

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 115 (2023)
Heft: 3

Artikel: L'ingénierie suisse des barrages dans le monde
Autor: Droz, Patrice
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1050005>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

L'ingénierie suisse des barrages dans le monde

Patrice Droz

Résumé

Les ingénieurs et entreprises suisses ont depuis longtemps montré un intérêt à exporter leur savoir-faire et leur expérience à l'étranger dans le domaine des barrages et des aménagements hydroélectriques. Cet article présente un tour d'horizon des activités récentes hors de Suisse dans ce domaine.

Zusammenfassung

Schweizer Ingenieure und Unternehmen haben seit langem Interesse daran gezeigt, ihr Know-how und ihre Erfahrung im Bereich Stauanlagen und Wasserkraftanlagen ins Ausland zu exportieren. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die jüngsten Aktivitäten ausserhalb der Schweiz in diesem Bereich.

1. Introduction

Le développement des barrages et de l'hydroélectricité en Suisse a commencé à la fin du 19^e siècle, tirant parti de la topographie du pays ainsi que de ses ressources en eau. Le développement de l'hydroélectricité a favorisé l'industrialisation du pays ainsi que son réseau de chemins de fer électriques. Mais progressivement, forts de leur savoir-faire acquis dans les Alpes, les ingénieurs et entrepreneurs suisses ont exporté leur expérience à l'étranger, d'abord en Europe, puis dans le monde entier.

À l'occasion de l'anniversaire du Comité suisse des barrages, il est intéressant de décrire brièvement quelques projets internationaux récents auxquels ont participé des bureaux d'ingénieurs-conseils et des experts, des entrepreneurs et des laboratoires de recherche suisses. Bien entendu, le présent document n'a pas pour but d'être exhaustif: une sélection a été faite par l'auteur, en tenant compte de l'importance du projet, des difficultés rencontrées dans la réalisation des projets, ainsi que des techniques spécifiques utilisées et des solutions retenues.

2. Développement de nouveaux projets de barrages

2.1 Europe

La centrale hydroélectrique de Kárahnjúkar (Islande), d'une capacité de 690 MW avec

une hauteur de chute brute de 600m, exploite l'eau de deux rivières glaciaires prenant leur source dans le grand glacier Vatnajökull. Le barrage en enrochement à masque amont de Kárahnjúkar (CFRD) a une hauteur de 198m. Des conditions difficiles ont été rencontrées lors de l'excavation du tunnel d'aménée en raison d'importants apports d'eau souterraine et de l'instabilité locale de la roche. Les retards qui en ont résulté ont nécessité l'accélération du remplissage, de la mise sous pression et de la mise en service du tunnel d'aménée. Pour ce faire, le tunnel d'aménée a été rempli en deux étapes. Dans un premier temps, les conduites forcées et la partie inférieure du tunnel ont été remplies à l'aide des eaux souterraines; ainsi l'eau stockée dans la partie inférieure du tunnel, derrière un batardeau temporaire, a été utilisée pour commencer les essais de plusieurs turbines pendant que les travaux de finition se poursuivaient dans la partie supérieure du tunnel. Une fois les travaux de finition terminés, le reste du tunnel a été rempli et mis en pression (Kaelin, 2009). Le corps du barrage est également situé sur une faille, ce qui a nécessité la construction d'un joint dans le mur de pied et le parement en béton. Des modélisations hydrauliques de ce projet ont été menées dans les deux Laboratoires Hydrauliques des Écoles Polytechniques Fédérales de Lausanne (Bollaert, 2003) et de Zurich (Berchtold & Pfister, 2011).

Le barrage de Neikovtsi est en cours de construction dans le nord de la Bulgarie et fait partie d'un projet d'approvisionnement en eau. La hauteur maximale du barrage est de 47,2m; la crête mesure 200m de long et le volume du remblai est d'environ 300 000 m³. Le barrage en enrochement à noyau d'asphalte (ACRD) est fondé sur la roche. Le noyau est vertical et se trouve dans la partie centrale du barrage. Il part du sommet d'une galerie d'injection encastree dans la fondation rocheuse. Pendant la phase de conception, une comparaison a été faite entre les déplacements horizontaux dus à un séisme obtenus par une analyse dynamique et par deux méthodes analytiques simplifiées. Dans ce cas, les résultats de l'analyse dynamique et de l'analyse simplifiée étaient presque identiques. Cependant, l'analyse dynamique utilisant la méthode des éléments finis fournit beaucoup plus d'informations sur le comportement sismique du barrage (Tzenkov, 2023).

Le projet hydroélectrique Devoll est situé à environ 70km au sud-est de la capitale albanaise Tirana et consiste en deux centrales hydroélectriques, Banja et Moglicë. Les centrales hydroélectriques auront une capacité installée totale de 256 MW et une production annuelle moyenne d'environ 703 GWh, augmentant ainsi la production d'électricité albanaise d'environ 17%. La centrale la plus basse (Banja) a été mise en service en 2016. La construction de la centrale hydroélectrique de Moglicë a commencé en 2014 avec une capacité installée de 184 MW. Le barrage de 167m de haut est un ACRD avec une longueur de crête de 370m. C'est l'un des plus hauts barrages de ce type dans le monde (Tirunas, 2018).

2.2 Moyen-Orient

Le développement récent de projets hydroélectriques et la construction de nombreux grands barrages en Turquie ont offert aux sociétés de conseil suisses l'opportunité de participer à la conception et

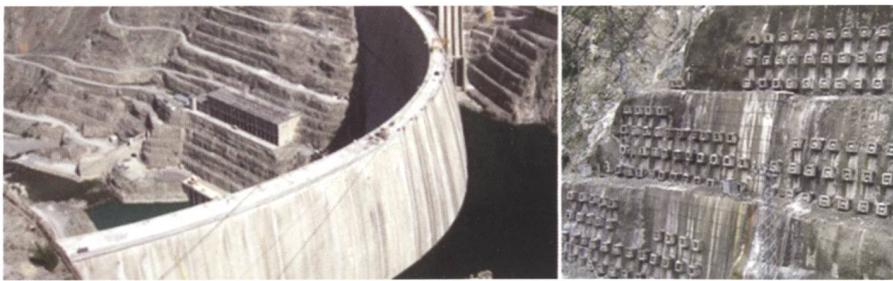


Figure 1: Vue amont du barrage de Deriner et stabilisation des appuis par ancrages.

