant que l'alluvionnement ne l'atteigne (par exemple, avant l'équivalent de 1 100 jours de crue) ;  
 ❷ après l'équivalent de 1 400 jours de crue ;  
 ❸ au terme de 1 660 jours de crue.

D'importantes quantités d'apports solides seront piégées dans la retenue pendant les saisons de mousson à cause du caractère montagneux du bassin versant. C'est pourquoi, dans un premier temps, le système de modélisation est exploité afin de caractériser la dynamique d'alluvionnement du réservoir : volume déposé, délai. Dans un second temps, la possibilité de récupérer de la capacité de stockage par ouverture des

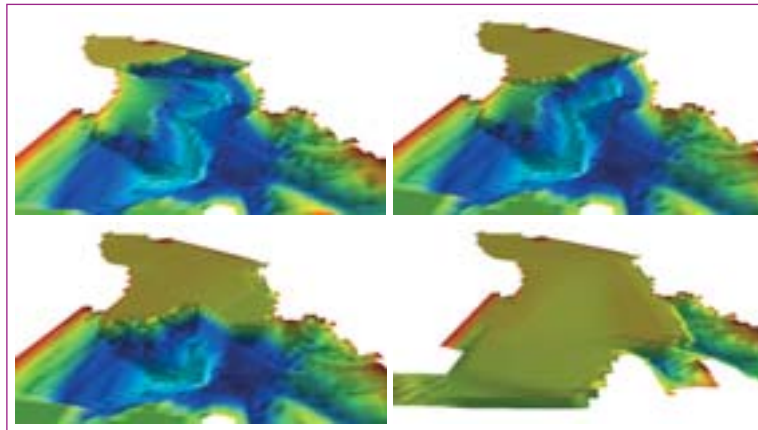


Figure D.  
 Vue 3D de la topographie aval de la retenue au cours de l'alluvionnement.

organes de vidange (chasse) a été étudiée en vue d'évaluer l'efficacité de telles opérations.

L'approche B s'impose pour la simulation à très long terme de la dynamique d'alluvionnement du réservoir. L'hydrologie du site révèle des variations saisonnières fortes, caractérisées notamment par un débit en période de mousson dix fois supérieur à celui du reste de l'année et des apports solides près de deux cents fois plus importants en période de mousson. La modélisation a donc été menée en simulant uniquement la juxtaposition de saisons de mousson, seule période de l'année générant des apports solides significatifs. L'évolution instationnaire du front de dépôts (caractéristique des classes granulométriques les plus grossières) est fortement influencée par la géométrie bidimensionnelle du réservoir, ce qui confirme l'utilité de recourir à une modélisation 2D. C'est ce que mettent en évidence les figures C et D.

Au terme de la simulation, un profil d'équilibre de la retenue est atteint. Ce dernier résultat pouvait également être obtenu directement par le biais de l'approche C, mais sans que celle-ci ne donne accès à l'évolution temporelle des dépôts. Néanmoins, le délai d'alluvionnement peut être déduit par cubage du volume final de dépôts et moyennant une hypothèse sur les apports annuels.

Au cours de l'opération de chasse, exécutée endéans une période de

quelques jours, des écoulements trans-critiques sont susceptibles de se développer localement. Le calcul doit

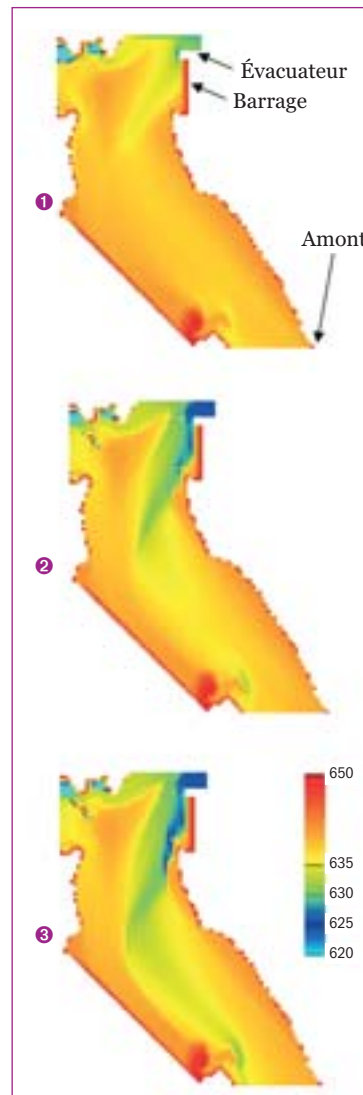


Figure E.  
 Topographie du réservoir (en mètres) à l'issue de trois, six et neuf jours de chasse (❶, ❷ ou ❸).

