

Une méthode innovante pour l'étude de stabilité d'un massif d'appui d'un barrage-poids

An Innovative Method for Evaluating the Stability of a Gravity Dam's Abutment

Chady EL-MOATAZ BILLAH^{1*}, Robin CANAC¹, Sophie PECO², Yann FOURNIE², Frédéric ANDRIAN¹

1 ARTELIA, Echirolles, France

2 SHEM, Balma, France

**chady.el-moataz-billah@arteliagroup.com*

RESUME : L'actualisation de l'étude de dangers d'un barrage-poids dans les Pyrénées a mis en évidence une connaissance limitée du massif rocheux en aval immédiat. Ce massif se distingue par l'absence de butée topographique en rive gauche. Une étude de caractérisation géologique structurale assortie d'une étude de stabilité de cet appui rocheux a donc été menée en mettant en œuvre une méthodologie innovante.

L'étude porte sur une synthèse géologique structurale et géomécanique sur la base des données à disposition et incluant des relevés de terrain. Un modèle géologique 3D a pu être établi, mettant en évidence un nombre significatif de blocs rocheux en interaction et de volumes comparables aux dimensions caractéristiques du barrage. De plus, la grande majorité des blocs ayant plus de trois faces, la méthode de Londe s'applique difficilement. Par conséquent, l'analyse cinématique de ces blocs n'a pas été réalisée par une identification analytique. Une étude cinématique numérique dont la méthodologie est détaillée dans l'article a été mise en œuvre. Elle mobilise un modèle numérique tridimensionnel à l'aide de la méthode des éléments discrets, représentant le barrage et les blocs rocheux comme des solides indéformables interagissant le long de discontinuités géologiques. Compte tenu des incertitudes sur l'orientation des discontinuités en profondeur, une première étude de sensibilité semi-automatique a été réalisée. Trois blocs critiques de volumes compris entre 70 m³ et 2400 m³ ont été identifiés comme ayant l'impact le plus significatif sur la stabilité des volumes rocheux. Une seconde étape d'étude de sensibilité sur l'intensité des sous-pressions a ensuite été menée comme le veut la pratique. La répartition et l'évolution des efforts résultants pour l'intégralité de la gamme d'intensité des sous-pressions considérées (10% à 100%) ont été analysées, ainsi que les facteurs de sécurité pour chaque bloc et les marges de sécurité globales du massif rocheux de fondation.

L'article discutera en détail des méthodes, des résultats et des reconnaissances complémentaires réalisées pour réduire les incertitudes sur la configuration géologique, et les paramètres géomécaniques.

ABSTRACT: The update of the safety assessment for a gravity dam in the Pyrenees highlights limited knowledge of the rock mass immediately downstream. This abutment is characterised by the absence of keying on the left bank. A geostructural analysis combined with a stability study of this abutment is therefore carried out using an innovative methodology.

The study carries out a geostructural and geomechanical synthesis based on available data in addition to field surveys. A 3D geological model is created, highlighting a significant number of interacting rock blocks and volumes comparable to the characteristic dimensions of the dam. Furthermore, as most of the blocks have more than three faces, the Londe method is impracticable. Consequently, the kinematic analysis of these blocks is not performed using analytical identification. A numerical kinematic study, which methodology is detailed in the article, is carried out. It uses a three-dimensional numerical model based on the discrete element method, representing the dam and the rock blocks as non-deformable solids interacting along geological discontinuities. Given the uncertainties regarding the orientation of the discontinuities at depth, a first semi-automated sensitivity study is carried out. Three critical blocks with volumes ranging from 70m³ to 2400m³ are identified with the most significant impact on the rock volumes stability. A second sensitivity study was then carried out on the intensity of pore pressure, as is standard practice. The distribution and evolution of the resultant forces over the entire range of the considered pore pressure intensities (10% to 100%) were analysed, as well as the safety factors for each block and the overall safety margins of the rock foundation.

The article will discuss in detail the methods, results and additional surveys carried out to reduce uncertainties regarding the geological configuration, and geomechanical parameters.

Mots-clés : Barrage ; Massifs rocheux fracturés ; Géologie structurale 3D ; Méthode des éléments discrets ; Stabilité de blocs

1 INTRODUCTION

Le barrage objet de l'étude est un barrage-poids légèrement arqué à profil triangulaire de classe A. Le corps du barrage est constitué de 5 plots en béton de 25 mètres de largeur. Le plot de plus grande hauteur s'élève à 31 m au-dessus des fondations (25 m au-dessus du terrain naturel). La fondation n'est pas équipée d'un dispositif de drainage. Les parements sont réalisés en moellons de granite. Sur le parement amont, ceux-ci recouvrent un masque en béton armé. Sur le parement aval, les moellons sont disposés en escalier.