à la construction de deux barrages très importants en Anatolie.

Le barrage de Deriner est un barrage voûte à double courbure situé sur la rivière Çoruh dans le nord-est de la Turquie. Avec une hauteur de 249 m et un volume de béton de 3,5 Mm³, il est actuellement le deuxième plus haut barrage de Turquie. La capacité installée de la centrale est de 670 MW, avec quatre turbines Francis, et sa production annuelle d'électricité s'élève à 2118 GWh, ce qui représente environ 1,1% de la production totale d'énergie en Turquie et environ 6% de la capacité de production d'énergie hydroélectrique du pays. Des sociétés de conseil suisses ont participé au projet, soit du côté du propriétaire (Wieland et al., 2008), soit du côté de l'entrepreneur turc (Müller, 2009). Les travaux de construction ont commencé en 2000 et le barrage a été mis en service en 2012. Le système d'évacuation des crues est particulièrement impressionnant avec deux déversoirs vannés sur les culées gauche et droite du barrage, d'une capacité totale de 2225 m³/s et huit évacuateurs de demi-fonds d'une capacité totale de 7000 m³/s. Le volume total des matériaux excavés s'élevait à 8,7 Mm³, et pour la stabilisation des appuis, plus de 2000 ancrages précontraints de 2 MN ont été installés (Figure 1).

Le barrage et la centrale hydroélectrique d'Illisu (1200 MW) sont situés sur le

Tigre, dans le sud-est de la Turquie, près de la frontière avec l'Irak (Figure 2). L'aménagement est composé d'un barrage en enrochement à masque amont de 135 m de haut et de 2289 m de long, d'un barrage-poids, d'un évacuateur de crue, de prises d'eau et de tunnels d'amenée d'un diamètre maximal de 13 m, d'une centrale électrique (6 turbines Francis d'une capacité totale de 1200 MW), d'un canal de fuite et de trois tunnels de dérivation de la rivière (Ø12 m), l'un d'eux servant de vidange de fond. La construction a été achevée en 2020 (IM, 2023; Stucky Gruner, 2023).

2.3 Asie centrale

Le barrage de Rogun est en cours de construction au Tadjikistan et sera achevé par étapes jusqu'en 2030. Il s'agit d'un barrage en enrochement à noyau en terre (ECRD) de 325 m de haut. Des études approfondies ont été menées afin d'évaluer son impact hydraulique et sociétal sur les pays riverains (Pöyry, 2014). Actuellement, plusieurs sociétés de conseil suisses ainsi que des entrepreneurs participent activement à la conception détaillée et à la construction du barrage. Le barrage est situé dans une région hautement sismique dans les montagnes du Pamir et une faille active traverse l'empreinte du barrage parallèlement à son axe. Les conditions géologiques difficiles, avec des intrusions de

sel et la forte teneur en sédiments de la rivière Vakhsh, constituent d'autres défis à relever.

Pendant la construction de la centrale hydroélectrique de Sangtuda 2, également au Tadjikistan, de graves infiltrations d'eau se sont produites dans l'excavation de la centrale au fil de l'eau. Un soutien spécifique a été apporté pour comprendre les conditions hydrogéologiques particulières qui ont conduit au drainage d'un aquifère karstique régional et pour concevoir des mesures d'atténuation appropriées (Ghader & Bussard, 2013). Un pompage d'environ 10 m³/s a permis de mener à bien le projet.

Rudbar Lorestan est un barrage en enrochement à noyau en terre d'une hauteur de 156 m. Il est situé dans un canyon étroit de la chaîne de montagnes Zagros, très active sur le plan sismique, à l'ouest de l'Iran. Le barrage est soumis à de multiples risques sismiques pouvant provoquer en particulier des mouvements le long de discontinuités multidirectionnelles et de failles dans l'empreinte du barrage. En raison de la présence de ces discontinuités et de ces failles secondaires, le barrage poids en béton initialement prévu avec un joint de glissement à travers la faille principale a été remplacé par un barrage en enrochement à noyau en terre conçu de manière conservatrice. Le scénario sismique le plus défavorable est un tremblement de terre de magnitude 7,5 à une distance de 1,5 km du site du barrage, provoquant une accélération horizontale maximale de 0,75 g et des mouvements maximaux de 1,5 m le long des failles dans l'empreinte du barrage. Une large revanche a été prévue pour faire face aux déformations du corps du barrage lors d'un séisme et aux ondes provoquées par d'éventuels mouvements de masse dans le réservoir. La première mise en eau du réservoir a commencé en 2017 (Wieland, 2019).

2.4 Asie du Sud-Est

L'aménagement hydroélectrique au fil de l'eau de Xayaburi (Figure 3) est situé sur le cours principal du Mékong, au Laos, à environ 100 km en aval de la ville de Luang Prabang. Le projet comprend une écluse pour la navigation, un déversoir et un bloc intermédiaire, ainsi que la centrale principale d'une capacité installée de 1285 MW. Le projet comprend également des installations de pointe pour la migration des poissons vers l'amont et vers l'aval. Le projet a été mis en service en 2019 (Morier-Genoud, 2019).

Actuellement, la centrale au fil de l'eau de Luang Prabang, d'une puissance de



Figure 2: Barrage d'Illisu, centrale et évacuateur de crue.

