

ETUDE NUMERIQUE ET SUR MODELE PHYSIQUE DE L'AMENAGEMENT DE TAOUSSA (MALI)

Numerical and scale model study of the Taoussa Project (Mali)

Sébastien Erpicum, Benjamin J. Dewals*, Pierre Archambeau, Michel Pirotton

Université de Liège – Département ArGEnCo – Secteur MS²F – Unité HACH

Chemin des Chevreuils, 1 B52/3 B-4000 Liège, Belgique

Tél: +32 (0)4 366 95 96, Fax: +32 (0)4 366 95 58, e-mail: s.erpicum@ulg.ac.be; hach@ulg.ac.be

* Fonds de la Recherche Scientifique F.R.S.-FNRS

Jean-Marie Vuillot

Coyne et Bellier – Tractebel Engineering

Allée des Barbanniers, 9 F-92632 Gennevilliers cedex, France

Tél: +33 (0)1 41 85 03 36, e-mail: jean-marie.vuillot@coyne-et-bellier.fr

La modélisation physique et la modélisation numérique représentent aujourd'hui deux approches d'analyse performantes en ingénierie hydraulique. Il est indéniable que l'application interactive des deux méthodes constitue la réponse la plus efficace à la résolution de la majeure partie des problèmes d'écoulement. Elle permet en effet de combiner les avantages inhérents aux deux approches, qui sont complémentaires, tout en étant bénéfique par rapport aux délais et à la profondeur des analyses qui peuvent être envisagés.

Cet article présente les résultats d'une application réussie d'une telle approche couplée numérique – expérimentale réalisée par le Laboratoire d'hydraulique des constructions de l'Université de Liège pour le bureau d'études Coyne et Bellier. Elle concernait, au stade de l'avant projet détaillé, l'étude hydraulique de l'aménagement de Taoussa sur le fleuve Niger au Mali. Les études, menées en moins de 6 mois, ont concerné aussi bien les conditions d'écoulement à l'échelle du réservoir et du fleuve, par voie numérique, que les détails hydrodynamiques du fonctionnement de l'évacuateur de crue par exploitation d'un modèle réduit à grande échelle.

Physical modeling and numerical modeling are two efficient analysis approaches in hydraulic engineering. The interactive application of both methods is obviously the more effective response to most of the flow problems analysis. Indeed, it enables combining the inherent advantages of both approaches, which are complementary, while being beneficial to the delays as well as the quality of the analyses.

This paper presents the results of a successful application of such a combined numerical – physical study carried out by the Hydraulics engineering Laboratory of the University of Liège on behalf of Coyne et Bellier. It concerned, at the stage of detailed draft, the hydraulic study of the Taoussa Project on the Niger River in Mali. The studies, performed in less than 6 months, focused on the flow characteristics at the scale of the reservoir and the river, using the numerical approach, as well as on hydrodynamic details in the spillway using a large scale factor physical model.

I INTRODUCTION

La modélisation physique a toujours été largement employée en ingénierie hydraulique pour les besoins de la recherche et du dimensionnement des ouvrages. Elle consiste à réaliser à l'échelle, avec un degré de complexité dépendant des objectifs de l'application, un modèle des systèmes hydrauliques étudiés [1]. Ce modèle permet de reproduire, dans un environnement contrôlé qui autorise leur analyse aussi bien qualitative que quantitative, l'ensemble des écoulements qui prennent place dans ces systèmes.

Le principal avantage des modèles physiques réside dans leur capacité intrinsèque à reproduire, pour autant qu'un facteur d'échelle et des lois de similitudes adaptés soient appliqués, l'ensemble des caractéristiques d'un écoulement, même très complexe. Ils permettent de plus une interaction physique très facile avec ces écoulements et sont extrêmement utiles pour la promotion et la communication d'un projet, démontrant de manière irréfutable au quidam tout comme à l'ingénieur spécialiste comment un aménagement ou une procédure va fonctionner [1].

