

La vérification des appuis de fondation du barrage d'Enguri : un défi à la hauteur de l'ouvrage

Assessment of the Enguri Dam Foundation Foundations: a Challenge Commensurate with the Structure

Florent COLLIN^{1*}, Maxime VONIE¹, Chady EL MOATAZ BILLAH¹, Frederic ANDRIAN¹, Silviu IANOS¹

*ARTELIA, Echirolles, France*¹

**florent.collin@arteliagroup.com*

RÉSUMÉ : L'étude de stabilité du barrage d'Enguri a été déclenchée par des doutes de l'exploitant sur la dégradation de ses appuis. L'une des plus hautes voûtes (271.5 m) est fondée dans des conditions géologiques complexes au droit du chevauchement méridional du Grand Caucase sur le bassin flexural du Rioni, une zone tectonique active. Dans un contexte dominé par un raccourcissement horizontal régional, responsable de failles inverses et de plis de propagation, certaines structures résultent d'un soulèvement local actif. Par ailleurs, une évolution du champ de contraintes y a favorisé la rotation des blocs et la formation de zones de cisaillement et de zones de dilatation associées.

L'étude menée par ARTELIA inclut la caractérisation géologique et géomécanique, l'identification des mécanismes de rupture et les marges de sécurité associées. La méthodologie décrite dans l'article combine l'analyse des données à disposition (tomographies sismiques à grande échelle, forages et essais au laboratoire) assortie d'une reconnaissance de terrain.

Les calcaires et dolomies du Crétacé inférieur de la fondation sont affectés par deux failles majeures, des zones de cisaillement parallèles aux plans de litage et des fractures persistantes. Les multiples directions d'autres discontinuités ont rendu difficile la classification en familles distinctes. L'identification des volumes rocheux mobiles vis-à-vis de la poussée combinée de la voûte, de l'eau du réservoir et des sous-pressions a donc constitué un défi malgré l'appui d'un modèle géologique 3D. L'article décrit une méthode innovante utilisant les éléments discrets pour leur identification automatisée à titre de vérification. Une méthode progressive pour évaluer leur stabilité compte tenu des échelles exceptionnelles est également proposée.

Enfin, les indices ayant conduit aux doutes de l'Exploitant sont analysés, les liens de cause à effet entre le comportement des appuis et les résultats montrés par les essais in situ sont identifiés et les conséquences sur la sécurité des appuis sont tirées.

ABSTRACT: The stability study of the Enguri dam was initiated due to concerns raised by the operator regarding the deterioration of its abutments. One of the tallest arch dams (271.5 m) is founded under complex geological conditions at the location of the southern thrust of the Greater Caucasus over the Rioni flexural basin, an active tectonic zone. In a context dominated by regional horizontal shortening—responsible for reverse faults and propagation folds—some structures result from active local uplift. Moreover, changes in the stress field have promoted block rotation and the formation of shear zones and associated dilation areas.

The study carried out by ARTELIA includes geological and geomechanical characterization, identification of failure mechanisms, and the associated safety margins. The methodology described in the paper combines analysis of available data (large-scale seismic tomography, boreholes, and laboratory tests) complemented by field investigation.

The Lower Cretaceous limestones and dolomites in the foundation are affected by two major faults, shear zones parallel to bedding planes, and persistent fractures. The multiple orientations of other discontinuities made it difficult to classify them into distinct families. Identifying rock volumes potentially mobilized under the combined thrust of the arch, reservoir water, and uplift pressures therefore proved challenging, despite support from a 3D geological model. The paper describes an innovative method using discrete element method for their automated identification as a verification tool. A step-by-step method to assess their stability, considering the exceptional scale, is also proposed.

Finally, the indicators that led to the operator's concerns are analyzed, the cause-and-effect relationships between the behavior of the abutments and the results of in-situ testing are identified, and the consequences for abutment safety are drawn.

Mots-clés : Barrage voûte ; stabilité des fondations ; géomécanique ; modèle géologique 3D ; discontinuités ; karst ; tomographie sismique

1 LE BARRAGE D'ENGURI

Le barrage d'Enguri est un barrage voûte à double courbure situé proche du village de Potshko Etseri, dans l'ouest de la Géorgie. Avec une longueur en crête d'environ 680 m et une hauteur maximale au-dessus de la fondation de 271,5 mètres, c'est l'un des barrages voûtes les plus hauts actuellement en exploitation. Conçu dans les années 1960 et construit dans les années 1970, le réservoir a atteint pour la première fois la cote de retenue normale en 1987.