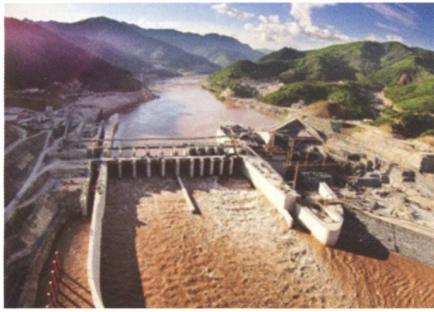


Figure 3: Vue du barrage de Xayaburi.

1460 MW, située à environ 30 km en amont de Luang Prabang au Laos, est en cours de construction, et des consultants suisses y participent.

Nam Ou VI, situé le long d'un affluent du Mékong au Laos, est un barrage en enrochement de 88m de haut avec une géomembrane amont installée selon une conception innovante. Les géomembranes composites en PVC sont aujourd'hui de plus en plus utilisées pour construire des barrages en enrochement, ce qui permet de construire des barrages en remblai à moindre coût. Pour le barrage de Nam Ou VI, le système de géomembrane a été installé en trois étapes successives (Scuero et al., 2016).

Son La et Lai Chau sont des barrages en béton compacté au rouleau (BCR) situés au Viêt Nam. Le point fort de ces projets est l'utilisation de cendres volantes déversées préalablement dans un bassin d'épuration sous forme de boue, car personne au Viêt Nam n'avait l'usage de ce type de matériau. Son La a été le premier barrage en béton compacté au rouleau au monde à utiliser ce type de cendres comme matériau principal entrant dans la recette du béton. Lai Chau l'a de nouveau utilisé, ainsi que d'autres grands barrages en béton compacté au rouleau au Viêt Nam et, plus tard, au Laos. Les deux projets ont été achevés avant la date prévue (Conrad et al., 2010; Conrad et al., 2014).

2.5 Afrique

Il convient de mentionner la conception et la supervision de la construction d'un certain nombre de barrages d'irrigation, d'approvisionnement en eau et de protection contre les inondations en Afrique du Nord par diverses sociétés de conseil suisses. Des consultants suisses ont également été membres de groupes d'experts pour différents barrages en Afrique et ont donné des conseils sur la création de l'autorité de surveillance des barrages en Éthiopie, le pays qui compte le plus grand nombre de barrages en construction en Afrique. Au cours de la dernière décennie, un certain

nombre d'études sur modèles hydrauliques pour des projets de barrages africains ont été réalisées dans les laboratoires hydrauliques des Ecoles Polytechniques Fédérales de Lausanne (Stojnic et al., 2018) et de Zurich (p. ex. Arnold et al., 2018). Des études sur la gestion des ressources en eau méritent également d'être mentionnées (Gamito de Saldanha Calado Matos & Schleiss 2017).

2.6 Amériques

La centrale hydroélectrique de Toachi-Pilatón utilise l'eau des rivières homonymes dans le nord-ouest de l'Équateur. La centrale a une capacité de 255 MW et est reliée au barrage-poids en béton de Toachi, d'une hauteur de 59m. La construction s'est achevée en 2015 (Lombardi, 2023).

La centrale hydroélectrique de Cerro del Águila est située dans les Andes péruviennes, à environ 270 km de la capitale Lima. Ce nouvel aménagement sur la rivière Mantaro comprend un barrage poids en BCR de 88 m de haut, un tunnel d'aménée de 5,7 km de long, un puits sous pression de 242 m de haut, une centrale électrique souterraine d'une capacité de 510 MW et un tunnel de fuite de 1,9 km de long. Un déversoir de crête vanné d'une capacité d'évacuation de 7000 m³/s est intégré dans le corps du barrage, ainsi que 6 vidanges de fond d'une capacité totale de 5000 m³/s. Au pied du barrage, une centrale électrique de 3 MW turbine le débit de dotation écologique. La construction a été achevée en 2016 (Lombardi, 2023).

2.7 Océanie

Il convient de mentionner que des essais sur modèle physique des prises d'eau et du système de chambre d'équilibre du système de pompage-turbinage Snowy 2.0, actuellement en construction en Australie, ont été réalisés à l'EPF de Lausanne (PL-LCH EPFL, 2023).

3. Réhabilitation de barrages

3.1 Vieillissement

Le barrage d'Enguri (Figure 4), situé dans la partie occidentale de la Géorgie, est un barrage voûte de 272 m de haut qui, jusqu'à récemment, était le plus haut barrage voûte du monde. Le barrage a été achevé en 1984, plusieurs années après le début de la production d'électricité à hauteur de chute réduite, les groupes ayant été mis en service en 1978-80. Le traitement des fondations du barrage et d'autres travaux se sont poursuivis jusqu'en 1988, première année où le réservoir a pu être rempli à son niveau maximum.

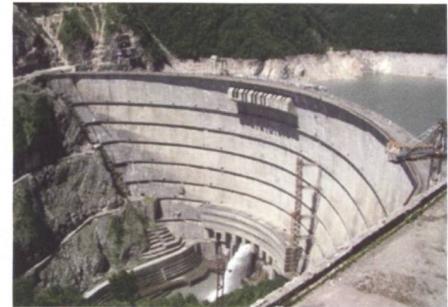


Figure 4: Barrage-voûte d'Enguri, Géorgie.

Après l'indépendance, le barrage a souffert du manque d'entretien et des troubles politiques. Les ouvrages hydromécaniques du barrage, en particulier le système de drainage, les éléments électromécaniques et les vidanges de fond du barrage ont été particulièrement affectés, ce qui a contribué au manque de fiabilité et de sécurité de l'exploitation du barrage.

Une mission d'expertise a alors été organisée par un groupe d'ingénieurs suisses et français afin de définir un programme de réhabilitation (Quigley et al., 2006) qui consistait principalement en :

- l'évaluation de la sécurité générale et l'identification de l'état de l'équipement de surveillance du barrage;
- l'évaluation de la faisabilité de la réhabilitation de l'ensemble du projet; et
- la définition de l'étendue des travaux nécessaires pour le corps du barrage, la galerie d'aménée sous pression et la centrale électrique.