L'étude de dangers de ce barrage a mis en évidence que l'état des connaissances du massif rocheux en aval rive gauche (RG) du barrage était limité. Plus particulièrement, ce massif n'a pas de butée en raison de la présence d'une gorge encaissée à l'aval immédiat de l'ouvrage. Afin de pallier ce manque de connaissance, la SHEM a missionné ARTELIA pour la réalisation d'une synthèse des données géologiques et géomécaniques et pour la réalisation d'une étude de stabilité de l'appui rocheux du barrage en RG. Cette étude est réalisée par le biais d'une modélisation tridimensionnelle du barrage et des coins rocheux, sous forme de solides indéformables, méthode jugée innovante par les auteurs et décrite dans cet article.

2 ETAT DE L'ART DES PRATIQUES USUELLES

2.1 Cas général des barrages sur fondation au rocher

Depuis les années 60 et l'accident du barrage de Malpasset, l'analyse des fondations rocheuses ainsi que leurs modes de ruptures associés sont pleinement intégrés aux études de stabilités des barrages neufs et existants, en particulier les barrages-voûtes (CFBR 2021). Dès lors qu'un massif rocheux est fracturé, le mode de rupture par glissement d'un ou de plusieurs volumes rocheux en fondation est étudié (CFBR 2021).

Une étude de stabilité de rupture de volumes rocheux en fondation d'un barrage vise à s'assurer que les appuis rocheux ne peuvent pas se déstabiliser sous l'effet combiné de leur poids-propre, des poussées transmises par le barrage (dont la pression hydrostatique) et des pressions d'eau dans les discontinuités. Dans un premier temps, la démarche consiste à identifier les volumes rocheux potentiellement instables à partir d'un modèle géologique, intégrant des éléments structurels (failles, discontinuités, schistosité, etc.), hydrogéologique (perméabilités, chemins d'écoulement, etc.) et

géomécanique. Le modèle géomécanique vise à caractériser mécaniquement les plans de discontinuités identifiés (rugosité, remplissage, espacement) de manière à en estimer les caractéristiques de résistance au cisaillement. Dans un second temps, la démarche cherche à quantifier la marge de sécurité vis-à-vis du glissement des volumes rocheux identifiés.

En fonction des résultats, l'étude débouche sur des recommandations opérationnelles, comme le besoin de reconnaissances complémentaires, de solutions de confortement (drainage, injections, ancrages/décapage local) et la définition ou la mise à niveau des dispositifs d'auscultation (piézomètres, mesures de débits, déplacement) pour permettre d'identifier et de suivre toute évolution.

2.2 Méthodes d'analyse usuelles

2.2.1 Méthodes d'identification des volumes mobiles

La pratique habituelle utilise l'approche déterministe. A l'aide du modèle géologique, les discontinuités dont la persistance est suffisamment grande à l'échelle du système analysé sont identifiées. A partir de cette sélection, une analyse « cinématique » est menée pour caractériser les volumes potentiellement instables.

Il existe plusieurs types d'analyses cinématiques basées sur des approches géométriques et/ou mécaniques (Lopard 2021). L'approche généralement utilisée dans l'étude des fondations des barrages rigides est géométrique. Elle consiste à étudier la géométrie de chaque volume pour déterminer si d'éventuels mouvements pouvant entraîner par cascade la ruine du barrage sont possibles. Une fois les volumes mobiles identifiés, des analyses de stabilité sont menées sur ces blocs. Plusieurs approches sont possibles pour réaliser ces études de stabilité. La plus commune dans le domaine des barrages-voûtes est la méthode de Londe et les méthodes qui s'en inspirent.

2.2.2 Méthode des coins de Londe

Il s'agit d'une méthode développée par Pierre Londe en 1965 (Londe 1965) pour analyser la stabilité des volumes rocheux en fondation. Cette méthode analytique, d'analyse en 3 dimensions, permet d'identifier les modes de glissement d'un volume rocheux et d'estimer l'angle de frottement nécessaire pour atteindre l'équilibre. Pour cela, la méthode prend en compte les forces s'appliquant sur le volume rocheux et analyse successivement l'état de stabilité de chaque face qui le délimite. Les forces généralement considérées sont le poids-propre, la poussée du barrage, ainsi que les sous-pressions. Il est généralement recommandé de réaliser une étude de

sensibilité sur la valeur des sous-pressions, compte tenu de leur incertitude (CFBR 2021, Londe 1965).

