

## **BARRAGE DE KARIBA : UNE FOSSE D'ÉROSION UNIQUE, NECESSITANT UNE APPROCHE REMARQUABLE POUR EN APPREHENDER LE COMPORTEMENT**

*Kariba dam: a unique plunge pool, requiring an outstanding approach to apprehend its behavior*

**Yanis OUKID, Christine NORET, Xavier MOLIN**  
Tractebel Engineering France ; 5, rue du 19 mars 1962  
92622 Gennevilliers - FRANCE

[yanis.oukid@tractebel.engie.com](mailto:yanis.oukid@tractebel.engie.com) ; [christine.noret@tractebel.engie.com](mailto:christine.noret@tractebel.engie.com) ; [xavier.molin@tractebel.engie.com](mailto:xavier.molin@tractebel.engie.com)

### **MOTS CLEFS**

Kariba, barrage voûte, modélisation aux éléments finis, modèle hydromécanique, fosse d'érosion, évaluation de stabilité.

### **KEY WORDS**

Kariba, arch dam, finite elements model, hydromechanical modelling, plunge pool, stability assessment.

### **RÉSUMÉ**

*Après la mise en service en 1960 du barrage de Kariba sur le Zambèze, une série de crues importantes forment rapidement une fosse d'érosion à l'aval immédiat du barrage, atteignant 80 m de profondeur aujourd'hui.*

*Les études ont montré que le risque d'érosion régressive ne pouvait être écarté en cas de crue extrême. Le projet de redimensionnement de la fosse doit permettre l'évacuation d'une telle crue, sans risque d'érosion régressive significative pour l'ouvrage. Ces travaux, d'une ampleur considérable, consisteront en une vidange de la fosse d'érosion, la modification de sa géométrie pour en augmenter le volume, avant sa remise en eau.*

*La question de l'impact de ces travaux sur le comportement du barrage s'est posée, avec deux sujets majeurs : la stabilité de l'ensemble barrage-fondation soumis à un chargement exceptionnel lors de la vidange de la fosse, et la stabilité des parois de la fosse d'érosion. Les pressions d'eau dans la fondation et les gradients hydrauliques associés seront modifiés significativement tout au long des travaux, entraînant la réorganisation des équilibres de forces et des déformations du massif.*

*Un modèle couplé hydraulique-mécanique, représentant le barrage, ses voiles d'étanchéité et de drainage, ainsi que la fondation a été mis en œuvre. Celui-ci a permis de réaliser les calculs en contraintes effectives afin de prendre en compte l'impact des variations de pression dans le massif au cours des travaux. L'historique des chargements du barrage a été reconstitué par un calcul temporel, et a permis d'évaluer la réponse de l'ouvrage à ces chargements extrêmes, qui n'avaient naturellement pas été envisagés lors de la justification de l'ouvrage.*

*L'analyse de la stabilité de la fosse d'érosion a été réalisée en s'appuyant directement sur les résultats du modèle numérique. Les mécanismes de rupture identifiés sont des ruptures de coins rocheux, délimités par les principales discontinuités relevées sur site ou le long de ces discontinuités. Des post-traitements spécifiques ont été développés pour intégrer les champs de contraintes effectives calculés par le modèle et évaluer ainsi l'équilibre des efforts s'exerçant sur les différentes surfaces. Ces post-traitements ont ainsi permis d'estimer les réserves de stabilité des coins rocheux pour chaque étape des travaux, et de vérifier le bon comportement de la faille et autres discontinuités.*

*L'étude a montré que le barrage, bien que soumis à une situation exceptionnelle et inhabituelle, subira des déformations n'excédant pas celles issues des chargements historiques de l'ouvrage.*

## ABSTRACT

After the Kariba Dam was commissioned in 1960, a series of major floods of the Zambezi river rapidly formed a plunge pool immediately downstream of the dam, reaching 80 m depth today.

Studies have shown that the risk of regressive erosion can not be ruled out in the event of extreme flooding. The reshaping project of the plunge pool should allow the evacuation of such a flood, without significant risk of regressive erosion for the structure. This work, of considerable magnitude, will consist of emptying the erosion pool, modifying its geometry to increase its volume, before its reimpounding. The question of the impact of this work on the dam behavior arose, with two major topics: the stability of the dam-foundation complex subjected to an exceptional loading during the emptying of the pool, and the stability of the plunge pool faces. The water pressure in the foundation and the associated hydraulic gradients will change significantly throughout the work, resulting in the reorganization of the balance of forces and the deformations of the rock mass.

A coupled hydraulic-mechanical model, representing the dam, its grouting and drainage curtains, as well as the foundation was implemented. This made it possible to perform the calculations in effective stresses in order to take into account the impact of the pressure variations in the rock mass during the works. The history of the dam loads was simulated by temporal calculation, and allowed the response of the structure to these extreme loads to be assessed, which had obviously not been considered when justifying the dam.

The plunge pool stability analysis was performed based directly on the results of the numerical model. Identified failure mechanisms are rock wedges failures, delimited by major discontinuities found on site, or along these discontinuities. Specific post-treatments have been developed to integrate the effective stress fields calculated by the model and thus assess the balance of forces exerted on the different surfaces. These post-treatments made it possible to estimate the stability reserves of the rock wedges at each stage of the works, and to check the good behavior of the fault and other discontinuities.

The study showed that the dam, although subjected to an extreme situation, will not undergo deformations exceeding those resulting from the historical loadings of the structure.

## 1. INTRODUCTION ET CONTEXTE

L'aménagement hydroélectrique de Kariba est à plusieurs égards remarquable : construit entre 1956 et 1959, il comporte une voûte double courbure de 125 m de hauteur, barrant le Zambèze, et formant le plus grand lac artificiel au monde, avec un volume avoisinant les 181 milliards de m<sup>3</sup>. Situé sur la frontière entre la Zambie et le Zimbabwe, il comporte une usine hydroélectrique souterraine sur chaque rive, développant une puissance combinée de 2 080 MW.

Le corps du barrage comporte un évacuateur de crue de demi-fond, formé de six passes vannées, pour une capacité de débit de 9 000 m<sup>3</sup>/s sous le niveau de réservoir normal. Les jets libres formés par l'évacuateur en opération se concentrent en une zone d'impact relativement restreinte, à quelques dizaines de mètres du pied aval du barrage.

Durant les travaux, et après la mise en eau du barrage, le Zambèze a connu une période intense de crues. Combinée à une mise en opération tardive de l'usine RG, ces épisodes de crues ont généré des déversements fréquents, à des débits considérables, et qui dureront une vingtaine d'années. Ces épisodes de crues sont à l'origine de la formation d'une fosse d'érosion sans précédent, puisqu'elle s'est développée à une centaine de mètres du pied du barrage, et s'étend 80 m sous le niveau d'eau aval.

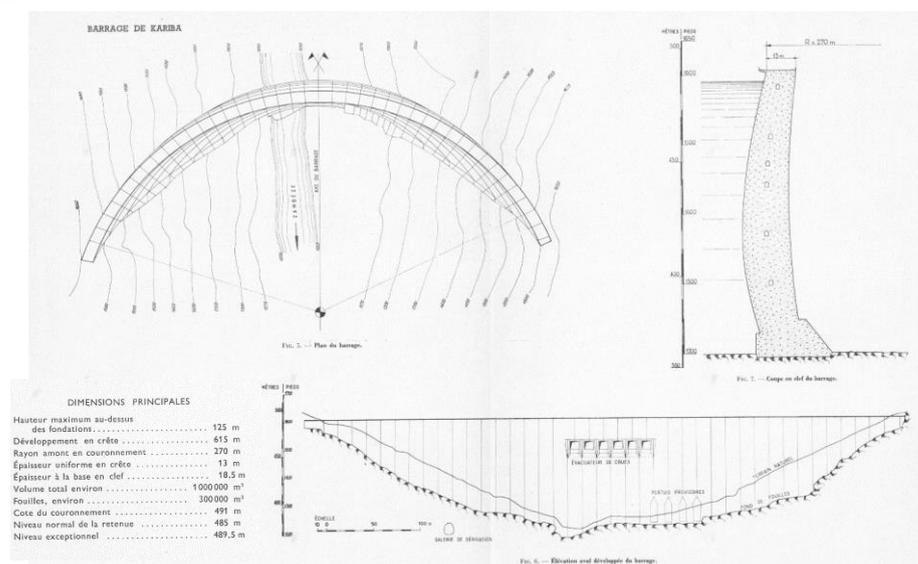


Figure 1 : Barrage de Kariba – Vue en plan, en élévation, coupe en clé et dimensions principales

La configuration de l'aménagement après plus de 60 ans d'opération est unique, et aucune situation similaire ne peut faire office de cas référence.