2 MODÈLE GÉOLOGIQUE DE LA FONDATION DU BARRAGE

2.1 Tectonique régionale et contexte géologique

Le site du barrage d'Enguri est situé sur la bordure sud de la ceinture plissée et chevauchante du Grand Caucase, près de sa limite avec le bassin du Rioni (Figure 2).

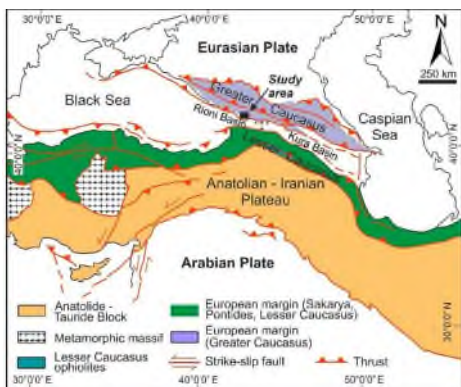


Figure 1. Carte géologique régionale de la collision entre les plaques Eurasiatique et Arabique (Tibaldi, 2019)

Le cadre géologique structural au niveau du barrage reflète l'interaction évolutive entre (i) les caractéristiques régionales typiques de la ceinture du Grand Caucase et (ii) la déformation tectonique locale au sein du bassin du Rioni.

La contrainte compressive majeure, généralement orientée NNE-SSW, a conduit au développement d'une série de chevauchements, de failles inverses et de plis de propagation de faille plongeant vers le NNE, parallèles à la chaîne montagneuse, c'est-à-dire selon un axe WNW-ESE.

Le site du barrage se situe au niveau d'une zone de configuration morpho-structurale particulière à l'échelle régionale appelée « bassin en surrection de Rioni » ou « bassin de charriage d'Odishi ».

Ce bassin est soumis à des contraintes majeures induites par le régime compressif associée à l'orogénèse caucasienne de direction NNE-SSW, mais

également à des tendances cinématiques liées à la rotation dans le temps du champ de contraintes à l'échelle locale et à la présence de barrière tectonique en limite de bassin qui empêche l'échappement latéral des dépôts sédimentaires comprimés.

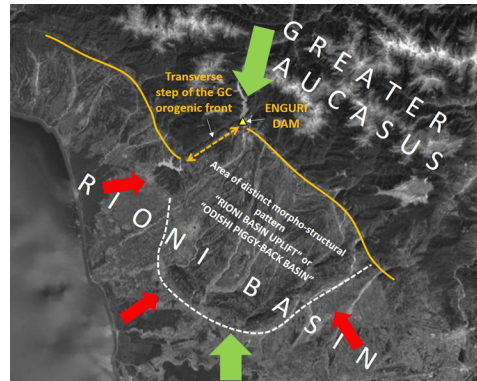


Figure 2. Limites morpho-structurales dans la zone du barrage d'Enguri, avec la contrainte principale régionale (flèche verte) et les contraintes multidirectionnelles locales (flèches rouges) selon Adamia et al., 2017. Fonds : Google Earth.

2.2 Géologie à l'échelle locale et géologie structurale

Des roches volcaniques et détritiques terrigènes affleurent sur la surface du réservoir, mais les formations composant la fondation du barrage et les environs proches sont les dépôts carbonatés sus-jacents, datés du crétacé inférieur et divisés en 6 unités, du Barrémien à l'Aptien.



Figure 3. Coupe verticale à travers la fondation du barrage montrant les limites entre unités géologiques (modifiée de Centre de recherche géodynamique, 2019)

D'un point de vue structural (Figure 5), la fondation du barrage est affectée par la présence :

- D'une faille inverse/décrochante vers la gauche traversant la rive droite, perpendiculaire à l'axe du barrage appelée F1, d'un pendage de 75-80° vers le sud-ouest
- De la faille d'Ingirish, inverse/décrochante vers la droite traversant le réservoir du barrage exerçant

également une influence sur l'état du rocher de fondation.

