

ETUDE SUR MODELE PHYSIQUE ET NUMERIQUE DES EVACUATEURS DE CRUE ET DES FOSSES D'EROSION DU BARRAGE DE KOMAN EN ALBANIE

Physical and numerical modeling of the spillways and plunge pools of Koman Dam in Albania

**Giovanni De Cesare, Milad Daneshvari, Matteo Federspiel, Mathias Malquarti,
Gaël Epely Chauvin et Anton Schleiss**

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

Tél: +41 21 693 23 85; Fax: +41 21 693 22 64, e-mail: giovanni.decesare@epfl.ch

Le barrage de Koman de 115 m de hauteur, est situé dans la partie nord de l'Albanie et fait partie des paliers hydroélectriques de la rivière Drin. L'aménagement dispose de deux évacuateurs de crue en tunnel avec des sauts de ski à leurs extrémités. Deux grandes fosses d'érosion se sont créées dans les alluvions aval. Le comportement hydraulique des deux évacuateurs et le processus d'affouillement ont été étudiés sur un modèle réduit et par modélisation numérique avec Flow-3D. L'écoulement dans les tunnels et sur les sauts de ski, ainsi que les trajectoires des jets et les zones d'impact ont pu être déterminés. L'évolution des fosses d'érosion et leurs étendues ont été étudiées. Les essais physiques ainsi que la modélisation numérique ont montré que, pour les deux évacuateurs, les sauts de ski ne peuvent guider les jets convenablement que jusqu'à 50% de leur capacité nominale. Au-delà, les sauts de ski ne peuvent plus dévier l'écoulement conformément aux prévisions théoriques, et la longueur du jet diminue, approchant la zone d'impact du pied du barrage. Les résultats de la modélisation physique et numérique pour l'état actuel ont pu être validés par les observations in situ. Le modèle physique et la simulation numérique permettent de reproduire fidèlement la création d'une fosse d'érosion dans des alluvions due à l'impact du jet plongeant.

Physical and numerical modeling of the spillways and plunge pool of Koman Dam in Albania

The 115 m high Koman Dam is located in the northern part of Albania and is part of the Drin River hydroelectric cascade. The dam is equipped with two tunnel spillways with flip buckets at their ends. Two large scour holes were created in the downstream alluvium. The hydraulic behavior of the two spillways and the formation of the scour holes were studied on a physical scale model and by numerical simulation with Flow-3D. The flow in the tunnels and over the ski jumps, as well as the jet trajectories and the impact zones could be determined. The evolution of scour holes and their extent were studied. The physical model tests as well as the numerical simulations showed that, for the spillways, the flip buckets can deflect the jets suitably only up to 50% of the nominal capacity. Beyond that discharge, the flip buckets cannot guide the flow according to theory, and the jet length decreases, approaching the impact zone to the downstream dam toe. The results from the physical and numerical modeling for the current state could be validated by in situ observations. The physical model and the numerical simulation are able to reproduce accurately the plunge pool scour in an alluvial bed due to the plunging jet impact.

I INTRODUCTION

Le barrage de Koman est situé dans la partie nord de l'Albanie et est l'un des barrages existants des quatre paliers de la rivière Drin. C'est un barrage à masque amont (et aval) en béton qui a été construit entre 1980 et 1988. La centrale hydroélectrique a une capacité installée de 600 MW. L'aménagement dispose de deux évacuateurs de crue principaux en tunnel avec des sauts de ski à leurs extrémités (Figure 1). L'évacuateur No. 3 a une capacité de 1'900 m³/s, il est situé sur la rive gauche. L'évacuateur No. 4 avec une capacité de 1'600 m³/s se situe en rive droite. Deux grandes fosses d'érosion se sont créées dans les alluvions aval. Probablement lors des premières opérations de l'évacuateur No. 4, le pied aval du barrage a été érodé. La rive gauche qui sépare les fosses d'érosion du canal de fuite de la centrale hydroélectrique a également mal supporté la forte sollicitation hydraulique. En raison de ce problème, l'évacuateur No. 4 n'a plus été utilisé depuis.

Un des objectifs des essais sur modèle physique et numérique était d'identifier la source du problème d'instabilité au pied du barrage et de proposer des solutions. L'état actuel des deux évacuateurs No. 3 et No. 4 a été évalué et la géométrie des fosses d'érosion étudiée [1] [2] et [3].