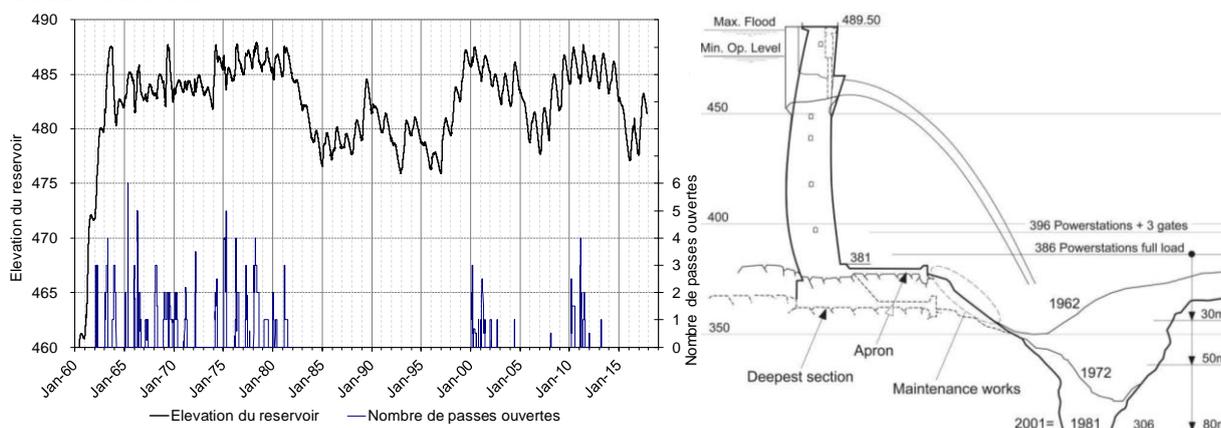


Figure 2 : Gauche : Historique du niveau de réservoir et de l'utilisation de l'évacuateur de crues – Droite : Coupe transversale dans une passe de l'évacuateur illustrant l'évolution de la fosse d'érosion dans le temps

Le Maître d'Ouvrage (Zambezi River Authority) a lancé un vaste programme de réhabilitation de l'aménagement, dont une des composantes consiste à stabiliser et conforter la fosse d'érosion.

Afin d'en évaluer les développements futurs si rien n'était entrepris, et définir un nouveau profil garantissant la stabilité des ouvrages à long terme, une étude a été menée par Tractebel France – Coyne et Bellier, conjointement avec le Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), et Aquavision Engineering. Un modèle hydraulique hybride numérique/physique a été élaboré et exploité. [2] [3].

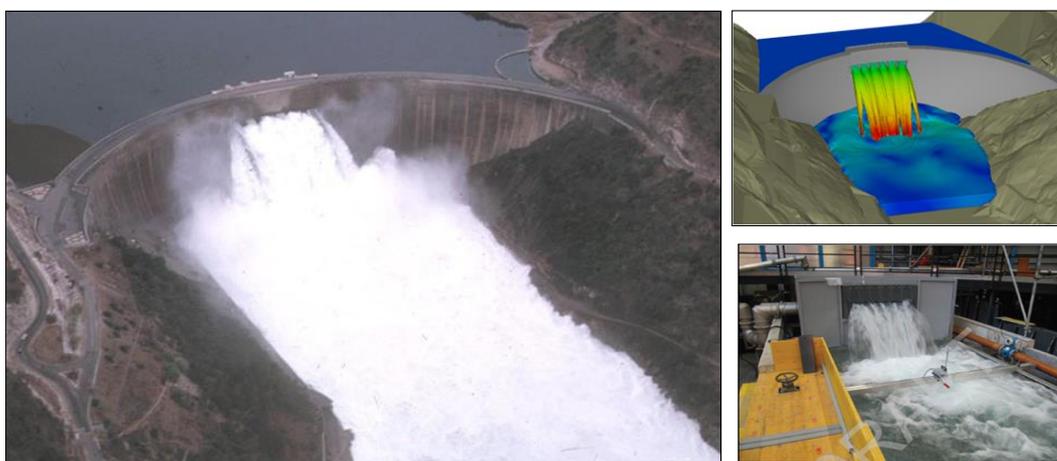


Figure 3: Comparaison des conditions d'évacuation des crues pour le modèle numérique, physique, et l'aménagement

Le projet de stabilisation de la fosse consiste principalement à élargir la fosse vers l'aval, et dans une moindre mesure vers les rives, de sorte à garantir des volumes disponibles à la dissipation d'énergie suffisants pour éviter un surcreusement par les déversements futurs.

Prévus pour durer plus de 3 ans, les travaux de stabilisation de la fosse sont de grande ampleur : ils impliquent des volumes d'excavation au rocher de près de 300 000 m<sup>3</sup>, ainsi qu'une plinthe en béton armé permettant d'améliorer les caractéristiques mécaniques dans la zone faillée.

Les problématiques de phasage de travaux sont complexes, la vidange des quelques 630 000 m<sup>3</sup> d'eau de la fosse de 80 m de profondeur, est réalisé par pompage progressif, visant à maintenir le plan d'eau quelques mètres sous le niveau de la zone de travaux. Le chantier est prévu pour être submergé 5 mois par an, pendant la période de crues, et la production hydroélectrique est ininterrompue. Un batardeau démontable et submersible est implémenté entre le chantier et la restitution des usines.

Etant donné la nature des travaux, et la proximité du barrage, un important programme de surveillance des travaux est mis en place, incluant notamment un contrôle accru des vibrations sur le barrage et les ouvrages à proximité durant les travaux d'excavation à l'explosif.

Préalablement à l'exécution des travaux, il était essentiel de s'assurer de la stabilité du barrage et de la fosse d'érosion durant les travaux, impliquant d'évaluer le comportement mécanique du barrage et du massif de fondation (incluant la fosse), mais aussi de prendre en compte et apprécier les conditions hydrauliques prévalant de manière transitoire durant les travaux, et de façon permanente après les travaux.

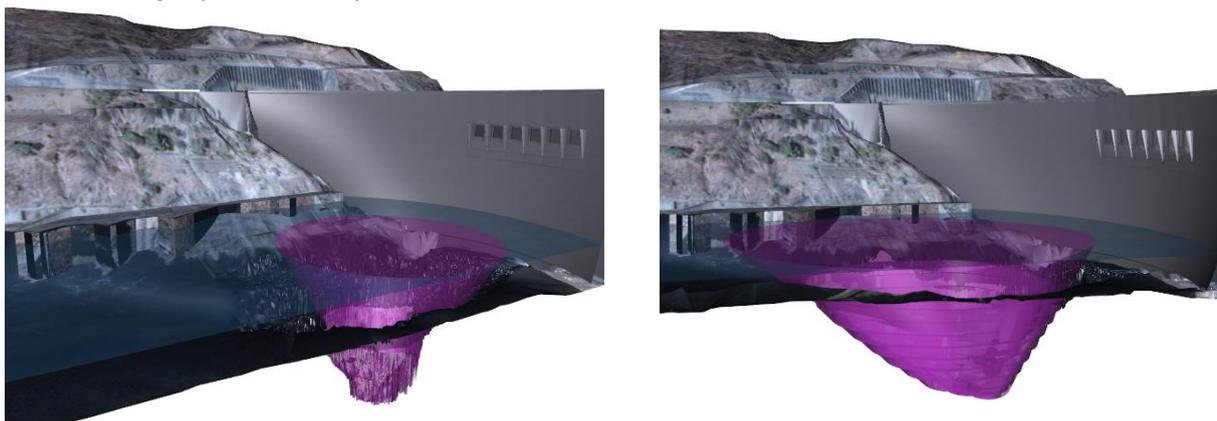


Figure 4 : Géométries actuelle et future de la fosse d'érosion

C'est le principe d'une approche numérique qui a été retenu, et compte tenu des enjeux combinés d'évaluation des conditions hydromécaniques qui sont hors de portée des analyses classiques déployées pour la conception ou la réhabilitation des ouvrages hydroélectriques, un modèle hydromécanique permettant de réaliser des calculs en contraintes effectives était nécessaire. De manière à être en mesure d'appréhender les variations des conditions hydrauliques, et les effets du phasage des travaux, ce modèle devait permettre de réaliser les calculs transitoires.