- D'une flexure anticlinale locale dont l'axe coïncide avec le lit de la rivière, qui explique le changement d'orientation des plans de stratification entre les deux rives :
 1. Rive droite : 50-70°/E-ESE
 2. Rive gauche : 50-70°/SE



Figure 4. Carte géologique et structurale de la fondation du barrage

Les études de projet avaient conduit à l'identification de six familles de discontinuités, numérotées de I (stratification) à VI, révélant des variations importantes des orientations et pendages au sein de chaque famille. La forte dispersion des attitudes des discontinuités, que les relevés effectués par les équipes d'ARTELIA ont confirmés (Figure 6), soulève la question de la représentativité des valeurs moyennes dans un modèle géologique. Par conséquent, pour l'identification des volumes rocheux potentiellement mobiles, chaque discontinuité prise en compte est introduite avec ses propres pendages et orientations.

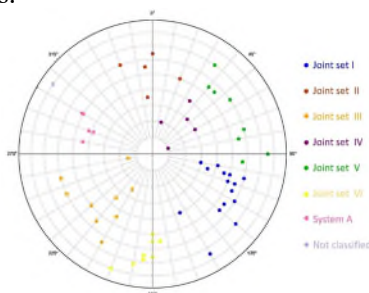


Figure 5. Stéréogramme représentant les pôles des plans de discontinuités relevés sur le terrain sur les deux rives

2.3 Zonage géomécanique

Les cartes et coupes géologiques réalisées en phase de conception ainsi que les observations effectuées lors de la visite de site par les équipes d'ARTELIA ont permis d'identifier cinq types de rocher d'un point de vue structural (fracturation/litage, Tableau 1 Figure 7).

Une valeur de GSI a ensuite été estimée pour chacune de ces unités.



Figure 6. Illustration des différents types de rocher sur site

Tableau 1. Estimation du GSI sur les différents types d'unité structurales

Structure	Degré de fracturation modérément fracturé	Faiblement fortement fracturé	Zone de cisaillement
Finement à moyennement lité	Unité 1 : GSI=45-55	Unité 2 : GSI=30-35	Unité 5 : GSI=<20
Litage épais à massif	Unité 3 : GSI=60-75	Unité 4 : GSI=35-45	

En parallèle, un travail d'exploitation des données de tomographie sismique datant de la construction du barrage a permis de définir un zonage géomécanique de la fondation en 3D à l'aide du logiciel Leapfrog (Bentley Systems). Le résultat est illustré sur la Figure 8 et montre une assez bonne corrélation avec les observations faites sur le terrain.

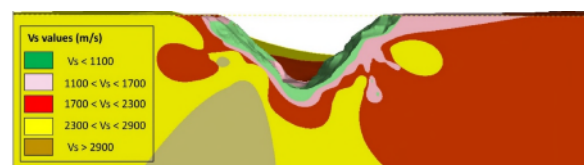


Figure 7. Zonage géomécanique basée sur les données sismiques

A la connaissance des auteurs, cette démarche est rare à l'échelle de la fondation d'un barrage. Elle est renouvelée périodiquement, alternant niveaux de réservoir haut et bas avec près de 100 m de marnage annuel. Aux environs du contact béton/rocher, ces mesures mettent en évidence une augmentation significative des vitesses des ondes sismiques lorsque le réservoir est à niveau haut (+30-40% sur les ondes de cisaillement). C'est un comportement probablement suspecté pour les très grands barrages, mais sûrement peu mesuré.

Dans le cas de l'appui de rive gauche, ces données mettent en évidence, à certains endroits, l'absence d'augmentation de vitesses à cote haute, voire leurs diminutions. Cette observation a attiré l'attention de l'exploitant du barrage qui a alors suspecté une

détérioration des conditions géomécaniques du massif de rive gauche.

2.4 Eléments de diagnostic géologique de la fondation

Les observations de terrain ont permis d'appréhender notamment la cinématique des discontinuités, dont celles de la famille III jouent, avec les joints de stratification, un rôle significatif dans la déformation du massif rocheux ainsi que dans la délimitation de volumes potentiellement mobiles.

Des plis d'entraînement, dessinés par les plans de stratification et induits par le jeu de discontinuités de la famille III (Figure 9), ont été observés dans les galeries en Rive Gauche à proximité de la fondation. Ces plissements favorisent la formation de zones de « dilatance » comportant des fractures ouvertes et concentrant les infiltrations d'eau.



