

## Barrage de Lavey. Études physique et numérique des écoulements et du transport solide dans le Rhône

*Lavey Dam – Physical and numerical analysis of flow and sediment transport  
in the Rhone River*

MICHAEL MÜLLER, MARTIN BIERI, JULIANO RIBEIRO MARTINS, JEAN-LOUIS BOILLAT,  
ANTON J. SCHLEISS

Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
EPFL-ENAC-IIC-LCH, Station 18, CH-1015 Lausanne, Suisse

e-mail : michael.mueller@epfl.ch, martin.bieri@epfl.ch, juliano.ribeiro@epfl.ch, jean-louis.boillat@epfl.ch, anton.schleiss@epfl.ch

Comme beaucoup d'aménagements hydrauliques au fil de l'eau, celui de Lavey sur le Rhône en Suisse est concerné par l'alluvionnement récurrent de sa retenue. Afin de trouver une solution durable à la problématique de la gestion sédimentaire, un modèle physique à l'échelle 1 :40 a été réalisé. Ce modèle a aussi pour objectif d'examiner la capacité de transit des crues au droit du barrage et la répartition du débit entre les quatre portails de la prise d'eau, sans et avec apport sédimentaire. Les niveaux d'eau, les écoulements d'approche, la répartition du débit, les processus d'alluvionnement et de purge sont mesurés d'une manière continue et non intrusive. Les essais purement hydrauliques montrent que la passe centrale du barrage est la plus chargée et révèlent l'importance des phénomènes tridimensionnels associés à l'écoulement en courbe. La prise d'eau est alimentée de manière homogène sur les quatre portails. Les essais de charriage permettent de reproduire les processus sédimentaires dans le Rhône et les dépôts mesurés sur prototype avant une purge. Le comportement observé in situ valide les résultats de la modélisation physique, également pour l'opération de purge. La simulation numérique tridimensionnelle (FLOW3D®) se révèle comme un complément utile pour générer les champs de vitesse et pour l'étude comparative de variantes d'aménagement.

As several of other run-of-river hydropower plants, the hydraulic scheme of Lavey on the Rhone River in Switzerland is concerned by continuous reservoir sedimentation. To determine the flood evacuation capacity of the weir as well as the flow distribution between the four entries of the water intake with and without bed load, a 1 :40 physical scale mode was used. Water levels, flow pattern, flow distribution, sediment deposition and flushing are measured continuously by non-intrusive equipment. Hydraulic tests show that the central dam gate is the most loaded and reveal the importance of three-dimensional phenomena in the curved river reach. The discharge is distributed homogeneously between the four openings of the intake. The test series with bed load allow reproducing the processes of sediment transport in the Rhone River as well as the deposits measured in situ before a flushing event. The prototype behaviour validates the results of physical modelling, including flushing operation. The applied three-dimensional numerical model (FLOW3D®) is a powerful complementary tool for generating approach flow pattern and for pre-evaluation and comparison of design alternatives.

### I ■ INTRODUCTION

L'usine hydroélectrique de Lavey turbine le débit du Rhône capté au fil de l'eau près d'Evionnaz dans le canton du Valais en Suisse. Mis en service en 1949, cet aménagement est conçu de manière à gérer de fortes variations de débit. La retenue est créée par un barrage mobile, qui contrôle le niveau d'exploitation de la prise d'eau en rive droite du Rhône (Figure 1). Le barrage comporte trois pas-

ses, équipées chacune de deux vantaux dont le réglage permet d'assurer une alimentation optimale de la centrale et un transit sécuritaire des crues.

Lors d'un événement extrême en octobre 2000, la capacité hydraulique du Rhône a atteint sa limite au droit du barrage. Les profils en travers relevés dans le Rhône en amont ont permis de documenter l'importance de l'alluvionnement et la réduction de la capacité hydraulique de l'ouvrage. Suite à ce constat, la Ville de Lausanne, exploitant de l'aménagement