## 2. METHODOLOGIE

### 2.1. Les enjeux du modèle

Un panel d'experts internationaux a participé à l'évaluation du projet de réhabilitation, et des risques inhérents. Dans leur analyse, il a été jugé possible qu'un scénario similaire à celui du barrage de Zeuzier puisse se produire dans le contexte des travaux du barrage de Kariba.

Ce barrage voûte situé en Suisse a subi d'importantes déformations, générées par des tassements du rocher de fondation. Les causes exactes de cet incident ont longtemps été sujettes à débat, mais un consensus scientifique a été trouvé, considérant que le creusement d'une galerie routière de drainage situé à plusieurs kilomètres de l'aménagement avait contribué à ces déplacements en drainant le massif. Ce cas de référence dans l'accidentologie des barrages a sans doute renforcé les préoccupations de l'ensemble des intervenants sur projet, et il était important que le modèle soit en mesure d'écarter le risque d'un « effet Zeuzier ».

Un des enjeux du modèle est donc d'évaluer les effets de drainage et des travaux de profilage, et de démontrer qu'ils ne sont pas en mesure de générer des tassements pouvant mettre en cause l'intégrité et la sécurité de l'aménagement. En d'autres termes, il convient de démontrer que la redistribution des contraintes en fondation, et les déformations induites, restent dans la gamme des déformations cycliques naturelles de l'ouvrage. Dans un second temps, la stabilité des parois de la fosse doit être évaluée dans les conditions hydrauliques temporaires des travaux.

Cet enjeu se décline naturellement en plusieurs objectifs intermédiaires, qui peuvent être résumés à la nécessité de répondre, aussi bien quantitativement que qualitativement, aux questions suivantes :

- Quelles sont les conditions hydromécaniques qui s'établiront autour de la fosse durant les différentes phases de travaux ? Et quelle influence aura la vidange de la fosse sur le barrage et sa fondation ?
- Quelle influence auront les travaux de profilage de la fosse sur la réorganisation des équilibres d'efforts et déformations du massif rocheux durant les travaux ? Quelle influence sur le barrage ?
- Est-ce que les parois de la fosse sont stables à toutes les phases de travaux, et quelles sont les réserves de stabilité ?

Partant de ces enjeux principaux, il est possible d'affiner l'ensemble des hypothèses et des contraintes permettant d'adresser les problématiques soulevées :

- L'emprise du modèle doit être suffisamment grande pour que les effets de bord induits par les conditions aux limites ne perturbent pas les résultats dans la zone d'intérêt ;
- La nécessité de représenter fidèlement les conditions hydrauliques en fondation exige de représenter, d'un point de vue hydraulique, les rideaux de drainage et d'étanchéité du barrage. Un calage, par le biais d'une étude de sensibilité au gradient de perméabilité, est alors nécessaire. Celui-ci s'appuiera sur les niveaux piézométriques relevés en aval du barrage dans le cadre du programme d'auscultation du barrage ;
- L'état de contrainte dans la voûte ne nécessite pas une représentation fine, seules les contraintes transmises à la fondation et les déformations induites par la modification des conditions hydrauliques en fondation, et des travaux de profilage de la fosse sont d'intérêt ;
- Le béton du barrage souffrant d'AAR, la prise en compte du gonflement du béton n'est nécessaire qu'à la bonne représentation des efforts transmis par la voûte à la fondation. Il est donc possible d'adopter une approche simplifiée ;
- La nécessité de reconstituer l'état de contrainte actuel, et d'évaluer les différentes phases de travaux exige de réaliser un calcul transitoire ;
- La représentation de la faille longitudinale, se développant parallèlement à l'axe du fleuve et en fond de vallée, est d'intérêt puisqu'elle est à même de présenter un module de déformation différent du module moyen de la masse rocheuse.

## 2.2. Le modèle

Une caractéristique principale du modèle est qu'il permet de réaliser des calculs couplés hydromécaniques. En calculant le champ des pressions interstitielles qui s'établissent en fondation, le modèle permet une évaluation des contraintes effectives, et de prendre en compte les forces induites par les gradients hydrauliques en fondation. Ainsi, en considérant les variations de pressions interstitielles durant la vidange, l'augmentation induite des contraintes effectives est reproduite. La présente analyse s'appuie sur un couplage unidirectionnel : les contraintes ne modifient pas la perméabilité des matériaux. Le modèle a été mis en œuvre grâce au code d'éléments finis Diana.

Le modèle reproduit la fondation sur une étendue de l'ordre d'un kilomètre d'amont en aval du barrage, et de rive à rive, et près de 500 m sous le niveau de fondation du barrage. Cette emprise est contrainte par la nécessité de maintenir les conditions limites hydrauliques suffisamment éloignées de la zone d'intérêt. La fosse d'érosion est reproduite à partir des résultats d'une campagne topographique LiDar.

Le maillage est constitué d'éléments quadratiques mixtes, de types tétraédriques, pentaédriques et hexaédriques, permettant de mailler de façon réglée les zones régulières, et de s'adapter au mieux aux variations géométriques des zones irrégulières.

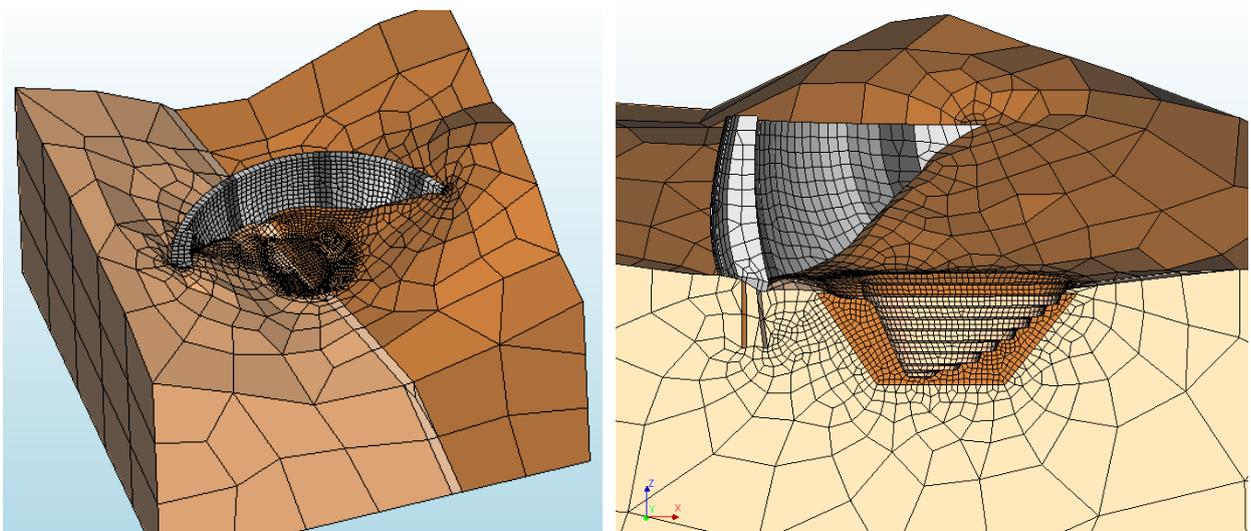


Figure 5: Vue d'ensemble du maillage – Vue de détail du maillage autour de la fosse, coupe longitudinale. Les différentes phases d'excavation de la fosse sont figurées en différentes couleurs, ainsi que les voiles de drainage et d'injection. La faille est figurée par une couleur plus claire.

L'enjeu majeur du maillage est d'assurer une précision suffisante dans les zones d'intérêt, c'est-à-dire les abords immédiats de la fosse, tout en limitant les temps de calcul à des durées raisonnables. Le modèle compte un total de 92 000 mailles. Les mailles les plus fines sont de l'ordre de 2 m, situées dans la fosse ; alors que les mailles les plus grossières sont de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres aux bords du modèle.