Cette méthode suppose que les volumes analysés sont de forme tétraédrique, c'est-à-dire des volumes rocheux à 4 faces dont une est la surface du terrain naturel (Figure 1). Les faces du bloc, exceptée la dernière formée par le terrain naturel, sont supposées planes. La résistance au glissement le long de chaque plan est uniquement due à l'angle de frottement de la discontinuité, la cohésion est supposée nulle. La résistance à la traction des plans est aussi supposée nulle de sorte que si l'effort normal sur une face devient négatif (tendu), alors le décollement du contact survient, et la résistance du volume repose sur les autres faces. Il en découle une méthode par itérations jusqu'à ce que tous les efforts relâchés au droit des faces tendues soient éventuellement équilibrés au droit des faces comprimées. La méthode de Londe suppose que le volume rocheux est indéformable. Par ailleurs, les moments de force s'appliquant au coin rocheux sont négligés.

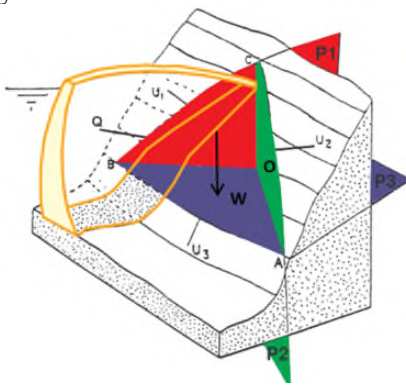


Figure 1: Schéma de principe de la méthode Londe

La méthode de Londe est relativement peu coûteuse à mettre en œuvre et permet d'identifier le mode de rupture éventuel du volume rocheux en fonction des sous-pressions appliquées (soulèvement, glissement sur une face, glissement sur deux faces). Par ailleurs, elle permet une première quantification des angles de frottement à mobiliser aux faces du bloc pour garantir la stabilité. C'est la méthode indiquée pour les configurations classiques.

Cependant, cette méthode comporte des limites. Les volumes rocheux de géométrie complexe (nombre de face supérieurs à 4, faces non planes) ne peuvent être analysés sans modification de fond de l'approche. L'hypothèse de cohésion nulle a tendance à surestimer les valeurs d'angle de frottement nécessaires à la stabilité, ou du moins une adaptation relativement laborieuse est nécessaire pour tenir compte de cette cohésion. L'hypothèse d'indéformabilité du volume rocheux et des plans de contact ne permet pas une ouverture partielle des plans. Enfin, une interaction entre plusieurs blocs adjacents ne peut pas être appréhendée.

3 PROPOSITION D'UNE APPROCHE NUMÉRIQUE ALTERNATIVE

L'approche numérique proposée dans cet article combine un modèle géologique 3D (Leapfrog, Bentley Systems) et un modèle numérique utilisant la méthode des éléments discrets (3DEC, Itasca) qui représentent la totalité du système à analyser.

Selon les auteurs, cette approche permet de fiabiliser la détection des volumes mobiles en automatisant la démarche tout en réduisant les erreurs d'appréciation liées à l'approche analytique. De plus, l'étude de stabilité qui peut être réalisée avec des géométries de volumes rocheux non prédéfinis, tient compte également des moments des forces, analyse l'interaction entre plusieurs blocs adjacents avec des contacts non rigides, permettant une ouverture partielle, plus réaliste.

3.1 Nouvelle méthode d'identification des volumes mobiles

La détection des volumes mobiles repose sur une démarche en deux temps, combinant une analyse semi-automatisée à l'aide d'un modèle de calculs aux éléments discrets 3D, dont les résultats sont ensuite validés par un géologue.

Dans un premier temps, un modèle géologique 3D est créé en y intégrant toutes les discontinuités relevées sur le terrain. Ensuite, les discontinuités permettant de délimiter des volumes rocheux sont importées dans un modèle numérique 3D qui comprend également le barrage dans la zone d'intérêt. Pour intégrer les incertitudes de levé, plusieurs scénarios d'orientation des discontinuités jugés probables sont testés en faisant varier les pendages et leurs directions autour des hypothèses initiales du modèle géologique. Chaque scénario fait ensuite l'objet d'une identification des volumes mobiles par un calcul numérique incluant des blocs rigides en interaction sur des surfaces de contact régies par un frottement de Coulomb.

La susceptibilité au mouvement est identifiée par une procédure de type $c-\varphi$ réduction, consistant à diminuer progressivement la cohésion (c) et l'angle de frottement (φ) des discontinuités, jusqu'à l'apparition d'un déplacement significatif de volume. À ce stade, toutes les forces appliquées aux blocs et au barrage sont modélisées. La configuration la plus défavorable issue de l'analyse de sensibilité permet alors de délimiter et de hiérarchiser les volumes potentiellement mobiles, retenus comme "blocs critiques". Les résultats sont enfin validés à dire d'expert par le géologue avant de sélectionner la configuration la plus critique qui fera l'objet d'une étude de stabilité détaillée.

