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

Artikel: Géologie et barrages
Autor: Jonneret, Ariane / Bussard, Thierry / Schaeren, Georg
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1050000

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: 28.12.2025

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

Géologie et barrages

Ariane Jonneret, Thierry Bussard, Georg Schaeren

Résumé

La géologie joue un rôle crucial dans l'implantation, la conception, la construction et la sécurité des barrages. Cet article met en évidence les aspects géologiques importants à prendre en compte à chaque étape de la vie d'un barrage. Les fondations et les appuis, composantes essentielles d'un barrage, doivent assurer la stabilité de l'ouvrage, contrôler et limiter les infiltrations d'eau et les sous-pressions, résister à l'érosion interne et rester intacts pendant toute la durée de vie du barrage. La géologie du réservoir et du bassin versant est également cruciale dans la conception et la surveillance des barrages. En particulier, la stabilité des pentes doit être étudiée pour évaluer les risques associés tels que la propagation de masses instables (glissements, éboulements, etc.), formation d'une vague d'impulsion, ainsi que le blocage des organes de secours. Des investigations ciblées sont nécessaires lors de la conception, un suivi précis des excavations est indispensable pendant la construction, et un plan de surveillance détaillé doit être établi pour toute la durée de vie de l'ouvrage. Il est essentiel de communiquer de manière claire et pragmatique le modèle géologique à tous les acteurs impliqués dans le projet.

Zusammenfassung

Geologie spielt eine entscheidende Rolle bei der Standortwahl, der Planung, dem Bau und der Sicherheit von Staudämmen. Dieser Artikel hebt die wichtigen geologischen Aspekte jeder Phase während der Lebensdauer eines Staudamms hervor. Fundamente und Widerlager sind die wichtigsten Komponenten eines Staudamms und müssen die Stabilität gewährleisten, Wasserinfiltrationen und Unterdruck kontrollieren und begrenzen, der inneren Erosion widerstehen und während der gesamten Lebensdauer intakt bleiben. Die Geologie des Stausees und des Einzugsgebiets ist ebenfalls entscheidend für die Gestaltung und Überwachung von Dämmen. Besonders die Stabilität der Hänge muss untersucht werden, um die damit verbundenen Risiken wie die Ausbreitung instabiler Massen (Rutschungen, Felsstürze usw.), die Bildung einer Impulswelle sowie die Blockierung von Rettungsorganen zu bewerten. Gezielte Untersuchungen sind bei der Planung erforderlich, eine genaue Überwachung des Aushubes während des Baus ist unerlässlich und ein detaillierter Überwachungsplan muss für die gesamte Zeit erstellt werden. Es ist von entscheidender Bedeutung, das geologische Modell allen am Projekt beteiligten Akteuren auf klare und pragmatische Weise zu vermitteln.

1. Introduction

Les barrages sont des structures complexes qui nécessitent une conception, une construction et une surveillance minutieuses pour garantir leur stabilité et leur sécurité à long terme. Les statistiques *(CIGB, 1995)* indiquent que la plupart des ruptures de barrages se produisent dans des barrages nouvellement construits, environ 70% d'entre elles se produisant au cours des dix premières années. En ce qui concerne les barrages en béton, les problèmes de fondation sont la principale cause de défaillance, l'érosion interne et la résistance insuffisante au cisaillement contribuant à parts égales (21% chacune) aux défaillances. Les barrages en remblai sont confrontés à des défis différents, le débordement étant la cause la plus fréquente de rupture (49% des cas). L'érosion interne du corps du barrage suit de près avec 28%, tandis que l'érosion des fondations représente 17% des défaillances dans ce type d'ouvrage. Ces statistiques soulignent que la géologie est une question sensible et que la fondation doit être considérée comme un élément à part entière du barrage. Une évaluation et une surveillance appropriées doivent être menées non seulement pour la fondation du barrage, mais aussi pour la stabilité des pentes du réservoir et au-dessus de la crête du barrage afin d'atténuer les risques, y compris celui de la création d'une vague d'impulsion.

À cet effet, l'Ordonnance suisse sur la sécurité des barrages fournit un ensemble complet de lignes directrices et de réglementations visant à assurer la sécurité des barrages en Suisse. Elle repose sur trois éléments: la sécurité structurelle, la surveillance et l'entretien, et le plan d'intervention d'urgence. Elle est mise en œuvre par une surveillance continue, un rapport annuel détaillé et des rapports quinquennaux réalisés par deux experts indépendants expérimentés, dont un ingénieur civil et un géologue (*Office fédéral de l'énergie OFEN, 2015*).

Cet article passe donc en revue les principaux aspects géologiques qui doivent être pris en considération tout au long de la durée de vie d'un barrage afin de garantir sa sécurité à long terme.

L'établissement et la mise à jour d'un modèle géologique sont le fil conducteur des différentes études et évaluations géologiques, depuis la faisabilité jusqu'à la surveillance à long terme. À cette fin, l'importance d'une bonne étude géologique, de la supervision des travaux de construction et du contrôle géotechnique (monitoring) sera discutée. Un aperçu des principaux aspects géologiques et hydrogéologiques qui peuvent affecter les fondations d'un barrage et son réservoir est donné.

2. Modèle géologique depuis la faisabilité jusqu'à la surveillance d'un barrage

Comme discuté dans le chapitre précédent, les aspects géologiques jouent un rôle es-

sentiel pour la conception et la sécurité des barrages. Il est donc important de recourir aux meilleures pratiques pour s'assurer que tous ces aspects ont été pris en compte dès l'étude de faisabilité et tout au long de la durée de vie du barrage. Une description des diverses tâches liées à la géologie, qui doivent être effectuées à différents stades d'un projet est fournie ci-dessous.