Les conditions limites mécaniques, appliquées aux frontières de la fondation, consistent à bloquer les mouvements dans les directions perpendiculaires aux surfaces formant les conditions limites. Les conditions limites hydrauliques imposent des charges hydrauliques aux limites amont et aval du modèle. Une condition limite appliquée au terrain naturel aval, considéré drainant, permet de contrôler le niveau d'eau aval.

### 2.3. La séquence de calcul

Compte tenu de la nature du calcul et de ses objectifs, il a été nécessaire de reconstituer toutes les étapes pertinentes depuis la construction de l'aménagement. La Figure 6 illustre la séquence des calculs hydrauliques et mécaniques, ainsi que les analyses et étapes d'étalonnage et de validation du paramétrage du modèle.

La séquence de calcul se décompose en quatre phases principales décrites dans les paragraphes ci-dessous.

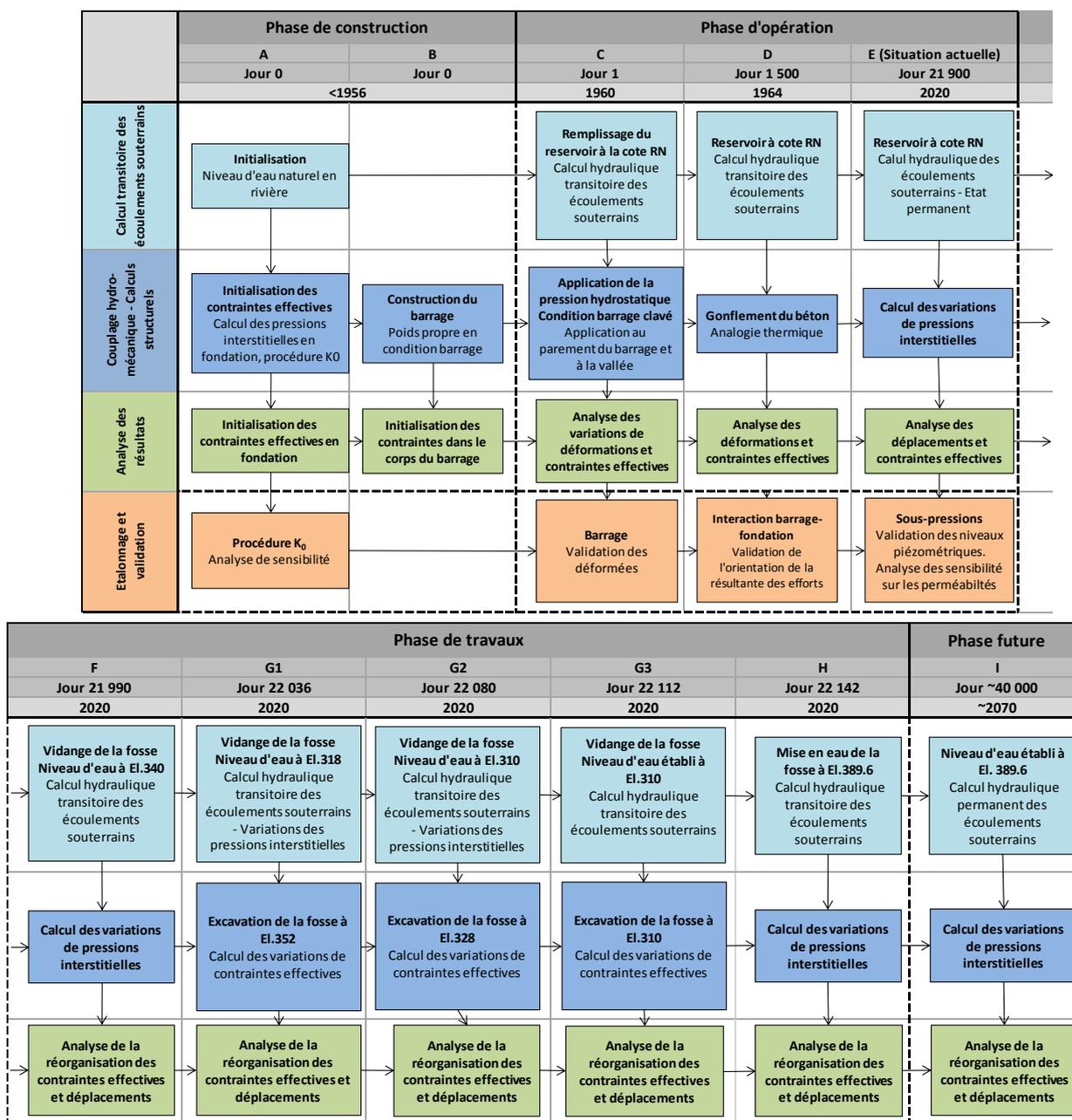


Figure 6: Schéma illustrant la séquence de calculs, et les analyses associées

## 2.4. Phase de construction de l'aménagement

Cette phase consiste à initialiser les contraintes en fondation et dans le corps du barrage. D'un point de vue hydraulique, cette étape permet d'initialiser les conditions d'écoulements naturelles prévalant avant la construction. D'un point de vue mécanique (structurel), les contraintes effectives verticales sont initialisées en fondation, leurs composantes horizontales dérivées d'une procédure  $K_0$ , et les pressions interstitielles sont prises en compte pour le calcul des contraintes totales.

Par la suite, le barrage en condition non-clavé est modélisé, et son poids propre appliqué afin d'initialiser les contraintes en sa structure.

## 2.5. Phase d'exploitation

Cette phase débute avec la mise en eau de l'aménagement. Celle-ci est modélisée par l'application de la pression hydrostatique sur le barrage, et aussi en fondation de sorte à établir les conditions hydrauliques d'écoulements souterrains. Le barrage de Kariba étant exploité depuis plus de 60 ans, les conditions hydrauliques souterraines y sont établies de façon permanente. Les gradients hydrauliques sont maximum aux abords du voile d'injection, et atteignent des valeurs de l'ordre de 2.

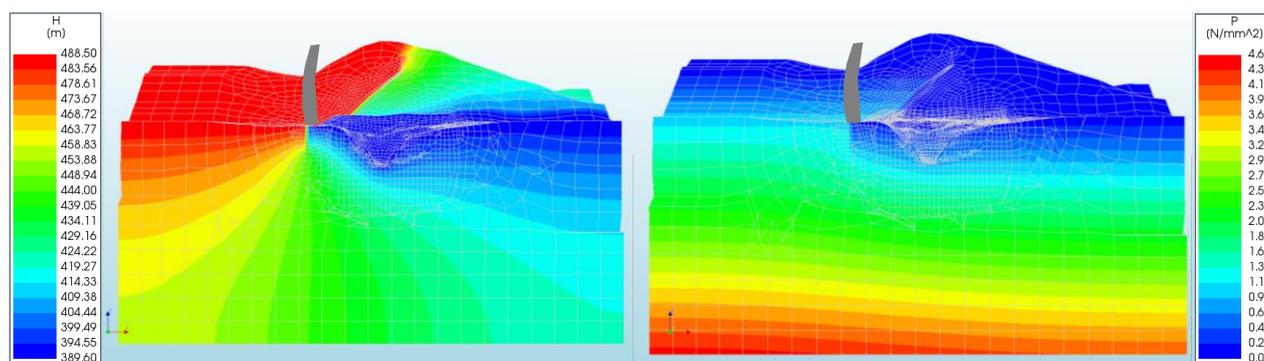


Figure 7: Charge hydraulique et pressions interstitielles en fondation en phase d'exploitation - Coupe transversale en perspective

La formation de la fosse est représentée, les matériaux érodés sont supprimés du modèle en trois phases successives après le remplissage du barrage.