L'approche traite donc explicitement les incertitudes d'orientation, en évaluant un grand nombre de configurations plausibles en parallèle tout en intégrant l'interaction entre les volumes. C'est une démarche difficilement envisageable avec une approche analytique.

3.2 Méthode d'analyse de stabilité des volumes mobiles (3DEC)

L'étude de stabilité reprend les forces appliquées lors de la détection des volumes rocheux mobiles, et introduit une analyse de sensibilité sur les sous-pressions le long des discontinuités du massif pour tenir compte des incertitudes hydrogéologiques (CFBR 2021, Londe 1965). L'étude de stabilité est cette fois menée sur la configuration estimée préalablement la plus critique.

L'approche évalue, pour chaque situation de projet, l'état de stabilité au glissement à l'échelle de chaque face de blocs. Celui-ci est calculé en suivant la loi de frottement de Coulomb, considérant l'équilibre entre résultantes normales effectives N' et tangentielles T et la résistance au cisaillement (φ l'angle de frottement de la face de contact, c sa cohésion et A sa surface).

$$F_s = \frac{N' \tan \varphi + cA}{T} \geq 1 \quad (1)$$

Pour rester dans la logique de la méthode de Londe, aucun critère spécifique n'est donné à la valeur du facteur de sécurité F_s . L'analyse se concentre davantage sur son évolution en fonction de la valeur des sous-pressions considérées.

4 APPLICATION À UN CAS CONCRET

4.1 Spécificités du barrage étudié

Le barrage étudié est implanté dans un massif granitique, au niveau d'un verrou fermant un ancien lac glaciaire. Un thalweg abrupt et profond d'une vingtaine de mètres incise en biais le seuil formé par ce verrou, selon une orientation approximative de N120°, vraisemblablement guidée par l'une des deux failles principales identifiées dans les études historiques du barrage (Figure 2).

La combinaison de la complexité du contexte géologique structural, avec la présence d'une topographie marquée par la présence d'une gorge escarpée à l'aval de l'ouvrage, rend l'analyse cinématique par les méthodes analytiques usuelles particulièrement délicate.

A l'inverse, la possibilité de réaliser des relevés de terrains par drones, dans des secteurs inaccessibles,

permet de compléter les relevés de terrains avec des données géolocalisées, exploitables dans le cadre de modèles géologiques 3D.

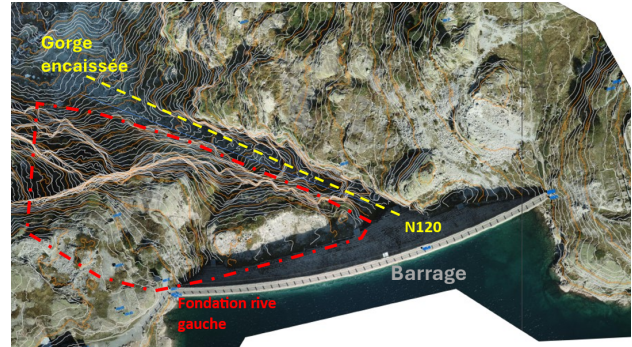


Figure 2 : Photographie aérienne interprétée représentant la configuration topographique du verrou avec identification de la zone de butée amincie en rive gauche.

Ces particularités ont ainsi contribué à développer une approche innovante visant à caractériser la stabilité de la fondation du barrage à l'aide d'outils numériques 3D. Les investigations géologiques et géotechniques ont aussi été adaptées de manière à caractériser plus particulièrement les paramètres nécessaires au déploiement de cette méthodologie.

4.2 Recueil des données

4.2.1 Relevé sur site

Dans un premier temps, un relevé sur site a été réalisé dans l'objectif d'acquérir les données permettant de caractériser, à partir de la surface, la structure de la fondation et de déceler le nombre et la disposition des volumes rocheux constituant le massif en rive gauche.

Les reconnaissances de terrain ont été concentrées sur l'évaluation du type de substratum, sur la description de son état d'altération ainsi que sur le relevé du réseau de discontinuités. La caractérisation des familles de discontinuités a inclus une description de leur orientation, de leur espacement, de leur persistance, de leur rugosité et de leur remplissage.

Les données de surface collectées sur site ont également permis de subdiviser le massif de fondation en rive gauche en plusieurs volumes rocheux principaux, à la faveur des discontinuités les plus lisibles dans le paysage et à la persistance la plus grande. Ces volumes ont été eux-mêmes subdivisés en plusieurs sous-ensembles, selon des discontinuités moins marquées, mais dont la persistance peut être significative, comme illustré sur la Figure 3.

