

Les ouvrages hydrauliques annexes comme des éléments de conception et de sécurité des barrages (Résumé élargi)

Anton J. SCHLEISS

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Station 18, 1015 Lausanne, Suisse – anton.schleiss@epfl.ch et Président de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB-ICOLD)

La conférence invitée souligne que les ouvrages annexes sont des éléments importants pour la conception et la sécurité structurale du barrage. Après une introduction générale sur l'importance des barrages pour le développement des infrastructures de l'eau vitales partout dans le monde, les ouvrages hydrauliques annexes aux barrages sont brièvement décrits comme éléments de conception et de sécurité. Les enjeux du choix ainsi les défis de dimensionnement pour les différents ouvrages annexes sont abordés et illustrés avec quelques exemples de recherche.

Mots-clés : ouvrages hydrauliques annexes aux barrages, évacuateurs de crues, vidanges de fond, prises d'eau, dérivation provisoire, affouillement, PKW, modélisation physique.

Appurtenant hydraulic structures as design and security elements of dams (extended abstract)

The keynote lecture addresses the appurtenant hydraulic structures as design and security elements of dams. After a general introduction on the importance of reservoirs and dams for the worldwide development of vital water infrastructure, the appurtenant hydraulic structures are briefly described as key elements for the conception of the dam and its security. The question of choice and the challenges for the design of the different hydraulic appurtenant structures are discussed and illustrated with some examples of research projects.

Key words: appurtenant hydraulic structures for dams, spillways, bottom outlets, intakes, river diversion, scour, PKW, physical modelling.

I INTRODUCTION : L'IMPORTANCE DES BARRAGES ET RESERVOIR POUR LE DEVELOPEMENT

En observant les marches financières on peut l'avoir l'impression que l'économie mondiale est avant tout contrôlée par des spéculations financières. Néanmoins la santé de l'économie mondiale dépend fortement des investissements dans la réalisation et maintenance des infrastructures. Parmi les derniers les ouvrages hydrauliques et les infrastructures de l'eau sont décisive pour tout développement. L'histoire nous apprend que la prospérité économique d'une société et sa richesse culturelle était toujours étroitement lié au développement des infrastructures de l'eau. En vue des changements climatiques ces infrastructures de l'eau y inclus les mesures de protection contre les crues avec revitalisation des cours d'eau, la force hydraulique, les réservoirs et barrages, joueront et doivent même jouer un rôle plus important comme infrastructures d'atténuation et d'adaptation pour satisfaire les besoins vitaux en eau, énergie et nourriture dans les différents continents pendant ce cycle.

II OUVRAGES HYDRAULIQUES ANNEXES AUX BARRAGES COMME ELEMENTS DE CONCEPTION ET DE SECURITE

Le choix du type de barrage est une tâche complexe qui nécessite la prise en compte d'un nombre particulièrement important de paramètres et d'informations comme la forme de la vallée (morphologie), la géologie, la disponibilité de matériaux de construction, la sismicité, les conditions

climatiques ainsi la maîtrise des crues. L'objectif est de proposer la solution la plus économique tout en garantissant le plus haut degré de sécurité et en minimisant les impacts causés par l'ouvrage, le chantier et l'exploitation. Il faut relever que la problématique de la crue à maîtriser et de l'intégration des ouvrages annexes constitue un critère particulier du choix du type de barrage. Les ouvrages annexes sont donc des éléments importants pour la conception et finalement la sécurité structurale du barrage [Schleiss et Pougatsch, 2011].

Les ouvrages annexes, tels la dérivation provisoire, la vidange de fond, la prise d'eau et l'évacuateur de crue sont le plus souvent des constructions en béton, qui sont, à cause de leur rigidité, sensibles aux tassements différentiels. En règle générale, ces ouvrages en béton sont placés de préférence en dehors des remblais et fondés directement sur une fondation rocheuse. Les ouvrages annexes se laissent plus facilement combiner et intégrer dans les barrages en béton selon les types. Leur possibilité d'implantation influence de manière prépondérante le choix du site d'un barrage.