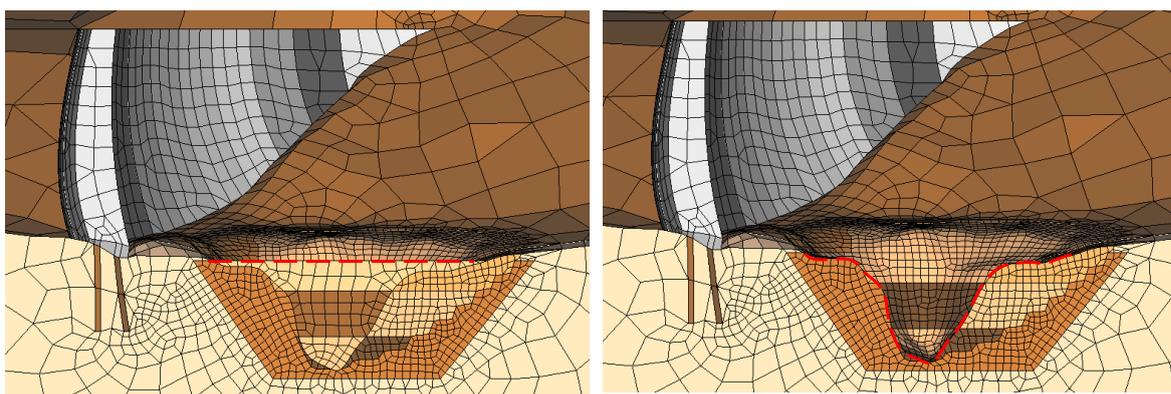


Figure 8: Détail dans la zone de la fosse avant et après sa formation (la ligne pointillée rouge représente le terrain naturel) - Coupe transversale en perspective

Le calcul couplé permet de dériver les déformations de la fondation soumise au gradient imposé par le réservoir. C'est ainsi que le gradient en fondation est à l'origine d'une déformation millimétrique répartie, qui atteint localement un maximum de l'ordre de 5 mm pour les déplacements longitudinaux, et un soulèvement de l'ordre de 6 mm verticalement à la zone aval à l'ouvrage. Le développement du gradient a aussi lieu dans la direction rive-à-rive, générant une convergence des parois de la fosse de l'ordre de 3 mm dans cette direction. Ces déformations sont rarement considérées dans le cadre de modélisations numériques plus conventionnelles.

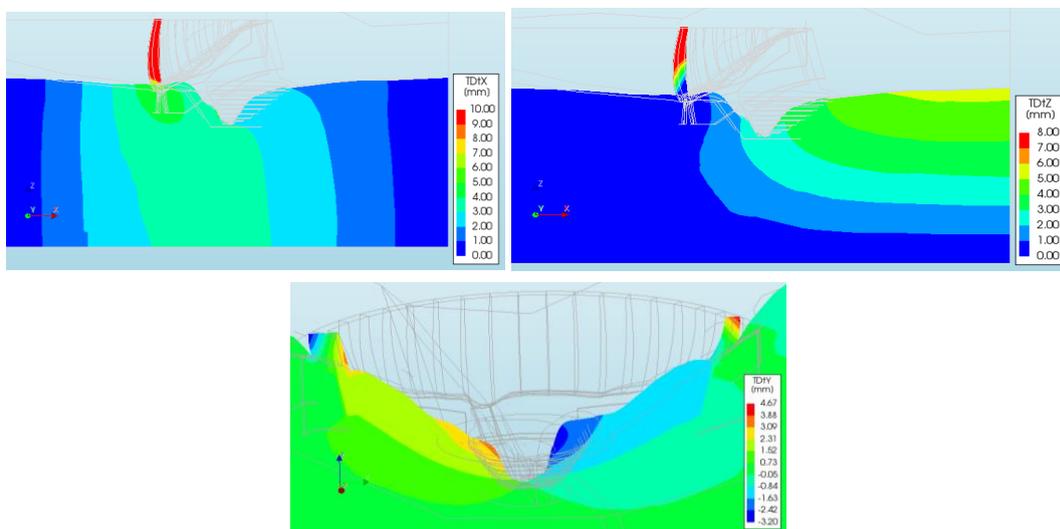


Figure 9: Haut : Composantes longitudinales et verticales de déformation de la fondation soumise au gradient hydraulique permanent en fondation – Coupe longitudinale ; Bas : Déformations dans la direction rive-à-rive – Coupe transversale

## 2.6. Phase de travaux

La phase de travaux est décomposée en 3 sous phases : vidange de la fosse, travaux d'excavation, mise en eau de la fosse. La vidange est modélisée suivant un calcul transitoire, et les excavations sont représentées de manière simplifiée en 3 sous étapes d'excavation, de sorte à figurer le déchargement progressif du terrain.

## 2.7. Phase future

Une dernière étape permet d'évaluer les conditions à long terme, à savoir lorsque les conditions hydrauliques souterraines atteignent un régime permanent.

## 3. EXPLOITATION DU MODELE, RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 3.1. Reconstitution de l'état actuel – Validation et études de sensibilité

La reconstitution de l'état actuel de l'aménagement en terme hydraulique et mécanique consiste à reproduire les conditions de contraintes et déformations établies sur site après 60 ans d'exploitation. Cette étape est cruciale dans le cadre de la validation et du calage du modèle. Les paramètres qui ont fait l'objet d'un calage sont les modules du rocher et du béton du barrage, les perméabilités du rocher et du voile de drainage.

Les études de sensibilité ont porté sur les paramètres difficiles à estimer par investigation directe, ou par le biais de l'interprétation des résultats d'auscultation. Ainsi, pour bien comprendre le comportement hydromécanique de l'aménagement et de sa fondation, la procédure  $K_0$ , ayant pour objet d'initialiser les contraintes effectives horizontales en fondation, ainsi que le module d'élasticité de la faille, ont fait l'objet d'études de sensibilité.

#### Calage des modules d'élasticité

L'aménagement de Kariba fait l'objet, depuis sa construction, d'un programme d'auscultation complet, s'appuyant sur une approche HST [4]. Le barrage dispose de 6 chaînes de pendules depuis 1989, permettant d'en analyser finement les déplacements.

Le calage s'appuie sur le test de combinaisons de valeurs de modules pour le barrage et la fondation. Le calage permet d'ajuster le ratio entre les deux, tout en s'assurant que les valeurs sont dans une fourchette réaliste. Ainsi, après le test de plusieurs combinaisons, le calage a permis de conclure à un module du béton de 20 GPa, identique à celui du rocher, permettant de se rapprocher au mieux des déplacements observés. Les déplacements pour plusieurs niveaux d'eau amont ont été testées de sorte à éprouver la robustesse de cette combinaison de modules.

### Calage des coefficients de perméabilité

Le système de discontinuités se développant dans le massif rocheux est constitué de quelques familles principales de joints sub-verticaux et sub-horizontaux. Ces discontinuités sont fermées. Il a donc été fait l'hypothèse d'une perméabilité isotrope. La perméabilité du massif a été l'objet d'essais de perméabilité *in situ* permettant d'estimer la perméabilité du massif comme inférieure à  $10^{-6}$  m/s.

Le calage des coefficients de perméabilité consiste à définir un jeu de valeurs de perméabilités des voiles de drainage et d'injection permettant de reproduire au mieux les niveaux piézométriques relevés à l'aval de l'ouvrage, niveaux qui sont dans l'ensemble bas.

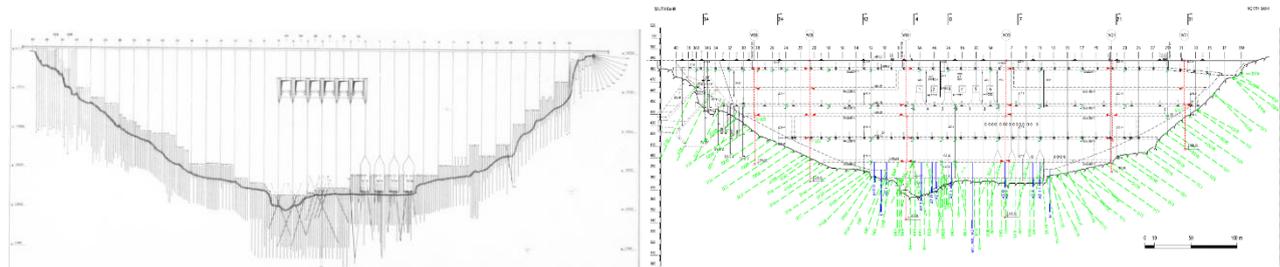


Figure 10: Gauche : Emprise du voile d'injections ; droite : Emprise du voile d'injections (vert), et implantation des piézomètres (bleu) - Vues en élévation aval

Cette analyse a mis en évidence que l'effet de la perméabilité du voile de drainage influait au second ordre sur les niveaux de pressions autour de la fosse, le niveau d'eau aval étant le paramètre dominant. Un ratio de 100 avec la perméabilité du massif rocheux a finalement été considéré pour le voile de drainage, permettant d'obtenir des résultats conservatifs, tout en présentant une valeur empiriquement raisonnable. Finalement, les perméabilités retenues sont respectivement  $10^{-7}$  m/s pour le voile d'injection,  $10^{-4}$  m/s pour le voile de drainage, et  $10^{-6}$  m/s pour le massif de fondation.

