

APPORT DE LA MODELISATION NUMERIQUE NON LINEAIRE 3D A LA CONCEPTION ET SUIVI DES BARRAGES CFRD

Contribution of 3D non-linear modeling to the design and supervision of Concrete Face Rockfill Dams

Cristian NIETO

Tractebel Engineering, 92230 Gennevilliers

cristian.nieto-gamboa@tractebel.engie.com

Nicolas ULRICH , Mohamed MONKACHI

Artelia Eau & Environnement, 38130 Echirolles

nicolas.ulrich@arteliagroup.com, mohamed.monkachi@arteliagroup.com

MOTS CLEFS

Barrage, enrochement, masque amont, modélisation non-linéaire.

KEY WORDS

Concrete face rockfill dam, upstream face, non linear numerical analysis.

RÉSUMÉ

Les barrages à masque amont en béton sont aujourd'hui un des types de barrages les plus utilisés. Leur conception historiquement basée sur l'empirisme rencontre des problèmes lorsque la taille des ouvrages dépasse celle de leurs prédécesseurs. Plusieurs ouvrages de ce type ont vu leur masque en béton s'endommager dès la première mise en eau. Le problème est éminemment lié au comportement de l'ouvrage et aux déplacements induits par la mise en eau. Pour fournir des éléments d'analyse et de conception la modélisation numérique tridimensionnelle et non-linéaire apporte une grande aide aux ingénieurs comme l'illustrent les deux exemples traités dans cet article, Mohale (H=145m) et Nam Ngum 3 (H=210m), tous les deux des barrages de grande hauteur.

ABSTRACT

Concrete Face Rockfill Dams (CFRD) are nowadays one of the most popular choices for dams. Their design based on precedents and empiricism faces problems when the height of the dams goes beyond the precedents. Several CFRDs have experienced slabs cracking during first impounding. The problem is related to the behavior of the dam and the displacements induced in the face during the impoundment. In this regard, 3D non-linear numerical modelling is capable of providing extremely useful information for analysis and design of these structures. Two examples illustrate the benefits of this kind of approach in the projects of Mohale (145m) and Nam Ngum 3 (210m).

1. INTRODUCTION

La popularité des barrages à masque amont en béton, mieux connus par le sigle en anglais comme CFRD (Concrete Face Rockfill Dam) n'a cessé d'augmenter dans les dernières décennies. Cette popularité, liée à un coût relativement faible de construction, a encouragé la conception et la construction de barrages CFRD de plus en plus hauts partout dans le monde. Actuellement, le barrage de Shuibuya en Chine atteint 233m de hauteur et est le plus haut barrage construit de ce type.

La conception des barrages à masque se fonde en grande partie sur les expériences antérieures ([1]) et elle profite de l'évolution constante des détails de conception et des méthodes de construction. Cependant, des ouvrages récents construits suivant « l'état de l'art » ont vu apparaître des désordres importants ([2], [3], [4]), entre autres, les barrages de Xingo (H=140m – 1994), Tianshengqiao 1 (H=178m-1999), Aguamilpa (H=187m – 1993), Ita (H=125m-1999), Mohale (H=145m-2002), Barra Grande (H=185m – 2005) et Campos Novos (H=202m – 2006) ont subi des problèmes liés à la fissuration du masque et la conséquente perte d'étanchéité menant à des fuites jusqu'à 1700l/s pour le cas le plus important.

Cette fissuration qui, dans les cas les plus graves, amène à la rupture localisée du masque amont en béton lors de la première mise en eau est liée à une incompatibilité de déformations entre le masque et l'enrochement. Le masque amont en béton, principale barrière d'étanchéité, n'a aucun rôle structural et ne peut que subir les déformations des enrochements dans le transfert de la poussée d'eau à la fondation. C'est une problématique complexe et tridimensionnelle car la forme de la vallée a une influence importante. Son analyse demande alors la prise en compte du comportement mécanique des enrochements, la prise en compte de l'interaction entre le masque et le support, une prise en compte de la géométrie de la fondation et de la forme de la vallée.

Pour l'analyse de la problématique liée à ces ouvrages, le recours aux modèles numériques est incontournable. Cependant, en ce qui concerne la modélisation, un vaste choix de possibilités est disponible et toutes n'aboutissent pas à des résultats réalistes. Parmi les choix de modélisation, un des plus importants est la représentation du comportement des enrochements. A cet égard, les modèles élastiques linéaires sont attractifs par leur facilité de mise en œuvre, cependant ils peinent à bien représenter le comportement des enrochements et de l'ouvrage. Des expériences menées de façon indépendante par les auteurs ont convergé vers les mêmes conclusions et ont conduit à adopter dans les modélisations un modèle de comportement non-linéaire avec écrouissage isotrope et déviatorique. Ce choix, parmi d'autres qui seront détaillés par la suite, a permis d'obtenir des modélisations réalistes et applicables à la conception des barrages de Nam Ngum 3 (H=210m) au Laos et Mohale (H=145m) au Lesotho.

Cet article présente une discussion à propos des choix de modélisation et de leur application aux projets de Nam Ngum 3 et Mohale.