La première phase des travaux de réhabilitation s'est étendue jusqu'en 2006.

La centrale hydroélectrique de Piva joue un rôle important dans le réseau électrique du Monténégro. En service depuis 1976, elle avait besoin d'être réhabilitée. La centrale est située dans la partie nord-ouest du Monténégro, près de la frontière avec la Bosnie-Herzégovine. La grande capacité de stockage du bassin garantit un facteur d'utilisation élevé de la centrale, même pendant les années sèches. Le barrage-voûte de 220m de haut, également connu sous le nom de barrage de Mratinje, est l'un des plus hauts barrages-voûtes d'Europe. L'équipement hydromécanique et électrique ainsi que les structures civiles, y compris le barrage, la prise d'eau et la structure de vidange avaient besoin d'être réhabilités et modernisés afin de prolonger leur durée de vie (Obermoser, 2009). Sur la base d'une investigation détaillée, des mesures de réhabilitation à court terme liées au barrage ont été identifiées, y compris le confortement des galeries non re-

vêtues, l'amélioration du rideau d'étanchéité du barrage et la modernisation du système de surveillance du barrage. Les dommages observés sur le béton du barrage sont mineurs et peuvent être traités dans le cadre d'une maintenance régulière.

Le barrage de Studena, en Bulgarie, est un barrage à contreforts de 55 m de haut situé dans une région sismique active. Le barrage, composé de 25 blocs, est utilisé pour l'approvisionnement en eau, la production d'énergie et la protection contre les inondations. La forte détérioration du parement amont a nécessité une réhabilitation complète. L'alimentation en eau ne pouvant être interrompue, les travaux de réhabilitation ont dû être réalisés, principalement sous l'eau. Un nouveau revêtement synthétique étanche recouvre la face amont du barrage. La réparation du parement amont a constitué un défi majeur en raison de sa géométrie compliquée avec des angles concaves complexes, nécessitant une fixation spéciale de la membrane sous des températures très basses pendant les travaux de construction (Scuero et al., 2019).

Le barrage de Kariba est un barrage-vôûte de 128 m de haut qui a été construit entre 1955 et 1959 sur le fleuve Zambèze, à la frontière entre la Zambie et le Zimbabwe. Les six vannes des évacuateurs de crue situées au centre ont une capacité de décharge totale de 9000 m³/s. Des déversements prolongés d'un volume total de 511,1 km³ à travers les pertuis de janvier 1962 à juin 1981 ont provoqué une fosse d'affouillement de 80 m de profondeur dans le bassin d'amortissement situé immédiatement en aval du barrage (Figure 5).

Une modélisation numérique et des tests hydrauliques ont été réalisés afin de définir la modification de la géométrie du

bassin d'amortissement pour éviter la progression des affouillements (Stojnic et al., 2018). Les travaux d'assainissement sont en cours (Mellal et al., 2023). En outre, les équipements hydromécaniques des 6 pertuis, menacés par le développement de la réaction alcali-granulat du béton du barrage, sont en cours de rénovation.

3.2 Réaction alcali-agrégat

Le barrage de Chambon en France est un excellent exemple de la façon dont les systèmes de géomembrane peuvent contribuer à prolonger la durée de vie d'un barrage. Ce barrage poids en béton de 137 m de haut, achevé en 1935, est affecté par la réaction alcali-granulat (RAG). Une série de sciages a été réalisée et un système de géomembrane PVC drainée a été installé en 1994 pour assurer l'étanchéité du parement amont. En 2013, le propriétaire a décidé de procéder à de nouveaux découpages et de renforcer le barrage au moyen d'un système de tendons et de bandes de carbone sur le parement amont, ce qui a nécessité l'enlèvement du système de géomembrane. Le même système de géomembrane a été réinstallé. Les travaux de réhabilitation ont été achevés avec succès en 2014 (Scuero et al., 2016).

Le barrage de Pian Telessio est un barrage poids arqué achevé en 1955 dans le nord de l'Italie. D'une hauteur de 80 m et d'une longueur en crête de 515 m, le barrage crée un réservoir d'une capacité de 24 Mm³. L'épaisseur du barrage varie de 5,7 m au niveau de la crête à un maximum de 35 m à sa base. Après environ 20 ans d'exploitation, le barrage a montré une dérive vers l'amont allant jusqu'à 60 mm au niveau du pendule central en 2008. Les études ont montré que les déplacements permanents étaient causés par l'expansion

du béton due à la RAG. Les travaux de réhabilitation ont nécessité le découpage de 16 fentes verticales sur des hauteurs de 21 à 39 m, à l'aide d'un fil diamanté (Amberg et al., 2009). D'autres analyses sont encore en cours afin d'évaluer la diminution de la sécurité du barrage en fonction du temps (Stucchi et al., 2023).

Le barrage de Kainji est situé sur le fleuve Niger au Nigeria. L'aménagement souffre de la RAG, en particulier la structure du déversoir, déjà quelques années après sa mise en service en 1968. Les structures en béton massif situées de part et d'autre de l'évacuateur de crues exercent une poussée sur la structure de l'évacuateur. Le mécanisme est confirmé par les résultats d'auscultation et les observations visuelles. Pour atténuer l'effet négatif de la RAG, des travaux de réhabilitation ont été effectués en 1996/97, comprenant le découpage de fentes pour soulager les contraintes de compression, le forage de trous de drainage et l'installation d'instruments de surveillance supplémentaires. Grâce aux travaux de réhabilitation précédents, il y a suffisamment de preuves pour conclure que le déversoir peut être exploité en toute sécurité dans les années à venir. La réhabilitation et la mise à niveau des instruments de surveillance et l'amélioration des procédures de surveillance sont en cours (Ehlers et al., 2023).