2.1 Études de faisabilité

Au cours de la phase de faisabilité d'un projet de barrage, une évaluation approfondie est réalisée en tenant compte de divers critères de sélection tels que les coûts, les aspects socio-économiques et environnementaux ainsi que les aspects topographiques et géologiques. Ces derniers comprennent la topographie, la géologie des fondations, le cadre tectonique, la disponibilité des matériaux de construction, l'étanchéité du réservoir et les risques naturels à la fois sur le site du barrage et autour du réservoir. En général, plusieurs options de sites de barrage sont évaluées à ce stade précoce afin de déterminer le site le plus approprié.

L'évaluation géologique doit commencer par une étude préliminaire, qui consiste à examiner les données géologiques et géotechniques disponibles pour le site envisagé. Il s'agit notamment des cartes géologiques, des rapports géologiques, des données de forages ou d'investigations antérieures, des enregistrements de l'activité sismique et de toute autre information géologique pertinente. Cette étape sera suivie d'une cartographie géologique du site et de ses environs afin d'identifier les types de roches, les caractéristiques structurales (failles, plis, fractures) et tout risque géologique potentiel. Des études géologiques et hydrogéologiques préliminaires sont ensuite menées pour évaluer la profondeur du substratum rocheux, son altération, l'étendue et la profondeur de la décompression du massif rocheux, les propriétés géomécaniques des sols et des roches sur le site, l'orientation, la nature et les caractéristiques géotechniques des discontinuités et les conditions hydrogéologiques sur le site du futur barrage. Cela implique généralement une campagne géophysique, des fouilles et des tranchées, des forages carottés, la réalisation d'essais in situ tels que les essais d'eau de type Lugeon et la collecte d'échantillons pour des essais en laboratoire. L'étude peut également être complétée par une évaluation détaillée de la topographie et des pentes rocheuses par photogrammétrie ou mesures LiDAR.

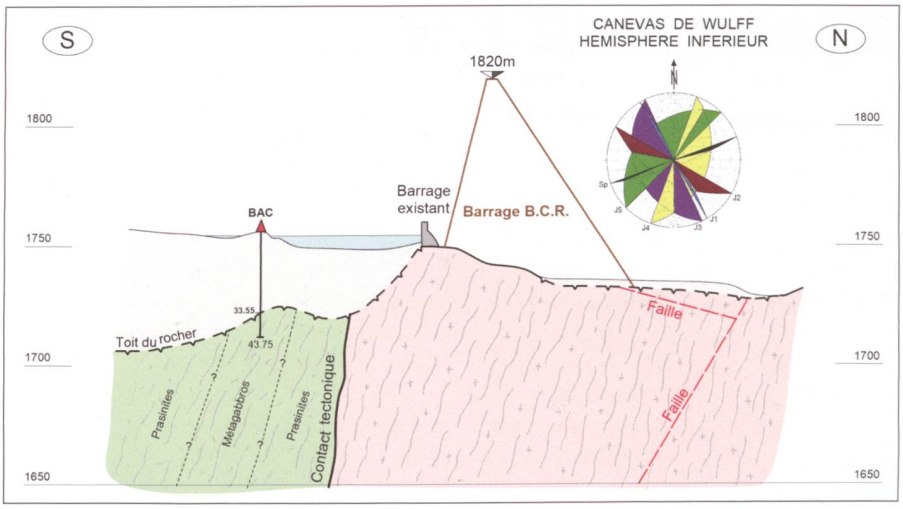

Figure 1 : Illustration d'une coupe géologique interprétative (projet de barrage en béton compacté au rouleau en Suisse).

Une évaluation des risques sismiques spécifiques au site est réalisée en collaboration avec des spécialistes. Elle comprend l'étude des données sismiques historiques, l'analyse des lignes de faille, l'évaluation du potentiel de tremblement de terre, l'amplification topographique et de site, la liquéfaction, les glissements de terrain, ou d'autres risques sismiques susceptibles d'affecter la stabilité du barrage, y compris la potentielle sismicité induite en lien avec la mise en eau du réservoir. En outre, le comportement des fondations en cas de tremblement de terre doit être évalué afin d'exclure toute défaillance entraînant un écoulement incontrôlé de l'eau du réservoir.

Enfin, une évaluation des risques géologiques, tels que les glissements de terrain, les éboulements ou d'autres événements géologiques susceptibles d'affecter la sécurité structurelle et le fonctionnement du barrage, est réalisée.

Sur la base des résultats de l'étude géologique, un rapport complet est établi. Ce rapport comprend un résumé des conditions géologiques, des risques géologiques potentiels, des considérations pratiques et des recommandations pour des études complémentaires. Ce rapport comprend donc le premier modèle géologique qui sera testé et mis à jour par des études supplémentaires à des stades ultérieurs du développement du projet.

La *Figure 1* est un exemple de coupe géologique transversale compilée pour l'étude de faisabilité du nouveau barrage de Fah en Suisse.