2. MODELISATION NUMERIQUE

Lors de la définition du modèle numérique d'un barrage CFRD, l'ingénieur modélisateur doit adopter des hypothèses de modélisation concernant les composantes du barrage et leurs interactions. Il faut arriver à un modèle simplifié, tout en gardant les principaux phénomènes physiques en jeu. C'est d'autant plus important pour les enrochements car les déplacements subis par ceux-ci détermineront l'état des déformations dans le masque en béton. Cet article présente ci-dessous les hypothèses de modélisation concernant les principales composantes d'un CFRD.

2.1. Enrochements

La rhéologie des enrochements peut être rapprochée de celle des sols, avec l'addition d'un phénomène lié à la rupture de grains. Tout comme les sols, les enrochements présentent une relation non-linéaire entre contrainte et déformation, une dépendance de la raideur à la contrainte de confinement et une résistance au cisaillement fonction des contraintes effectives et liée au frottement. Par ailleurs, la rupture de grains amène des caractéristiques additionnelles, telles que la variation de l'angle de frottement avec le confinement (enveloppe de rupture curviligne) et les effets d'échelle [5]. Ces derniers rendent la résistance au cisaillement et les caractéristiques de raideur fonction de la taille de particules. Cette rupture de grains est d'ailleurs relativement sensible à la variation de l'état hydrique de l'enrochement [12], [13].

2.1.1. Effet d'échelle

Le diamètre élevé des enrochements mis en œuvre pour la plupart des CFRD rend difficile l'estimation de leurs caractéristiques mécaniques à l'aide d'essais en laboratoire. Pour pouvoir réaliser des essais qui soient représentatifs, il faudrait des dispositifs dont les dimensions sont encore hors de portée dans la pratique.

Par conséquent, les essais sont réalisés sur des échantillons de taille inférieure. Cependant, la réduction des dimensions des échantillons par rapport à la réalité entraîne une surestimation des caractéristiques mécaniques, même si les enrochements sont de nature pétrographique et de géométrie similaires. Cette différence entre les caractéristiques mécaniques obtenues à l'aide d'un essai en laboratoire avec des dimensions réduites et les caractéristiques réelles de l'enrochement utilisé sur site est due à l'effet d'échelle ([5]). Cet effet d'échelle est principalement lié au taux de rupture plus élevé à l'échelle de chaque grain pour les plus grands diamètres d'enrochement.

La littérature montre que de nombreux paramètres affectent la probabilité de rupture des grains. Parmi eux, la taille des grains, leur forme, et également la répartition de la granulométrie, affectent particulièrement la rupture des enrochements à l'échelle de chaque grain, et affectent donc la déformabilité et la résistance de l'enrochement dans sa globalité.

La figure suivante représente les résultats d'essais triaxiaux réalisés sur des enrochements de diamètres différents pour une contrainte de confinement identique (0,9 MPa). Ces essais montrent que les échantillons ayant les diamètres les plus importants ont une déformabilité plus élevée que les échantillons avec des granulométries plus faibles, à contrainte équivalente.

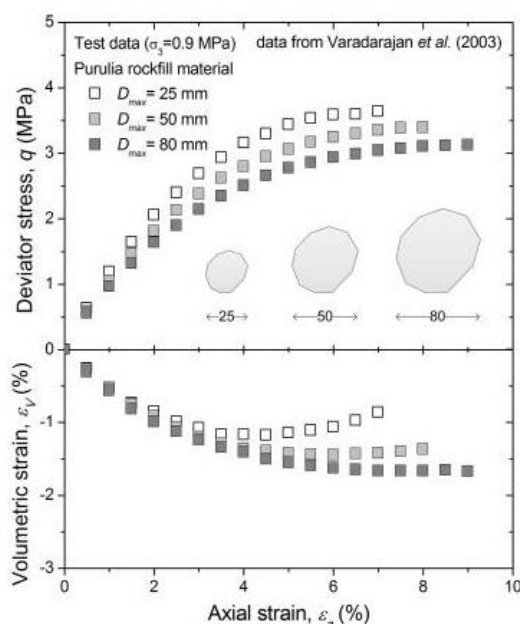


Figure 1 : Essais triaxiaux sur des échantillons de granulométrie variable [6]

Frossard & Nieto ([7]) ont établi la relation suivante après l'analyse de résultats d'essais en laboratoire et de données d'auscultation. L'indice 1 correspond aux valeurs relatives aux dimensions réelles et l'indice 0 aux valeurs relatives aux essais en laboratoire, soit avec des échantillons de dimensions réduites. « D » correspond au diamètre D_{80} , « E » au module d'Young et « m » est un paramètre relatif à la probabilité de rupture d'un grain. Ce dernier paramètre dépend de la nature pétrographique des enrochements.

$$\frac{E_1}{E_0} = \left(\frac{D_1}{D_0} \right)^{-\frac{3}{m}}$$

Dans le cadre de la supervision de la construction du barrage de Nam Ngum 3 (CFRD de 210m de haut), cette formule a été utilisée pour estimer les caractéristiques mécaniques attendues à l'échelle du barrage sur la base des caractéristiques mécaniques obtenues par les essais au laboratoire.

2.1.2. Comportement différé

L'analyse des données d'auscultation des CFRD existants met en évidence une déformation différée plusieurs années après la fin de la construction des barrages, sous chargement relativement constant.

Afin d'éviter une estimation optimiste de la déformation totale subie par le masque amont, il est alors nécessaire d'anticiper l'effet de ce comportement différé dans le cadre de son dimensionnement.