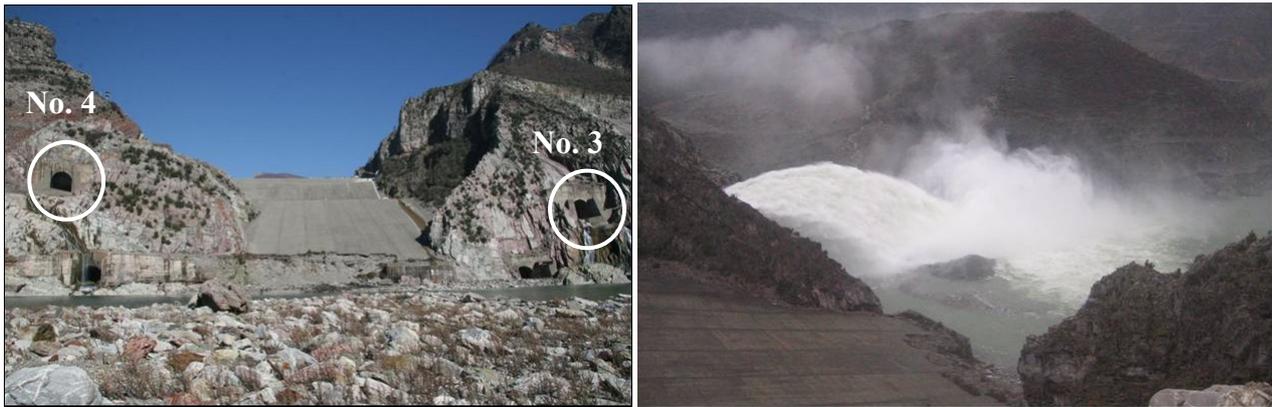


Figure 1: Vue de l'aval du barrage de Koman avec les deux sorties des évacuateurs de crue No. 4 et 3 (gauche); photo de l'évacuateur No. 3 en rive gauche en fonction (droite), source: Pöyry Energy Ltd., date et débit inconnus.

II LE MODELE PHYSIQUE

Un modèle réduit à l'échelle 1:65 a été construit au Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - EPFL (Figure 2).

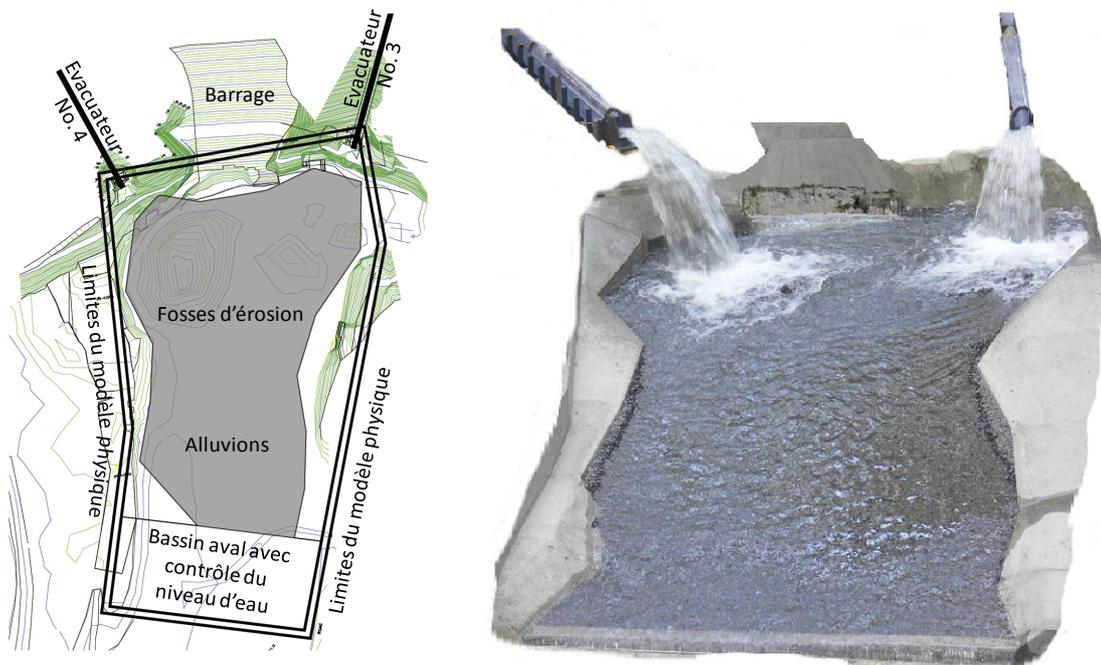


Figure 2: Limites et éléments du model physique (gauche) et photomontage des évacuateurs modèles en fonction superposés à la photo du barrage réel (droite).

L'étude avait pour objectives de:

- Vérifier l'écoulement dans les tunnels et aux sorties des déversoirs pour les scénarios différents de l'ouverture des vannes et des débits,
- Mesurer et vérifier la trajectoire théorique du jet et de la zone d'impact dans le bassin amortisseur,
- Mesurer les niveaux d'eau dans le bassin amortisseur,
- Étudier qualitativement le mouvement de charriage et l'évolution potentielle des fosses d'érosion,
- Étudier la circulation d'écoulement dans le bassin amortisseur, particulièrement au pied du barrage,
- Mesurer localement les vitesses dans le bassin amortisseur, particulièrement le long du pied du barrage et de la rive droite,
- Mesurer les pressions dynamiques agissant sur le pied du barrage,

- Proposer et vérifier les modifications structurales des sauts de ski où la trajectoire du jet pourrait être améliorée ou une pré-excavation d'une fosse plus grande afin d'améliorer la dissipation d'énergie.

La configuration du modèle du bassin aval ainsi qu'un photomontage sont illustrée dans la Figure 2. Les profils des sections nécessaires à la construction ont été extraits de la topographie relevée sur place.

Dix différents scénarios de débits et de combinaisons des évacuateurs ont été définis pour les essais. Chaque évacuateur fonctionne individuellement à 25, 50, 75 et 100% de sa capacité ainsi que les deux évacuateurs ensemble, chacun à 50 et 100% de sa capacité nominale.

Des données de granulométrie proviennent de cinq relevés en ligne pris in-situ dans les alluvions du bassin aval. Le matériel granulaire du prototype présente un $d_{50} = 11$ cm et un $d_{90} = 56$ cm, les plus grands blocs atteignent environ 1 m de diamètre. Le matériel sélectionné pour la modélisation est composé de 50% de sable 8 - 11 mm et 50% de gravier concassé 11 - 16 mm représentant les plus gros blocs, le d_{50} est égale à 11 mm. Ce mélange permet une bonne représentation de la réalité à l'échelle du modèle.