Figure 8. Pli d'entraînement observé en galerie

Les déformations observées ainsi que les stries de faille témoignent d'une cinématique transpressive, cohérente avec les contraintes multidirectionnelles qui s'appliquent au niveau du site du barrage, reflétées aussi par la relation complexe entre les failles majeures. Même si les zones de dilatance ainsi observées sont de taille d'ordre métrique, elles pourraient être considérables à l'intersection de discontinuités majeures et avoir un impact significatif sur le comportement géomécanique et les écoulements.

En parallèle, certains karsts et discontinuités ouvertes de la fondation ont été remplis de matériaux argileux.

Lorsque le niveau du réservoir est haut, le lessivage des matériaux de remplissage des discontinuités (Figure 10) ainsi que l'ouverture élastique par effet de vérin hydraulique, voire l'extension des fractures existantes par hydro-fracturation pourraient augmenter la porosité secondaire de la fondation, ce qui se traduirait par une diminution des vitesses sismiques, d'où l'intérêt d'une auscultation par tomographie sismique afin de surveiller ce phénomène.



Figure 9. Erosion des matériaux de remplissage dans le rocher de fondation du barrage d'Enguri

L'impact de l'érosion interne par lessivage lors des cycles de marnage du réservoir ainsi identifiée est jugé prévalant sur la karstification qui joue également un rôle actif sur l'élargissement de fractures ouvertes.

L'agrandissement progressif des zones de dilatance associé à l'influence d'un chargement cyclique et de contraintes tectoniques à proximité d'une faille active pourrait entraîner une diminution de la résistance du rocher de fondation à long terme. À moyen terme, l'augmentation de la porosité secondaire devrait se traduire d'abord par une augmentation des débits des fuites à travers les appuis du barrage, sachant toutefois que jusqu'à l'établissement de conduits élargis continus amont-aval, les débits sont limités par les relais d'infiltration à moindre section d'écoulement. A ce stade, les données d'auscultation fiabilisées ces 20 dernières années ne montrent ni augmentation du débit des fuites, ni dérive dans le comportement mécanique du barrage.

3 IDENTIFICATION DES VOLUMES ROCHEUX POTENTIELLEMENT MOBILES

3.1 Identification analytique des volumes rocheux

Une identification avec une approche « géométrique » classique a été effectuée dans un premier temps sur la base des discontinuités reportées dans le modèle géostructural 3D créé sur Leapfrog Works (Bentley System). Cinq volumes ressortent de cette identification mais un seul serait cinématiquement compatible avec la poussée combinée de l'eau, du barrage, des sous-pressions et du poids-propre du dièdre (Figure 11). La densité de discontinuités dans le modèle (>50) est particulièrement élevée, conséquence du contexte tectonique du site. Malgré tout le soin accordé par les intervenants dans le cadre de cette approche géométrique, la mise en œuvre d'une méthode plus élaborée s'est avérée nécessaire.

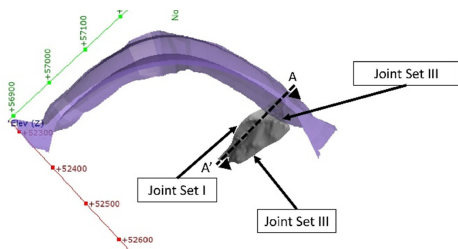


Figure 10. Vue en plan du volume identifié

3.2 Identification automatisée des dièdres rocheux

Une méthode numérique développée en partie pour l'occasion a été mise en œuvre pour vérifier la pertinence de l'identification d'un unique dièdre dans ce contexte complexe.

Cette approche numérique 3D à l'aide de la méthode des éléments discrets (3DEC, Itasca) modélise explicitement les discontinuités dans le système à analyser qui se découpe en autant de blocs rigides que le permettent les discontinuités. Les principaux chargements attendus sont appliqués et l'interaction entre blocs adjacents est prise en compte. Les volumes mobiles sont détectés par un calcul de type $c-\phi$ réduction réitéré jusqu'à voir apparaître des déplacements significatifs. Les détails de cette méthode sont décrits dans un article dédié par ailleurs (EL Moataz Billah 2026).

Dans le cas de la fondation du barrage d'Enguri, cette approche automatisée confirme bien la mobilité du volume identifié de manière analytique.

Quatre volumes rocheux présentent également des déplacements à l'issue de l'analyse de type $c-\phi$ réduction. Néanmoins, leurs déplacements ne sont pas de nature à remettre en question la sécurité ni du barrage, ni de ses équipements et relèvent davantage de la stabilité de talus.