Le comportement différé des enrochements peut être attribué à une succession de cycles : Augmentation des forces de contact → Rupture de grains → Réarrangement → Equilibre → Augmentation des forces de contact →...

Ce phénomène a pour effet d'homogénéiser la répartition des contraintes dans les enrochements et d'aboutir à un meilleur équilibre des forces entre les différents grains. Ce comportement perd donc en intensité avec le temps, ce qui est confirmé par les données d'auscultation.

Les tendances de tassement montrées par les données d'auscultation permettent d'établir des courbes théoriques comme celles indiquées sur la figure suivante. La constante ϵ_r (en %) peut être considérée comme le tassement moyen après 30 ans. L'expérience montre qu'une faible résistance mécanique des enrochements intensifie la déformation différée, tout comme une forte pluviométrie, qui par effet de lubrification des contacts entre les grains, accélère le tassement différé.

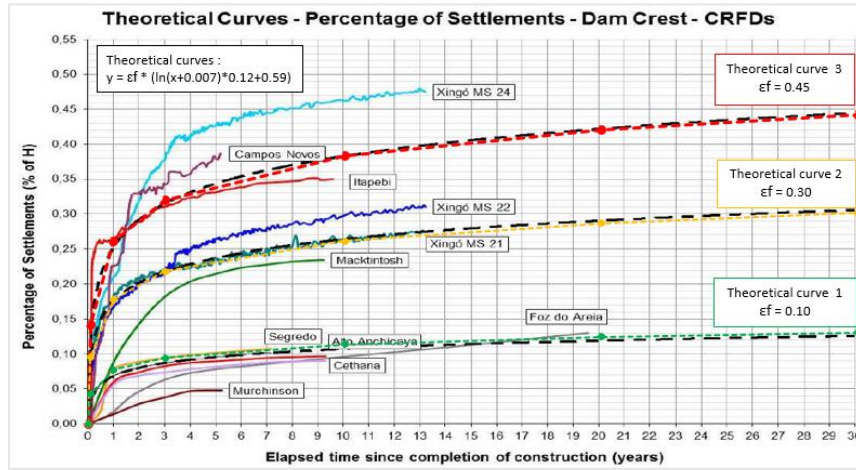


Figure 2 : Tassements mesurés sur plusieurs ouvrages et définition de courbes théoriques [9]

Il est possible de montrer via des essais en laboratoire que le tenseur des déformées à long terme pour des enrochements dépend des contraintes isotrope, déviatoire et du facteur de sécurité par rapport au critère de Mohr-Coulomb suivant la relation de Shen [20] suivante :

$$\varepsilon_{vf} = b \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{m_1} + c \left(\frac{q}{p_a} \right)^{m_2} \quad \gamma_f = d \left(\frac{S_l}{1-S_l} \right)^{m_3} \quad \text{avec :}$$

- ε_{vf} et γ_f les déformées isotropes et déviatoires à long terme ;
- σ_3 la contrainte de confinement ;
- q la contrainte déviatoire ;
- S_l le facteur de sécurité vis-à-vis du critère de Mohr-Coulomb ;
- p_a la pression atmosphérique ;
- b, c, d, m_1, m_2 et m_3 des paramètres de sol déterminés par les essais au laboratoire.

Lors de la modélisation, le choix du tassement final à long terme peut se faire sur la base d'un jugement à dire d'expert sur la qualité des enrochements et du compactage et sur la pluviométrie locale, dans l'attente de valeurs réelles mesurées sur site. Enfin, l'étalement de ce tassement différé dans le temps est calibré sur la base des courbes théoriques définies sur la base du retour d'expérience décrit précédemment.

Le comportement différé peut alors être pris en compte par la relaxation de la contrainte isotrope dans les éléments, de façon à augmenter la déformation et en retrouvant une contrainte constante par l'atteinte d'un nouvel équilibre. Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre lorsque la courbe de déchargement / rechargement est élastique linéaire. La relaxation de contrainte totale à appliquer à l'échelle de chaque élément du modèle numérique est calculée à partir de la relation de Shen remise à l'échelle du tassement global attendu du barrage qui est étalé dans le temps suivant la courbe théorique choisie.