La généralisation de la modélisation numérique en ingénierie hydraulique remonte tout au plus à une vingtaine d'années. Elle a été favorisée par le développement de modèles mathématiques de plus en plus

représentatifs et de schémas de résolution de plus en plus robustes et précis, couplé à un formidable essor et à une vulgarisation des potentialités de calcul numérique.

Tout comme l'efficacité et la pertinence d'un modèle physique repose sur un choix judicieux du facteur d'échelle et des lois de similitude, la réalisation de modélisations numériques d'écoulement représentatives et fiables dépend de nombreux paramètres parfois encore peu reconnus comme les choix tant du modèle mathématique que du schéma de résolution et de la valeur de leurs paramètres, la qualité et l'adéquation des données d'entrées, et en particulier les conditions aux limites, ou encore l'expertise du modélisateur.

Les principaux avantages des modèles numériques sont le faible coût de leur mise en œuvre par rapport au coût de réalisation d'un modèle physique, même pour des emprises d'études importantes, leur souplesse, en termes de modifications géométriques par exemple, ou encore la facilité avec laquelle l'évolution de la valeur des inconnues peut être suivie en tout point du système étudié.

Aujourd'hui, il est indéniable que l'application interactive de la modélisation physique et de la modélisation numérique représente la réponse la plus efficiente à la résolution de la majeure partie des problèmes d'ingénierie hydraulique. Cette approche permet de combiner les avantages inhérents aux deux méthodes, qui sont complémentaires, tout en étant bénéfique par rapport aux délais et à la profondeur des analyses qui peuvent être envisagés.

Cet article présente les résultats d'une telle étude couplée numérique – expérimentale réalisée par le Laboratoire d'hydraulique des constructions de l'Université de Liège (Unité de recherche HACH) pour le bureau d'études Coyne et Bellier. Elle concernait, au stade des études d'avant-projet détaillé, l'étude hydraulique de l'aménagement de Taoussa sur le fleuve Niger au Mali.

La capacité des modèles numériques à considérer des emprises de modélisation importantes a été employée pour mener les études hydrauliques générales du projet et pour définir précisément les conditions d'écoulement à l'approche de l'évacuateur de crue. Ce dernier, qui constitue un ouvrage à l'hydrodynamique complexe, a ensuite pu être étudié précisément sur un modèle physique à grande échelle dès lors que l'emprise de la zone à représenter a été drastiquement limitée grâce à l'exploitation des résultats numériques.

II CARACTÉRISTIQUES DE L'AMÉNAGEMENT ET OBJECTIFS DES ÉTUDES

Le projet de l'aménagement hydraulique de Taoussa est principalement composé d'un barrage en remblai d'une quinzaine de mètres de hauteur et de l'ordre de 1300 m de longueur en crête qui obstrue la vallée du fleuve Niger, 130 km en amont de la ville de Gao dans l'est du Mali.

Le barrage est équipé d'une usine hydroélectrique composée de 5 groupes d'un débit d'équipement de 75 m³/s chacun, d'une écluse de 12 m de large et d'un évacuateur de crue (EVC) d'une capacité de 3100 m³/s. L'EVC est composé d'un seuil déversant à profil Creager calé à la cote 252,75 m et divisé en 10 passes vannées de 8,5 m de large séparées par des piles de 3,3 m. Un bassin de dissipation de 55 m de long est localisé en aval du seuil. Son fond est calé à la cote 244 m et il possède une marche d'extrémité de 2 m de haut. Le bassin de dissipation est divisé longitudinalement en 5 portions identiques par des voiles intermédiaires à la cote 255 m dans le prolongement des piles du seuil.