3.3 Résistance aux séismes

Le barrage de Fontanaluccia est une structure de 40 m de haut, vieille de près de 100 ans, constituée d'un corps de barrage central en maçonnerie à voûtes multiples avec déversoir et de deux sections latérales de barrage poids en béton cyclopéen. Le barrage est situé dans une vallée étroite de la région italienne des Apennins, une zone sismique modérée à élevée. Suite à la publication de nouvelles directives sur l'évaluation de la sécurité sismique des barrages en Italie en 2019, une réévaluation de la sécurité sismique du barrage a été réalisée. Les résultats des analyses dynamiques ont montré que la section à voûtes multiples est vulnérable à l'action sismique dans la direction transversale, ce qui nécessite un renforcement du barrage. Un programme de modernisation a été développé pour permettre au barrage de rester opérationnel pendant les travaux de réparation (Abati et al., 2023).

3.4 Surélévation

Le barrage voûte de Cambambe sur la rivière Kuanza, en Angola, a été construit de 1959 à 1963. Dès sa conception initiale, il



Figure 5: Barrage voûte de Kariba et évolution de l'affouillement à proximité du pied du barrage.

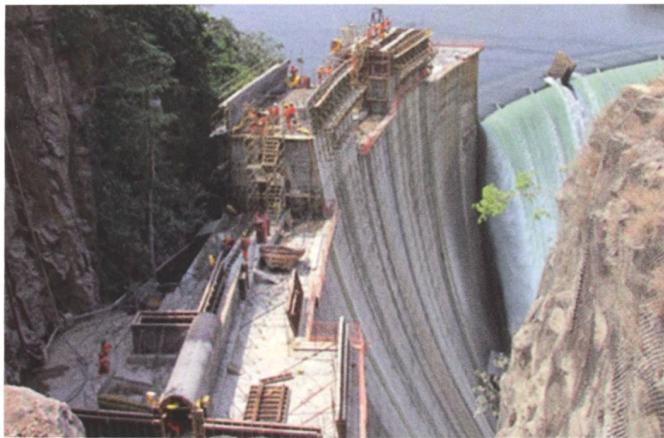


Figure 6: Surélévation du barrage de Cambambe en Angola.

était prévu que le barrage soit rehaussé ultérieurement. Cependant, pour différentes raisons, ces travaux n'ont commencé qu'en 2010. Le barrage voûte initial avait une hauteur de 72 m, avec une longueur de crête de 250 m. La surélévation du barrage était prévue à 20 m, pour une hauteur finale de 92 m. Les travaux de surélévation (Figure 6) ont été achevés en 2020 et se sont déroulés en même temps que la réhabilitation de la centrale électrique existante et la construction d'une nouvelle centrale à ciel ouvert. La gestion des crues pendant la construction du rehaussement du barrage a nécessité le suivi très strict du programme des travaux (Wohnlich *et al.*, 2012).

3.5 Tunnels de dérivation des sédiments

Le réservoir de Nanhua à Taïwan souffre d'une sédimentation importante et continue, menaçant son exploitation durable. Un grand tunnel de dérivation des sédiments pour les acheminer au-delà du barrage a été planifié et construit, ce qui a été vérifié par des experts du Laboratoire d'Hydraulique de l'ETH Zurich (Boes *et al.*, 2018). De même, la rénovation d'un tunnel de dérivation de sédiments existant avec des pavés de granit, au barrage de Mud Mountain dans le nord-ouest des États-Unis, a bénéficié de la recherche et des développements suisses effectués à l'ETH Zurich (Auel *et al.*, 2018), ce qui lui a valu un prix d'ingénierie américain. Une autre étude de modèle de sédimentation avec bassin de décantation et tunnel de dérivation a été menée au Laboratoire de l'ETH Zurich pour un nouveau barrage au Pakistan (Beck *et al.*, 2016; Boes *et al.*, 2019).

4. Sécurité des barrages

4.1 Inspections post-sismiques

Le barrage à contreforts de Sefid Rud, d'une hauteur de 106 m, situé dans les

montagnes de l'Alborz en Iran, a été achevé en 1962. Le barrage a été conçu pour résister à une accélération maximale du sol de 0,25 g. Il a été endommagé par le tremblement de terre de Manjil de magnitude 7,4 du 21 juin 1990, au cours duquel les villes voisines de Manjil et Rudbar ont été détruites. La composante horizontale maximale au sol a été estimée à 0,7 g. Le choc principal a été suivi de plusieurs répliques d'une magnitude allant jusqu'à 6,0. La partie supérieure du barrage a été endommagée. Une fissure horizontale, à environ 18 m sous la crête du barrage, a été observée sur la face amont du barrage, affectant tous les contreforts. Dans un des contreforts, un système de fissures horizontales et inclinées le long des joints de construction a créé un décrochement d'environ 30 mm. Des écailles de béton le long des joints verticaux des blocs ont également été observées, ainsi que des fuites à travers certaines fissures. Une inspection détaillée (Wieland *et al.*, 2003) a conduit à des travaux de réhabilitation comprenant l'injection de résine époxy et la réalisation d'ancrages précontraints dans les appuis.

Le 12 janvier 2010, un tremblement de terre de magnitude 7,0 a causé d'importants dégâts et des pertes humaines en Haïti. Le barrage de Péligré, situé à environ 60 km de l'épicentre, a été inspecté en mars 2010 (Droz *et al.*, 2010). En l'absence d'instruments de surveillance appropriés, seule une inspection visuelle approfondie a pu être réalisée. Aucun signe de dommage structurel n'était visible. En raison de la distance épcentrale relativement importante, le niveau de secousse au barrage était plutôt faible.

4.2 Instrumentation de surveillance des barrages

Les centrales hydroélectriques d'Inga 1 (Figure 7) et 2 sont situées sur le fleuve Congo, à environ 150 km au sud-ouest de



Figure 7: Barrage d'Inga 1, RD du Congo.