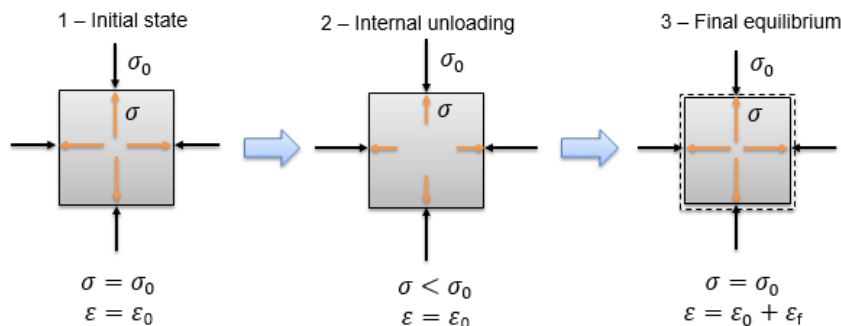


Figure 3 : Principe de modélisation du comportement différé

2.1.3. Modélisation

La représentation de la rhéologie des enrochements dans un calcul numérique considère les enrochements comme un milieu continu dont la relation entre contraintes et déformations est représentée par une loi de comportement (appelée aussi modèle de comportement). Les lois de comportement utilisées dans la pratique de l'ingénieur sont soit élastiques, soit élasto-plastiques, bien que d'autres types existent [14]. Les lois élastiques ont séduit les ingénieurs notamment par le nombre réduit de paramètres et le gain en temps de calcul par rapport aux calculs non-linéaires, en particulier quand il s'agit de modèles numériques tridimensionnels. Cependant, les lois élastiques négligent complètement les principales caractéristiques du comportement des sols. La comparaison entre les mesures réelles effectuées sur des barrages et le résultat de modèles numériques élastiques a montré des limitations claires [15], [16]. Entre autres, les modèles élastiques surestiment les déplacements lors de la mise en eau, variable clé de dimensionnement quand il s'agit du masque en béton.

Les lois de comportement développées dans le cadre de la plasticité sont les mieux adaptées à la représentation du comportement des sols et enrochements. Selon l'expérience des auteurs, les principales caractéristiques requises dans un modèle pour la représentation du comportement des enrochements sont les suivantes:

- Capacité à développer des déformations plastiques en trajectoires isotropes (surface de charge fermée ou « cap ») ;
- Ecrouissage en trajectoire déviatorique ;
- Elasticité non-linéaire en chargement et déchargement définie en fonction de la contrainte de confinement ;
- Résistance au cisaillement en fonction de la contrainte de confinement ;
- Représentation de la dilatance.

Deux lois de comportement très similaires et intégrant les caractéristiques décrites ci-dessus ont été utilisées dans les modélisations de Nam Ngum 3 et Mohale cf. §3. Ces sont les lois dites HSM « Hardening Soil Model » et « Modified » Mohr Coulomb implémentées sur les logiciels FLAC et Midas GTS respectivement.

Les lois de comportement élasto-plastiques sont définies par un certain nombre de paramètres. Ces paramètres mécaniques sont estimés soit i) à partir d'essais de laboratoire, en appliquant une correction par effet d'échelle ([5], [7],[8]), soit ii) à partir d'analyses inverses par calage de paramètres sur des ouvrages similaires et bien instrumentés ([10]). La première approche a été mise en œuvre dans les calculs du barrage de Nam Ngum 3 et la deuxième dans le cas du barrage de Mohale.

2.2. Masque en béton

Dans la modélisation du masque, deux hypothèses doivent être définies, d'une part le type d'éléments et d'autre part, le modèle de comportement.

Concernant le type d'élément, deux approches peuvent modéliser le masque en béton. Une option est la modélisation du masque par éléments solides ; ceci a l'avantage de permettre la prise en compte de la variation de l'épaisseur du masque dans l'espace. Une deuxième option, c'est de modéliser les dalles par des éléments structuraux type coque (« plate ») ce qui permet de récupérer très facilement les efforts de membrane et les moments fléchissants en vue d'une vérification du ferrailage.

A moins d'avoir un objectif de modélisation particulier, le modèle de comportement du béton peut être adopté élastique linéaire. En particulier lorsqu'il s'agit de la conception d'un ouvrage neuf, l'ingénieur cherche à avoir un état de contraintes acceptable selon les normes en vigueur (e.g., Eurocodes), ce qui implique de rester dans le domaine élastique.

2.3. Interaction Masque – sous-masque en béton (« Curb »)

Dans la pratique des CFRDs une couche de bitume est souvent introduite entre le sous-masque et le masque pour « casser le lien » (bond-breaker) entre les deux composantes. L'efficacité de cette mesure n'est pas partagée par tous les ingénieurs.

D'un point de vue numérique, on peut introduire des éléments dits d'interface qui représentent l'interaction entre ces deux surfaces. Ces éléments permettent de définir une condition limite en cisaillement donnée par les paramètres de résistance de Mohr-Coulomb et ont la capacité de représenter l'ouverture ou fermeture de l'interface (contact).

3. CAS D'ETUDE

Les considérations présentées auparavant ont été mises en application dans deux projets. Le premier projet concerne le barrage de Mohale au Lesotho. Ce barrage dont la construction a été achevée en 2002 et la mise en eau en 2006 a fait l'objet d'une analyse inverse qui a permis non seulement d'identifier les paramètres des enrochements, mais de valider la méthodologie de modélisation en vue de l'application à un projet neuf, le projet de Polihali. Ce dernier n'est pas présenté dans cette communication.

Le deuxième projet est le projet de Nam Ngum 3 au Laos [11], actuellement en construction et dont les analyses 3D non-linéaires ont fourni des éléments importants pour affiner la conception du masque et réduire les risques associés de rupture.

3.1. MOHALE

3.1.1. Contexte

Dans le cadre des études de conception du barrage de Polihali au Lesotho, une étude numérique a été prévue afin d'identifier les risques potentiels liés au comportement du barrage et du masque en béton. Afin de pallier les retards des investigations géotechniques (essais triaxiaux inclus) menées par le client et de respecter le programme des études, il a été proposé que les paramètres mécaniques décrivant le comportement des enrochements soient identifiés à partir d'une analyse inverse sur le barrage de Mohale [17]. Le barrage de Mohale, un CFRD de 145m, localisé à 75km du site de Polihali, a été construit avec des enrochements de basalte de la même formation que ceux envisagés pour le barrage de Polihali.