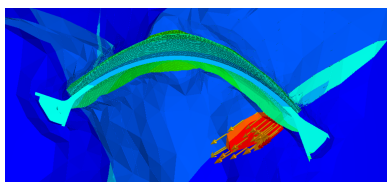


Figure 11: Identification automatique des blocs mobiles

3.3 Paramètres de résistance au cisaillement des discontinuités

Les paramètres de cisaillement des deux familles de discontinuités nécessaires à l'étude ont été évaluées :

- Étant donné l'épaisseur de remplissage importante dans les discontinuités associées à la stratification (famille I), les paramètres retenus pour cette famille sont ceux des matériaux de remplissage, argileux à sableux ;

- Les paramètres de la famille III sont évalués grâce au critère de Barton & Choubey

Les paramètres de résistance au cisaillement retenus pour les deux familles de discontinuités étudiés sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Paramètres de résistance au cisaillement pour les familles de discontinuités I et III

Famille de discontinuités	Cohésion : c (MPa)	Angle de frottement : ϕ ($^\circ$)
I	0	24
III	0.1	31

4 ETUDE DE STABILITÉ

Compte tenu des dimensions du dièdre (90 m de large, 190 m de long), l'hypothèse classique des blocs rigides est remise en question. Par conséquent, une approche graduée a été appliquée, mettant en œuvre la méthode de Londe pour une analyse préliminaire et une approche en contraintes/déformations pour une analyse plus détaillée.

4.1 Méthode de Londe

La méthode de Londe (Londe 1965) a été appliquée pour la situation de projet avec un réservoir à la cote de retenue normale. Conformément à la bonne pratique, une étude de sensibilité vis-à-vis des sous-pressions a été réalisée, exprimées en pourcentage de la charge hydraulique du réservoir. Les faces du dièdre sont identifiées sur la Figure 13. A noter que la face 3 représente une surface très limitée dans le système. Le comportement suivant est mis en évidence selon le niveau considéré de sous-pressions : glissement sur deux faces jusqu'à 40% de la pression hydrostatique, puis glissement sur une face jusqu'à 70%. Au-delà, le bloc devient instable (Figure 14). Jusqu'à 40%, la stabilité dépend de l'angle de frottement le long de la discontinuité I, avec une valeur critique d'environ 40° , déjà incompatible avec les paramètres du Tableau 2. Entre 40% et 70% de sous-pressions, le frottement ne mobilise plus que la face I, et dès 50% la valeur critique de l'angle de frottement atteint $\sim 80^\circ$.

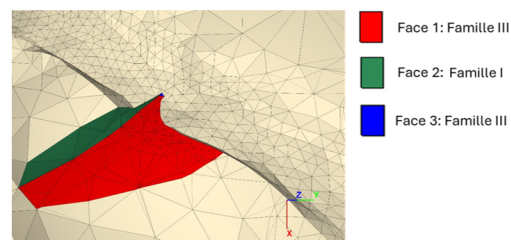


Figure 12: Identification des faces du dièdre pour la méthode de Londe

Les calculs montrent donc une instabilité du dièdre suivant les hypothèses considérées, même avec une faible valeur de sous-pressions. Cela contredit les conditions réelles.

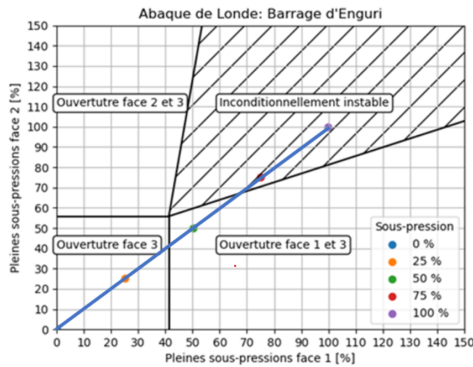


Figure 13: Abaque de Londe avec évolution de l'état de stabilité en fonction des sous-pressions (ligne bleue)

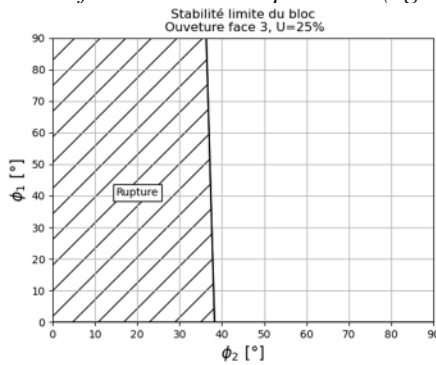


Figure 14 : Couple d'angle de frottement au droit des discontinuités I et III garantissant la stabilité du bloc à 25% de la pression hydrostatique.