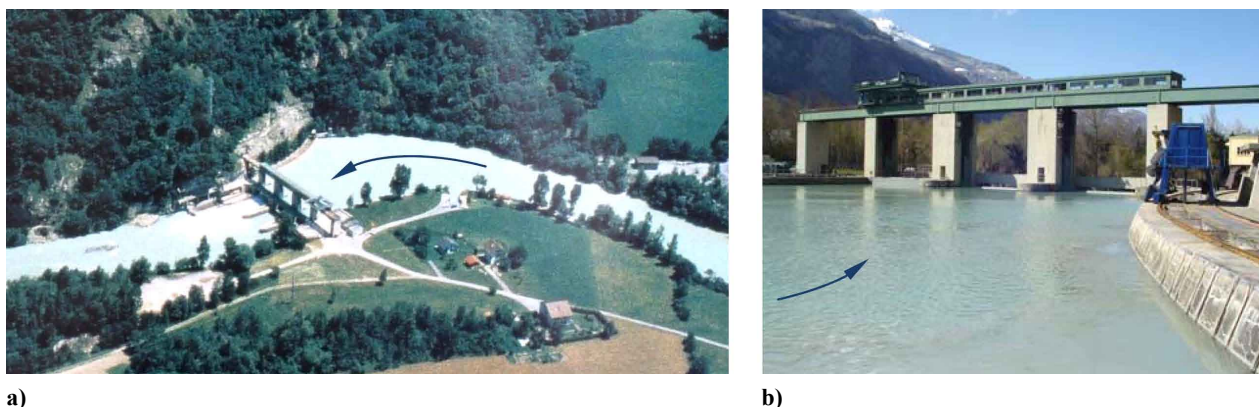


Figure 1 : Photo aérienne (a) et vue amont (b) de l'aménagement au fil de l'eau de Lavey

de Lavey par son *service de l'électricité* (SEL), a mandaté un groupement d'ingénieurs constitué de *Stucky SA*, *Hydrocosmos SA* et *Bonnard & Gardel SA* pour élaborer des propositions d'aménagement. Afin de tester et optimiser la solution projetée, un modèle physique de l'aménagement a été réalisé au *Laboratoire de Constructions Hydrauliques* (LCH) de l'*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL). Dans une première phase expérimentale, les essais se sont concentrés sur l'état actuel de l'aménagement dans un but de calage et de validation du modèle, tant d'un point de vue purement hydraulique que sédimentaire [4]. Cette étape préliminaire fait l'objet de la présente publication.

Les essais se concentrent sur la capacité de transit des crues au droit du barrage et sur la répartition du débit entre les portails de la prise d'eau, avec et sans apport sédimentaire. Les mesures sont comparées aux observations faites sur le prototype ainsi qu'avec les résultats d'une simulation numérique tridimensionnelle [5].

## II ■ CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE L'AMÉNAGEMENT

Le barrage de Lavey contrôle l'écoulement du Rhône pour former une retenue à niveau constant devant la prise d'eau de l'aménagement. Les doubles vantaux de chacune des trois passes du barrage peuvent être levés ou abaissés selon les conditions d'exploitation. Le radier des passes se trouve à 435 m s.m. et les ouvertures ont une largeur de 13 m.

La prise d'eau est implantée en rive droite, à l'extérieur de la courbe du Rhône. L'ouvrage est composé de deux trompes d'entrée, chacune divisée en deux portails de 14 m de largeur à l'orifice. Le seuil de la prise se trouve à 438 m s.m. et le bord supérieur des ouvertures à 443.5 m s.m., ce qui définit une hauteur d'entrée de 5.5 m. Une grille de 6 m de longueur permet d'éviter l'entrée de débris flottants (bois, déchets etc.) dans la prise. Elle est nettoyée par un dégrilleur automatique dès que la perte de charge aux portails dépasse la valeur de consigne.

En mode d'exploitation, le plan d'eau dans le bassin d'accumulation est maintenu à 446 m s.m. et la prise permet de

soutirer un débit de turbinage jusqu'à  $Q_{\text{prise}} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ . En cas de crue (débit du Rhône  $Q \geq 600 \text{ m}^3/\text{s}$ ), l'exploitation de la centrale est arrêtée et tout le débit doit pouvoir transiter par le barrage sans provoquer l'inondation de la zone amont. Dans une telle situation, les vantaux du barrage sont complètement ouverts, avec leur limite inférieure à 444.7 m s.m.

## III ■ MODÉLISATION PHYSIQUE

### ● III.1 CARACTÉRISTIQUES DU MODÈLE

Le modèle physique est construit à l'échelle géométrique 1 :40 et exploité en similitude de Froude. Il reproduit 500 m du Rhône, répartis sur 350 m à l'amont et 150 m à l'aval du barrage (*Figure 2*). L'approvisionnement en eau est assuré en circuit fermé et contrôlé par un débitmètre électro-magnétique. Un bassin d'alimentation installé en tête du modèle permet la mise en vitesse de l'écoulement et un écran répartiteur limite les effets de bord à l'entrée. Le niveau aval est contrôlé à l'aide d'un déversoir réglable, de manière à satisfaire la relation « niveau-débit » fournie par le groupement d'ingénieurs, sans influencer le transit sédimentaire. La topographie du Rhône et de ses rives est reproduite conformément à l'état relevé lors de la réalisation de l'aménagement en 1949 (« état initial »). Le lit fixe est construit en croustage de ciment sur la base de profils en travers caractéristiques. Les ouvrages hydrauliques (barrage, prise d'eau et mur guideau) sont fabriqués en plastique PVC et implantés dans le modèle.

Pendant les essais de charriage, un fond mobile de référence est reproduit sur le modèle. La masse sédimentaire est constituée de matériaux granulaires non cohésifs, caractérisés par un diamètre moyen et une masse volumique respectant le critère de Shields. A l'aval du modèle, les sédiments transportés sont récupérés dans un bassin de décantation.