Le barrage de Mohale a une longueur en crête de 540 m (L) et d'une hauteur maximale (H) de 145 m. Le rapport L / H est de 3,7.

Le volume total d'enrochement d'origine basaltique déversé et compacté était de 7,2 millions de mètres cubes. La recharge amont a une pente de 1 (V): 1,4 (H), tandis que la recharge aval a une pente moyenne de 1 (V): 1,4 (H), avec des pentes de 1 (V): 1,25 (H) entre routes d'accès.

3.1.2. Identification des paramètres par analyse inverse

La méthode d'identification des paramètres par analyse inverse est une méthode itérative qui repose sur la simulation mécanique numérique (e.g., par éléments finis ou différences finies) d'un ouvrage et la comparaison entre les résultats de la modélisation et les mesures sur l'ouvrage réel. Les paramètres recherchés sont obtenus en minimisant l'écart entre le calcul et l'expérience défini par un indicateur d'erreur.

Les mesures issues de l'auscultation concernent les valeurs mesurées pendant la construction et la mise en eau par les cellules de tassement installées dans le corps du barrage. Le modèle numérique prend en compte le phasage de construction, qui dans le cas de Mohale présentait des asymétries tant dans la direction amont-aval que de rive à rive.

Pour évaluer la représentativité du modèle un indicateur d'erreur a été défini par la somme des différences entre la valeur mesurée et la valeur calculée. Cet indicateur est calculé pour deux phases de construction et une phase de mise en eau. Les paramètres mécaniques sont ensuite modifiés tout en cherchant la minimisation de D.

$$D = \frac{\sum |S_i^{meas} - S_i^{model}|}{n}$$

Où D est la différence relative entre le tassement mesuré dans le barrage (S_i^{meas}) au point i et le tassement calculé au même pont (S_i^{model}). L'échantillon de points utilisés pour le calcul de D est composé par 57 mesures de construction (distribuées en deux phases de lecture) et 15 de mise en eau.

L'analyse inverse du barrage de Mohale portait essentiellement sur l'identification des paramètres mécaniques définissant les matériaux d'enrochement. Ceux-ci sont définis par la loi de comportement dite « Modified Mohr Coulomb » implémentée sur le logiciel Midas GTS. Cette loi est définie par 11 paramètres, 7 décrivant l'élasticité non-linéaire et 4 la plasticité.

En ce qui concerne les données de l'auscultation, trois sections principales nommées A, B et C ont été instrumentées dans le barrage de Mohale. Les instruments ont été disposés à deux niveaux dans les sections A & C (en rive) et à trois niveaux dans la section principale B.

Les principaux composants de l'instrumentation sont :

- 40 cellules de tassement hydrauliques réparties en trois sections et aux élévations 1975, 2010 et 2040masl.
- 12 repères topographiques dans le mur de parapet et le parement aval
- Jauges de contrainte dans les dalles

- 31 joint-meters pour suivre l'ouverture / la fermeture des joints, principalement sur les rives gauche et droite dans les 10 premières dalles.
- 9 jeux de jauges de déplacement (trois directions) installés sur la plinthe.
- 8 jauges de contrainte réparties dans les dalles 18 & 20 (dalles au centre du masque).
- 8 cellules de pression dans la section principale.
- 1 inclinomètre.

3.1.3. Principaux résultats de modélisation

Au total une vingtaine de calculs ont suffi pour déterminer un jeu de paramètres représentatif du comportement des zones 3B et 3C du barrage. Le jeu de paramètres retenu est présenté ci-dessous.

Tableau 1 Paramètres obtenus pour le modèle Mohr-Coulomb modifié - Mohale

Matériau	Masse (kN/m ³)	volum	Coefficient de Poisson	E_{50}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	$m_{MCM}^{(*)}$	P_{ref} [kPa]	KNC	Ψ (°)	ϕ (°)	Porosité ₀
3B	22		0.3	30	25	90	0.7	750	0.6	10	39	0.2
3C	22		0.3	25	16	7	0.5	750	0.3	10	39	0.2

(*) puissance de la loi élastique de type $E = E^{ref} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{(1-m_{MCM})}$

Le résultat, en termes de tassements calculés, est illustré dans les figures suivantes pour deux des trois sections instrumentées lors des deux phases de construction choisies pour comparaison et la mise en eau.

La section B (Figure 4) est la section maximale, elle atteignait (lors de la première lecture) à l'amont la cote 2030masl (20m au-dessus de la section A) et à l'aval la cote 1990m. Etant la section maximale, une couche additionnelle d'instruments se trouve à l'élévation 1975masl. Ce qui fait un total de 10 points de mesure lors de la première lecture et 17 lors de la deuxième phase (Figure 5), l'entrepreneur ayant construit en priorité le remblai en rive droite.

La section C, en rive droite, était la section où le remblai atteignait la cote la plus élevée lors de la première lecture, 2040masl à l'amont et 2010masl à l'aval. La différence de niveau entre les sections était due à des besoins constructifs, le remblai constituant aussi les rampes de circulation entre la rive gauche et la rive droite.

Les résultats de la section C sont satisfaisants. On note une plus grande difficulté à bien représenter les tassements des cellules installées à l'élévation 2010masl dans la deuxième phase de lecture. Une discussion à ce sujet est présentée en section 3.1.4.