2.2 Phase de conception

Une fois que le site du barrage a été défini et que la conception est en cours, il est essentiel qu'une mise à jour du modèle géologique soit effectuée pour s'assurer que tous les aspects géologiques qui pourraient avoir un impact sur le barrage et ses structures annexes ont été examinés. À ce stade, une cartographie géologique détaillée et des investigations complémentaires, qu'elles soient géophysiques ou au moyen de forages et éventuellement de galeries d'exploration, seront nécessaires. Une bonne collaboration et une interaction avec l'ingénieur responsable de la conception sont essentielles. Le modèle géologique sera ensuite mis à jour et inclura toutes les hypothèses formulées pour la conception. À ce stade, la réalisation d'une base de données tridimensionnelle et la préparation d'un modèle géologique 3D fournissent un outil très efficace en soutien à l'ingénieur, comme l'illustre la *Figure 2*. Un projet réussi doit identifier les risques géologiques et, si nécessaire, atténuer les effets potentiels de ces risques sur la construction et l'exploitation des barrages

Figure 2 : Illustration d'un modèle géologique 3D préparé pour la conception d'un grand barrage (en jaune) en Asie centrale. Il comprend tous les releves géologiques (souterrains et de surface), les données géophysiques, les forages et les essais in situ, ainsi que le barrage et les structures annexes.

et de leurs réservoirs. Il est donc essentiel que les ingénieurs acquièrent une compréhension claire du modèle géologique fourni par les géologues *(Banque mondiale, 2021)*.

2.3 Construction

Le suivi géologique de la phase de construction est essentiel pour contrôler que le modèle géologique élaboré pendant la phase de conception est adéquat. Toute condition géologique inattendue rencontrée pendant l'excavation doit être rapidement évaluée et des mesures appropriées doivent, si nécessaire, être prises pour y remédier, que ce soit par des mesures de mitigation ou par une adaptation du design.

En outre, une cartographie détaillée de toutes les excavations du barrage et des structures annexes doit être réalisée, ainsi qu'une synthèse des observations géologiques et des mesures de mitigation qui ont pu être prises. Cela permettra non seulement de mettre à jour le modèle géologique, mais aussi de constituer un dossier complet sur les conditions géologiques rencontrées pendant la construction. Ces dossiers sont essentiels pour évaluer la cause de tout comportement anormal qui pourrait être observé pendant la durée de vie du barrage. Ces données conformes sont également très utiles pour la planification d'une extension de l'aménagement (p.ex. surélévation du barrage).

Un exemple de cartographie géologique pendant les travaux de renforcement du barrage des Toules est donné dans la *Figure 3*. Ce suivi géologique pendant la construction a permis de fournir des plans conformes à l'exécution et de vérifier le modèle géologique.

2.4 Plan de surveillance

L'observation visuelle et la surveillance à long terme d'un barrage sont essentielles pour contrôler sa stabilité, son comportement et sa sécurité. La surveillance d'un barrage implique généralement l'utilisation de divers instruments pour évaluer le comportement et la stabilité du barrage, de sa fondation et de ses appuis et de la zone du réservoir. Les instruments les plus couramment utilisés sont les pendules directs et inverses, les extensomètres, les piézomètres, les stations de jaugeage (débit des drainages), les jauges de tassement, les jauges de déformation, les inclinomètres et les équipements de surveillance sismique. En outre, la surveillance chimique d'éventuelles infiltrations d'eau peut être mise en œuvre, en particulier lorsque des roches solubles sont présentes dans les fondations et les appuis du barrage (surveillance de l'évolution de la concentration et du flux de masse des éléments dissous).

La *Figure 4* illustre l'exemple de deux barrages faisant partie de l'aménagement hydroélectrique d'Inga en RDC où une déformation irréversible à long terme a été observée. La réhabilitation des instruments existants a été effectuée et des instruments supplémentaires ont été mis en place pour assurer la surveillance des barrages et des centrales électriques *(Droz & Wohnlich, 2019)*.

Un autre exemple est celui du barrage de Lessoc en Suisse, où la surveillance de l'ouvrage a confirmé les inquiétudes existantes concernant la stabilité de l'appui rocheux en rive gauche et la faiblesse du rideau d'injection révélée par les mesures piézométriques. Des travaux de renforcement ont été réalisés en 2019, notamment la confortation de l'éperon rocheux avec 33 ancrages passifs, l'extension du rideau d'injection sur la rive gauche et l'installation de nouveaux instruments de surveillance *(Fern et al., 2019)*.

En plus de tous les instruments installés dans le corps du barrage ou dans les structures annexes, la télédétection et la surveillance géodésique sont souvent utilisées pour surveiller le comportement général du barrage et des bassins versants. Les techniques de surveillance géodésique, telles que le Global Navigation Satellite System (GNSS), sont utilisées pour mesurer avec précision les déplacements horizontaux et verticaux du barrage et de ses fondations, ainsi que de toute zone potentiellement instable telle que les glissements de terrain. Des instruments supplémentaires tels que des inclinomètres et des piézomètres peuvent également être mis en place lorsque des glissements de terrain ont été identifiés.

3. Géologie et hydrogéologie des fondations

Les fondations et les appuis d'un barrage sont des éléments cruciaux qui jouent un rôle essentiel dans la stabilité et la sécurité de la structure. Plusieurs aspects géologiques doivent être pris en compte lors de la conception et de la construction d'un barrage.