### ● III.2 INSTRUMENTATION ET PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE MESURE

Le comportement hydraulique du barrage et de la prise d'eau a été étudié pour plusieurs situations d'exploitation et

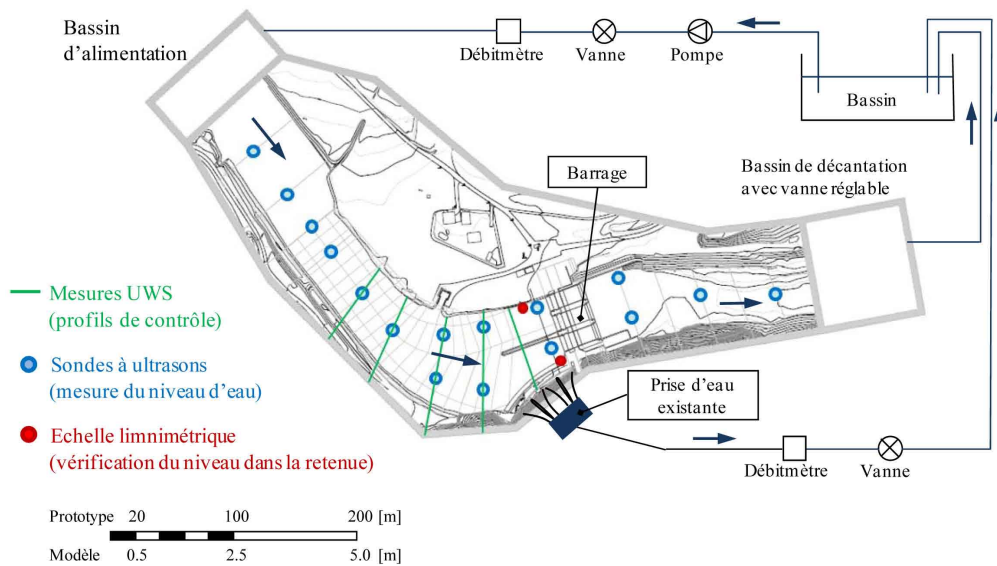


Figure 2 : Géométrie, circuit d'alimentation et instrumentation du modèle physique du barrage de Lavey

de crue. Le niveau du plan d'eau était suivi par 16 sondes à ultrasons et vérifié par deux échelles géométriques réparties sur le modèle. Des mesures de vitesse au micro-moulinet ont permis de déterminer la répartition du débit entre les trois passes du barrage et à l'entrée des quatre portails de la prise d'eau. Les écoulements d'approche ont été visualisés à l'aide d'un colorant traceur et les champs de vitesses superficielles par la méthode LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) [1, 3]. Au cours des essais de charriage l'évolution des dépôts sédimentaires a été mesurée par un Mini Echo Sounder (UWS) [2], dont la sonde partiellement immergée permet de suivre le fond en continu sans interruption de l'essai.

## IV ■ MODÉLISATION NUMÉRIQUE

La complexité de l'écoulement en courbe et la disposition particulière des ouvrages hydrauliques ont encouragé l'approche complémentaire d'une modélisation numérique tridimensionnelle avec le logiciel *FLOW3D*<sup>®</sup> (Figure 3). Dans un premier temps, l'état initial sans dépôts de sédiments a été simulé pour les situations d'exploitation et de crue caractéristiques. La situation alluvionnée a ensuite été modélisée. Les écoulements d'approche du barrage et de la prise d'eau ont été analysés et comparés aux résultats du modèle physique.

La modélisation a été effectuée en tenant compte des forces de gravité ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ), de viscosité (fluide Newtonien) et de turbulence (modèle « k- $\epsilon$  »). Les caractéristiques du fluide (densité et viscosité) sont celles de l'eau à 20 °C. Pour les simulations d'exploitation, le maillage autour des ouvrages est caractérisé par une grille de 0.5 m de hauteur pour 1.0 m de largeur et 1.0 m de longueur. Pour les simulations de crues, le maillage a été simplifié en augmentant la hauteur de 0.5 m à 1.0 m. Ces tailles de maillage ont été choisies de manière à satisfaire les critères de convergence pour assurer une solution finale stable, et aussi pour obtenir des temps de calcul raisonnables [6].

Les conditions de bords ont été fixées selon les cas. Pour les situations d'exploitation, un débit entrant avec un niveau constant à l'amont (Volume flow rate), une vitesse à la sortie de la prise (Specified pressure) et un débit soutiré/déversé (Volume flow rate) ont été choisis. Pour les situations de crues, le débit caractéristique avec les niveaux d'eau amont et aval (Volume flow rate) correspondants ont été imposés.