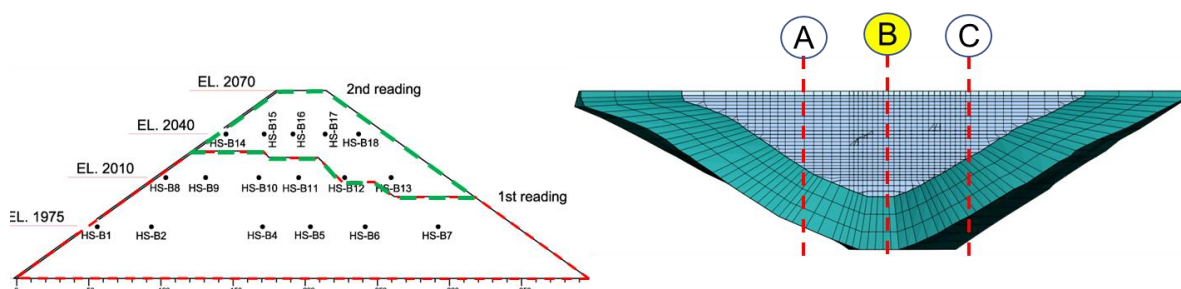


Figure 4 : Etat du remblai lors de la première lecture (contour rouge) et deuxième lecture (contour vert) au droit de la section B

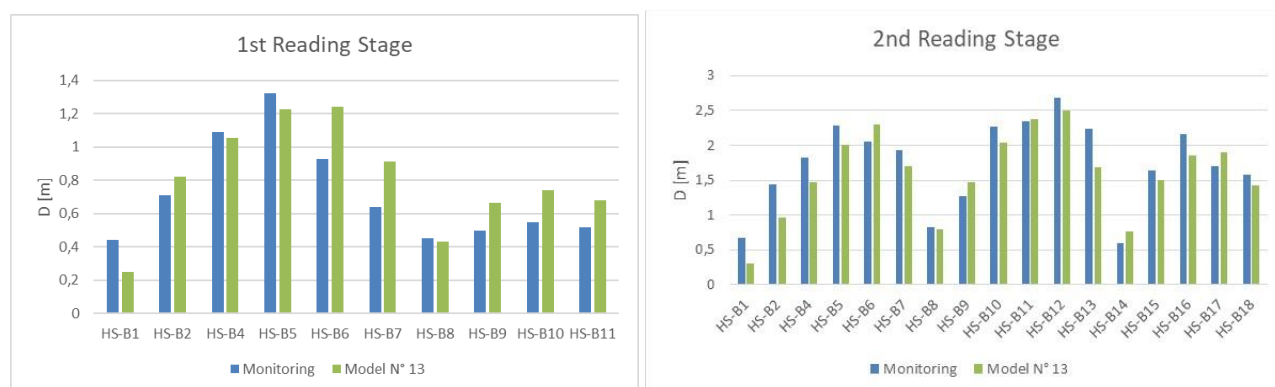


Figure 5 : Comparaison des résultats de la simulation et de l'instrumentation pour les lectures concernant les phases 1 et 2 dans la section B.

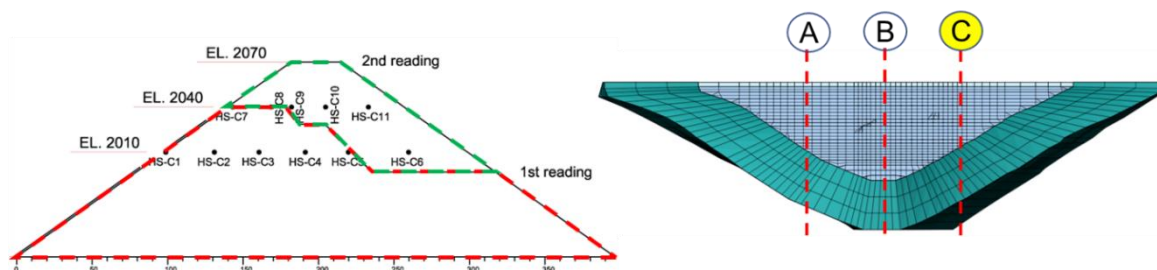


Figure 6 : Etat du remblai lors de la première lecture (contour rouge) et deuxième lecture (contour vert) au droit de la section C.

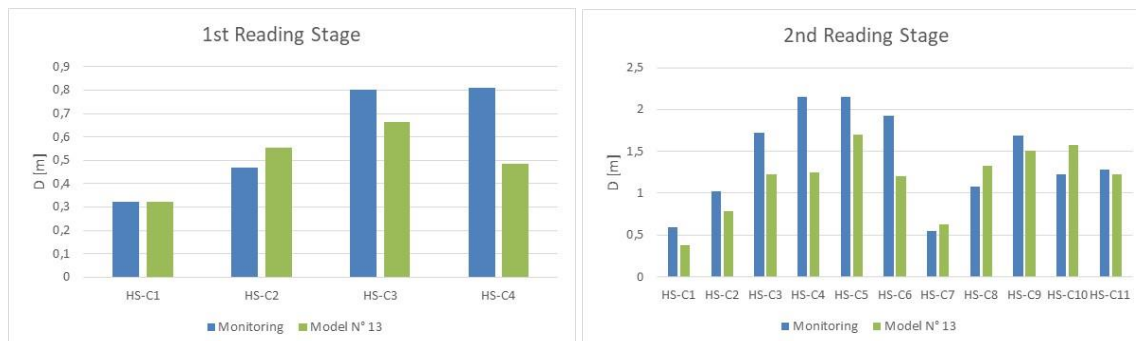


Figure 7 : Comparaison des résultats de la simulation et de l'instrumentation pour les lectures concernant les phases 1 et 2 dans la section C.