3.1 Caractéristiques géologiques des fondations

La composition de la matrice rocheuse et son degré d'altération sont des facteurs essentiels à prendre en compte, car les fon-

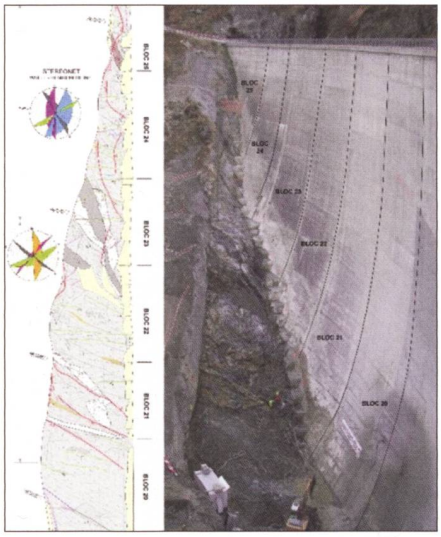

Figure 3: Plan conforme à l'exécution établi pendant les travaux de renforcement du barrage des Toules – Suisse.

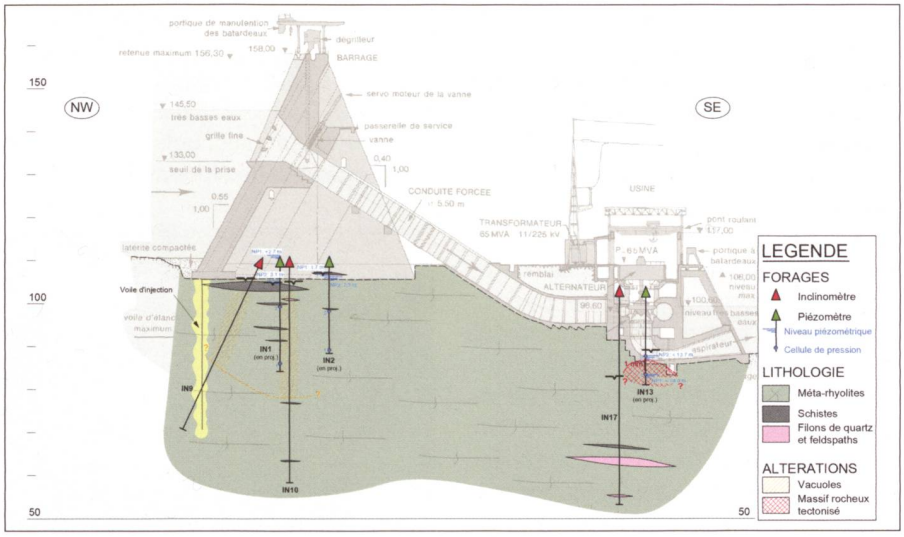

Figure 4: Illustration de la mise en place d'équipements de surveillance dans les fondations d'un barrage et d'une des centrales d'Inga, comprenant des piézomètres (en vert) et des inclinomètres (en rouge) – RDC.

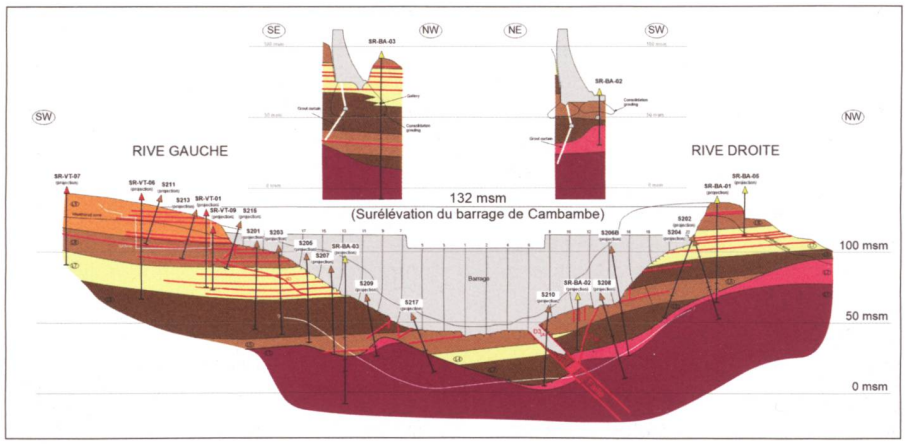

Figure 5: Afrique – Coupes géologiques en long de la fondation du barrage mettant en évidence les failles subhorizontales (lignes rouges) dans les deux appuis. Ces failles, lorsque combinées avec les familles de joints verticaux, créent des conditions défavorables.

dations du barrage doivent supporter le poids et la répartition des charges. En effet, les différents types de roches ont des propriétés mécaniques et physiques distinctes. La composition, la taille des grains et la minéralogie de la roche affectent sa résistance, sa perméabilité et sa durabilité, qui sont des paramètres géotechniques critiques. L'altération joue également un rôle important en ce qui concerne la qualité du massif rocheux. En général, les matériaux altérés sont retirés des fondations, mais des mesures de mitigation spécifiques doivent être prises en cas d'altération localisée en profondeur.

Outre la matrice rocheuse, les discontinuités, telles que les joints, les failles ou les plans de stratification et de schistosité, peuvent avoir un impact significatif sur les propriétés géomécaniques et la stabilité des appuis et des fondations des barrages. Les discontinuités sont des plans de faiblesse naturels dans la masse rocheuse, et leur orientation détermine la façon dont elles interagissent avec les charges appliquées et la stabilité globale de la structure du barrage. L'analyse des discontinuités, y compris leur orientation, leur rugosité, leur altération, leur persistance, leur espacement et leur remplissage, est essentielle pour évaluer les paramètres géotechniques à prendre en compte dans les calculs de stabilité des barrages.