### Prise en compte du gonflement du béton

Les études dédiées à l'évaluation des effets du gonflement alcali-réactif du béton du barrage ont mis en évidence un déplacement général de la voûte vers l'amont. Cette déformation, de l'ordre de 50 mm, a pour effet bénéfique de redresser la résultante des efforts transmis en fondation d'approximativement  $20^\circ$ .

La modélisation du gonflement alcali-réactif du béton est un sujet d'études à part entière, et dans le cadre du projet de réhabilitation de la fosse, seuls les effets sur la transmission des efforts en fondation sont d'intérêt. Il a donc été mis en place une analogie thermique permettant de se rapprocher du phénomène mécanique.

### Etudes de sensibilité

Le modèle a fait l'objet de deux études de sensibilité distinctes, l'une visant à évaluer les effets de la procédure  $K_0$  sur les résultats, et l'autre à évaluer les effets mécaniques de la faille.

L'évaluation et la modélisation des contraintes horizontales dans un massif est un problème délicat de la mécanique des sols et roches. L'état de contrainte initial exerce une influence importante sur la réponse d'un massif aux sollicitations auxquelles il est soumis. L'initialisation des composantes horizontales de contraintes effectives est rarement aisée sans disposer de mesures *in situ* pertinentes. Le développement de ces contraintes horizontales est souvent sujet à l'influence de multiples facteurs, tels que l'hétérogénéité des formations géologiques, l'irrégularité du système de reliefs, l'historique des sollicitations, ou les conditions tectoniques régionales et locales...

En pratique, l'initialisation des contraintes effectives horizontales est réalisée en introduisant un coefficient de poussée du massif au repos, reflétant le ratio entre contraintes verticales et horizontales. Cette méthode, souvent désignée comme procédure  $K_0$ , est une approche largement déployée sur les projets de modélisation géotechnique, et qui s'appuie sur des hypothèses simplificatrices. En effet, ce facteur n'est pas propre à un matériau, et l'expérience a montré qu'il pouvait varier significativement avec la profondeur et l'historique de chargement.

Dans le cadre de notre étude, il a été considéré un coefficient  $K_0$  isotrope, générant des niveaux de contraintes dans le domaine élastique. Ce jeu d'hypothèses est difficile à vérifier, et seuls des essais *in situ* permettront d'en affiner la définition. Néanmoins, compte tenu du système de fracturation du rocher, et le fait que les discontinuités soient fermées, l'hypothèse d'homogénéité reste réaliste. Compte tenu des incertitudes inhérentes à l'approche d'initialisation des contraintes horizontales, il a été décidé de réaliser plusieurs calculs de sensibilité des résultats aux valeurs du coefficient  $K_0$ , permettant d'évaluer l'enveloppe des contraintes et déplacements attendus pendant les travaux. Ainsi, une valeur moyenne de 0.5 a été considérée, et des calculs de sensibilités réalisés pour des valeurs limites de 0.3 et 1.

Une faille sub-verticale traverse la fondation du barrage, quasi parallèlement au fleuve. Cette faille a été assez peu investiguée, et sa qualification mécanique comporte des incertitudes. Son module d'élasticité a donc fait l'objet de calculs de sensibilité, de sorte à évaluer ses effets sur les résultats pour une gamme de modules allant de 10 GPa, soit la moitié du module considéré pour la fondation, à 20 GPa.

### 3.2. Effet de la vidange sur la distribution des contraintes

Le calcul a permis de démontrer que, compte tenu de la faible perméabilité du massif rocheux, les activités de drainage n'étaient pas à même de désaturer une zone significative autour de la fosse. Le système de drainage de peau prévu au projet n'est pas représenté, car pas à l'échelle des enjeux du calcul. L'effet de la vidange sur les pressions interstitielles en fondation est localisé autour de la fosse, du fait de la faible perméabilité du rocher. Le gradient maximal atteint au fond de la fosse est de l'ordre de 2.5 à 3, se développant sur une épaisseur de l'ordre d'une trentaine de mètres. Le rocher superficiel sera naturellement drainé du fait du desserage local des discontinuités. Si tel n'était pas le cas, un complément de drainage est prévu au projet, pour réduire ces gradients se formant temporairement.

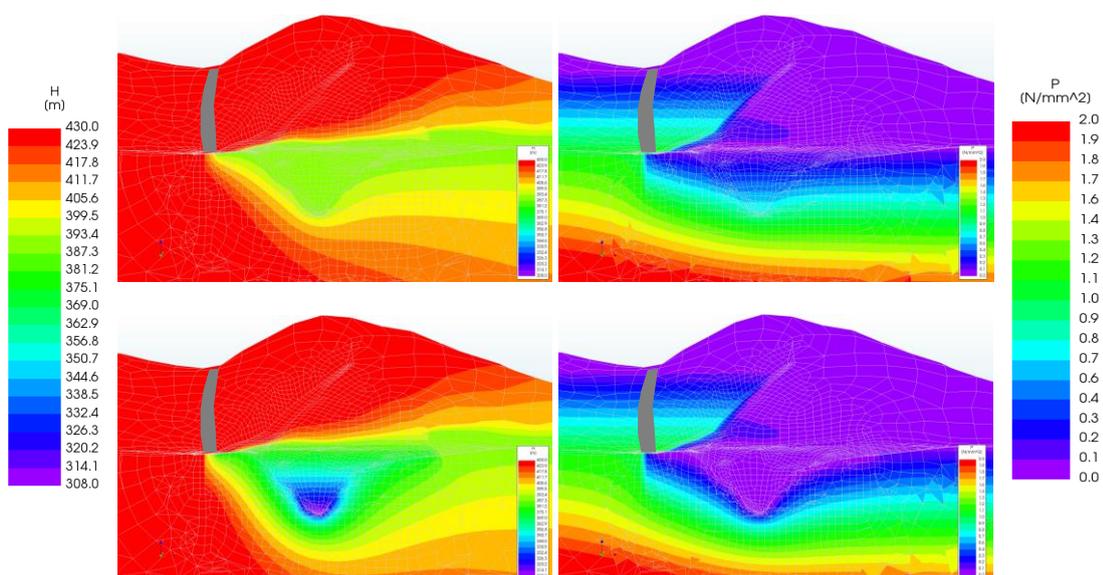


Figure 11: Caractéristiques hydrauliques autour de la fosse au début et après avoir maintenu la fosse à sec pendant 6 mois – A gauche : niveaux de charge hydraulique, A droite pressions interstitielles, l'ensemble sur une coupe amont-aval

Les débits de fuite moyens dans la fosse sont calculés pour chaque phase de travaux, par intégration des vitesses d'écoulement sur la paroi de la fosse. Il est néanmoins important de noter que les venues d'eau locales, notamment apportées par la faille, ne sont pas prises en compte par le modèle qui considère un massif de fondation homogène. Le débit de fuite maximal moyen attendu est de l'ordre de 60 l/s.

### 3.3. Effet du profilage de la fosse sur la distribution des contraintes

Les contraintes effectives en condition actuelle sont perturbées par la présence de la fosse. En contournant la fosse, les contraintes horizontales forment des arcs générant des concentrations de contraintes locales. Au fond de la fosse (Figure 13), les contraintes effectives atteignent 2.3 MPa dans la direction rive-à-rive, et 3.4 MPa d'amont en aval. La contrainte relevée sur la paroi amont de la fosse est de 4 MPa dans la direction rive-à-rive. Les contraintes normales à la paroi sont inférieures à 1 MPa, et aucune traction n'apparaît.