Figure F.  
Pistage de sédiments dans la partie aval de la retenue.  
La région colorée délimite l'enveloppe des trajectoires  
des particules libérées en amont lors du calcul de pistage pour  
des tailles de grain valant : ① 0,425, ② 0,300 et ③ 0,250 mm.

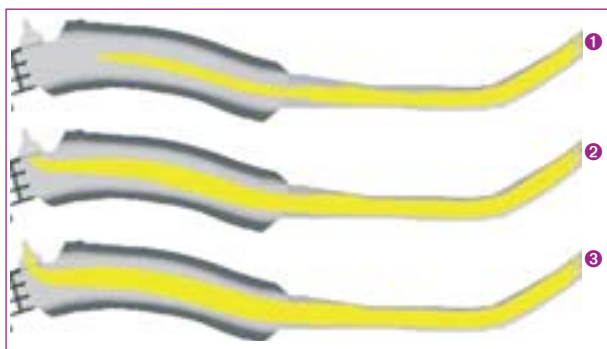
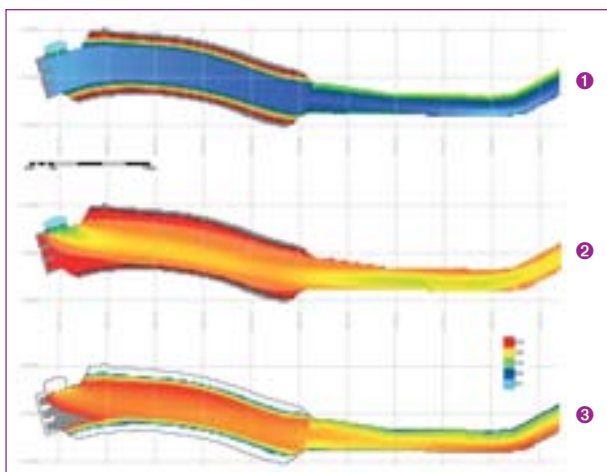


Figure G.  
① Topographie initiale (m). ② Profil d'équilibre simulé (m).  
③ Différentiel (m).



garantir un couplage serré entre la partie hydrodynamique du modèle et la simulation de transport des sédiments, si bien que seule l'approche A

s'applique ici. À la frontière amont du réservoir, un hydrogramme typique d'une période de chasse est imposé – il correspond à une phase de décrue – ainsi que des débits solides en équilibre avec l'hydrodynamique. À l'aval, une consigne d'évolution temporelle du niveau des vannes (abaissées de 14 m pendant environ 150 heures) est prescrite comme condition limite. La condition initiale topographique correspond à la bathymétrie finale atteinte après la simulation d'alluvionnement du réservoir.

La figure E montre l'évolution temporelle de la topographie du réservoir. Le taux maximal d'évacuation des volumes de sédiments est atteint entre le quatrième et le cinquième jour de chasse. La capacité totale de stockage récupérée est estimée à environ cinq millions de m<sup>3</sup>. Les dépôts sur le chenal d'approche ne sont cependant pas complètement effacés parce que l'effet érosif intense induit par l'accélération de l'écoulement demeure concentré dans un nouveau chenal créé à proximité du mur de barrage.

### Application 2 : ouvrage hydroélectrique dans une vallée alpine

Second exemple, un projet hydroélectrique dans le Sud-est de la France implique également l'analyse

de la sédimentation dans le réservoir et la gestion à long terme des sédiments par des opérations de chasse. Le projet comporte entre autres un barrage de dérivation (9 m de haut pour 40 m de large) et une prise d'eau. Le réservoir peu profond est long d'environ deux kilomètres ; sa capacité de stockage s'élève à environ 200 000 m<sup>3</sup>.

Le bassin versant est montagneux et la rivière compte plusieurs torrents alpins parmi ses affluents. Par conséquent, des apports sédimentaires importants sont à attendre dans la retenue. C'est pourquoi le système de modélisation a été mis en œuvre pour deux buts : d'une part, prédire le profil d'équilibre du réservoir en l'absence de gestion spécifique, et d'autre part, évaluer la faisabilité et l'efficacité des opérations de chasse. Une procédure en trois étapes a été appliquée afin d'atteindre ces objectifs.