L'EVC devrait permettre de varier le niveau du plan d'eau dans la retenue entre les cotes 254,50 et 258,75 m en gestion courante annuelle en conditions normales. En période de crues importantes (i.e. débit supérieur à 2500 m³/s, crue centennale), le plan d'eau pourrait s'élever à une altitude supérieure jusqu'à atteindre la cote 260,80 m³/s pour le débit décennal de 3100 m³/s, 8 passes ouvertes.

Les études hydrauliques de l'aménagement ont été menées successivement par deux approches complémentaires : une première partie réalisée sur base de modélisations numériques pour étudier les écoulements à l'échelle de la retenue et du fleuve en aval et une seconde partie expérimentale pour analyser en détails le fonctionnement de l'EVC par la construction et l'exploitation d'un modèle réduit.

L'étude numérique avait pour but d'analyser les conditions d'écoulement à large échelle dans la retenue lors du fonctionnement de l'EVC et d'appréhender les interactions de ces écoulements avec les digues, l'écluse et l'usine hydroélectrique. Elle avait également pour objectif de permettre la définition de l'emprise réduite du modèle physique de l'EVC et, le cas échéant, de déterminer les conditions d'alimentation à réaliser afin de rendre la maquette représentative des conditions réelles d'écoulement. Dans le même cadre, elle a servi à déterminer la valeur des conditions limites aval de hauteur d'eau à imposer au modèle physique.

L'étude expérimentale avait pour sa part pour but la validation et l'optimisation des formes hydrauliques et des dimensions de l'EVC vanné et du bassin de dissipation en aval, la vérification des conditions

d'écoulement et de restitution des eaux en aval du bassin de dissipation, y compris en phase de dérivation provisoire, et l'analyse du mode de gestion des vannes de l'évacuateur pour optimiser l'évacuation des débits du fleuve sous différents niveaux de retenue en gestion courante.

III MODÈLE NUMÉRIQUE DE GRANDE EMPRISE

III.1 Logiciel

L'étude numérique de grande emprise impliquait de prendre en compte des conditions d'écoulement à large échelle dans le fleuve ou la retenue et des détails hydrodynamiques au droit des ouvrages du barrage. Le maillage du modèle numérique devait donc couvrir une zone étendue avec une précision localement importante. D'un autre côté, la faible hauteur d'eau dans l'ensemble du site (de l'ordre de 10 m) en regard des extensions en plan des écoulements, couplée à des vitesses essentiellement horizontales vu la géométrie des ouvrages envisagés, ne nécessitait pas le recours à une modélisation totalement tridimensionnelle.

Suite à ces considérations, les études numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel de calcul quasi-tridimensionnel WOLF2D en utilisant un maillage à mailles carrées de taille variable par blocs. Ce logiciel, partie intégrante de la suite WOLF pour le calcul des écoulements à surface libre, résout par la méthode des volumes finis la forme intégrée sur la hauteur d'écoulement des équations de Navier Stokes, capable en valeurs moyennes de représenter valablement toutes les spécificités de l'écoulement, avec prise en compte explicite des effets de turbulence à l'aide de modèles mathématiques adaptés [2-5].

III.2 Données, emprise, validation

Deux échelles limnimétriques sont implantées sur le fleuve de part et d'autre de la localisation prévue des aménagements.

Sur base des informations topographiques fournies par Coyne et Bellier, trois modèles numériques de terrain (MNT) du site d'étude ont été réalisés. Le MNT constitue en effet la donnée de base indispensable à la réalisation de toute modélisation numérique d'écoulement. Le premier MNT était représentatif de l'ensemble du lit actuel du Niger entre les 2 échelles limnimétriques, le second de la retenue et le troisième de la zone en aval des aménagements jusque l'échelle limnimétrique aval. Afin de construire ces MNT, les différentes informations topographiques pertinentes pour chaque modèle ont été globalisées dans un même fichier sous forme de points définis en x,y,z et ont ensuite été interpolées par WOLF2D afin de générer un MNT régulièrement distribué sur l'ensemble de la zone à envisager. Par superposition des plans AutoCad la représentant, la géométrie précise des ouvrages de l'aménagement a ensuite été ajoutée à la topographie. Le MNT du Niger dans son état actuel couvrait un tronçon de près de 7 km du fleuve en amont de la station limnimétrique aval avec plus de 2 550 000 mailles (Figure 1).