Lors de la mise en eau, l'inclinomètre en face amont est tombé en panne ; alors le calage du modèle a pris en compte les tassements des cellules disponibles dont deux sont montrées en Figure 8. Ce calage ne considère que les mesures disponibles avant la rupture du masque le 14 février 2006 (cf., [4]). Car, une fois le masque rompu, les enrochements ont subi des déformations additionnelles liées à la rupture de particules par mouillage de l'enrochement.

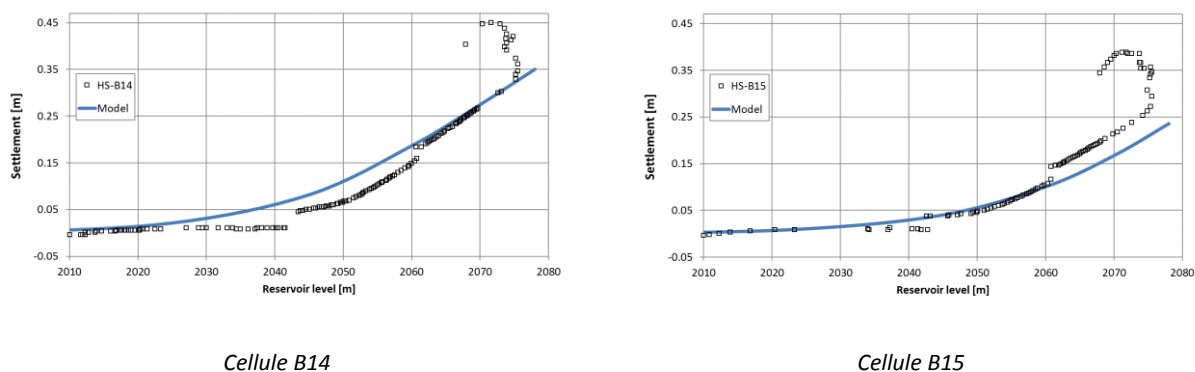


Figure 8 : Comparaison des résultats de la simulation et de l'instrumentation pour les lectures concernant la mise en eau et les tassements dans les cellules B14 et B15 (proches de la face amont).

De façon générale, la comparaison entre les mesures in-situ et le calcul numérique est très satisfaisante. Outre les résultats présentés ci-dessus, les déplacements en crête (verticaux, rive à rive et amont-aval) ont été très proches des mesures.

Une fois les caractéristiques mécaniques des enrochements définies par l'analyse inverse, un modèle plus élaboré a été développé (Figure 9). Ce modèle cherchait à identifier les capacités d'un modèle numérique à représenter le comportement du masque (dalles et joints). Ce modèle inclut les mêmes éléments du modèle utilisé pour l'analyse inverse (fondation et enrochement) plus l'inclusion du sous-masque (curb) représenté par des éléments solides, le masque en béton représenté par des éléments structuraux (coques), et des éléments d'interface pour simuler, d'une part, l'interaction entre les dalles en béton et le sous-masque (Interface 2D) et, d'autre part, l'interaction entre les dalles. Ce nouveau modèle a permis la comparaison des résultats en termes de déformation dans les dalles du masque et le comportement des joints (ouverture / fermeture).

Dans le barrage de Mohale des extensomètres installés au niveau des joints verticaux (entre dalles) en rive gauche et droite ont permis de suivre l'ouverture de ces joints. Un de ces éléments est présenté en Figure 10a. Les éléments utilisés ont permis de modéliser correctement l'ouverture des joints en rive sous l'effet de la déformation du masque lors de la mise en eau du réservoir.