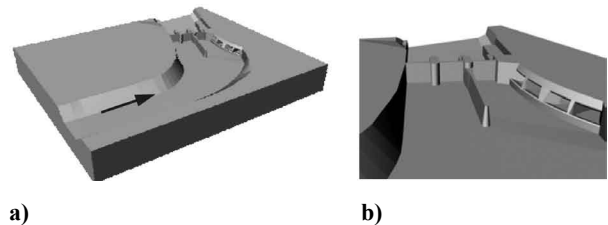


Figure 3: Géométrie complète du modèle numérique (a) et détail de la prise d'eau et du mur guideau (b).

## V ■ RÉSULTATS

### ● V.1 ESSAIS HYDRAULIQUES

#### V.1.1 Essais de crue

Pour un débit  $Q = 1270 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondant à la pointe de crue mesurée en octobre 2000, toutes les passes sont ouvertes et l'ouverture centrale est la plus chargée. La passe de rive gauche est affectée par l'écoulement en courbe qui privilégie l'extérieur du coude et celle de rive droite est partiellement masquée par le mur guideau. Cette répartition non uniforme du débit est également mise en évidence par la simulation numérique 3D. La différence observée entre les résultats expérimentaux et numériques (Figure 4) montre que, malgré

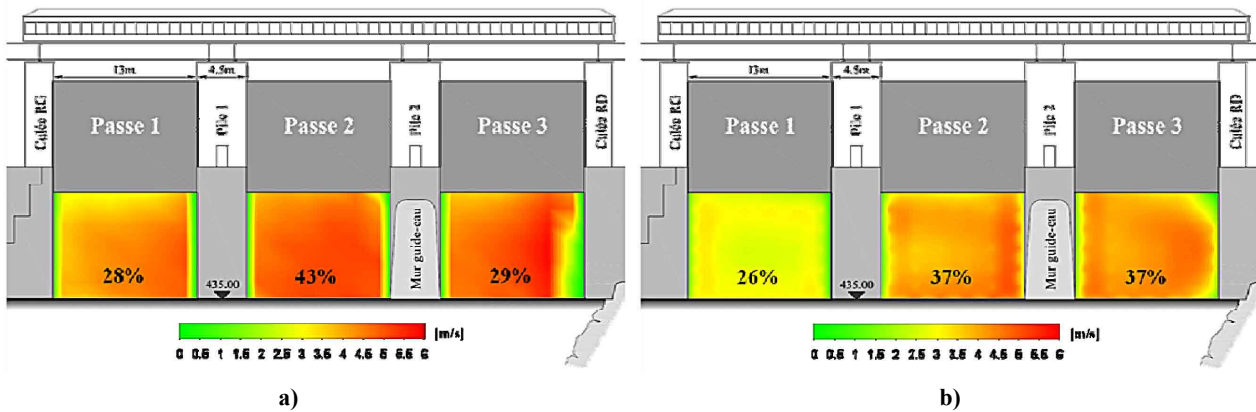


Figure 4 : Vitesses d'écoulement (en m/s) dans les pertuis des trois passes ouvertes,  $Q_{\text{Rhône}} = HQ_{\text{année 2000}} = 1270 \text{ m}^3/\text{s}$  ; répartition du débit entre les passes sur le modèle physique (a) et sur le modèle numérique 3D (b)

la puissance du modèle 3D, l'écoulement en courbe et la présence d'obstacles génèrent des comportements tridimensionnels complexes qui ne sont pas parfaitement reproduits par le modèle numérique.

Dans le cas de fermeture complète d'une vanne (cas N-1), un débit de crue millénaire  $Q = 1450 \text{ m}^3/\text{s}$  passe à travers les deux pertuis ouverts sans causer de débordements à l'amont. Cette condition de sécurité est imposée par l'Ordonnance suisse sur la sécurité des ouvrages d'accumulation (OSOA) qui fixe les exigences requises en matière de sécurité. La répartition entre les passes est équilibrée lorsque les vannes 1 et 2, respectivement 1 et 3 sont ouvertes. Si les passes 2 et 3 doivent évacuer le débit, le mur guideau intervient comme élément perturbateur qui prérèterite la passe de rive droite.

L'augmentation du débit conduit à l'atténuation de l'influence du mur guideau et à une répartition plus uniforme entre les passes. Avec la diminution du débit, l'influence de ce mur devient significative pour toutes les configurations

d'ouvertures. Dans tous les cas, la passe 2 reste la plus capacitive.

L'analyse de capacité sur modèle physique montre que la limite de débordement en rive gauche est atteinte pour un débit  $Q = 1860 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le transit d'écoulement sur la culée gauche commence à partir de  $Q = 1960 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Les mesures de niveau montrent que l'inclinaison du plan d'eau, causée par l'écoulement en courbe à l'amont du barrage, conduit à une différence d'environ 0.7 m entre les deux rives.