Afin de modéliser les écoulements dans les différentes zones représentées, un maillage de calcul a été défini dans chaque cas avec une taille de mailles carrées régulières variant par blocs au sein de la simulation en fonction des spécificités hydrodynamiques à modéliser et de la finalité du calcul. Par exemple, pour les sous-modèles amont et aval (Figure 1), des tailles de mailles de 12, 4 et 2 m ont été appliquées avec un raffinement progressif du maillage à proximité de l'EVC, là où les vitesses d'écoulement sont importantes.

Le débit constitue la condition limite amont des modèles. Il est injecté dans le domaine de simulation soit directement comme condition limite de débit spécifique en sortie du bassin de dissipation, soit sur toute la largeur du cours d'eau par une zone d'infiltration numérique, c'est-à-dire sans donner de direction préférentielle à l'écoulement. Le débit de turbinage est prélevé ou injecté par le même artifice d'infiltration numérique en amont ou en aval de l'usine.

Dans tous les cas, une cote de plan d'eau est imposée en aval, soit au niveau du seuil de l'EVC, soit en une section transversale au droit de la station limnimétrique. Pour les modélisations de la retenue, la cote de surface libre imposée au niveau du seuil de l'EVC est définie de façon à obtenir dans la retenue la charge correspondant, pour le débit donné, à celle de la courbe de tarage théorique du seuil déversant. Cela assure d'obtenir, dans le domaine de modélisation, des hauteurs d'eau et donc des vitesses d'écoulement représentatives de celles imposées par l'EVC. Dans les autres cas, la valeur d'altitude de surface libre imposée provient directement de la relation hauteur / débit de l'échelle limnimétrique aval fournie par Coyne et Bellier.

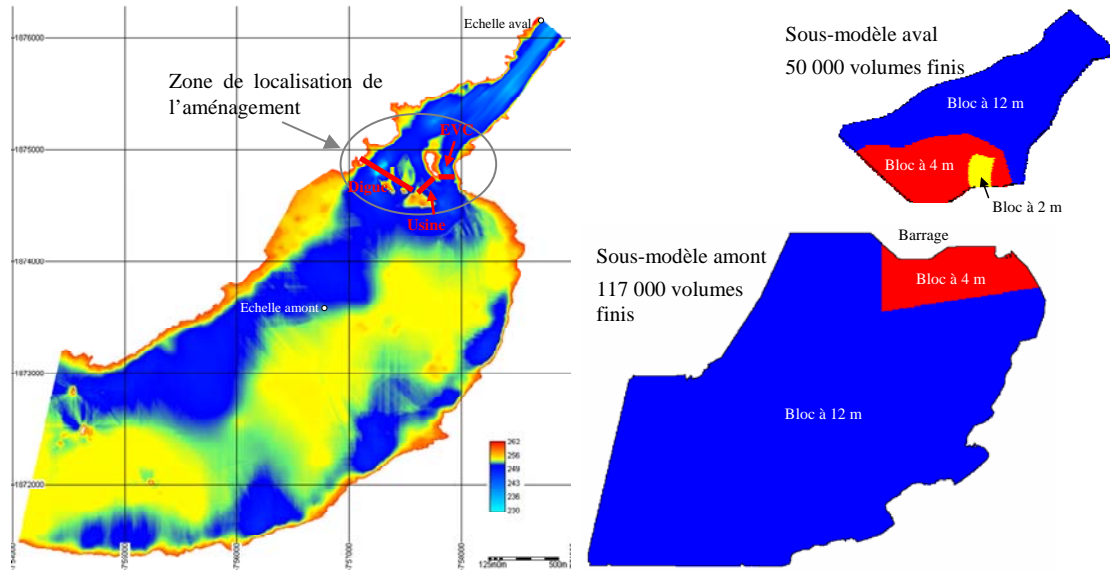


Figure 1 : MNT d'ensemble du site (gauche) et maillage de calcul des sous-modèles amont et aval (droite)