4.2 Méthode en contraintes/déformations

4.2.1 Géométrie du modèle

L'approche en contraintes/déformation a été réalisée à l'aide du logiciel FLAC3D développé par Itasca. Ce modèle initialement créé pour l'étude de stabilité du barrage (Andrian, 2025) inclut le barrage et une extension tronquée de la fondation.

La géométrie de la fondation est basée sur les données issues des excavations réelles et la topographie de manière détaillée à l'aval. Cela a permis d'y rajouter directement le dièdre.

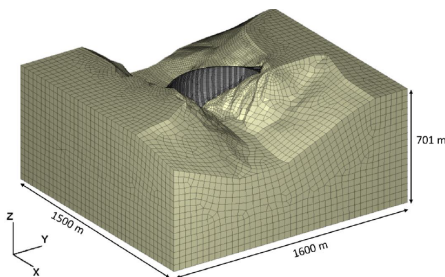


Figure 15 16. Maillage du modèle numérique 3D du barrage d'Enguri (Andrian 2025)

Dans le modèle numérique, il est possible d'intégrer les contraintes à l'interface entre le dièdre et les milieux adjacents que sont la fondation et le barrage (Figure 18).

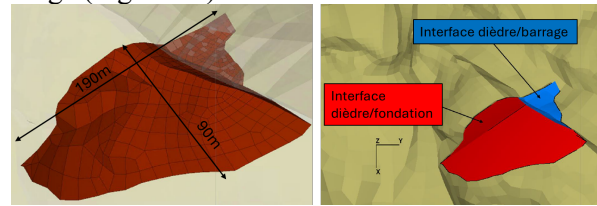


Figure 17. Caractéristiques du dièdre rocheux

4.2.2 Loïs de comportement

Le barrage, la fondation et le dièdre rocheux suivent une loi de comportement élastique linéaire.

Les interfaces entre le dièdre et la fondation suivent également une loi de comportement élastique linéaire empêchant l'ouverture et le glissement. En effet, afin de se rapprocher au maximum de la méthode des coins de Londe, le choix a été fait d'analyser les résultats en termes de contraintes à travers des facteurs de sécurité au glissement, sans modéliser physiquement les glissements et les ouvertures.

4.2.3 Propriétés mécaniques du rocher de fondation

Les propriétés de la fondation sont issues des études géomécaniques. Le zonage présenté en Figure 8 est conservé dans le modèle numérique afin de définir les zones de modules élastiques. Les valeurs des modules sont ensuite calées à partir des données d'auscultation des pendules (Andrian, 2025).

Les propriétés mécaniques du dièdre rocheux, sont fournies dans le Tableau 3.

Tableau 3. Propriétés mécaniques du volume rocheux

Densité (kg/m ³)	Coefficient de poisson (-)	Module d'élasticité (GPa)
2450	0.25	20-25

4.2.4 Mise à jour des paramètres de résistance au cisaillement des joints

Les paramètres de résistance au cisaillement des joints délimitant le dièdre sont considérés dans le calcul des facteurs de sécurité au glissement.

Les paramètres initialement considérés sont ceux issus de l'évaluation géomécanique (Tableau 2). Dans les conditions réelles, le volume rocheux se révèle stable sous son propre poids ainsi que sous le poids du barrage. Par conséquent, à la fin de la construction, le dièdre devrait être stable dans la modélisation numérique. Or, comme le montre la Figure 19, le dièdre apparaît instable vis-à-vis du glissement en prenant en compte ces paramètres. C'est également une tendance montrée par l'application de la méthode

de Londe (§4.1). En revanche, ici aucun décollement total d'une face n'est mis en évidence, justifiant l'utilisation d'une approche en contraintes / déformations. A noter qu'il reste des incertitudes sur la distribution réelle des sous-pressions dans les joints, ne permettant pas de réaliser un calage pour la situation à cote de retenue normale, déjà vécue à plusieurs reprises par le barrage.

Afin de reproduire la seule situation de projet dont les conditions de chargement sont connues, le choix a été fait de réévaluer les paramètres de résistance au cisaillement pour que les facteurs de sécurité au glissement atteignent une valeur de 1.