Le niveau d'eau sur prototype dans le bassin amortisseur est directement lié au débit évacué, à un éventuel débit turbiné dans la centrale hydroélectrique en rive gauche ainsi que de la section de contrôle à la sortie du bassin amortisseur. Il est contrôlé par un déversoir à l'aval du modèle physique (Figure 8).

III LE MODELE NUMERIQUE

Les simulations ont été effectuées avec le programme Flow-3D distribué par la société Flow Science [4]. Ce programme est autonome, gérant tant la partie pré- que *postprocessing*, il permet la création de géométries, des conditions initiales et de bords, la simulation numérique et la visualisation des résultats obtenus. Cependant, par soucis de commodité, les éléments géométriques (évacuateurs, sauts de ski, topographie, barrage, ...) ont été modélisés sous 3DSmax ou Autodesk Inventor puis importées dans Flow-3D.

L'étude numérique se composait de deux parties:

1. Implémentation des topographies obtenues avec le modèle physique comme fond fixe. Les conditions d'écoulement du modèle physique sont alors simulées. Les caractéristiques de l'écoulement, champ de vitesse et pressions sont extraites.
2. Mise en place du modèle sédimentaire dans Flow-3D, tests de faisabilité à l'aide d'un cas d'étude de la littérature, ensuite simulation numérique avec fond mobile afin de retrouver les géométries obtenues dans le modèle physique, validées par l'observation in-situ.

Flow-3D résout numériquement les équations de continuité, d'énergie et de quantité de mouvement par une approche en volumes finis. Le domaine de simulation est intégré dans un maillage à cellules rectangulaires fixes. Toutes les variables sont situées dans les centres des cellules, à l'exception de la vitesse, qui est située sur les faces des cellules (*staggered grid arrangement*). Les obstacles et surfaces sont intégrés dans le maillage, en définissant sur chaque face du maillage une répartition entre une zone solide et une zone ouverte à l'écoulement (méthode dite *Fractional Area-Volume Obstacle Representation - FAVOR*). Cette technique permet une reproduction géométrique plus détaillée que la taille minimale des cellules du maillage.

Le choix de la dimension des mailles est toutefois même important. Diminuer la taille des mailles permet d'augmenter la précision (de l'écoulement et des géométries) mais également le temps de calcul. Afin de minimiser le nombre de cellules tout en gardant une bonne précision, un maillage composé de plusieurs blocs a été utilisé (Figure 3 gauche). La continuité entre deux blocs adjacents est assurée directement par Flow-3D, pour autant que l'on ne dépasse pas 5 à 10% de différence entre la taille des cellules qui composent deux blocs contigus. Un rapport hauteur/largeur/profondeur des cellules proche de l'unité a été choisi pour l'ensemble des blocs, garantissant une stabilité numérique. Une prévisualisation interactive des solides et du fluide à l'état initial est possible dans Flow-3D grâce au module FAVOR. Il permet de bien optimiser le maillage avant de lancer la simulation (Figure 3 droite).

Les maillages utilisés varient en fonction des scénarios: de 900'000 cellules pour les simulations mettant en jeu un seul évacuateur de crue avec forme des fosses d'érosion prédéfinie et jusqu'à 2'000'000 cellules pour l'ensemble barrage - évacuateurs de crue - bassin amortisseur aval avec fond érodable (Figure 4).

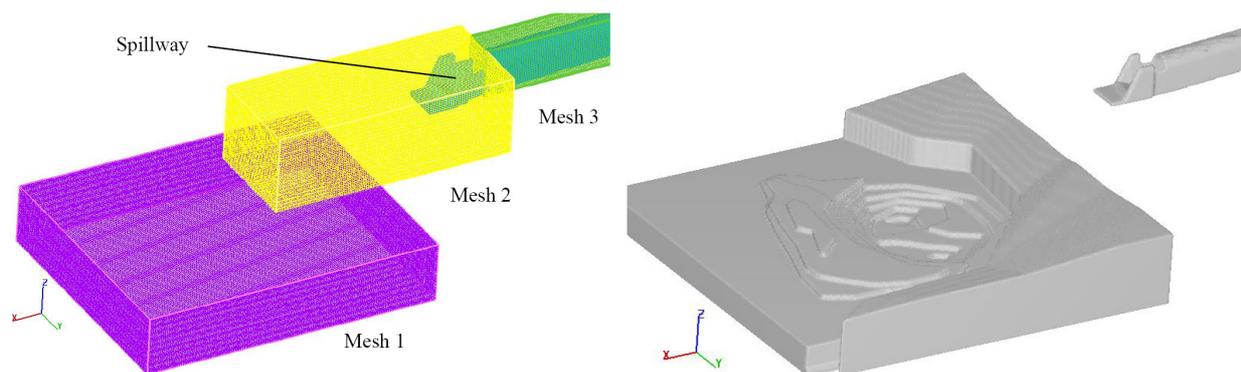


Figure 3: Modèle numérique Flow-3D en 3 blocs pour le modèle partiel de l'évacuateur No. 4 avec la galerie, la zone du jet et la fosse d'érosion à l'aval (gauche) et résultant du rendu géométrique final par le module FAVOR (droite).