Kinshasa. Les deux barrages sont de type contrefort et présentent des mouvements irréversibles vers l'aval depuis des décennies. Malheureusement, l'instrumentation de surveillance des barrages, qui a été installée lors de la construction, dans les années 1970 pour Inga 1 et dans les années 1980 pour Inga 2, était incomplète, en mauvais état, obsolète ou inadéquate pour suivre l'évolution des déformations, en particulier dues à la RAG, et pour évaluer régulièrement la sécurité des barrages. Face à ces problèmes, un projet, financé par la Banque Mondiale, a été mis en œuvre (Droz *et al.*, 2019) afin :

- d'améliorer la qualité de la surveillance des structures en restaurant et en étendant le système de surveillance des barrages et des centrales hydroélectriques, ainsi qu'en installant un réseau géodésique adéquat ; et
- d'effectuer les investigations et les études nécessaires pour déterminer les causes des mouvements irréversibles observés dans la plupart des structures d'Inga 1 et 2.

Le barrage de Sardar Sarovar est un barrage-poids en béton construit sur le fleuve Narmada en Inde. Le barrage a été construit pour fournir de l'eau et de l'électricité à quatre États indiens. Le barrage poids a une hauteur de 136 m et une longueur en crête de 1300 m. Près de 400 capteurs ont été installés vers 1994. Le projet de réhabilitation a été organisé en 5 étapes. En 2021 (étape 1), des tests fonctionnels des instruments existants ont été effectués. Ensuite, le système est passé de manuel à semi-automatique en installant des boîtiers de multiplexage. En 2022, après la réhabilitation partielle des puits existants (étape 2), 3 nouveaux pendules directs de 76 m de long ont été installés (étape 3) avec un système d'acquisition automatique pour mesurer les déformations hori-

zontales du barrage. La mise en service de l'ensemble des pendules automatiques est prévue pour 2023 (étape 4). En passant d'une surveillance manuelle et semi-automatique à une surveillance entièrement automatique (étape 5), le propriétaire du barrage bénéficierait d'une surveillance plus rapide et plus sûre du barrage (Ballarin et al., 2023).

De nombreux barrages au Sri Lanka sont vieillissants et souffrent de diverses déficiences structurelles et de lacunes dans leurs procédures d'exploitation et de maintenance. Pour remédier à ces insuffisances, le projet de sécurité des barrages et de ressource en eau (Dam Safety and Water Resources Planning Project – DSWRPP) a été lancé en août 2008, avec l'aide d'un financement de la Banque mondiale. Outre la réhabilitation de 32 structures majeures de barrage montrant des signes de détérioration, l'amélioration de l'acquisition et de l'analyse des données de surveillance a été réalisée (Sorgenfrei et al., 2011).

L'installation d'un système de surveillance sur et autour du barrage naturel d'Usoy reste un projet exceptionnel. Le lac Sarez, situé dans les montagnes du Pamir au Tadjikistan, a été formé en 1911 lorsqu'un tremblement de terre a déclenché un éboulement qui a enseveli le village d'Usoy sous une énorme masse de débris de roche et de glace de 650 m de haut, qui a endigué la rivière Murghab. Le lac de 60 km de long contenant plus de 17 km³ d'eau a ainsi été créé par le barrage d'Usoy, devenant le plus haut barrage du monde. En raison de son énorme masse, le niveau de connaissance du barrage d'Usoy (Figure 8) est réduit à des hypothèses basées sur des observations et l'analyse de quelques paramètres recueillis dans le passé, en particulier l'évolution du taux d'infiltration à travers la digue naturelle. Afin de réduire le risque lié au lac Sarez, un système de surveillance moderne et un

système d'alarme ont été installés en 2006. Ce système de surveillance concerne également une pente instable, située à environ 4 km en amont du barrage et qui, en cas de rupture, créerait des ondes qui pourraient menacer la stabilité du barrage ou, au moins, modifier son régime d'infiltration (Droz et al., 2006 et 2008).

4.3 Plans d'urgence

Outre une conception sûre et une construction de haute qualité, ainsi qu'un entretien, un contrôle et une surveillance appropriés, le troisième pilier sur lequel repose la sécurité des barrages est la préparation en cas d'urgence qui permet de faire face aux risques résiduels. Récemment, des plans d'urgence (Emergency Preparedness Plan – EPP) ont été élaborés pour 20 barrages en Turquie.

Actuellement, les plans d'urgence du barrage de Rogun (en construction), du barrage de Nurek, une digue de 305 m de haut située directement en aval de Rogun et achevée en 1980, et du barrage de Kariba (tous deux en cours de réhabilitation) sont en cours d'élaboration.

4.4 Formation

Un projet de sécurité des barrages incorporant cinq ouvrages le long des rivières Drin et Mat a été réalisé dans la partie nord de l'Albanie. L'une des composantes du projet était la rénovation et la mise à niveau des instruments de surveillance des cinq barrages. L'objectif était de mettre en place un système de surveillance moderne et durable. Les nouveaux instruments contribueront à améliorer la sécurité à long terme des barrages. Toutefois, la sécurité ne peut être améliorée que si les installations sont correctement entretenues, si les mesures sont fréquemment relevées et les valeurs sont immédiatement évaluées et régulièrement analysées par des ingénieurs spécialisés. La formation était donc l'élément le plus important pour la durabilité de cet investissement. L'installation des instruments et des logiciels a été complétée par un programme de formation complet destiné aux gardiens des barrages et aux ingénieurs spécialisés chargés de l'analyse des données et de la rédaction des rapports (Stahl et al., 2013).

Le programme d'amélioration de la sécurité des barrages (Dam Safety Enhancement Program – DaSEP) a été mis en place en 2010. Le DaSEP visait à améliorer les procédures de sécurité des milliers de barrages sous la responsabilité du Ministère chinois des ressources en eau (Méan et al., 2012). Les diverses missions d'experts

suisses et la formation d'homologues chinois en Chine et en Suisse ont abouti à la modification du cadre réglementaire de la sécurité des barrages en Chine, y compris, par exemple, l'obligation de préparer des rapports annuels de sécurité et de définir clairement les rôles et les responsabilités pour les barrages de petite et moyenne taille.