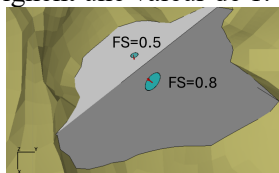


Figure 18. Facteurs de sécurité au glissement en fin de construction du barrage en considérant les paramètres de résistance au cisaillement issus de l'approche de Barton & Choubey

Les paramètres de résistance au cisaillement obtenus après ce recalage sont présentés en Tableau 4.

La cohésion prise en compte peut traduire la rugosité du contact ou son ondulation à grande échelle, et/ou également une persistance de discontinuité plus faible qu'observée.

Tableau 4. Paramètres de résistance au cisaillement après recalage numérique

Famille de discontinuités	Cohésion : c (MPa)	Angle de frottement : φ (°)
I	80	24
III	150	31

4.2.5 Charges appliquées

Afin de se rapprocher au mieux des hypothèses de la méthode de Londe, à l'exception du dièdre rocheux, la fondation du barrage est supposée non pesante. Le poids-propre du barrage est également pris en compte. Les niveaux d'eau dans le réservoir pris en compte dans les calculs sont les suivants :

- La cote de retenue normale (FSL) : 510,5 m ;
 - La cote minimale d'exploitation (LWL) : 410 m ;
 - La crue maximale probable (PMF) : 511,5 m ;
- Les charges hydromécaniques associées ont été considérées sous forme de forces additionnelles :
- Pression hydrostatique appliquée sur le parement amont du barrage ;
 - Sous-pressions appliquées à l'interface barrage/fondation, avec un coefficient rabatement

de 2/3 au droit des galeries conformément aux données d'auscultation ;

- Distribution uniforme des sous pressions au niveau des joints délimitant le volume rocheux.

En l'absence de dispositifs de surveillance couvrant l'ensemble du volume rocheux, une étude de sensibilité a également été réalisée vis-à-vis des sous-pressions en considérant de 0 à 100% de la pression hydrostatique amont dans les calculs pour chaque niveau d'eau.

4.2.6 Résultats

Les résultats sont évalués en termes de facteur de sécurité au glissement le long des plans délimitant le volume rocheux et s'exprimant comme suit :

$$FS = \frac{C \times A + N' \times \tan(\varphi)}{T} \quad (2)$$

Où N' et T sont les résultantes des forces normales effectives et tangentielles le long des plans de glissement, c et φ les paramètres de résistance au cisaillement du plan considéré, et A la surface de ce plan.

Les facteurs de sécurité au glissement évalués pour chaque niveau d'eau et chaque hypothèse de sous-pressions sous le volume rocheux sont reportés sur le graphique en Figure 20.

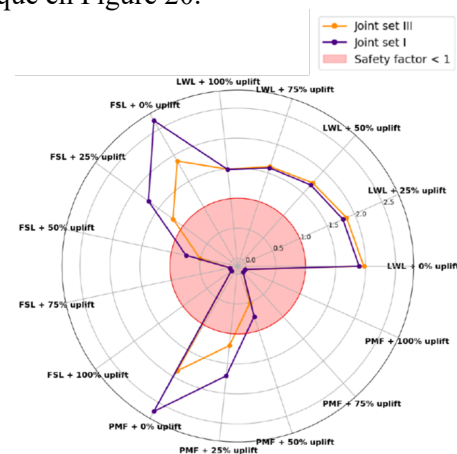


Figure 19. Synthèse des valeurs de facteur de sécurité au glissement pour chaque cas de charge

La stabilité du volume rocheux est pour un niveau d'eau à la cote minimale d'exploitation (LWL) tant que les sous-pressions n'excèdent pas 100 % de la pression hydrostatique amont. Une situation contraire peut exister en cas de présence de nappe de versant par exemple. En revanche, pour les niveaux à la cote de retenue normale (FSL) et la crue maximale probable (PMF), la stabilité est uniquement garantie lorsque les sous-pressions, appliquées uniformément le long des discontinuités du coin rocheux, sont inférieures à environ 37.5% de la charge hydraulique amont.

Seule la partie du dièdre rocheux le plus proche du barrage est équipée de piézomètres. Ceux-ci confirment en effet un rabattement de nappe satisfaisant. Toutefois, la distribution réelle des sous-pressions vers l'aval est peu connue. Si l'hypothèse d'une répartition uniforme des sous-pressions de l'amont vers l'aval considérée dans les calculs peut paraître pénalisante, l'existence de nappe de versant ou de contournement du voile d'injection ne peut être totalement exclue compte tenu de la fracturation du massif et de l'extension du système à considérer.