Comme préalable à l'utilisation du modèle numérique pour l'étude hydraulique à large échelle des aménagements, des calculs d'ensemble de l'écoulement entre les deux échelles limnimétriques existantes sur le site ont été réalisés sur base de la topographie actuelle du fleuve. Ces calculs préliminaires ont permis d'appréhender la précision du MNT pour la modélisation des écoulements dans le cours d'eau en l'absence du barrage ainsi que de caler le coefficient de frottement des simulations. La relation hauteur / débit calculée numériquement à l'échelle limnimétrique amont est en fine identique à la courbe mesurée avec une précision de l'ordre de 50 cm sur l'ensemble de la gamme des débits du fleuve envisagée alors que l'incertitude sur la bathymétrie atteint localement plusieurs mètres.

III.3 Résultats numériques

Les modélisations numériques en amont ont permis de caractériser les écoulements qui prennent place dans la retenue dans différentes configurations de fonctionnement des ouvrages. Elles ont ainsi conduit à proposer des modifications locales de bathymétrie afin d'améliorer les conditions d'alimentation de l'usine et de l'EVC et ont également permis de quantifier l'amplitude des variations d'altitude du plan d'eau le long du parement amont de la digue, de grande longueur.

Les modélisations d'écoulement en aval des ouvrages ont permis de déterminer la relation hauteur / débit à la limite aval du modèle réduit. Elles ont notamment montré que la hauteur d'eau à cet endroit ne peut être directement déduite des altitudes du plan d'eau aux deux échelles qui entourent le site pour les débits considérés. En effet, des circonstances hydrodynamiques clairement identifiées dans l'étude induisent à cet endroit des niveaux de surface libre inférieurs à ceux des 2 échelles lorsque l'usine ne fonctionne pas. De la même manière, les niveaux d'eau atteints au pied de l'écluse et de l'usine hydroélectrique ont été déterminés pour plusieurs configurations de fonctionnement de l'EVC.

En phase de dérivation provisoire du fleuve, les niveaux d'eau atteints le long du batardeau en rive droite ont été quantifiés. Ils sont significativement plus importants que ceux observés actuellement du fait de la contraction de section imposée au fleuve par le batardeau.

Finalement, l'emprise du modèle réduit et la position du mur d'alimentation en eau dans le bac amont ont été définies sur base de l'analyse des résultats des modélisations numériques d'écoulement dans la retenue. Les champs d'écoulement modélisés dans la maquette et dans l'ensemble du réservoir ont été comparés afin de valider la représentativité du modèle réduit par rapport aux courants d'approche de l'EVC.

IV MODÈLE PHYSIQUE LOCAL

IV.1 Caractéristiques

Un modèle réduit représentatif de l'ensemble de l'EVC, des prises d'eau de l'usine, d'une portion de la retenue sur 105 m de long et 300 m de large en amont du seuil et d'un tronçon de la rivière naturelle de

160 m de long en aval de l'extrémité aval du bassin de dissipation a été réalisé à une échelle de $1/40^\circ$ en similitude de Froude (Figure 2). Ce facteur d'échelle important n'a pu être envisagé que grâce à la forte limitation de l'emprise du modèle aussi bien dans la retenue qu'en aval, permise par l'exploitation des résultats des modélisations numériques préalables.