### V.1.2 Essais d'exploitation

L'étude de répartition du débit à l'entrée de la prise d'eau ne fait pas apparaître de différence significative entre la capacité des deux trompes. Selon les mesures sur modèle physique, les ouvertures amont de chaque trompe sont en revanche un peu mieux alimentées. Ce constat n'est toutefois pas confirmé par les résultats du modèle numérique (Figure 5).

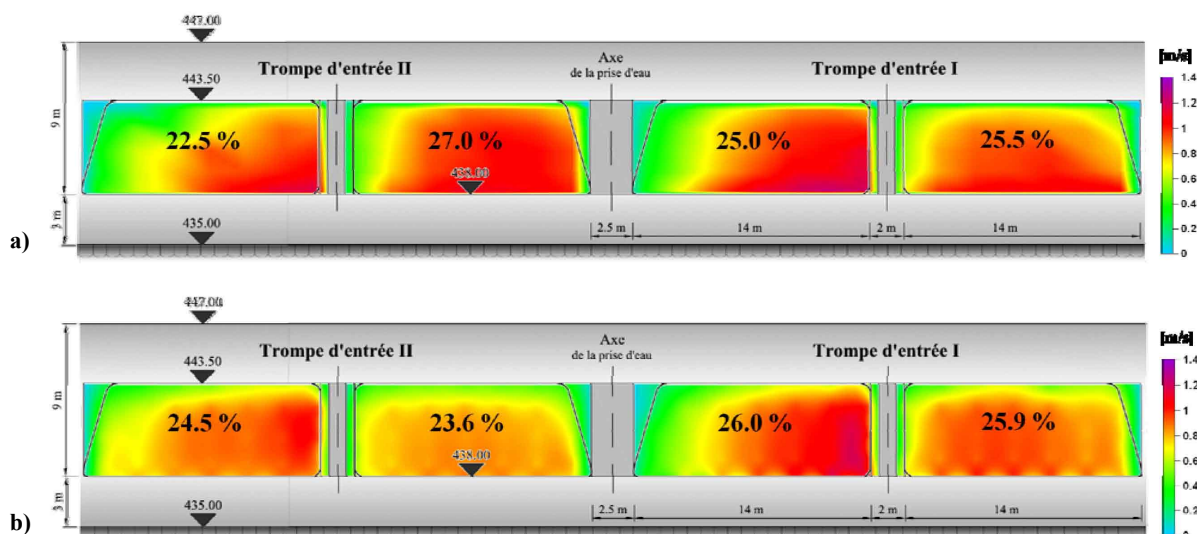


Figure 5 : Répartition des vitesses à l'entrée de la prise,  $Q_{\text{Rhône}} = Q_{\text{prise}} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$  ; résultat de la modélisation physique (a) et numérique (b)

Les vitesses maximales à la grille se situent autour de 1.2 m/s et restent dans une limite acceptable pour une prise d'eau en rivière. Néanmoins, dans la situation alluvionnée, les vitesses augmentent jusqu'à 1.35 m/s sous l'influence des dépôts sédimentaires qui réduisent la section d'écoulement. L'écoulement le plus rapide se rencontre à proximité du seuil inférieur de la prise, où les masses d'eau sont accélérées à partir du fond de la retenue.

En exploitation normale, le niveau dans la retenue est maintenu constant à 446 m s.m. Au voisinage immédiat de la prise d'eau, un léger abaissement du plan d'eau est observé, dû au soutirage. L'étude des écoulements d'approche à l'aide de la méthode LSPIV et d'un colorant traceur a permis de reproduire le champ des vitesses superficielles dans la retenue (Figure 6).

Lorsque la prise d'eau est en exploitation, les masses d'eau au-dessus de l'ouvrage se mettent en rotation et conduisent à la formation de vortex. Ceux-ci ne sont pas préjudiciables au bon fonctionnement de la prise car ils ne génèrent pas de noyau suffisamment fort pour aspirer de l'air vers la conduite.

Situé dans une zone où les masses d'eau montrent une tendance à recirculation, le portail le plus proche du barrage présente une zone de faibles vitesses dans le coin supérieur gauche (Figure 5a et Figure 6).

L'écoulement d'approche simulé par *FLOW3D*<sup>®</sup> est présentée par deux plans XY à 439.25 m s.m. et 445.75 m s.m. respectivement (Figure 7). L'écoulement en profondeur est concentré vers l'extérieur de la courbe en direction de la trompe amont tandis que l'écoulement en surface est bien réparti sur toute la largeur du Rhône et dirigé plutôt vers la trompe aval. L'écoulement à l'intérieur de la courbe est confiné par le mur guideau derrière lequel une zone stagnante s'installe. A l'amont de la vanne 3, une petite zone de recirculation apparaît juste devant le portail aval de la prise d'eau où des faibles vitesses sont identifiées.