Un exemple de problème potentiel dû aux discontinuités est illustré à la *Figure 5*. Au cours d'une étude géologique réalisée dans le cadre de la surélévation de 20 m d'un barrage en Afrique, une étude spécifique a été réalisée concernant le risque potentiel de glissement d'une partie du massif rocheux de fondation en raison de la poussée du barrage et de la pression de l'eau. L'analyse a nécessité une évaluation détaillée des propriétés des joints, en particulier d'un système de failles subhorizontales parallèles au plan de stratification avec une faible résistance au cisaillement. Les résultats ont ensuite été utilisés pour concevoir un projet approprié pour la surélévation du barrage.

Ce n'est pas seulement la qualité de la fondation qui est importante, mais aussi l'homogénéité de ses caractéristiques géotechniques. L'hétérogénéité de la masse rocheuse peut influencer de manière significative le comportement des fondations des barrages, en affectant des facteurs tels que la résistance au cisaillement, la perméabilité et la répartition des déformations. Ceci peut être illustré par l'exemple du barrage des Toules en Suisse, où des déformations permanentes étaient significativement plus élevées sur la rive gauche, indiquant que le massif rocheux était presque deux fois plus déformable que sur la rive droite. Ceci est dû à la présence d'un compartiment rocheux sur la rive gauche dont les caractéristiques géomécaniques sont nettement inférieures à celles du reste de la fondation *(Figure 6)*. Les exigences en matière de sécurité sismique n'ont donc pas pu être respectées. Par conséquent, des travaux importants ont dû être entrepris pour renforcer le barrage *(Figure 6)*.

Un autre aspect où la qualité de la masse rocheuse joue un rôle important est celui de l'affouillement, qui se réfère à l'érosion causé par la force de l'eau. L'affouillement se produit généralement lors d'événements extrêmes tels que des crues importantes ayant pour conséquence le déversement d'eau par l'évacuateur de crues au pied du barrage. Il s'agit d'un problème important, car il peut compromettre la stabilité du barrage ou de certains de ses organes. Les facteurs influençant l'affouillement comprennent la morphologie du lit du cours d'eau, les conditions d'écoulement

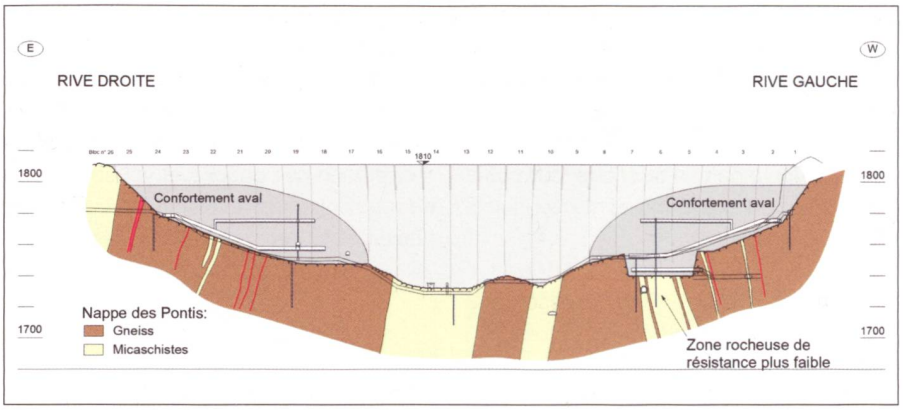

Figure 6: Les Toules, Suisse – Coupe géologique le long du barrage montrant l'hétérogénéité des fondations.

Figure 7: Barrage de Kariba, Zambie/Zimbabwe – Vue des travaux en cours sur le bassin de dissipation d'énergie dans la zone d'érosion (mars 2023) et vue d'une image de synthèse de l'excavation à la fin des travaux (Razel Bec, 2016).

de l'eau, la sédimentation du réservoir et les caractéristiques des sédiments et, bien sûr, les propriétés du massif rocheux qui peuvent être caractérisées par un indice d'érodabilité *(Annandale, 1995)*.

Un exemple célèbre est le cas du barrage de Kariba en Zambie-Zimbabwe où l'énergie induite par les chutes d'eau lors de la décharge du barrage au cours des 20 premières années après la construction a provoqué un phénomène d'érosion au pied de l'ouvrage avec pour conséquence l'affouillement d'un bassin de 85 m de profondeur *(Michael et al., 2006)*. Les mesures de mitigation choisies consistent à remodeler le bassin d'affouillement pour augmenter la dissipation d'énergie et éviter toute nouvelle érosion régressive en direction des fondations du barrage *(Figure 7)*. Les travaux en cours ont nécessité la construction préliminaire d'un batardeau en aval pour isoler les travaux d'excavation.

3.2 Pression d'eau et infiltration possible à travers les fondations

Une pression d'eau élevée sous le barrage et/ou une infiltration à travers les fondations du barrage sont des éléments très sensibles pouvant conduire à des conditions défavorables en termes de sécurité (en plus de l'impact négatif possible du point de vue de la perte d'eau). Les ruptures bien connues (1) du barrage de Malpasset en 1959 (France) et (2) du barrage de Teton en 1976 (USA) illustrent ces deux problèmes liés aux conditions hydrauliques à l'intérieur de la fondation :

1. Une charge hydraulique élevée combinée à des orientations défavorables des familles de joints peut conduire à la formation de coins rocheux instables sous le barrage ou dans ses appuis. Il est donc essentiel d'identifier et d'évaluer les familles de joints afin de déterminer si des structures géologiques défavorables existent, et de concevoir un rideau d'injection et un système de drainage adaptés pour éviter des conditions de charge inacceptables. Si nécessaire, un traitement complémentaire au pied amont du barrage peut être effectué.
2. Des fuites concentrées dans la masse rocheuse à la base du noyau du barrage peuvent conduire au développement d'un conduit continu et à des conditions d'érosion inacceptables. Un traitement systématique des joints, une paroi moulée (comprenant des filtres) et des matériaux adaptés pour le noyau (peu érodables) sont donc essentiels.