Les caractéristiques physiques du problème ont été définies en fonction des paramètres à analyser, les deux modèles de base sont le modèle gravitaire et le modèle de viscosité/turbulence. Pour la turbulence, le modèle $k-\varepsilon$ a été implémenté. Ce modèle permet d'obtenir des approximations correctes des écoulements à fort Reynolds, ce qui est le cas ici. Pour l'opérateur d'advection (l'advection correspond au transport d'une quantité scalaire conservée par un champ vectoriel), une approximation du 3^{ème} ordre a été implémentée afin de permettre l'étude d'écoulements tourbillonnaires. Pour la simulation cohérente d'un jet d'eau, le modèle tient également compte de la tension superficielle de l'eau.

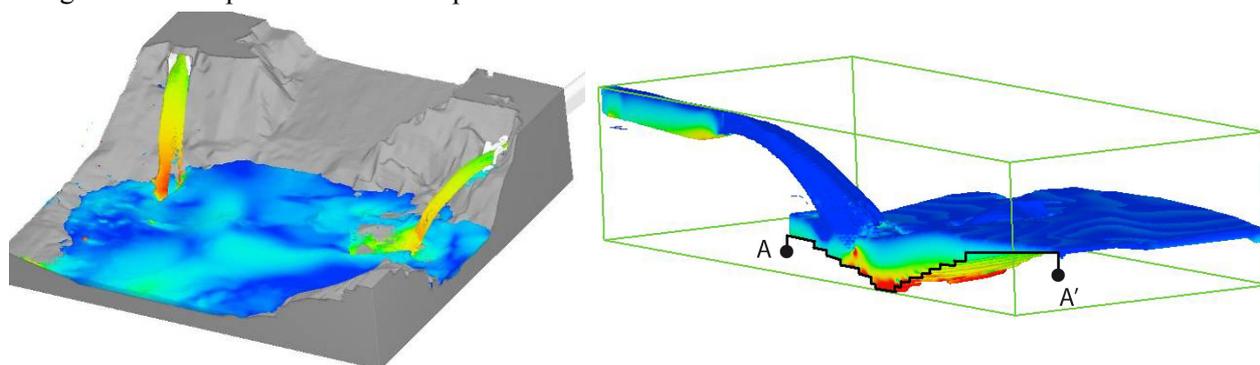


Figure 4: Modèle numérique Flow-3D de l'ensemble barrage - évacuateurs de crue - bassin amortisseur aval (gauche) et modèle partiel pour l'étude de l'évacuateur No. 3 montrant l'écoulement dans la galerie, le jet et une coupe à travers la fosse d'érosion aval (droite).

Les conditions aux limites sont à l'amont (dans les évacuateurs) les vitesses et les hauteurs d'eau imposées à l'aval des vannes en fonction du débit et de l'ouverture des vannes. La condition aval est définie comme une section à niveau d'eau constant, avec une distribution hydrostatique des pressions du fluide sortant.

Pour le modèle numérique à fond mobile, la même géométrie et les mêmes conditions amont et aval sont définies. Un lit formé des sédiments a été mis en place par dessus d'un fond fixe en profondeur. Les caractéristiques des sédiments sont identique à celles du modèle physique, soit une masse spécifique $\rho = 2'650 \text{ kg/m}^3$ et un angle de frottement $\phi = 35^\circ$. La granulométrie non-uniforme, mais peu étendue, a été prise en compte avec un diamètre moyen $d_m = 11 \text{ mm}$. Les deux évacuateurs ont chacun fonctionnés à 100% de leur capacité nominale.

IV RESULTATS

IV.1 Trajectoire des jets

Pour tous les scénarios, la forme et les trajectoires de la nappe inférieure et supérieure ont été mesurées sur le modèle physique. Le modèle numérique fournissait pour comparaison, le résultat pour 100% de capacité uniquement.

A titre d'exemple, la forme du jet de l'évacuateur No. 3 à 100% de sa capacité est présenté à la Figure 5 gauche. Les résultats sont globalement en accord avec le modèle physique (Figure 5 droite). L'étalement du jet augmente avec les des débits. Il reste à noter une très forte influence de la taille du maillage sur la

précision de la simulation des jets. Un contrôle des flux a permis de vérifier que le jet ne "perdait" pas de l'eau, la continuité étant satisfaite dans le modèle numérique. C'est essentiellement au niveau de l'affichage des résultats lors du *postprocessing* que des "trous" apparaissaient dans les jets.

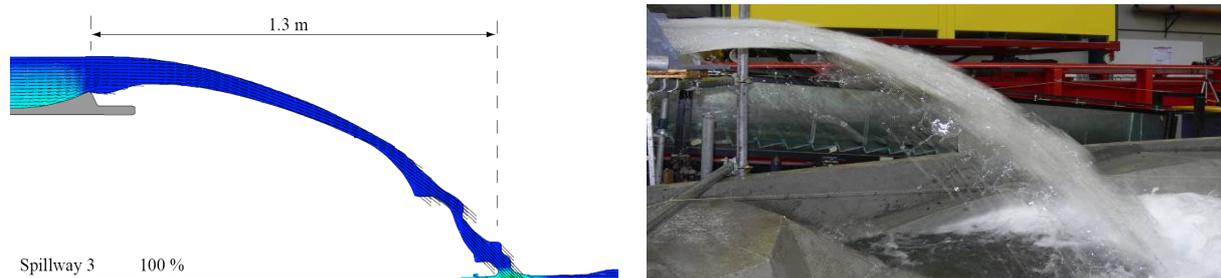


Figure 5: Trajectoire du jet pour l'évacuateur No. 3 à 100% de sa capacité, 1'900 m³/s. La compression de la nappe supérieure du jet sur le saut de ski est bien visible, réduisant sa longueur et approchant ainsi la zone d'impact du jet vers le barrage; résultats de la modélisation numérique (gauche) et physique (droite).