5 CONCLUSION

Le barrage d'Enguri est construit dans une zone tectonique active à l'échelle régionale gouvernée par un contexte compressif. Le site du barrage lui-même est à proximité d'une faille majeure et traversé par une deuxième faille, le jeu desquelles témoigne d'un régime transpressif. La rotation avérée du champ de contraintes régionales a conduit à des interactions complexes entre les blocs délimités par des discontinuités. Il en résulte un massif rocheux hétérogène d'un point de vue structural et géomécanique. Il est dissymétrique avec une rive droite fortement affectée par l'effet des deux failles contrairement à la rive gauche. Le massif comporte par conséquent plusieurs familles de discontinuités dont la multiplicité des pendages et des orientations met en question la représentativité des valeurs moyennes.

Depuis sa construction, la fondation de ce barrage fait l'objet de campagnes géophysiques périodiques de mesure des vitesses de propagation des ondes sismiques. Ces campagnes mettent en évidence une augmentation de ces vitesses lorsque la cote de retenue augmente de manière saisonnière (+100 m). Ce comportement rarement mesuré est aléatoire sur la rive gauche avec, pour certaines zones, une absence de variation voire une baisse des vitesses avec la montée de la cote de retenue. Ces mesures ont attiré l'attention de l'exploitant du barrage qui y a associé une détérioration du massif rocheux. D'après les auteurs, ce phénomène peut trouver son explication dans le lessivage progressif des remplissages des discontinuités et la karstification du massif avec les cycles de marnage. Sa progression devrait se traduire dans un premier temps par une augmentation des débits de fuites avant d'impacter les déplacements du barrage et de sa fondation. Le dispositif d'auscultation en place, relativement étendu, ne détecte aucune de ces tendances à ce stade.

Dans ce contexte géologique torturé, l'identification et l'étude de stabilité de dièdres rocheux est essentielle à l'évaluation de la sécurité du

barrage. L'existence d'une cinquantaine de discontinuités dans la zone d'intérêt pour détecter les dièdres a rendu la tâche particulièrement laborieuse. Une méthodologie automatisée a été mise en œuvre pour confirmer avec succès les résultats de l'approche analytique classiquement utilisée par la profession.

Compte tenu de ses larges dimensions, l'étude de stabilité du dièdre a fait appel à une approche graduée de calcul : passant des blocs rigides (méthode de Londe) à une méthode en contraintes/déformations. Cette dernière contredit le comportement décrit par la méthode simplifiée et son usage, jugé plus réaliste par les auteurs, semble se justifier dans le cas de dièdres de grandes dimensions.

Dans le contexte tectonique actif du site d'implantation du barrage, le défi majeur pour celui-ci et sa fondation est certainement la tenue au séisme, dont l'évaluation de l'aléa est actuellement en cours.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adamia&al (2017). Postcollisional tectonics and seismicity of Georgia. *The Geological Society of America*, Special Paper 525, pp.1-38
- Andrian F., Vonié M., Yziquel A., Tardieu B., Robbe E., Humbert N. (2025), Arch dams under moderate to high seismic loads: review and update of failure mechanisms based on recent numerical analyses, *Twenty-Eight International Congress on Large Dams/Vingt-Huitième Congrès International des Grands Barrages*, Chengdu.
- El Moataz Billah C., Canac R., Peco S., Fournie Y., Andrian F. (2026), Une méthode innovante pour l'étude de stabilité d'un massif d'appui d'un barrage-poids, dans : *Journée Nationale de Géotechnique et Géologie de l'ingénieur*, Grenoble, France
- Itasca (2024), 3DEC Theory and Background, [3DEC Theory and Background — Itasca Software 9.6 documentation](#)
- Londe P. (1965), Une méthode d'analyse à trois dimensions de la stabilité d'une rive rocheuse, *Annales des Ponts et chaussées*, Janvier-Février (n°1), pp 38-61, (Disponible à : https://heritage.ecoledesponts.fr/ark:/12148/bpt6k_13422521/f6.item)
- Tibaldi &al (2019). Landslides near Enguri dam (Caucasus, Georgia) and possible seismotectonic effects. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. 71-91 . <https://doi.org/10.5194/nhess-19-71-2019>