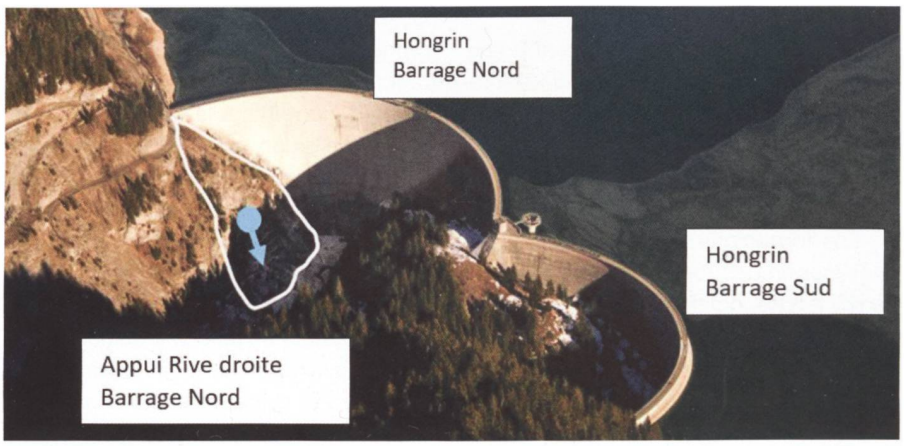

Figure 8: Barrages de l'Hongrin, Suisse – Les venues d'eau développées dans l'appui rive droite (barrage nord) immédiatement après la mise en eau du réservoir ont été traitées en 2018.

La *Figure 8* illustre des venues d'eau situées en aval du barrage nord de l'Hongrin, dans l'appui rive droite. Le débit d'eau était faible, mais les piézomètres installés ont confirmé une pression d'eau allant jusqu'à 4 bars. Des calculs de stabilité du versant en aval immédiat du barrage ont été effectués et ont indiqué qu'une amélioration significative en termes de facteur de sécurité peut être obtenue par un drainage approprié de la masse rocheuse, c'est-à-dire par une réduction de la pression d'eau *(Koliji et al., 2011a et 2011b; Bussard et al., 2015)*. Un plan d'action ciblé et échelonné a été mis en œuvre *(Leroy et al., 2016)* et des travaux de réparation des défauts localisés du voile d'injection ainsi qu'un drainage supplémentaire ont été réalisés en 2018 *(Bussard & Wohnlich, 2018)*. Les nouvelles conditions ont conduit à un tarissement des venues d'eau illustrées sur la *Figure 8*. Les résultats sont satisfaisants et indiquent une diminution significative de la pression d'eau dans le massif rocheux en aval immédiat du barrage (diminution générale de 70%) et une diminution similaire du point de vue du débit (diminution de 70%).

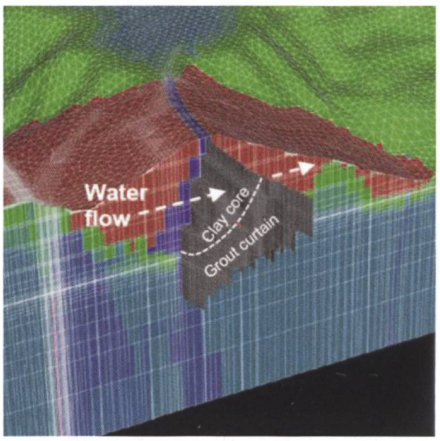

Figure 9: Illustration de l'analyse des écoulements et des fuites possibles au travers d'une digue et de ses fondations en vue de la conception d'un rideau d'injection et d'un système de drainage appropriés (Asie centrale).

Un modèle numérique est recommandé pour évaluer la distribution possible de la charge hydraulique sous le barrage et les fuites possibles *(Figure 9)*. Le modèle aidera à la conception du voile d'injection et du système de drainage, ainsi qu'à l'installation d'un système de surveillance adapté.

Finalement, la présence de roches solubles dans la fondation du barrage peut être un problème critique, en particulier dans le cas de roches très solubles (halite, anhydrite et gypse) qui peuvent évoluer de manière significative pendant la durée de vie du barrage (développement actif de karsts). Ces types de roches doivent être clairement identifiés au cours des phases d'investigation afin de déterminer avec précision les conditions du site et si des mesures de mitigation adaptées peuvent être mises en œuvre ou non. Dans le cas de roches moins solubles (carbonates: calcaire, dolomie), il y a un risque que des cavités et des conduits déjà présents dans les fondations et les appuis puissent également conduire à des fuites, avec un risque de débourrage de matériaux de remplissage des cavités pendant la mise en eau du réservoir.

4. Géologie du réservoir et du bassin versant

La géologie du réservoir d'un barrage et de son bassin versant joue un rôle important non seulement en ce qui concerne les pertes d'eau ainsi que son potentiel de sédimentation et donc la viabilité économique à long terme du barrage, mais aussi du point de vue de la sécurité de l'ouvrage qui peut être menacé par des dangers naturels.

4.1 Étanchéité du réservoir

La présence de formations perméables au sein du réservoir peut avoir pour conséquence des fuites si elles sont reliées à des points de résurgence situés à une altitude inférieure à celle du niveau d'eau du réservoir.