Il y a deux critères géométrique principaux pour la conception d'une auge d'un saut de ski [5]: le rayon de la l'auge, R et son angle d'ouverture, β (Figure 6). Le rayon R de la l'auge devrait être d'au moins quatre fois la profondeur de l'eau à l'approche, h_0 . En outre, l'auge devrait être capable de guider le jet convenablement avec un débit spécifique de l'ordre de 110 m³/s/m. L'autre critère est l'angle d'ouverture de l'auge, β , qui varie normalement entre 25° et 35°. L'angle de détachement de l'auge α est en règle générale égal à l'angle d'ouverture, sauf si la profondeur d'eau dépasse le critère du rapport $R/h_0 > 4$.

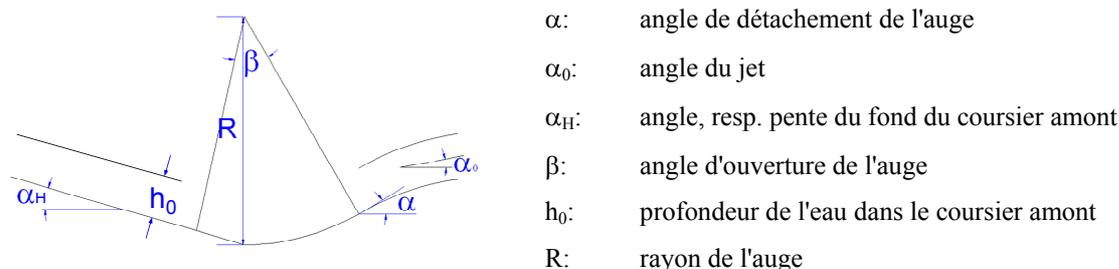


Figure 6: Définition et schéma des caractéristiques géométriques d'un saut de ski

En fonction des caractéristiques hydrauliques de l'écoulement et de la géométrie du saut de ski, la trajectoire théorique peut être calculée [6] [7]. Le résultat de ce calcul est montré à la Figure 7 et est comparé aux mesures effectués sur le modèle physique. Il en sort clairement, que la trajectoire observée sur modèle physique donne un jet nettement plus court que prédit théoriquement, cela pour des débits dépassant 50% de la capacité des évacuateurs de crue. Dans le cas de l'évacuateur No. 3 à 100% de sa capacité, la distance depuis le point de départ au centre de l'impact du jet est réduite jusqu'à 12 m avec l'angle de départ réduit, ce qui est confirmé par des observations in-situ, notamment par la position et la forme de la fosse d'érosion.

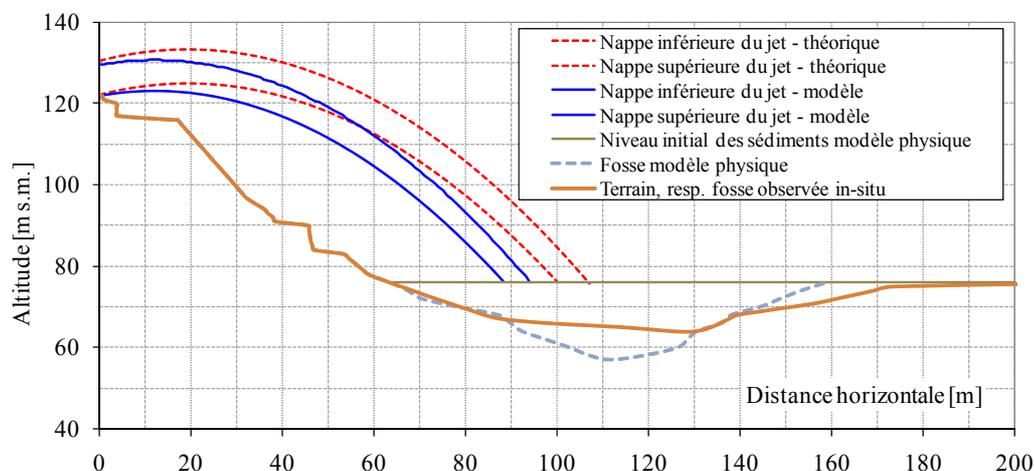


Figure 7: Trajectoires observées sur modèle physique et théorique pour l'évacuateur No. 4 à 100% de sa capacité, 1'600 m³/s. Dans ce cas, la distance au centre de l'impact du jet est réduite jusqu'à 12 m, confirmé par des observations in-situ.

IV.2 Zone d'impact des jets

Dans cette partie de l'étude la zone d'impact du jet et sa forme ont été mesurées. Pour réaliser les mesures, une grille en fils synthétiques a été placée légèrement en dessus du niveau de l'eau (Figure 8). Le maillage de la grille est de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Cette grille a permis de délimiter schématiquement la forme du jet dans sa zone d'impact. Cette mesure a été effectuée pour les quatre débits par évacuateur. Des mesures ponctuelles de la pression à l'intérieur du jet à l'impact ont également été effectuées.