Le système d'alimentation en eau du modèle fonctionne en circuit fermé avec une pompe asservie à un automate de contrôle, un réservoir enterré de 400 m^3 et des conduites sous pression. Afin d'obtenir une répartition du débit et des vitesses en entrée du modèle conforme aux résultats numériques, l'eau est déversée dans un bac de tranquillisation amont et injectée dans le modèle au travers d'un écran perméable constitué de briques perforées et d'un voile en crin synthétique. En aval, l'eau est récupérée dans un canal de collecte qui la ramène au réservoir de stockage avant son repompage. Le débit maximum qui peut transiter par le modèle est de 350 l/s , soit de l'ordre de $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ réels.

La topographie non érodable de la retenue et de la rivière en aval a été réalisée dans un bac étanche à l'aide d'une couche de mortier de ciment de 5 cm sur un soubassement de blocs en béton. Elle a ensuite été peinte au latex. Elle a été reproduite entre les cotes 244,00 et 262,00 dans le réservoir et les cotes 240,00 et 256,00 en aval de l'EVC à l'aide d'une série de profils transversaux espacés régulièrement de 20 cm sur le modèle (8 m réels) et tracés à partir des fichiers topographiques fournis par Coyne et Bellier. L'EVC et le bassin de dissipation ont été réalisés en plusieurs parties à l'aide de PVC et d'aluminium. Les différents seuils ont été profilés à l'aide de résine synthétique. Tous les éléments ont ensuite été assemblés sur la dalle étanche du bac, qui délimite le modèle, avant de terminer la réalisation de la topographie. Chaque passe de l'EVC a été équipée d'une vanne mobile et peut être obstruée par d'un batardeau. Les cinq conduites de l'usine hydroélectrique ont été équipées chacune d'une vanne tout ou rien afin de pouvoir modéliser le fonctionnement des différents groupes. Ces vannes débitent toutes dans un réservoir de concentration en aval qui est lui-même relié à une conduite d'évacuation équipée d'un débitmètre et d'une vanne papillon. Cette dernière permet de régler précisément la perte de charge du système pour contrôler l'amplitude des débits turbinés.

La condition limite amont est constituée du débit injecté dans le modèle réduit. Les niveaux d'eau dans la retenue s'établissent naturellement en fonction des capacités d'évacuation de l'EVC. La relation hauteur-débit à l'aval du modèle est régulée par un déversoir à lamelles. Elle est imposée au droit de la section du Niger où elle a été calculée par modélisation numérique.



Figure 2 : Vues du modèle réduit de l'EVC (Générale – gauche, et détail des passes et du bassin de dissipation – droite)

IV.2 Résultats expérimentaux

L'exploitation du modèle réduit pour des débits réels compris entre 75 et $3100 \text{ m}^3/\text{s}$ a permis, hormis quelques modifications mineures, la validation de la géométrie des ouvrages, et en particulier les dimensions du bassin de dissipation. Les relations H-Q du seuil ont été mesurées sur le modèle dans différentes configurations d'ouverture des passes (10 et 2 vannes ouvertes, ouvertures totale et partielles), en fonctionnement libre ou vanné et ses spécifications fonctionnelles ont été vérifiées, y compris en mode dégradé. Au départ des résultats de ces mesures, une loi H-Q analytique générique a été définie pour chacun des 2 modes de fonctionnement (libre et vanné) avec des paramètres qui dépendent uniquement du nombre de vannes ouvertes et du degré d'ouverture des vannes.

Les lignes d'eau et les vitesses d'écoulement ont été relevées dans le bassin de dissipation, sur le seuil, les piles et le long du mur guide en rive gauche dans différentes configurations d'ouverture des passes et de niveau de retenue. L'influence de l'usine hydroélectrique sur le fonctionnement de l'EVC a été analysée par

des essais réalisés pour différents débits et dans différentes configurations d'ouverture des passes. Notamment, l'étude de la variation des niveaux d'eau en aval de l'aménagement lors du fonctionnement des turbines n'a pas montré de modification significative des caractéristiques d'écoulements dans le bassin de dissipation et sur le seuil. Il en va de même de la relation H-Q du seuil qui n'est pas affectée pour des débits dans la retenue jusque 2500 m³/s. Il a été déduit de ces essais que, excepté une modification des niveaux d'eau dans le bassin de dissipation et en aval, l'usine n'avait pas d'influence significative sur le fonctionnement de l'EVC.