Les formations perméables peuvent consister en des roches perméables, en particulier des roches solubles, des dépôts meubles grossiers et poreux ou des zones de faille. L'évaluation du risque de pertes nécessite une analyse détaillée des conditions hydrogéologiques locales et régionales. Si nécessaire, la mise en œuvre de mesures de mitigation peut être une option *(Figure 10)* et un plan de surveillance spécifique des secteurs sensibles est recommandé.

Figure 10 : Exemple de réaménagement de la pente d'un réservoir et de l'installation d'un revêtement en géomembrane pour prévenir les pertes d'eau dans des formations rocheuses karstiques et fissurées (Moyen Orient).

4.2 Risques naturels

Les barrages sont souvent situés dans des zones montagneuses sujettes à des dangers naturels tels que glissements de terrain, éboulements, laves torrentielles et avalanches. S'ils sont proches de l'ouvrage, ces dangers peuvent endommager le barrage lui-même ou les structures essentielles du barrage, telles que les évacuateurs de crues, ou compromettre leur fonctionnalité, ce qui peut entraîner le débordement du réservoir.

En outre, l'impact des dangers naturels sur le réservoir, même éloignés du barrage, doit également être pris en compte, car il peut avoir des conséquences dramatiques. Un exemple célèbre est la catastrophe du barrage de Vajont en Italie, qui s'est produite le 9 octobre 1963. La catastrophe a été déclenchée par un large glissement de terrain sur le Monte Toc, une montagne adjacente au barrage. On estime que 270 millions de mètres cubes de roches et de terre ont glissé dans le réservoir à grande vitesse, créant une grande vague qui est passée au-dessus du barrage. La catastrophe du barrage de Vajont est un rappel tragique de l'impact possible des glissements de terrain sur la sécurité des barrages et de l'importance d'évaluations géologiques approfondies, de la mise en place d'un système de surveillance et d'un plan de préparation aux situations d'urgence dans les zones sujettes à de tels risques.

Une évaluation détaillée des dangers naturels autour du réservoir doit donc être réalisée au moyen d'études préliminaires au bureau et sur le terrain, d'analyses et de modélisations numeriques utilisant des logiciels de pointe. Les études doivent comprendre l'identification et la caractérisation des dangers, l'évaluation de la vulnérabilité et l'analyse des risques *(Figure 11)*. Des recommandations concernant les stratégies de mitigation, la surveillance et les systèmes d'alerte précoce doivent être formulées afin que les propriétaires ou exploitants de barrages puissent évaluer et gérer efficacement les aléas naturels autour du réservoir, protégeant ainsi l'ouvrage, les communautés en aval et l'environnement.

Pouvant avoir les mêmes conséquences tragiques que les grands glissements de terrain, les crues par débâcle de lacs glaciaires (GLOFs) peuvent avoir un impact significatif sur la sécurité des barrages. Elles se produisent lorsqu'un lac glaciaire endigué par un glacier ou une moraine se rompt, libérant un grand volume d'eau en aval. Ces événements peuvent entraîner des crues catastrophiques, avec des conséquences dévastatrices pour les barrages situés en aval. Au cours des dernières décennies, le réchauffement progressif du climat a entraîné une augmentation rapide du nombre et du volume des lacs glaciaires dans le monde, ce qui accroît le risque.

Lorsqu'un barrage se trouve sur le parcours des eaux provenant de la rupture d'un lac glaciaire, il court le risque d'être submergé, ce qui peut causer des dommages structurels, voire entraîner une défaillance totale de l'ouvrage.

Les eaux associées à un GLOF peuvent, du fait de leur grande vitesse, provoquer l'érosion et l'affouillement des fondations du barrage et des zones environnantes. Cette érosion peut affaiblir la structure du barrage, compromettre sa stabilité et saper ses fondations. En outre, les GLOFs peuvent transporter d'importantes quantités de débris, notamment des arbres, des rochers et de la glace. Ces débris peuvent s'accumuler sur le site du barrage, bloquant potentiellement l'écoulement de l'eau et obstruant les évacuateurs de crues.

Pour atténuer les risques posés par les GLOFs, diverses mesures telles que la télédétection, les systèmes d'alerte précoce, la surveillance des lacs glaciaires, le renforcement des barrages et les plans de préparation aux situations d'urgence doivent être mises en œuvre *(Weicai et al., 2022)*.

Le changement climatique dégrade également les conditions du permafrost dans les zones montagneuses. Ces effets sont déjà visibles et ont des impacts notables dans la chaine de l'Himalaya. Par exemple, une lave torrentielle d'environ 4 millions de m^3 s'est produite à Barcem en 2015 (montagnes du Pamir, Tadjikistan) suite à des vagues de chaleur. Les dépôts ont endigué la vallée de Gunt et la zone en amont a été inondée presque jusqu'à la centrale de Pamir 1. Une réflexion est en cours pour construire une structure de dérivation (by-pass) afin de prévenir une éventuelle inondation de la centrale lors d'un prochain événement. La réduction des risques de catastrophe et une stratégie de résilience sont nécessaires dans l'environnement changeant actuel.