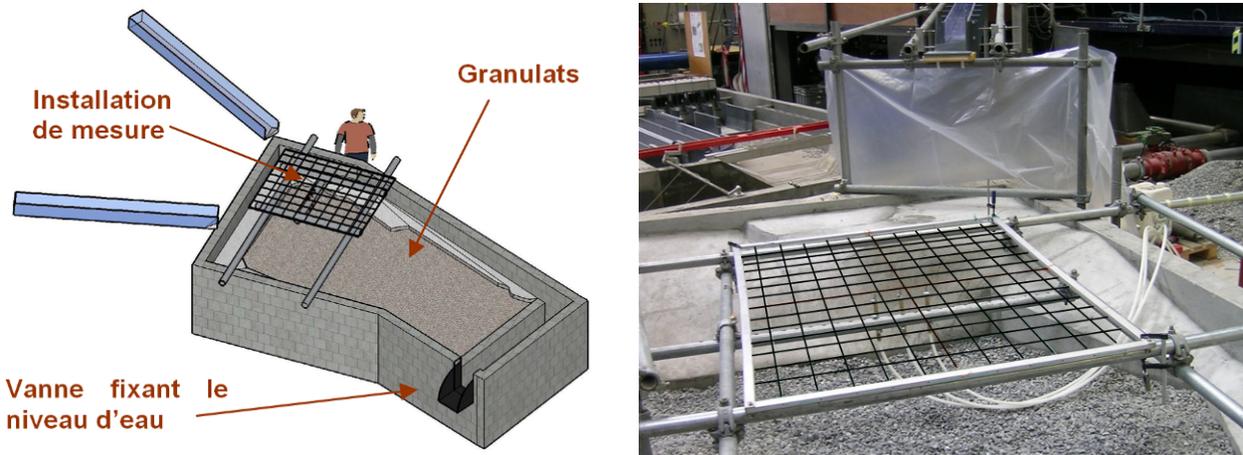


Figure 8: Dispositif permettant de délimiter la zone d'impact du jet et d'y mesurer les pressions

La Figure 9 illustre schématiquement la zone d'impact. La zone d'émission du jet (la fin du saut de ski) y est également indiquée pour une meilleure compréhension. La zone d'impact du jet correspond à une forme de volute. Le noyau du jet (*core jet*) n'est plus clairement identifiable. La forme observée du jet évolue vers un aplatissement avec l'augmentation du débit, voir également Figure 5. Cette constatation est due à la forme du saut de ski avec sa lame coupé en biais ainsi que de la hauteur d'eau à chaque débit. Il a été observé que plus le niveau d'eau augmente (donc plus le débit augmente) moins la nappe supérieure du jet subit l'effet déviateur du saut de ski. Raison pour laquelle le jet perd de sa longueur et s'aplatit pour prendre une forme plus proche d'un jet rectangulaire. On peut dès lors remarquer que la forme du jet durant sa chute évolue considérablement par rapport à la forme de départ.

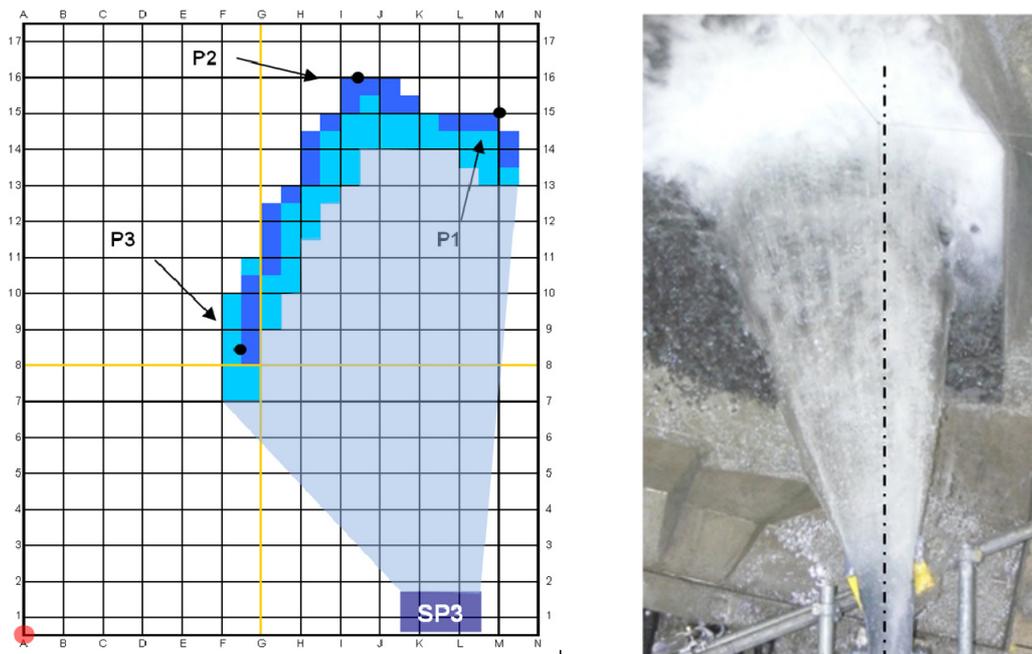


Figure 9: Schéma de la forme typique sur modèle physique de la zone d'impact du jet pour l'évacuateur No. 3 à 50% de sa capacité, $950 \text{ m}^3/\text{s}$ (gauche). La fin du saut de ski SP3 comme origine du jet est également indiquée. Les cercles noirs représentent les endroits où les pressions sous le jet dans la zone d'impact ont été mesurées, un carré = $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Photo du jet vu par-dessus de l'évacuateur No. 3 montrant la dispersion du jet décollant du saut de ski donnant la forme caractéristique de la zone d'impact (droite).