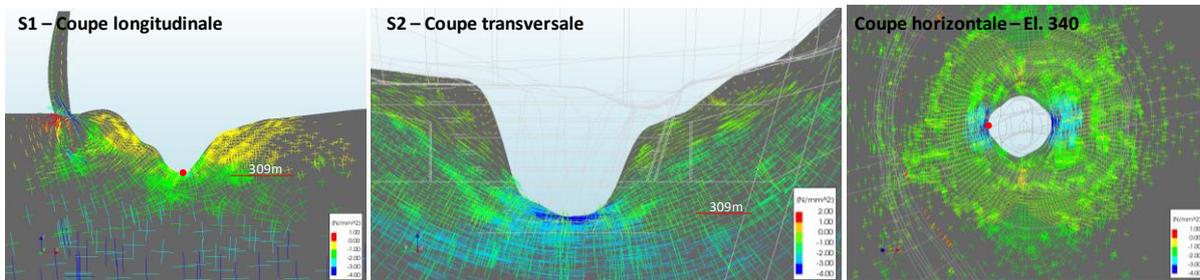


Figure 13: Etat de contraintes effectives autour de la fosse – Condition actuelle

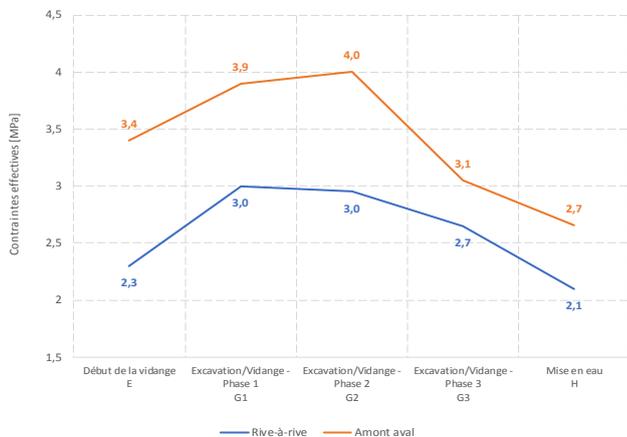


Figure 12: Variations des contraintes effectives au fond de la fosse - Période de travaux - Directions rive-à-rive et amont-aval

Il est observé sur le fond de la fosse que les contraintes de compression sont plus fortes dans la direction d'amont en aval que de rive-à-rive, du fait de l'effet de vallée généré par les rives.

Les compressions ont tendance à augmenter (entre 15% et 30%) jusqu'à la phase 2 (G2) d'excavation, essentiellement du fait de la vidange qui tend à abaisser les pressions interstitielles. A partir de cette phase, les contraintes diminuent (de l'ordre de 30%) du fait de la modification de la géométrie de la fosse, et du déchargement du rocher par excavation. Finalement, la remise en eau contribue à diminuer à nouveau les contraintes de compression pour retrouver des niveaux similaires à l'état actuel.

Dans la direction perpendiculaire à la paroi, les contraintes de sont inférieures à 1MPa, et aucune traction n'apparaît.

En ce qui concerne les déformations induites par les travaux de profilage, les parois ont tendance à converger vers le centre de la fosse, du fait de la réorganisation des contraintes en fondation. Le déchargement du terrain génère, lui, un exhaussement général du fond de la fosse, qui entraîne, par effet élastique, une zone alentour. Cet ensemble de déformations se reporte aussi sur la voûte, générant des déplacement de l'ordre du millimètre.

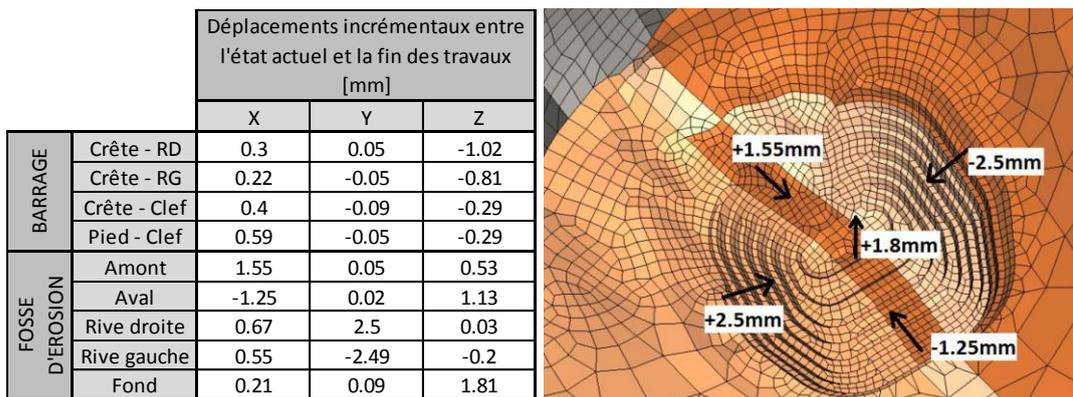


Figure 14 : Synthèse des déformations induites par les travaux sur le barrage et les parois de la fosse (X : direction amont-aval ; Y : direction rive-à-rive ; Z : direction verticale)

### 3.4. Evaluation des réserves de stabilité des parois de la fosse

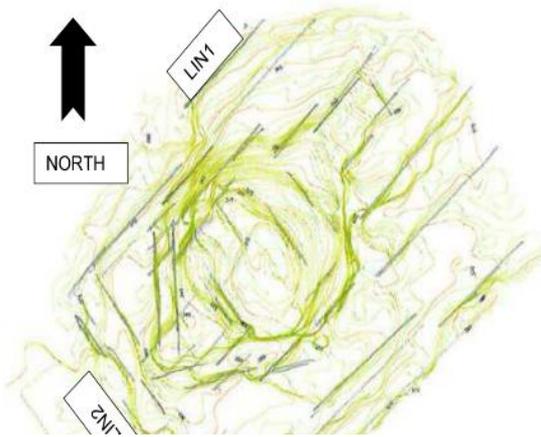


Figure 15 : Illustration des discontinuités principales autour de la fosse - Vue en plan

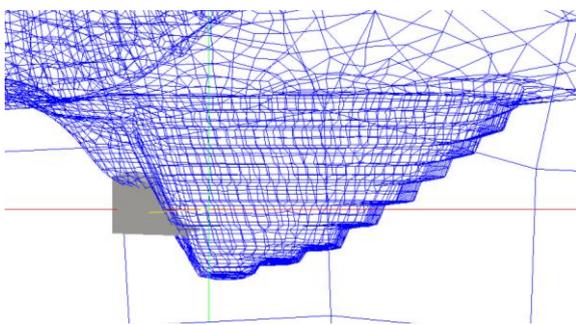
La stabilité *in fine* de la fosse, actuelle ou future, dépend de la stabilité des coins rocheux potentiels formés par les discontinuités existantes de la masse rocheuse, de la fondation et des discontinuités elles-mêmes, y compris la faille.

L'aménagement de Kariba est implanté dans un contexte géologique marqué par un métamorphisme à l'échelle régionale. Le site de fondation se caractérise par un gneiss biotitique aux caractéristiques mécaniques exceptionnelles. Le système de discontinuités se développant autour de la fosse, se caractérise par cinq familles principales de discontinuités illustrées par la Figure 15 : joints verticaux le long de l'axe de la vallée et dans la direction rive à rive, joints sub-horizontaux, et joints verticaux secondaires dans deux directions obliques. La méthode des éléments finis étant basée sur une hypothèse de mécanique du continuum, il serait malaisé d'essayer de représenter la masse rocheuse avec toutes ses discontinuités.

L'analyse du champ de contraintes montre que les différents joints ou fissures resteront fermés (contraintes effectives maintenues en compression) mais peuvent potentiellement être soumis à des efforts de cisaillement significatifs. L'hypothèse d'un comportement linéaire est donc acceptable, mais la résistance au cisaillement de chaque discontinuité doit être vérifiée. L'aspect novateur du calcul de stabilité mis au point pour cette vérification consiste à évaluer les efforts sur les surfaces de discontinuités indépendamment du maillage du modèle éléments finis, c'est-à-dire que le calcul ne nécessite pas que les joints et les coins soient explicitement modélisés dans le maillage. Il est à noter que les petites instabilités locales, potentiellement générées par de petits blocs formés le long des parois de la fosse, ne sont pas concernés par cette analyse.

Un exemple de vérification des coins rocheux est donné par les figures suivantes. Le principe de cette vérification consiste à évaluer d'une part les angles de frottement requis pour assurer la stabilité avec une hypothèse de cohésion nulle, et d'autre part les cohésions nécessaires pour une hypothèse d'un angle de frottement de 35°.

Les forces appliquées sont estimées en intégrant les contraintes effectives et les pressions interstitielles résultant du modèle sur chacune des faces des coins.