La sécurité des barrages pendant la construction dépend avant tout du bon fonctionnement de la dérivation provisoire et pendant l'exploitation celle de l'évacuateur de crues ainsi de la vidange de fond. Le bon fonctionnement de la prise d'eau est également important pour la sécurité mais influence surtout l'exploitation économique du barrage.



Figure 1 : Barrage de Jiroft en Iran lors d'une crue de 5000 m³/s

III L'ENJEU DU CHOIX ET LES DEFIS DE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES ANNEXES

Lors de la conférence invitée les enjeux du choix ainsi les défis de dimensionnement pour les différentes ouvrages annexes seront brièvement abordés. Ensuite les exemples suivants de recherche qui illustrent ces défis et enjeux sont présentés.

Protection de surface des digues a faible hauteur pour permettre un déversement contrôlé pendant des crues

Un système de macro-rugosités pour la protection superficielle de barrages en remblais, envisagé pour la réhabilitation d'évacuateurs de crues de barrages existants, a été développé pour des barrages allant jusqu'à 30 m de hauteur [Manso et Schleiss, 2002]. Ce système, qui peut être utilisé également

pour la protection des batardeaux submersibles, est composé de blocs préfabriqués en béton posés sur une couche de drainage, dont la stabilité est assurée par leur poids propre. Plusieurs géométries d'éléments ont été développées et testées dans un modèle physique du parement d'un barrage avec une pente de 1V:3H. Basé sur l'étude expérimentale systématique, un modèle de stabilité a été développé pour le calcul des coefficients de sécurité. Ce modèle est basé sur la stabilité au renversement (mécanisme de rupture dominant) et des hypothèses concernant les forces hydrodynamiques, la pression hydrostatique et la concentration d'air dans l'écoulement. Des diagrammes de dimensionnement ont été élaborés qui permettent une estimation rapide des caractéristiques du système de protection, comme les dimensions et le poids des blocs, résistant à un certain débit spécifique, pour plusieurs marges de sécurité.

Protection des sorties des galeries de dérivation contre l'érosion

Des prismes de béton obtenus par une séparation diagonale des cubes ont été utilisés avec succès en pratique comme mesures de protection flexible et économique à la restitution des galeries de dérivation sortant sur un lit mobile. Les essais systématiques en laboratoire ont permis de confirmer la performance des prismes et de développer des critères de dimensionnement [Emami et Schleiss, 2006a]. Ces prismes en béton ont par leur comportement flexible et robuste avec un grand avantage par rapport à la solution traditionnelle d'une dalle de protection en béton. Des critères de dimensionnement et des formules pour l'estimation de la géométrie de la fosse d'érosion et son lieu ainsi que la taille nécessaire des prismes et la surface à protéger ont été développés par les essais systématiques en laboratoire. Plusieurs applications pratiques ont prouvé l'efficacité de la protection avec des prismes en béton à la sortie des galeries de dérivation [Emami et Schleiss, 2006b] et même comme protection des rives des rivières en montagne [Schleiss et al. 1998].

Augmentation des pertes d'énergie sur les évacuateurs en marches d'escalier et protection contre les effets de cavitation

Pour augmenter les pertes de charge sur les évacuateurs en marches d'escalier, les marches ont été équipées avec seuils et avec blocs dans le cadre d'une étude expérimentale pour des inclinaisons de coursier de 18.6° et 30° [André et al. 2008]. Globalement, cette a permis la compréhension du comportement hydraulique complexe de ces écoulement turbulents et aérés et du phénomène de dissipation d'énergie. Elle a également fourni une définition réaliste des différentes hauteurs pouvant caractériser l'écoulement aéré et leur implication respective dans l'estimation de l'énergie dissipée.

L'analyse comparative de l'énergie dissipée de systèmes autres que les marches conventionnelles a mis en évidence la contribution importante des pertes de charge locales dues aux effets de forme causées par la géométrie des macro-rugosités et aussi par leur distribution. Jets internes transversaux, zones de séparation vortex/jet ou vortex/vortex, contraction, sillage, changement de pente augmentent la rugosité effective du système de protection.