IV.3 Fosses d'érosion

Durant les essais menés dans le cadre de ce travail, les fosses d'érosions ont été relevées (forme, profondeur d'affouillement et hauteur des dépôts aval) pour les différents débits et combinaisons des évacuateurs. Les résultats obtenus avec le modèle sédimentaire de Flow-3D sont présentés et comparés aux résultats de la modélisation physique. Ces résultats ont été validés par les relevés in-situ, essentiellement la position, la forme et la profondeur de la fosse d'érosion de l'évacuateur No. 4 car cette dernière se trouve intégralement dans les alluvions meubles.

Avant de réaliser les simulations de l'érosion dans le modèle physique, des tests de la capacité de Flow-3D à pouvoir simuler l'érosion et le transport solide dus à un jet plongeant ont été effectués. Ainsi les expériences de Pagliara et al. (2008) [8], portant sur l'évolution temporelle de l'affouillement d'un lit sédimentaire du à des jets plongeant ont été modélisées, simulées et les résultats validés. Ensuite, le modèle sédimentaire de Flow-3D a été utilisé pour simuler l'érosion au pied des deux évacuateurs de cru ensemble. Les résultats des géométries obtenues par simulation numérique et sur le modèle physique sont donnés à la Figure 10. La localisation ainsi que le développement spatial des zones d'affouillement et des dépôts aval sont très proches.

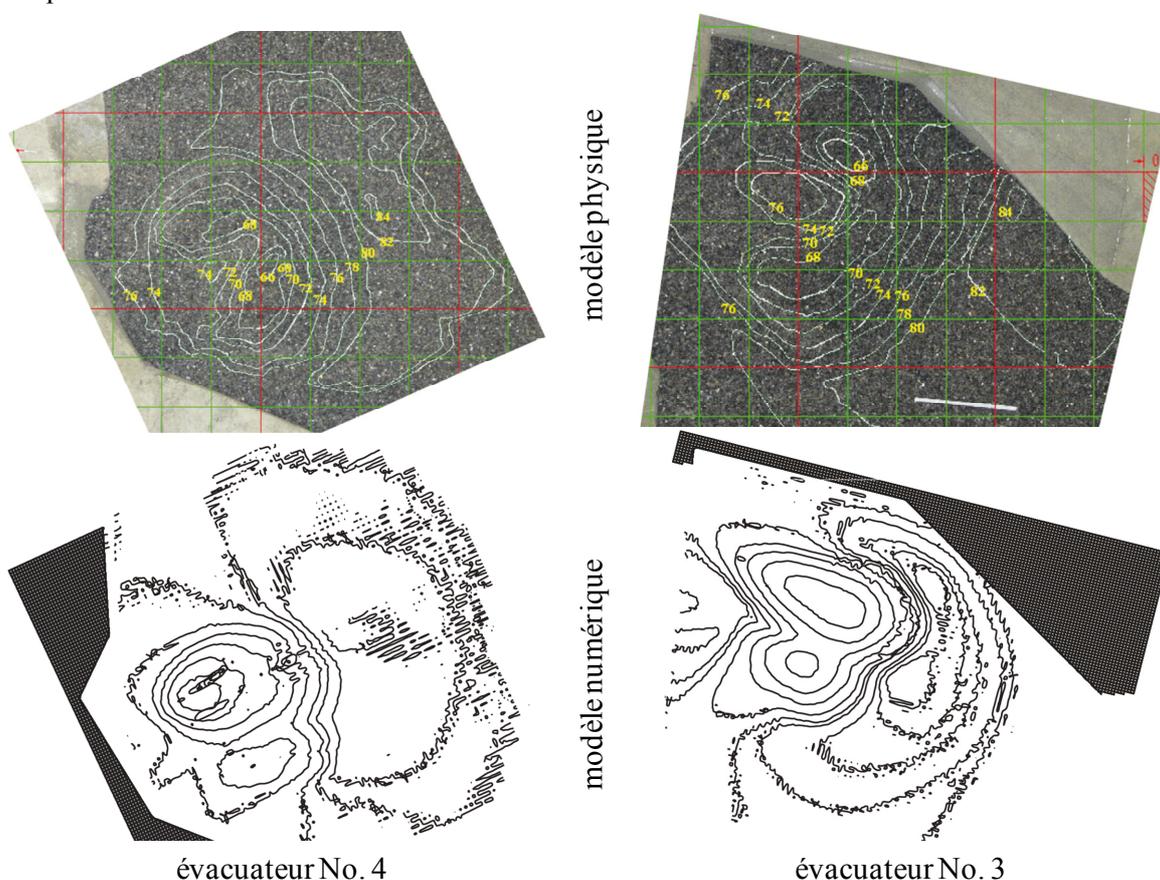


Figure 10: Comparaison entre les géométries pour les fosses d'érosion à l'aval des évacuateurs de crue issues du modèle numérique et du modèle physique, fonctionnant à 100% de leur capacité. Les fosses ainsi que les dépôts aval ont été simulés correctement en termes de position, profondeur, étendue et volume.