La sélection des discontinuités et la détermination des volumes rocheux ont été menées au regard de la problématique de stabilité de la fondation du barrage, de manière à définir des volumes rocheux dont les proportions sont compatibles avec le mécanisme de rupture étudié. Cette considération justifie que

certaines discontinuités visibles au cours du relevé n'aient pas été retenues pour l'étude et que la pertinence de l'interprétation géologique développée n'est valable que dans le cadre de la méthodologie appliquée.

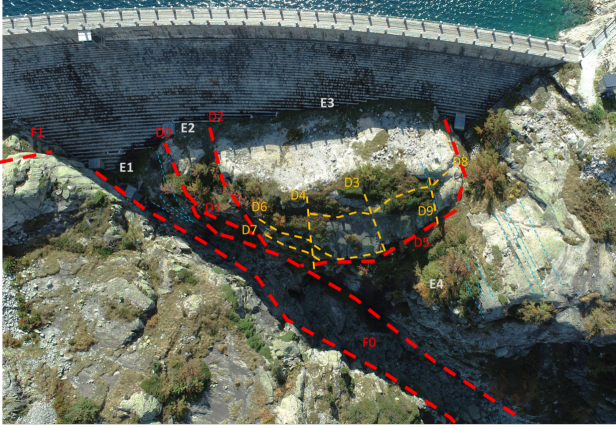


Figure 3 : Illustration sur une photographie prise par drone des discontinuités et volumes rocheux identifiés à la suite du relevé aérien sur site

Les relevés ont néanmoins été effectués sans moyens de progression en terrain d'accès difficiles, ce qui limite les possibilités de caractérisations dans le secteur escarpé de la gorge. Ces lacunes, qui auraient pu se trouver particulièrement préjudiciables pour la fiabilité de l'étude, ont pu être comblées par les approches complémentaires présentées ci-dessous.

4.2.2 Exploitation du nuage de points

Le relevé photogrammétrique par drone réalisé dans le cadre de l'étude a permis de constituer un nuage de points de la topographie du site, doté d'une résolution de l'ordre de 10 centimètres, suffisamment élevée pour permettre la caractérisation des structures géologiques du massif.

L'exploitation de ce nuage de points a été effectuée à l'aide du logiciel CloudCompare, qui propose des outils permettant de réaliser numériquement des mesures de pendages de plans. Ces mesures numériques ont ainsi complété les relevés de terrains dans les secteurs qui n'ont pas pu être parcourus au niveau des falaises et ravins (Figure 4).



Figure 4 : Illustration de la prise de pendage de plans dans le thalweg au niveau d'une falaise constituant l'extrémité du massif de fondation en rive gauche du barrage, à partir du logiciel CloudCompare

4.3 Modèles géologique et géotechnique

4.3.1 Modèle géologique 3D

Les relevés de terrains et l'analyse du nuage de points ont été, dans un premier temps, exploités à l'aide du logiciels SIG QGIS dans le but de géolocaliser l'ensemble des observations effectuées.

Les données ont ensuite été exploitées à l'aide du logiciel de modélisation géologique 3D Leapfrog, afin de générer, par interpolation, les géométries des discontinuités qui seront intégrées dans les modèles de calculs. L'interpolation des discontinuités est plus particulièrement guidée par les pendages mesurés et par la projection des discontinuités sur la topographie, ces éléments constituant de fait des paramètres déterminants pour la fiabilité du modèle.

Les géométries générées ont par la suite été validées par un travail de contrôle visuel de la cohérence des surfaces interpolées. Le modèle 3D obtenu est illustré sur la Figure 5.

Les plans générés ont présenté des courbures et des ondulations, inhérentes à l'interpolation. Ces courbures et ondulations ont finalement été simplifiées par des plans moyens exploitables dans le modèle numérique.

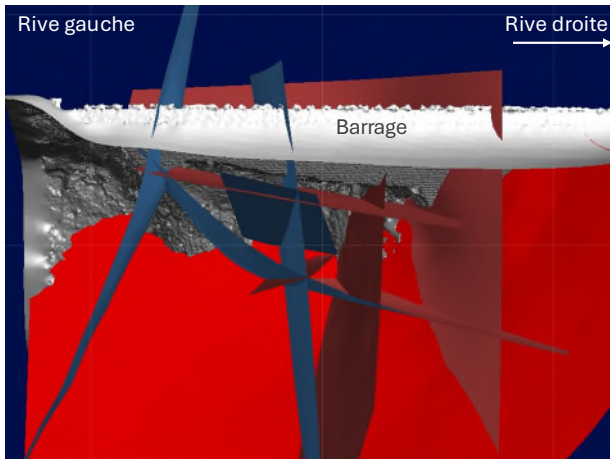


Figure 5 : Modèle numérique de terrain du barrage (en blanc) et plans de discontinuités interpolés sur le logiciel Leapfrog en rive gauche (en rouge et bleu), observés depuis l'amont du barrage en direction de l'aval

4.3.2 Modèle géotechnique

La caractérisation géomécanique du massif rocheux a été réalisée par une approche combinant essais in situ, observations structurales et approches bibliographiques.