### Diamètre de coupure de la retenue

Les sédiments susceptibles d'atteindre les prises d'eau au début de l'exploitation ont été caractérisés en premier. À cette fin et par le biais du modèle purement hydrodynamique, l'écoulement dans la retenue a été simulé dans les conditions normales d'exploitation, sur un mail-

## Références

- Dewals B, Rulot F, Ercicum S, Archambeau P, Piroton M, 2011. *Advanced topics in sediment transport modeling : non-alluvial beds and hyperconcentrated flows*. Sediment transport, INTECH : 30.
- Dewals B, Basseur N, Ercicum S, Archambeau P, Piroton M, 2009. *Flushing operations with limited sediment availability*. Proc. 33rd IAHR Congress : Water Engineering for a Sustainable Environment. Vancouver, Canada.
- Dewals B., Ercicum S., Archambeau P, Detrembleur S., Piroton M., 2008. *Hétérogénéité des échelles spatio-temporelles d'écoulements hydrosédimentaires et modélisation numérique*. Houille Blanche-Rev. Int., 109-114.
- Dewals B, Ercicum S, Archambeau P, Piroton M, 2009. *Approches numériques et expérimentales en appui à la gestion durable des sédiments*. Congrès SHF - 31<sup>e</sup> Journées de l'hydraulique : Morphodynamique et gestion des sédiments dans les estuaires, les baies et les deltas. Paris, France.
- Dewals B, Ercicum S, Archambeau P, Piroton M, 2009. *A modeling system handling the wide range of time scales involved in sediment transport processes*. 6th Int. SedNet Conf. - The Role of Sediments in Coastal Management. Hamburg, Germany.
- Dewals B, Rulot F, Ercicum S, Archambeau P, Piroton M, 2012. *Long-term sediment management for sustainable hydropower*. Comprehensive Renewable Energy. Volume 6 - Hydro Power. A. Sayigh. Oxford, Elsevier.
- Dufresne M, Dewals B, Ercicum S, Archambeau P, Piroton M, 2012. *Flow patterns and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs*. Water and Environment Journal Available online.
- Dufresne M, Dewals B, Ercicum S, Archambeau P, Piroton M, 2010. *Experimental investigation of flow pattern and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs*. International Journal of Sediment Research 25, 258-270.
- Rulot F, Dewals B, Ercicum S, Archambeau P, Piroton M, 2012. *Modelling sediment transport over partially non-erodible bottoms*. International Journal for Numerical Methods in Fluids (in press).

lage de résolution de 1 m par 1 m et en recourant à un modèle de turbulence de type k- $\epsilon$ . Ce champ d'écoulement a ensuite été analysé en termes de capacité de transport des sédiments, moyennant un pistage de particules solides dans la retenue (figure F), afin de prévoir la taille maximale des grains en mesure d'atteindre la prise d'eau, donc de contribuer à une usure prématurée des turbines.

#### Profil d'équilibre de la retenue en l'absence de gestion spécifique

Le profil d'équilibre à long terme de la bathymétrie du réservoir a ensuite été calculé au moyen de l'approche C (figure G).

La sensibilité du résultat final a été analysée. Elle s'est avérée raisonnablement limitée par rapport aux caractéristiques sédimentaires principales (taille des grains).

#### Efficacité d'opérations de chasse et de curage du bief aval

Enfin, les écoulements rapides, hautement transitoires et à capacité érosive élevée, qui se développent au cours d'une opération de chasse, ont été simulés sur base de l'approche A, en assurant un couplage serré entre le calcul de l'écoulement et du transport solide. Cette simulation numérique débouche sur une évaluation de l'efficacité de la chasse en termes de changement de la bathymétrie dans la partie aval du réservoir (figure H) ainsi qu'en termes de volume évacué. Le rendement global de l'opération de chasse est ainsi globalement évalué.

Les champs de vitesse et la répartition du nombre de Froude simulés après 90 minutes de chasse sont reproduits à la figure I. Elle révèle que la zone d'écoulement transcritique s'étend jusqu'à une centaine de mètres en amont et en aval du barrage. Un tel constat corrobore le besoin incontournable d'un modèle hydrosédimentaire totalement couplé tel qu'employé ici.