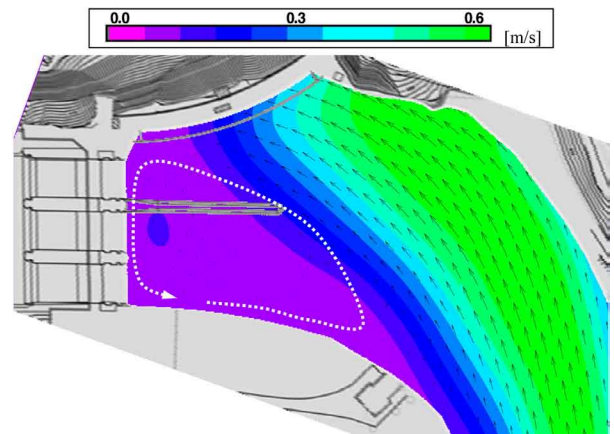


Figure 6 : Ecoulement superficiel d'approche pour  $Q_{\text{Rhône}} = Q_{\text{prise}} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$  (mesure LSPIV)

## ● V.2 ESSAIS DE CHARRIAGE

### V.2.1 Essais de remplissage et d'équilibrage

Un essai d'alluvionnement réalisé sur le modèle physique a permis la reconstitution de la bathymétrie mesurée sur prototype avant l'opération de purge réalisée en 2005 (Figure 8). Après une phase de remplissage par charriage à débit constant de 400 m<sup>3</sup>/s, une série d'événements de crue (600 et 800 m<sup>3</sup>/s) a été simulée pour dynamiser le transport sédimentaire. Des mesures bathymétriques à l'aide d'un Mini Echo Sounder (UWS) ont permis de suivre l'évolution du lit pendant les essais et de reconstituer la géométrie finale des dépôts. Cet essai a été interrompu lorsque le volume d'alluvionnement du modèle correspondait à celui mesuré in situ. Les niveaux et la forme des dépôts ont pu être reproduits conformément à la réalité, en respectant les conditions d'ex-

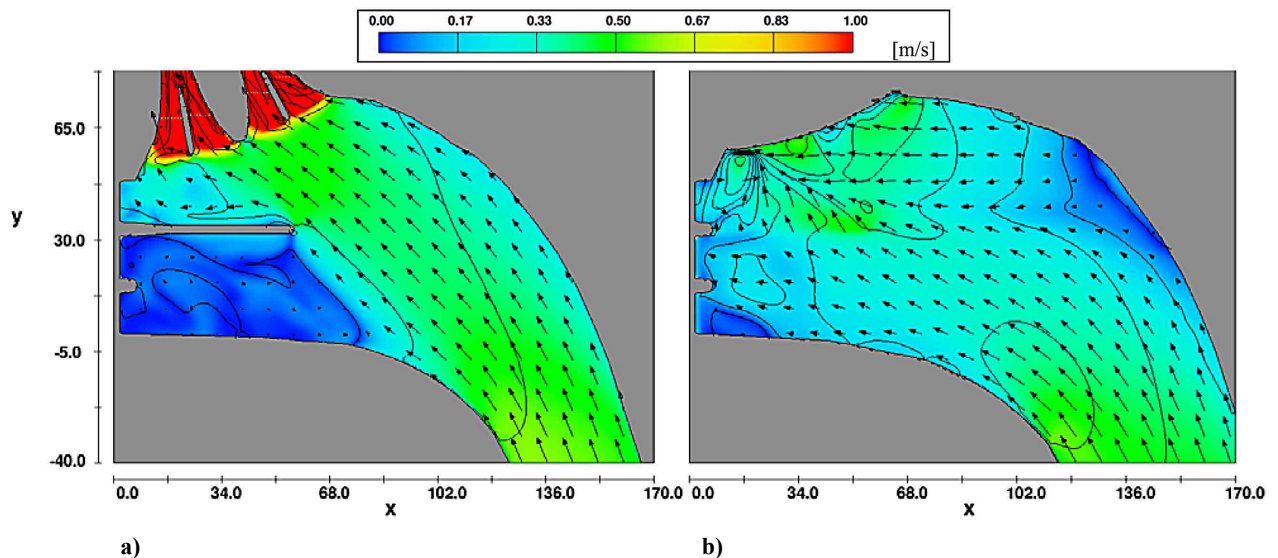


Figure 7 : Ecoulement d'approche *FLOW3D*<sup>®</sup> pour  $Q_{\text{Rhône}} = Q_{\text{prise}} = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ , à 439.25 m s.m. (a) et 445.75 m s.m. (b)