La démarche a consisté dans un premier temps à caractériser la résistance du rocher intact en se basant à la fois sur des mesures au marteau de Schmidt effectuées lors du relevé et sur une estimation qualitative des valeurs de résistance selon la classification proposée par l'ISRM. Les valeurs de résistances relativement élevées obtenues ont permis de justifier la prépondérance des mécanismes de ruptures selon les discontinuités identifiées plutôt qu'au travers de la rupture du massif rocheux.

La caractérisation des joints s'est ensuite appuyée sur un relevé détaillé des discontinuités et sur l'application de la méthode de Barton-Choubey avec, en l'absence d'essais de laboratoire, estimation des paramètres JRC, JCS et angle de frottement résiduel. Les observations, effectuées en surface, en galerie au niveau des accès à l'usine souterraine et en forage lors de reconnaissances effectuées sur le secteur, ont montré des joints majoritairement fermés ou faiblement ouverts, peu altérés et sans remplissage significatif. L'application des critères, couplée à une comparaison basée sur la littérature scientifique, a conduit à retenir, pour l'étude cinématique préalable, une valeur prudente de résistance au cisaillement des joints caractérisée par un angle de frottement de 45° et une cohésion nulle.

4.4 Etude de stabilité

4.4.1 Géométrie

Le modèle numérique du barrage étudié inclut la partie rive gauche du barrage, sa fondation et l'entièreté du thalweg. Les discontinuités et non-linéarités modélisées sont le contact barrage/fondation et les discontinuités du massif rocheux. Au total, 11 discontinuités et environ 120 volumes rocheux sont modélisés (Figure 6).

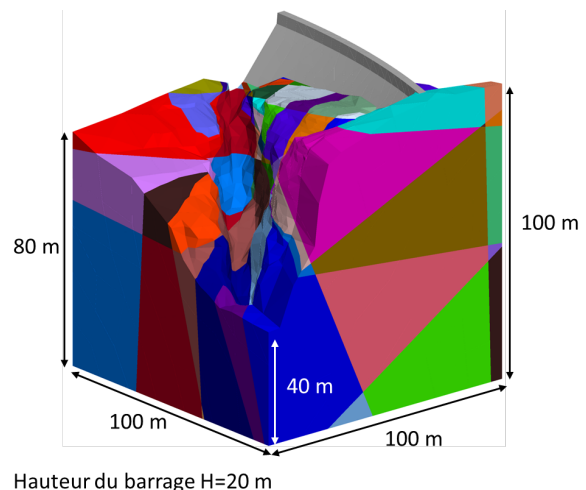


Figure 6: Géométrie du modèle numérique (vue depuis la rive gauche aval)

4.4.2 Conditions aux limites

Les déplacements et rotations sont bloqués à la base du modèle. Les déplacements horizontaux ainsi que toutes les rotations sont bloquées sur les faces latérales, à l'exception de l'extrémité coupée du barrage. Pour cette face, seules les translations en direction de la rive droite sont bloquées et les rotations selon l'axe rive/rive sont autorisées pour permettre de modéliser une éventuelle ouverture du pied amont. Il est précisé que l'extension du modèle englobe totalement les volumes mobiles identifiés au préalable. Les conditions aux limites ne sont donc pas de nature à empêcher leurs déplacements.

4.4.3 Forces appliquées

Les forces modélisées sont le poids propre du barrage et de la fondation, la poussée hydrostatique s'appliquant sur les faces amont du barrage et de la fondation et les sous-pressions appliquées au contact barrage/fondation et aux droites des discontinuités du massif.

La répartition des sous-pressions au contact barrage/fondation est linéaire. En l'absence d'instrumentation du massif et de manière conservative, les considérations pour les sous-

pressions au droit des discontinuités sont les suivantes (Figure 7) :

- Si le point se situe au droit du pied amont du barrage, ou plus en amont, la valeur des sous-pressions est égale à $\sigma = \alpha \rho_e g (z_{retenue} - z_{point})$, α étant un coefficient variant de 0 à 100% pour étudier la sensibilité du modèle aux valeurs de sous-pressions, ρ_e est la masse volumique de l'eau et g la constante de gravité;
- Si le point se situe à l'aval du versant du thalweg, la valeur de sous-pression considérée est nulle ;
- Si le point se situe entre le pied amont de la retenue et le versant amont du thalweg, une interpolation linéaire est faite, sur la base de la distance horizontale amont/aval séparant le point considéré du pied amont du barrage. Cette hypothèse, bien que non représentative et conservatrice dans les zones aval proches de la surface, permet d'appliquer une règle unique pour les calculs.