Suite à la rupture de la digue de col de Xepian-Xenamnoy au Laos en 2018 (Schleiss et al., 2019), une inspection nationale de la sécurité des barrages a été lancée. Le rapport de synthèse des principales conclusions des différentes inspections a souligné la nécessité d'améliorer l'organisation et les procédures de sécurité des barrages au Laos, y compris les aspects techniques (Droz et al., 2022) et institutionnels (Darbre et al., 2022). Ce projet de la Direction Suisse du Développement et de la Coopération (DDC) est en cours et a déjà donné des résultats fructueux avec l'adhésion du Laos comme membre à part entière de la communauté CIGB, la modification de la loi sur la sécurité des barrages, et la création d'un département spécifiquement en charge de la sécurité des barrages.

5. Conclusions et perspectives

Après une longue période de construction de barrages en Suisse, les propriétaires, les bureaux d'études et les entrepreneurs, à l'instar de leurs collègues européens, sont confrontés aux problèmes de vieillissement de ces barrages. Pour faire face à ce problème de vieillissement, il est nécessaire de réaliser des travaux de réhabilitation et de développer de nouvelles solutions. Le savoir-faire acquis peut être utilisé dans d'autres projets à travers le monde, y compris les projets de nouveaux ouvrages de rétention, l'évaluation de la sécurité des barrages, leur réhabilitation ainsi que leur surélévation, accompagnés de transfert de connaissances. Aujourd'hui, en raison des problèmes liés au changement climatique et de l'augmentation de la demande d'énergie, de nouveaux projets sont en cours de développement en Suisse.

6. Remerciements

La préparation de cet article n'aurait pas été possible sans le soutien des bureaux d'études, des entrepreneurs, des organisations et des instituts de recherche suivants: AFRY, BG, Carpi, EPFL (PL-LCH), ETHZ (VAW), Gruner Stucky, Norbert Géologues, Helvetas, Huguenberger, IM Maggia, Lombardi, Rittmeyer et Walo.



Figure 8: Barrage naturel d'Usoy et lac Sarez au Tadjikistan.

Références:

- Abati, A., Gatto, Frezza, G. A., Sparmacci, R. 2023. Seismic safety assessment of an old multiple arch gravity dam. Symposium «Management for Safe Dams» – 91st Annual ICOLD Meeting – Gothenburg 13–14 June 2023.
- Amberg, F., Bremen, R., Brizzo, N. 2009. Rehabilitation of the Pian Telessio dam (IT) affected by AAR-reaction. 23rd ICOLD Congress, Brasilia, Q. 90.
- Arnold, R., Bezzi, A., Lais, A., Boes, R.M. (2018). Intake structure design of entirely steel-lined pressure conduits crossing an RCC dam. Proc. Hydro 2018 Conference, Gdańsk, Poland: Paper 04.02. Aqua-Media International, Wallington, UK.
- Auel, C., Thene, J.R., Carroll, J., Holmes, C., Boes, R.M. (2018). Rehabilitation of the Mud Mountain bypass tunnel invert. Proc. 26th ICOLD Congress, Vienna, Austria, Q.100-R.4: 51–71.
- Ballarin, A., Gardenghi, R., 2023, Huggenberger Communication.
- Beck, C., Lutz, N., Lais, A., Vetsch, D., Boes, R.B. (2016). Patrind Hydropower Project, Pakistan Physical model investigations on the optimization of the sediment management concept. Proc. Hydro 2016 Conference, Montreux, Switzerland: Paper 26.08.
- Berchtold, Th., Pfister, M. (2011). Kárahnjúkar Dam spillway, Iceland: Swiss contribution to reduce dynamic plunge pool pressures generated by a high-velocity jet. in: Dams in Switzerland. Swiss Committee on Dams, pp. 315–320, ISBN 978-3-85545-158-6, Switzerland.
- Boes, R.M.; Beck, C.; Lutz, N.; Lais, A.; Albayrak, I. (2017). Hydraulics of water, air-water and sediment flow in downstream-controlled sediment bypass tunnels. In Proc. 2nd Intl. Workshop on Sediment Bypass Tunnels (Sumi, T., ed.), paper FP11, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- Boes, R.M., Müller-Hagmann, M., Albayrak, I., Müller, B., Caspescia, L., Flepp, A., Jacobs, F., Auel, C. (2018). Sediment bypass tunnels: Swiss experience with bypass efficiency and abrasion-resistant invert materials. Proc. 26th ICOLD Congress, Vienna, Austria, Q.100-R.40: 625–638.
- Bollaert, E., Tomasson, G. G., Gisiger J.-P., Schleiss, A. 2003. The Kárahnjúkar hydroelectric project: transient analysis of the waterways system. Wasser Energie Luft, Heft 3, 2003.
- Conrad, M., Dunstan, M.R.H., Morris, D., Pham Viet An, 2010. The Son La RCC dam – Testing in-situ properties, Hydro Asia 2010.
- Conrad, M., Morris, D., Nguyen Phan Hung 2014. The RCC dam for the Lai Chau HPP- RCC full scale trials and challenges in the construction of the RCC dam, Hydro Asia 2014.
- Darbre, G., Droz, P., Malaykham B. 2022. Institutional organization for dam safety in Lao PDR, ICOLD Q105/R1, June 2022, Marseille.
- Droz, P., Darbre, G., Malaykham, B. 2022. Emergency dam safety inspections in Lao PDR, ICOLD Q105/R38, June 2022, Marseille.
- Droz, P., Fumagalli, A., Novali, F., Young, B. 2008. GPS and INSAR technologies: a joint approach for the safety of lake Sarez, 4th Canadian Conference on Geohazards, Université Laval, mai 2008.
- Droz, P., Hegetschweiler, D 2010. Inspection du barrage de Péligre suite au séisme du 12 janvier 2010 en Haïti, Eau energie air (WEL), 3-2010.
- Droz, P., Spacic-Gril, L. 2006. Lake Sarez Risk Mitigation Project: a global risk analysis, Q86 – R75, 22nd ICOLD Conference on Large Dams, 2006, Barcelona.
- Droz, P., Wohnlich, A. 2019. Rehabilitation of the monitoring system of Inga 1 and 2 dams, Hydropower & Dams, Issue 2, 2019.
- Ehlers, S., Goltz, M., 2023. The development of Alkali Aggregate Reaction (AAR) at the Kainji spillway structure after 50 years of operation, Hydro Africa, Uganda.
- Gamito de Saldanha Calado Matos, J. P., Schleiss, A. 2017. A free and state-of-the-art probabilistic flow forecasting tool designed for Africa. Proceedings of Int. Conference Africa 2017, Marrakech, Morocco.
- Ghader, S., Bussard, T. 2013. The study of drainage and water pumping of spillway and hydropower plant foundation in Sangtuda 2 project. Tajikistan. 1st Iranian Conference on Geotechnical Engineering, 22–23 October 2013. University of Mohaghegh, Ardabil, Iran IM, 2023, web site.
- Kaelin, J., Olafsson, S., Leifsson, P.S. 2009. Filling and pressurizing the headrace tunnel at Kárahnjúkar in Iceland. Hydro2009, Lyon.
- Lombardi, 2023, web site.
- Méan, P., Droz P., Cai, Y., Sheng, J 2012. Dam Safety Enhancement Program: A Cooperation Project between Switzerland and China, Int. Symposium on dams for a changing world, ICOLD, June 2012, Kyoto.
- Mellal, A., Chibvura, C., Mhlanga, S. Z., Nkweendanda A., Munodawafa, M. C., Quigley, B.M., Arigoni, A. 2023. Use of computational modelling for prediction and follow up of dam behaviour during plunge pool reshaping of the Kariba Dam. Symposium «Management for Safe Dams» – 91st Annual ICOLD Meeting – Gothenburg 13–14 June 2023.
- Morier-Genoud, G. 2019. Fish pass design on the Mekong River – Challenges and lessons learned from Xayaburi HPP, SHF Conference HydroES 2019, Grenoble, France, January 2019.
- Obermoser, H., Pješčić, S., Conrad, M. 2009. Focused Rehabilitation of the Piva HPP in Montenegro, Conference Hydro 2009, Lyon, France.
- PL-LCH EPFL 2023, Personal communication.
- Pöyry 2014, www.worldbank.org/en/country/tajikistan/brief/final-reports-related-to-the-proposed-rogun-hpp.
- Quigley B., Matcharadze G. 2006. Upgrading and Refurbishment of Enguri Dam and Hydro Power Plant in Georgia, HYDRO 2006, Porto Carras, Greece.
- Schleiss, A., Tournier, J.-P., Chraibi, A. 2019. XPXN-Saddle Dam D failure – IEP Final Report, ICOLD annual meeting, Ottawa, 2019.
- Scuero, A., Vaschetti, G., Machado do Vale, J. 2016. A unique case: new works at Chambon dam. International Symposium on «Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries», Johannesburg, South Africa.
- Scuero, A., Vaschetti, G. 2019. Underwater technologies for rehabilitation of dams: Studena case history. ICOLD annual meeting, Ottawa, 2019.
- Scuero, A., Vaschetti, G. J. Cowland, J., Cai, B., Xuan, L. 2016. Nam Ou VI: Geomembrane Face Rockfill Dam in Laos. Proceedings of Asia 2016, Vientiane, Lao PDR, 2016.
- Sorgenfrei, A., Friedrich, M. 2011. Dam Safety and Operational Efficiency Improvements in Sri Lanka, ICOLD 70th Annual meeting, Lucerne, Switzerland, June 2011.
- Stahl, H., Celo, M. 2013. Refurbishment and Upgrading of the Monitoring Instrumentation for Fierza and Ulza Dams in Albania, Proceedings of the ICOLD European Club Symposium held in Venice, Italy, April 2013, Paper B18.
- Stojnic, I., Ylla, C., Amini A., De Cesare, G., Bollaert, E.F.R., Mhlanga, S.Z., Mazidza, D.Z., Schleiss, A.J. 2018. Kariba plunge pool rehabilitation, HYDRO 2018 proceedings, Gdańsk, Poland.
- Stucchi, R., Catalano, E., 2023. Numerical modelling of the Pian Telessio dam affected by AAR, 12th ICOLD European Club Symposium, Interlaken, Switzerland, Sept. 2023.
- Stucky Gruner, 2023, web site.
- Tirunas, D., Aspen, B.V. 2018. The Moglicë Hydropower Project, Albania – Construction Design Experience. Proc. of HYDRO 2018, Gdańsk, 15.–17.10.2018.
- International Journal on Hydropower and Dams, Aqua Media Int., 2018.
- Tzenkov, A.D., Kisliakov, D.S., Schwager, M. 2023. An application of sophisticated FEM and simplified methods to the seismic response analysis of an asphalt-concrete core rockfill dam. 12th ICOLD European Club Symposium, Interlaken, Switzerland, Sept. 2023.
- Wieland, M., Aemmer, M. and Ruoss, R. 2008. Designs Aspects of Deriner Dam. Int. Water Power & Dam Construction, Volume 60 Number 7, pp19–23.
- Wieland, M., Brenner, R.P., Sommer, P. 2003. Earthquake resiliency of large concrete dams: damage, repair, and strengthening concepts, ICOLD Conference, Montreal, 2003.
- Wieland, M., Roshanomid, H. 2019. Seismic design aspects and first reservoir impounding of Rudbar Lorestan rockfill dam. Proc. Symposium on Sustainable and Safe Dams around the World, ICOLD 2019 Annual Meeting, Ottawa, Canada, June 9–14, 2019.

Auteur:
Patrice Droz: Comité suisse des barrages.