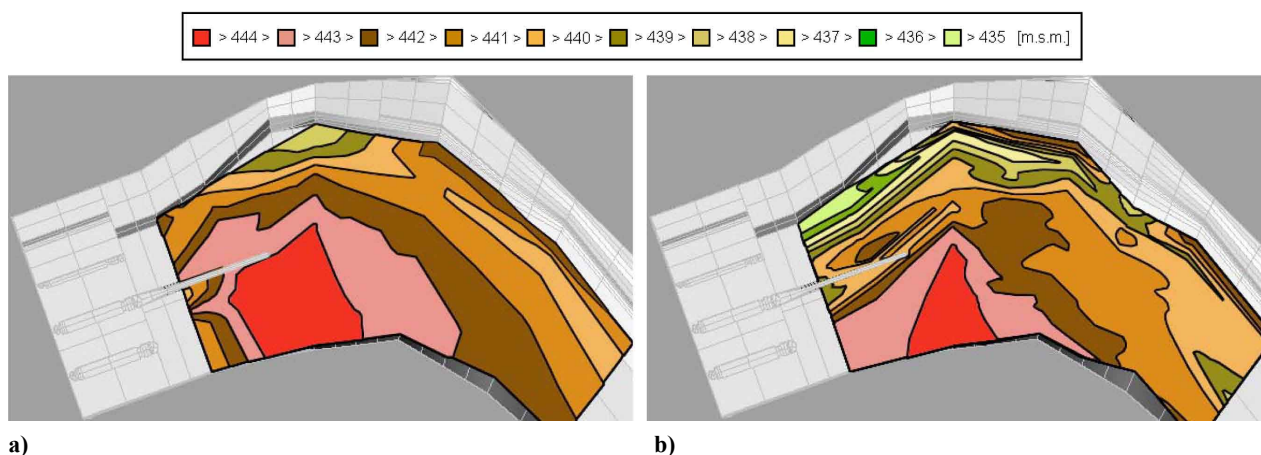


Figure 8 : Bathymétrie avant purge sur prototype en 2005 (a) et sur modèle physique (b)

exploitation du barrage. Cette bathymétrie, caractérisée par un dépôt important à l'intérieur du coude et un chenal prononcé en rive droite, a été utilisée comme condition initiale pour l'opération de purge et la mesure de son efficacité.

#### V.2.2 Essais de purge

L'essai d'alluvionnement a été suivi d'un essai de purge, dans le respect des consignes appliquées sur prototype. Le

processus a été documenté par des photos zénithales prises à intervalle régulier. En parfaite similitude avec les observations faites in situ, la purge se révèle efficace en rive droite, où les sédiments accumulés devant la prise et les passes du barrage sont évacués. En rive gauche, une zone sédimentaire importante à l'intérieur du coude ne parvient pas à être évacuée, comme constaté sur l'aménagement réel (Figure 9).