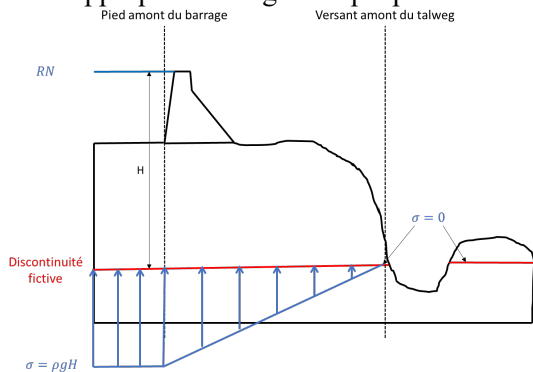


Figure 7: Principe de modélisation des sous-pressions dans le massif

4.4.4 Paramètres de calculs

Le béton du barrage a une masse volumique de 2300 kg/m^3 et celle du massif rocheux est de 2700 kg/m^3 . Conformément à l'étude de stabilité existante, il est pris un angle de frottement de 45° avec une cohésion de 30 kPa pour l'interface entre le barrage et la fondation. Un angle de frottement de 45° et une cohésion nulle sont considérés pour les discontinuités du massif rocheux.

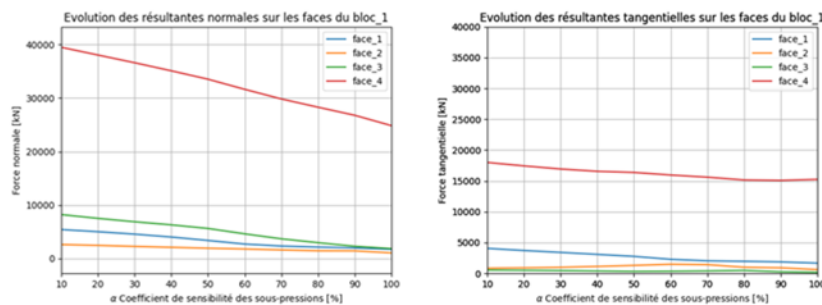


Figure 9: Evolution des résultantes normales et tangentielles des faces 1 à 4 du bloc 1

4.5 Résultats

4.5.1 Identification des blocs mobiles

Au total six configurations de discontinuités ont été testées, en faisant varier le pendage des discontinuités les plus déterminantes pour la stabilité des volumes rocheux (D2 et D6 sur la Figure 8).

La configuration la plus défavorable a mis en évidence la mobilité de trois volumes principaux (blocs 1 à 3) ainsi que de trois volumes secondaires (blocs 1.2, 2.2 et 3.2). Le mouvement des volumes secondaires est déclenché uniquement après celui des volumes principaux. Dans la suite, seule la stabilité des volumes principaux est par conséquent analysée.

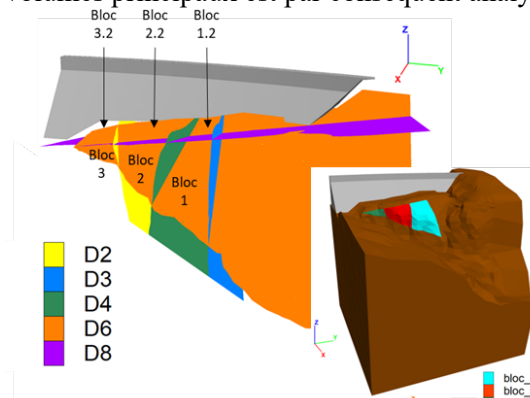


Figure 8: Représentation des volumes mobiles et de leurs discontinuités génératrices (D2, D3, D4, D6 et D8)

4.5.2 Analyses de stabilité des volumes mobiles

L'analyse des blocs 1 à 3 indique que les efforts se concentrent sur D6, inclinée vers l'aval (face 4, Figure 9), qui constitue la surface principale de résistance et le plan de glissement gouvernant la stabilité des blocs. Les calculs montrent que les blocs 1 et 2 bénéficient d'un facteur de sécurité au glissement supérieur à 1 jusqu'à 100% des sous-pressions, tandis que le bloc 3 se retrouve à la limite du glissement à partir de 50% des sous-pressions (Figure 10). Pour analyser le comportement global du massif, un calcul avec réduction de $c-\varphi$ a été réalisé pour chaque valeur de sous-pressions au-delà de 50%. Ce calcul montre qu'hormis le bloc 3, le massif reste stable jusqu'à une valeur de 100%.