Au départ des relations analytiques H-Q du seuil et suite à l'observation sur le modèle du meilleur mode d'ouverture successive des vannes, des lois de gestion de l'EVC ont été proposées et validées par des essais sur le modèle. Elles fournissent la séquence et le taux d'ouverture des vannes à réaliser pour permettre, de façon sécuritaire pour l'aval des ouvrages, une maîtrise du plan d'eau dans la retenue entre les cotes 254,50 et 258,75 pour des débits jusqu'au maximum évacuable par le seuil sous le niveau de retenue considéré.

Finalement, les écoulements en phase de dérivation provisoire ont été analysés afin de caractériser l'efficacité hydraulique des passes lorsqu'elles sont arasées à la cote 249 et de déterminer, pour différentes phases de chantier successives, les niveaux qui devraient être atteints pour la protection des ouvrages en construction.

V CONCLUSIONS

La combinaison des approches numériques et expérimentales en ingénierie hydraulique constitue une méthodologie efficace qui permet d'envisager des analyses très complètes des problématiques posées dans des délais restreints. Réalisée de façon réfléchie, cette combinaison permet une amélioration globale de la qualité des études par une augmentation des emprises envisagées, la mise en évidence objective des zones critiques et l'analyse détaillée subséquente de ces zones. Ces avantages peuvent s'accompagner d'une diminution des coûts et des délais de construction des modèles physiques grâce à l'étude préalable de variantes par voie numérique.

Cet article présente les résultats d'une application réussie d'une telle approche couplée numérique – expérimentale où les études complètes des problèmes d'hydraulique de surface libre d'un grand aménagement sur le fleuve Niger ont été menées en moins de 6 mois. Les études ont concerné aussi bien les conditions d'écoulements à l'échelle du réservoir et du fleuve, par voie numérique, que les détails hydrodynamiques du fonctionnement de l'EVC par exploitation d'un modèle réduit à grande échelle.

L'expérience acquise par le Laboratoire sur un grand nombre d'applications réelles, y compris avec effets sédimentaires, fait cependant apparaître que pour être menées de façon fructueuse, en tirant le meilleur parti des spécificités de chaque approche, des études hydrauliques couplées numériques – expérimentales requièrent une expertise globale qui fait du profil d'ingénieur hydraulicien numéricien et expérimentateur un profil d'avenir.

VI REFERENCES

- [1] ASCE (2000). – *Hydraulic modeling – Concepts and practice*. ASCE Manuals and reports on engineering practice No. 97. Reston, Virginia: ASCE.
- [2] Dewals B.J., Epicum S., Archambeau P., Detrembleur S., & Pirotton M. (2006). – Depth-integrated flow modeling taking into account bottom curvature. *J. Hydraul. Res.* **44**(6), 787-795.
- [3] Epicum S., Archambeau P., Detrembleur S., Dewals B.J., & Pirotton M. (2008). – *A 2D finite volume multiblock flow solver applied to flood extension forecasting*. In *Numerical modelling of hydrodynamics for water resources*, G.-N. Pilar & P. Enrique, Editeurs. 2008, London: Taylor & Francis. 321-325
- [4] Epicum S., Meile T., Dewals B.J., Pirotton M., & Schleiss A. (2009). – 2D numerical flow modeling in a macro-rough channel. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 2009: published online: 13 Feb 2009. DOI 10.1002/flid.2002
- [5] Epicum S., Dewals B.J., Archambeau P., & Pirotton M. (2009). – Dam-break flow computation based on an efficient flux-vector splitting. *J. Comput. Appl. Math.*, 2009: published online: 29 Aug 2009. DOI 10.1016/j.cam.2009.08.110