Avant remplissage	Angle de frottement mobilisé ( $c=0$ MPa)	Cohésion requise ( $\phi=35^\circ$ )
Face RD	41°	0,21 MPa
Face RG	41°	0,22 MPa
Fond	26°	0 MPa

Figure 16 : A gauche : Bloc amont N°3 à la cote 325 – Coin rocheux en gris – Vue en perspective- A droite : valeur requise sur chacune des faces du dièdre pour assurer un non glissement

Les calculs pour les différents blocs identifiés montrent des résultats similaires en configurations actuelle et future : une grande réserve de stabilité sur les faces inférieures, des angles ou cohésions raisonnables mobilisés pour les faces verticales. En effet, la qualification du massif rocheux indique des valeurs d'angle de frottement de l'ordre de 40° à 45° pour les plans de discontinuité ; et des cohésions de l'ordre de 1MPa.

Un deuxième exemple est donné avec le post-traitement mis au point pour analyser les contraintes sur les discontinuités. Les contraintes normales et de cisaillement sont calculées à partir du tenseur de contraintes pour chaque discontinuité. La résistance au cisaillement peut alors être présentée, soit en affichant la cohésion ou l'angle de frottement requis pour assurer une résistance suffisante au cisaillement le long de la discontinuité, soit le facteur de sécurité local pour des valeurs de cohésion et de frottement données. Ces données étant estimées pour toutes les discontinuités de la fondation, les enveloppes des valeurs minimales de cohésion (pour un angle de frottement de 35 degrés) ou d'angle de frottement (à cohésion nulle) ou des facteurs de sécurité peuvent être évalués.

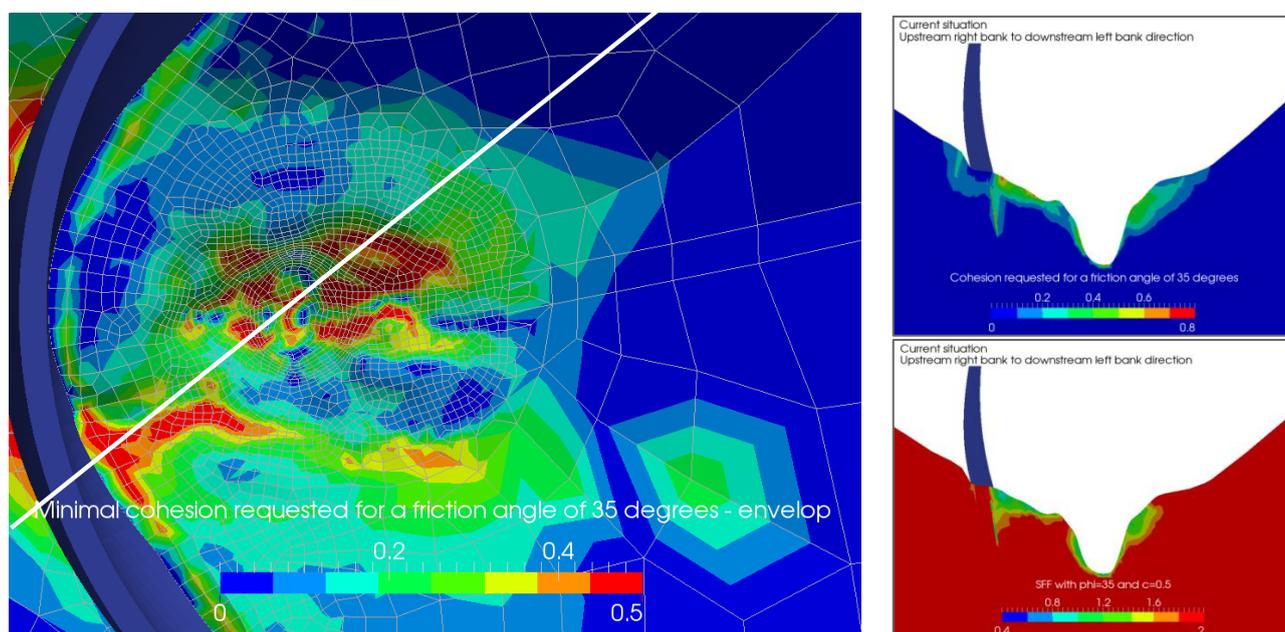


Figure 17 : Fosse actuelle – Enveloppes des valeurs de cohésion minimale (en MPa) pour un angle de frottement de 35 degrés - Vue en plan (le trait blanc figure la position du plan analysé) à gauche et coupe verticale amont-RD vers aval-RG en haut à droite – Enveloppe des SFF en bas à droite (même coupe).

Enfin, la faille qui traverse la fosse a été modélisée comme une épaisseur de rocher de 20 m avec de faibles caractéristiques mécaniques (module de Young égal à 10 GPa). Les champs de déplacement et de contrainte ne montrent quasiment aucun effet sur le comportement de la fosse. Les angles de frottement mobilisés sont inférieurs à 30°.

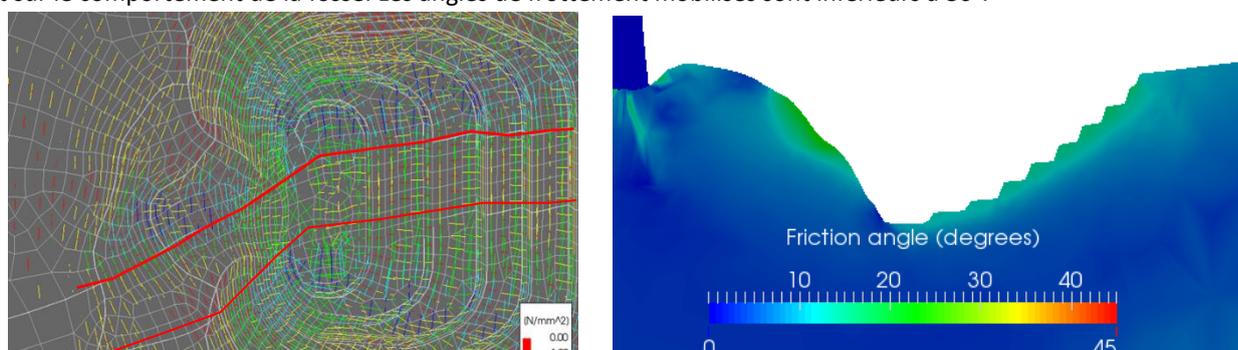


Figure 18 : vue en plan de la faille avec le champ de contrainte et angles de frottement mobilisés sur celle ci

#### 4. CONCLUSION

L'aménagement hydroélectrique de Kariba est un ouvrage remarquable, et les enjeux soulevés par les travaux de stabilisation de la fosse d'érosion, et les conditions d'exécution, ont requis le développement d'approches de modélisation et de calcul non-conventionnelles. Un modèle éléments-finis hydromécanique transitoire a été élaboré, de sorte à prendre en compte les effets des pressions interstitielles en fondation ; et une méthode de post-traitement novatrice et flexible a permis l'évaluation des conditions de stabilité sur n'importe quelle surface du massif rocheux.

La séquence de calcul a permis de reconstituer l'ensemble de la vie de l'ouvrage, d'évaluer la réorganisation des contraintes en fondation, les déformations induites et les conditions de stabilité du massif rocheux autour de la fosse, pour chaque étape clé des travaux. Cette étude a permis de démontrer que les conditions de stabilité durant les travaux sont bonnes, et que l'influence des travaux sur les déformations du barrage était marginale.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] COYNE ET BELLIER Kariba dam poroplastic modelling – Computational studies for dam revaluation ; Plunge pool simulation, future behaviour tentative forecast. Detailed analysis of thrusts and stresses, May 1997
- [2] BOLLAERT E. F. R., MUNODAWAFA M. C. MAZVIDZA D. Kariba dam Plunge Pool scour : quasi-3D Numerical Predictions, Int. Conf. on Scour Erosion, Paris August 2012
- [3] NORET C., GIRARD J. C., MUNODAWAFA M. C. MAZVIDZA D. Z. Kariba dam on Zambezi River: Stabilizing the natural Plunge pool, Int. Conf. on Scour Erosion, Paris August 2012
- [4] NORET C., CLAVE O. Kariba dam, more than 50 years of operation and surveillance