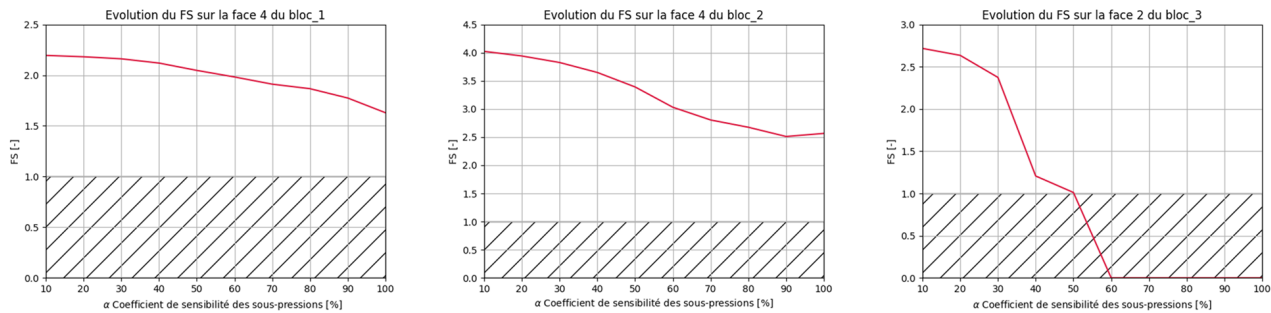


Figure 10: Evolution du facteur de sécurité au glissement le long de D6 pour les blocs 1 à 3

5 RECONNAISSANCES IN-SITU

Des recommandations graduelles visant à fiabiliser les hypothèses de l'analyse de stabilité ont été proposées.

L'objectif de la première phase de reconnaissances géotechniques consiste à effectuer des sondages carottés assortis d'imagerie de paroi pour déterminer plus précisément la géométrie des discontinuités du massif, en particulier celles jugées déterminantes pour le glissement. Des essais de cisaillement sur joints, ainsi qu'un suivi de la piézométrie seront effectués dans un second temps en cas de nécessité.

Les forages réalisés sont encore en cours d'analyse à la date de rédaction de l'article. Néanmoins, les premiers résultats, comprenant une imagerie de paroi orientée avec caractérisation des discontinuités, ont permis de confirmer la présence de discontinuités à des profondeurs et à des orientations concordantes. L'analyse approfondie de ces résultats devra permettre de fiabiliser la représentativité des hypothèses prises sur les orientations et pendages des discontinuités, ainsi que les valeurs de sous-pressions, de manière à avoir un jugement plus critique les conclusions de l'étude établie.

6 CONCLUSIONS

Cette étude montre que l'approche numérique proposée constitue une réponse robuste lorsque les méthodes classiques atteignent leurs limites, notamment en présence de géométries de volumes rocheux complexes, ou lorsque les analyses de stabilité analytiques aboutissent à des conclusions trop conservatives. En intégrant explicitement le réseau de discontinuités, la modélisation permet de représenter plus fidèlement les mécanismes de rupture potentiels à l'échelle du massif. Elle permet également la prise en compte d'aspects déterminants pour la stabilité des volumes rocheux tels qu'une géométrie plus réaliste, l'interaction entre blocs, les moments des forces.

Par ailleurs, cette méthode permet de mieux encadrer les incertitudes, qu'elles soient géométriques

ou géomécaniques, grâce à la mise en œuvre systématique d'analyses de sensibilité. Elle permet alors d'obtenir rapidement des facteurs de sécurité évalués sur une plage d'hypothèses et d'identifier les zones et mécanismes critiques. Ces résultats constituent une base efficace pour orienter les études de stabilité détaillées et optimiser les reconnaissances in situ.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Comité Français des Barrage et Réservoirs (2021), Recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages-voûtes, France.
- Duffault P. (2010), *Malpasset la seule rupture totale d'un barrage-voûte*, Revue française de géotechnique N° 131-132, https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/pdf/2010/02/geotech2_010131-132p5.pdf
- International Society for Rock Mechanics, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts 15(6):319-368, January 1978
- Itasca (2024), 3DEC Theory and Background, [3DEC Theory and Background — Itasca Software 9.6 documentation](https://www.itasca.com/3DEC/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)
- Lopard G. (2021), *Conception et dimensionnement des ouvrages souterrains dans les massifs rocheux discontinus – Développement de la méthode des blocs isolés*, PhD thesis, Mines PARISTECH : Géosciences Ressources Naturelles et Environnement, https://pastel.hal.science/tel-03297253v1/file/2021UPSLM014_archivage.pdf