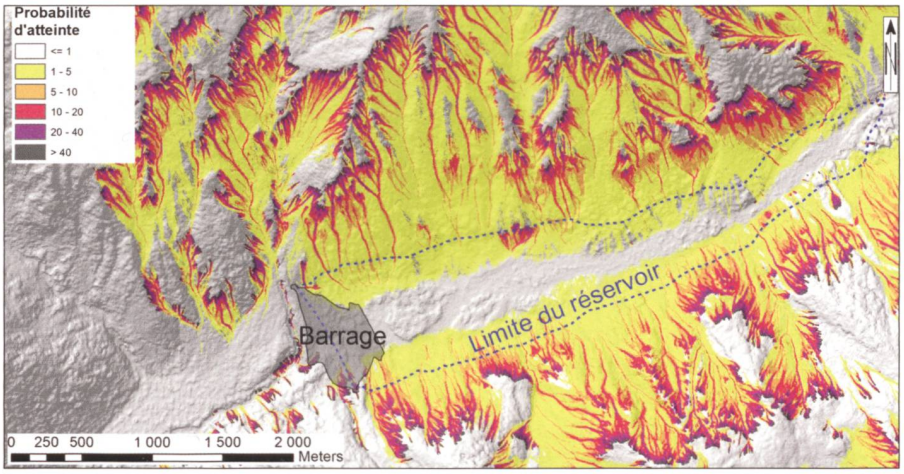

Figure 11 : Exemple d'évaluation de la probabilité d'atteinte par des chutes de pierres pour le réservoir d'un projet de barrage en Géorgie.

5. Conclusions

En conclusion, la géologie joue un rôle crucial pour assurer la sécurité et l'intégrité des barrages. La complexité des conditions géologiques sur les sites des barrages nécessite une compréhension approfondie des propriétés des roches et/ou des sols sous-jacents, de la géologie structurale et des risques géologiques possibles.

Les études géologiques permettent de sélectionner des sites de barrage adaptés, en tenant compte de facteurs tels que les conditions de fondation, l'évaluation des pertes et des dangers naturels. Elles fournissent également des informations précieuses pour la conception et la géométrie du barrage en tenant compte des caractéristiques de résistance, de perméabilité et de déformabilité de la géologie sous-jacente.

De plus, en intégrant les données géologiques au moyen d'un modèle géologique lors de la conception, la construction et la surveillance continue des barrages, des décisions en connaissance de cause peuvent être prises pour atténuer les risques.

L'intégration des connaissances et de l'expertise géologiques dans les pratiques d'ingénierie des barrages est donc essentielle pour assurer la sécurité à long terme.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les propriétaires des barrages suisses pour leur confiance et leur collaboration continue au fil des ans, ainsi que Gruner Stucky pour leurs fréquentes demandes d'expertise géologique dans le cadre de projets menés dans le monde entier.

Références:
Annadale, G.W. 1995. Erodibility, Journal of Hydraulic Research, 33:4, 471–494.
Bussard, T., Wohnlich, A., Leroy, R. 2015. Monitoring of the Hongrin arch dams in Switzerland, water leakage and stability of the foundation issues. Colloque CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs): Fondations des barrages: caractérisation, traitements, surveillance, réhabilitation. 8–9 April 2015. Chambéry, France.
Bussard, T., Wohnlich, A. 2018. Ouvrages de l'Hongrin. Travaux d'entretien 2018. Comité Suisse des Barrages. Interaction entre barrages et foundation. 20 août 2018. Montreux, Switzerland.
Droz, P., Wohnlich, A. 2019. Rehabilitation of the monitoring system of Inga 1 and 2 dams, Hydropower & Dams, Issue 2, 2019.
Fern, I., Jonneret, A., Kolly, J.C. 2019, Travaux de confortement de l'appui rive gauche du barrage de Lessoc, Wasser Energie Luft – 111. Jahrgang, 2019, Heft 3.
ICOLD. 1995. Dam Failure Statistical Analysis. Bulletin 99.
Koliji, A., Bussard, T., Wohnlich, A., Leroy, R. 2011. Abutment stability assessment at the Hongrin arch dam. Hydropower & Dams. Issue Three, 2011.
Koliji, A., Bussard, T., Wohnlich, A., Zhao, J. 2011. Abutment stability assessment at the Hongrin arch dam using 3D distinct element method. 12th ISRM Congress. 16-21 October 2011. Beijing, China.
Leroy, R., Bussard, T., Wohnlich, A. 2016. Hongrin Dam – Long Term Serviceability of the Right Bank. HYDRO 2016. International Conference and exhibition. 10–12 October 2016. Montreux, Switzerland.
Michael, F.G., Annandale, G.W., 2006. Kariba Dam Plunge Pool Scour, International Conference on Scour & Erosion, November 2006.
Razel Bec, 2016, Kariba Dam, Plunge pool reshaping, method statement (not published).
Swiss Federal Office of Energy SFOE. 2015. Directive on the Safety of Water Retaining Facilities.
Weicai W., Taigang Z., Tandong Y., Baosheng A., 2022, Monitoring and early warning system of Cirenmaco glacial lake in the central Himalayas, International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 73, 15 avril 2022, 102914.
World Bank. 2021. Good Practice Note on Dam Safety – Technical Note 2: Geotechnical Risk.

Auteurs:
Ariane Jonneret, a.jonneret@norbert-sa.ch
Thierry Bussard, t.bussard@norbert-sa.ch
Georg Schaeren, georg.schaeren@bluewin.ch

12th ICOLD European Club Symposium 2023

MAIN EVENT PARTNER SPONSORS

SILVER SPONSORS

Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Association suisse pour l'aménagement des eaux
Associazione svizzera di economia delle acque

BRONZE SPONSORS

Wir bedanken uns herzlich für die Unterstützung bei