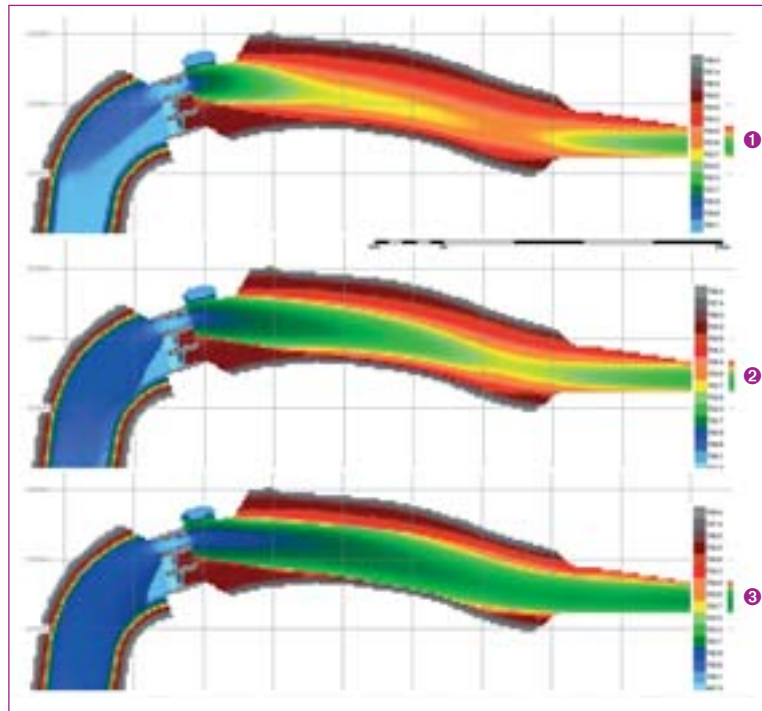


Figure H. Évolution de la topographie (m) au cours de l'opération de chasse.

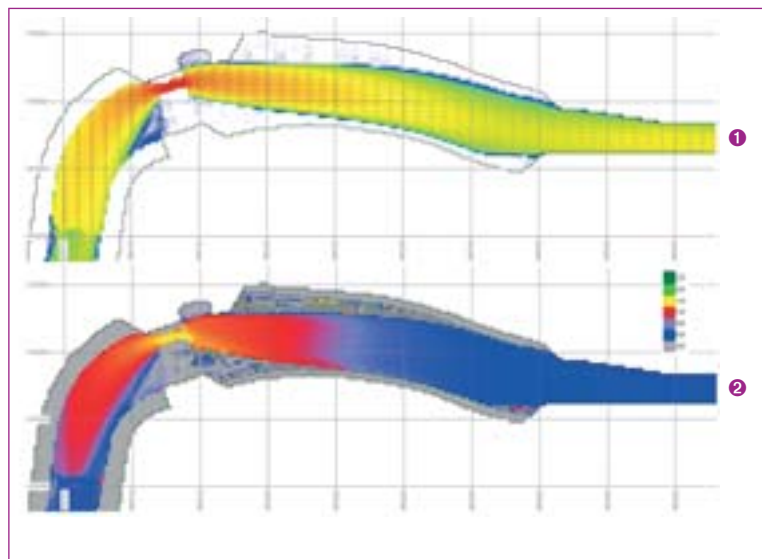


Figure I. Exemple de champ de vitesse (m/s) au cours de l'opération de chasse ① et de champ de nombre de Froude ②, montrant la zone étendue d'écoulement supercritique.

#### Wolf, un système de modélisation assez universel

Le système de modélisation Wolf, développé à l'université de Liège, apporte une réponse particulièrement pointue et complète aux besoins de modélisation hydrosédimentaire à différentes échelles temporelles.

Ce système de modélisation bidimensionnel, référencé internationalement, offre une grande flexibilité dans les niveaux de couplage entre les sous-modèles et les schémas d'intégration temporelle implémentés : stationnaire, quasi stationnaire ou ins-

tationnaire complet. In fine, il permet de couvrir la majorité des échelles de temps pertinentes au moyen d'approches numériques adaptées.

**Benjamin Dewals, Sébastien Erpicum, Pierre Archambeau et Michel Piroton**  
**Université de Liège, Hydraulics in Environmental and Civil Engineering / Belgique**

\* Dans l'intervalle de, dans la limite de, dans le délai de. Ancienne locution, qui aujourd'hui paraît surtout usitée en Belgique. Dictionnaire Littré.