Concernant l'efficacité des revêtements de macro-rugosités, les systèmes homogènes tel qu'un seuil par nez de marche et sur toute leur largeur du coursier, n'améliorent ni la position du début d'entraînement d'air, ni les changements de régime, ni la dissipation d'énergie par rapport à une couche de marches conventionnelles. Par contre, une distribution irrégulière des éléments de macro-rugosités modifie significativement l'écoulement et améliore le taux d'énergie dissipée et réduit le risque de cavitation au début du coursier pour des débits spécifiques élevés.



Figure 2 : Evacuateur en marches d'escalier avec changements de pente de l'aménagement de pompage-turbinage de Siah Bishe en Iran.

Les évacuateurs en marches d'escalier avec changements de pente et aérateurs

La dissipation d'énergie prononcée rend les coursiers en marches d'escalier attrayants sous diverses conditions, à savoir en tant que déversoirs sur les barrages - poids en BCR et sur les flancs de vallée pour des digues en remblai. Pour ce cas un changement de pente abrupte peut être nécessaire pour suivre la topographie du site et minimiser les excavations nécessaires et donc des coûts respectifs [Baumann et al. 2006].

L'effet d'un changement de pente abrupt sur les caractéristiques d'écoulement en mousse, en analysant l'entraînement d'air, le gonflement de l'écoulement, le développement de la vitesse et de la pression dynamique ainsi que de la dissipation de l'énergie a été étudié systématiquement avec des essais en laboratoire dans un canal à relativement grand échelle avec des changements de pente de 50° à 18.6° ($\Delta\theta = 31.4^\circ$) et 50° à 30° ($\Delta\theta = 20^\circ$) [Ostad Mirza et al. 2017]. Les résultats indiquent une influence substantielle des changements de pente abrupts sur les propriétés de l'écoulement pour la gamme de profondeurs critiques relatives testée ($2.6 \leq d/h \leq 9.2$), en particulier en comparaison avec les résultats typiques d'écoulement sur coursiers en marches d'escalier à pente constante. Des formules empiriques ont également été développées pour prédire la concentration moyenne d'air et des profondeurs d'écoulement caractéristiques le long du tronçon sous l'influence de la variation de la pente.

Comme déjà mentionné, les évacuateurs en marches offrent l'avantage d'un taux de dissipation d'énergie plus élevé, et un début d'aération superficielle situé plus en amont. Cependant, l'écoulement non-aéré à l'amont du point initial est exposé à un risque de cavitation plus élevé dû au détachement de l'écoulement le long des marches. Jusqu'à récemment, les évacuateurs en marches d'escalier ont été dimensionnés avec des débits spécifiques relativement faible qui conduisait pas à un risque de cavitation. Aujourd'hui, les évacuateurs en marches d'escalier sont conçus avec des débits spécifiques importants. La cavitation l'amont du point initial d'aération superficielle peut être empêchée par un aérateur comprenant un déflecteur sur la première marche. Avec une étude systématique sur modèle réduit la performance de l'aérateur a pu être décrit en fonction de sa conception ce qui a permis de donner des consignes de dimensionnement [Terrier et al. 2015, 2016].

Les déversoirs en touches de Piano (PKW) : formules de dimensionnement, comportement sous l'effet des bois flottants et risque d'érosion à l'aval

Le déversoir labyrinthe présente une alternative intéressante dans les projets de réhabilitation de barrages lorsque la capacité d'évacuation des crues doit être augmentée [Schleiss 2011]. La variante de déversoir en touches de piano (PK-Weir) est particulièrement intéressante par sa structure elle-même et par les conditions d'écoulement qu'elle crée aussi bien en amont qu'en aval de l'ouvrage. Avec des essais en laboratoire systématiques et une analyse paramétrique de la géométrie du PK-Weir des bases fiables pour son dimensionnement hydraulique à l'aide des formules empiriques ont été développées. Les résultats ont été validés avec des données obtenus avec des essais sur modèle physique pour plusieurs projets de réhabilitation des évacuateurs de crues en France [Leite et al. 2012].

Le comportement des PKW sous l'effet des bois flottants a été testé également avec des essais systématiques en laboratoire (Pfister et al. 2013). Il s'avère que la capacité d'un PKW est peu sensible respectivement l'augmentation du niveau d'eau à l'amont reste faible même en cas de grands accumulations de bois flottants.