Le Tableau 1 synthétise les profondeurs d'érosion et les hauteurs des dépôts à l'aval des fosses. Les profondeurs d'érosion obtenues sont en bon accord avec les essais physiques.

Tableau 1: Comparaison entre les géométries issues du modèle numérique et du modèle physique pour les évacuateurs No. 4 et 3 fonctionnant à 100%.

Résultats de la modélisation	Profondeur d'érosion [m]		Hauteur du dépôt aval [m]	
	numérique	physique	numérique	physique
Fosse d'érosion à l'aval de l'évacuateur No. 4	0.135	0.108	0.092	0.123
Fosse d'érosion à l'aval de l'évacuateur No. 3	0.138	0.154	0.013	0.123

Pour des raisons de temps de calculs élevés (le temps de simulation est de l'ordre de 15 min correspondant à environ 15 jours de calculs pour chaque test), les essais numériques avec modèle de transport solide ont été relativement courts, la profondeur ultime d'érosion n'étant probablement pas encore atteinte. La durée des essais physiques était de 45 minutes.

V CONCLUSIONS

Les deux évacuateurs de crue ainsi que les différentes fosses d'érosion du barrage de Koman en Albanie ont été étudiés sur un modèle hydraulique à l'échelle 1:65 et par modélisation numérique avec Flow-3D. L'étude portait entre autres sur l'écoulement dans les auges des sauts de ski, les trajectoires des jets ainsi que sur les zones d'impact et les fosses d'affouillement.

Les résultats de l'étude mixte, numérique et physique, ont montré que, pour les deux évacuateurs, les sauts de ski ne peuvent plus dévier les jets convenablement au-delà de 50% de leur capacité. La déflexion ne se fait plus comme prévu théoriquement, on observe que la longueur du jet diminue, que la zone d'impact et la fosse d'érosion s'approchent du pied du barrage. Les résultats de la modélisation physique et numérique ont été validés par les observations in situ. Le modèle physique et la simulation numérique permettent de reproduire fidèlement la création d'une fosse d'érosion, dans des alluvions, due à l'impact d'un jet plongeant.

Malgré de nombreuses simplifications du modèle numérique (surtout l'effet d'aération et la limite due au maillage) et des effets d'échelle du modèle physique, cette approche hybride numérique et physique permet de mieux comprendre les phénomènes en jeu. De plus, elle permet de prédire l'effet d'une éventuelle mesure à prendre au niveau du prototype comme la modification de la cuillère du saut de ski afin de garantir à long terme la stabilité du barrage et le bon fonctionnement des évacuateurs de crue.

Comme dans toute modélisation, qu'elle soit numérique ou physique, et tout particulièrement dans le domaine du transport solide, les résultats sont à considérer comme des valeurs qualitatives, la quantification exacte étant plus difficile à atteindre. Malgré les efforts de l'ingénieur expérimentateur et l'application stricte des lois de similitudes hydrauliques (et de celles du transport solide), la transposition des résultats et des conclusions reportées au prototype nécessitent beaucoup d'expérience et de savoir-faire. Le calage avec des observations sur modèle physique ou prototype est indispensable pour obtenir des résultats qualitatifs fiables par la modélisation numérique. Un sens critique, du talent d'interprétation et une mise en question de ce qui est fait demeurent indispensables. Néanmoins, les outils et méthodes à disposition de l'ingénieur-chercheur aujourd'hui permettent de faire de la modélisation physique et numérique un outil éprouvé pour un transfert avec succès des résultats vers l'application pratique.

REMERCIEMENTS

L'étude a été réalisée pour le propriétaire et les autorités locales, Koman HPP et l'Albanian Power Corporation KESH, ainsi que pour leur consultant Pöyry Energy Ltd. à Zürich. Le projet est financé par la Direction pour le développement et la coopération (DDC) du Secrétariat d'Etat à l'économie Suisse (SECO) et la Banque Mondiale dans le cadre du projet de réhabilitation du barrage de Koman.

REFERENCES

- [1] EPFL-LCH (2009). Koman Dam Rehabilitation Project. Hydraulic model tests for spillways and plunge pool - Report on physical model, *Rapport d'étude du LCH No. 2/2009*, non publié.
- [2] Epely Chauvin, G. (2009). Dimensionnement de bassins de dissipation d'énergie non-revêtus pour des grands barrages en béton à l'aide de modélisation 3D, *Travail de Master en Génie Civil*, EPFL-ENAC-LCH
- [3] Malquarti, M. (2009). Étude de pressions générées par des jets à hautes vitesses, mesures en laboratoire et étude de cas, *Travail de Master en Génie Civil*, EPFL-ENAC-LCH
- [4] Flow Science (2008). Flow3D User's Manual – Theory, Flow Science Flow 3D v9.3
- [5] ASCE (1995). Hydraulic design of spillways, *Technical Engineering and Design Guides as adapted from the U.S. Army Corps of Engineers*, No.12, American Society of Civil Engineers
- [6] Viatcheslav, O. (1974). Die Bestimmung des Strahlsteigwinkels beim Abfluss über einen Sprungschanzentüberfall, *Wasserwirtschaft-Wassertechnik*, 24. Jahrgang, Heft 9
- [7] Kawakami, K. A (1973). Study on the computation of horizontal distance of jet issued from ski jump spillways, *Trans. of the Japanese Society of Civil Engineers*
- [8] Pagliara, S., Hager, W. H., and Unger, J. (2008). Temporal Evolution of Plunge Pool Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 11, 1630–1638