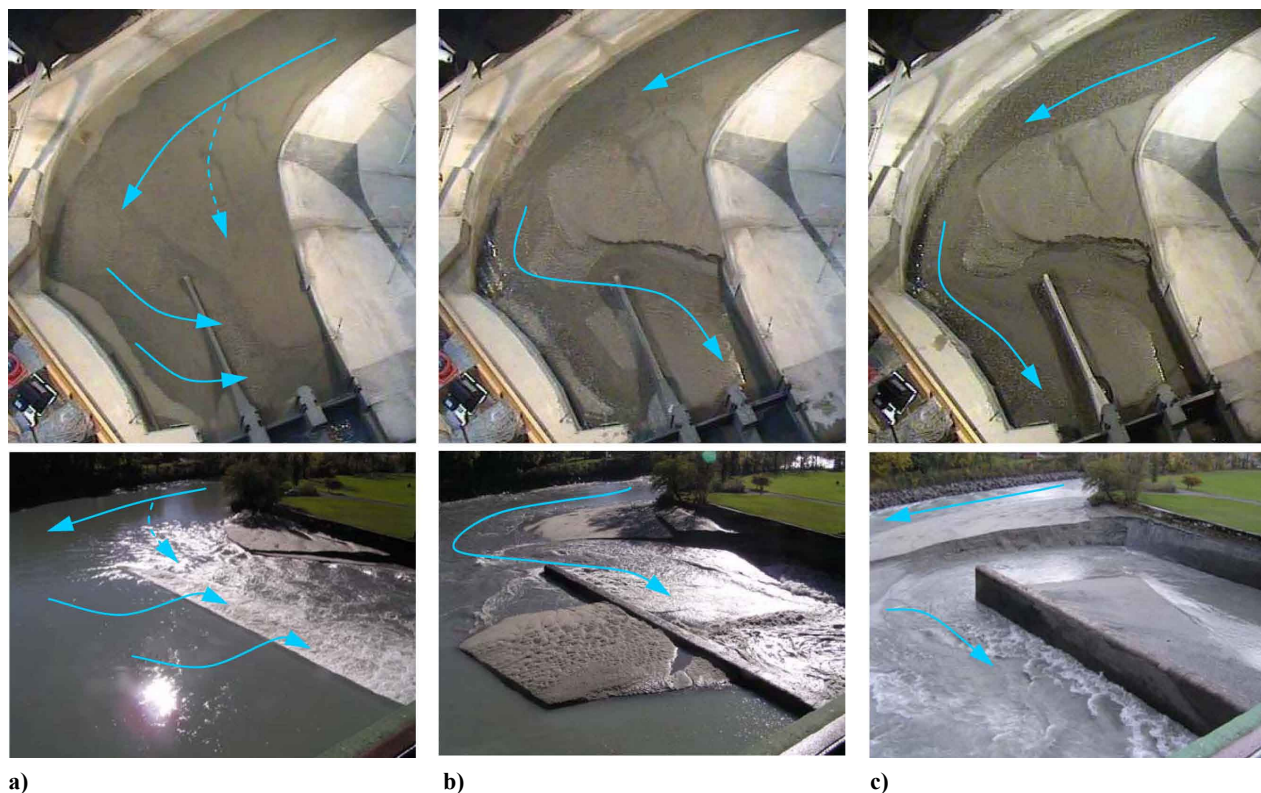


Figure 9 : Chronologie de purge sur modèle physique (en haut) et sur prototype (en bas) ; ouverture des passes – passe 1 (a), passes 1 et 2 (b), passe 3 (c)

## VI ■ CONCLUSIONS

Le modèle physique de la retenue de Lavey sur le Rhône en Suisse a été réalisé à l'échelle 1 :40 dans le but de tester et d'optimiser un aménagement susceptible de maîtriser la gestion sédimentaire sur le site. Une phase expérimentale préliminaire a été consacrée au calage et à la validation du modèle, en comparaison des observations et mesures effectuées in situ. Cette étape, dont les résultats sont présentés ici, avait également pour but de documenter un état de référence concernant l'alluvionnement, les opérations de purge, la gestion des crues et l'alimentation de la prise d'eau. Les essais purement hydrauliques ont également fait l'objet d'une modélisation 3D dans un but de comparaison.

L'application de techniques de mesure appropriées, comme le micro-moulinet, l'UWS (Mini Echo Sounder) et le LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry), a permis une documentation précise et contribué à une analyse rapide des situations d'intérêt.

En exploitation normale, la prise d'eau fonctionne de manière adéquate avec un soutirage uniforme et des vitesses d'entrée acceptables. En situation de crue, la capacité hydraulique du barrage a été examinée dans le respect des contraintes de sécurité imposées. Les essais d'alluvionnement et de purge à lit mobile ont été validés par des observations faites sur prototype.

A l'origine, le choix du modèle physique était justifié par la complexité des phénomènes bi-phasiques et tridimensionnels concernés. A titre comparatif, la modélisation numérique 3D des écoulements a livré des résultats globalement similaires mais parfois différents localement. L'approche numérique se révèle particulièrement intéressante pour la documentation des écoulements d'approche à large échelle et pour l'étude préalable de variantes d'aménagement. Les situations avec transport sédimentaire n'ont par contre pas pu être simulées numériquement en raison de la complexité des processus transitoires et surtout des temps de calculs requis.

Après cette phase de validation, les solutions d'aménagement proposées par le groupement d'ingénieurs ont pu être

testées sur modèle numérique et optimisées sur le modèle physique. Finalement, des consignes opératoires ont été établies à l'intention de l'exploitant.

## VII ■ REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le *Service de l'électricité (SEL)* de la ville de Lausanne, mandant de cette étude, ainsi que le groupement d'ingénieurs *Stucky SA, Hydrocosmos SA et Bonnard & Gardel SA* pour leur collaboration efficace et fructueuse.

## VIII ■ RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] BIERI M., JENZER J., KANTOUSH S. A., BOILLAT J.-L. (2009) — Large Scale Particle Image Velocimetry Applications for Complex Free Surface Flows in River and Dam Engineering. *33rd IAHR 2009 Congress. Vancouver, Canada.*
- [2] KANTOUSH S. A., BOLLAERT E., SCHLEISS A. J. (2008) — Experimental and numerical modelling of sedimentation in a rectangular shallow basin. *International Journal Sediment Research*. **23** 112-132
- [3] KANTOUSH S. A., DE CESARE G., BOILLAT J.-L., SCHLEISS A. J. (2008) — Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling. *Flow Measurement and Instrumentation*. **19** 139-144
- [4] LCH (2008) — *Barrage de Lavey – Etude des écoulements et du transport solide dans le Rhône – Phase 1 – Etat initial et état actuel. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.*
- [5] RIBEIRO J. M. (2009) — Physical and 3D Numerical modeling of the water intakes of the Lavey Hydroelectric power plant under steady flow conditions. *MAS practical research project. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.*
- [6] TEKLEMARIAM E., KORBAYLO B. W., GROENEVELD J. L., FUCHS D. M. (2002) — Computational Fluid Dynamics : Diverse Applications in Hydropower Project's Design and Analysis. *CWRA 55th Annual Conference. Winnipeg, Canada.*