Des PKW sont aussi utilisés comme évacuateurs de crues en combinaison avec des barrages en rivière avec lit mobile et transport solide. Concernant la stabilité du PKW l'affouillement à l'aval est d'un intérêt particulier. Avec des essais hydrauliques systématiques des formules empiriques ont été développées qui permettent l'estimation de l'affouillement à l'aval du PKW [Justrich et al. 2016].

IV REFERENCES

- André S., Boillat J.-L., Schleiss A. (2008) - Ecoulements aérés sur évacuateurs en marches d'escalier équipées de macro-rugosités – Partie I: caractéristiques hydrauliques. *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, 63(1): 91-100
- André S., Boillat J.-L., Schleiss A. (2008) - Ecoulements aérés sur évacuateurs en marches d'escalier équipées de macro-rugosités – Partie II: dissipation d'énergie. *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, 63(1): 101-108
- Emami S. and Schleiss A.J. (2006). - Design of erosion protection at diversion tunnel outlets with concrete prisms. *NRC-CNRC Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(1):81-92.
- Emami S., Schleiss A.J. (2006) - Performance of large concrete prisms as erosion protection at Seymareh diversion tunnel outlets during a large flood. *Commission Internationale des Grands Barrages - Vingt Deuxième Congrès des Grands Barrages, CIGB-ICOLD, Barcelone, Vol. V Communications, C12, pp. 799-813.*
- Baumann A., Arefi F., Schleiss A.J. (2006). - Design of two stepped spillways for a pumped storage scheme in Iran. *Proc. of Int. Conf. Hydro 2006 - Maximising the benefits of hydropower, Porto Carras, Greece, 25-27 September 2006 (CD-ROM).*
- Justrich S., Pfister M., Schleiss A. J. (2016). - Mobile Riverbed Scour Downstream of a Piano Key Weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11): 04016043.
- Leite Ribeiro, L., Bieri, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A., Singhal, G., Sharma, N. (2012). - Discharge Capacity of Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2): 199-203
- Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J., Boillat, J.-L. (2012). - Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50 (4): 400-408
- Manso P.A.; Schleiss A. J. (2002) - Stability of concrete macro-roughness linings for overflow protection of earth embankment dams. *NRC-CNRC Canadian Journal of Civil Engineering*, 29: 762 – 776..
- Ostad Mirza M, Gamito de Saldanha Calado Matos J. P., Pfister M. and Schleiss A.J. (2017). - Effect of an abrupt slope change on air entrainment and flow depths at stepped spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 55(3): 362-375.
- Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B., Schleiss, A.J. (2013). - Debris-Blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir-type approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(11): 1134-1141
- Schleiss, A. J. (2011). - From Labyrinth to Piano Key Weirs – A historical review” *Proc. of International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs (PKW 2011), 9-11 February 2011, Liège, Belgium, Erpicum et al. (eds), ISBN 978-0-415-682282-4, pp. 3-15*
- Schleiss A.J., Aemmer M., Philipp E., Weber H. (1998). - Erosion protection at mountain rivers with buried concrete blocks (in German). *Wasser, energie, luft*, 90(3/4): 45-52.
- Schleiss A.J. et Pougatsch H. (2011). - *Barrages - Du projet à la mise en service*. *Traité de Génie Civil, Volume 17, Presse polytechnique et universitaire romande, PPUR, 700 pages*
- Terrier S., Pfister M. & Schleiss A.J. (2015). - Comparison of chute aerator effect on stepped and smooth spillways, *Proc. of Int. Congress IAHR 2015 (on-line version)*. The Hague (The Netherlands), 19.6-3.7.2015, http://app.iahr2015.info/programma_details/3085

Terrier, S., Pfister, M., Schleiss, A.J. (2016). - Effect of deflector aerator on stepped spillway flow. In B. Crookston & B. Tullis (Eds.), *Hydraulic Structures and Water System Management*. 6th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Portland, OR, 27-30 June (pp. 168-177). doi:10.15142/T330628160857 (ISBN 978-1-884575-75-4).