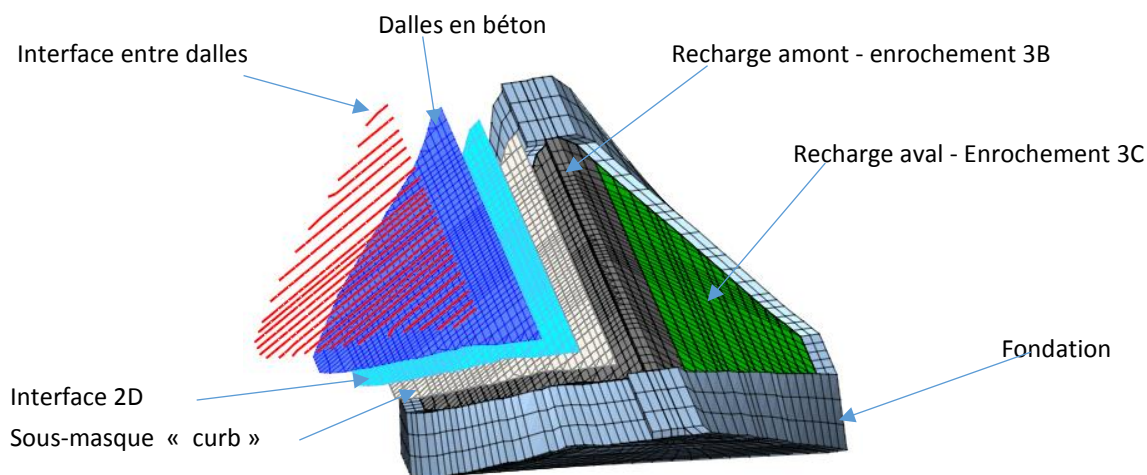


Figure 9 : Composantes du modèle numérique de Mohale

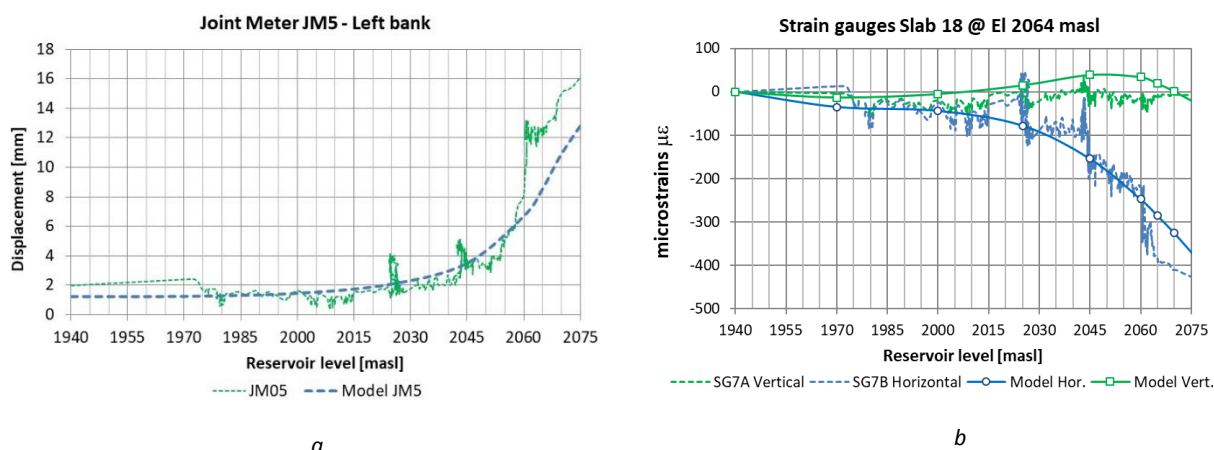


Figure 10 : Comparaison (a) du comportement du joint JM5 en rive gauche et (b) des déformations dans la dalle 18 (centre du barrage) à l'élévation 2064masl relatives au début de la mise en eau.

Par ailleurs, les dalles 18 et 20 ont été instrumentées avec des jauges de déformation dans le sens de la pente (verticale) et dans le sens rive à rive (horizontal) à plusieurs niveaux. Les déformations obtenues dans les éléments représentant les dalles sont très proches des mesures des instruments et montrent bien la tendance des déformations lors de la mise en eau (Figure 10.).

D'une façon générale, l'estimation des paramètres mécaniques décrivant le comportement des enrochements a permis une modélisation très proche de l'expérience. Ceci indique que, grâce aux choix de modélisation adoptés, les principaux mécanismes de déformation ont été pris en compte et nous pouvons via des modélisations numériques tridimensionnelles non-linéaires identifier les risques liés aux barrages à masque amont.

3.1.4. Discussion à propos de la modélisation de Mohale

L'utilisation d'une loi non-linéaire dans la représentation du comportement mécanique des enrochements permet de bien représenter leur comportement. C'est ainsi que les déformations dans le masque du barrage ont pu être modélisées correctement. Dans le cadre d'une analyse inverse, l'utilisation de ce type de loi de comportement nécessite la modélisation de plusieurs étapes de construction, car chaque étape modélisée représente un état de contraintes. C'est en comparant les déplacements à différents états de contraintes qu'il est possible de caler les divers paramètres de la loi.

Dans l'analyse inverse de Mohale, l'effet du fluage de l'enrochement n'a pas été pris en compte. Il est probable que ce phénomène soit en partie la raison de l'écart observé lors de la deuxième phase de lecture dans la section C pour les premières cellules de tassement installées (cf. Figure 7). Ce phénomène est plus clairement mis en évidence lors de la mise en eau. La mise en eau de Mohale a été effectuée par paliers. Tous les ans pendant la période humide le réservoir augmentait de niveau et il restait relativement constant jusqu'à la suivante. En Figure 8 lorsque le niveau du réservoir est resté quelques mois à la cote 2043 et 2060masl, le fluage a induit des déformations à charge constante.

Les effets du fluage ont été intégrés dans l'analyse du barrage de Nam Ngum 3, présenté ci-après.

3.2.NAM NGUM 3

Le barrage de Nam Ngum 3 est un CFRD de 210m de hauteur en cours de construction au Laos. Une modélisation prédictive a donc été mise en œuvre, avec pour but d'estimer le tassement des enrochements et de vérifier l'efficacité des dispositions constructives prévues par l'entreprise de construction. Cette approche prédictive se base sur la prise en compte de l'effet d'échelle et du comportement différé décrits précédemment.

Le logiciel utilisé est Flac3D, utilisant la méthode des différences finies et un schéma de résolution explicite (Ref. [21]).

La modélisation tridimensionnelle est relativement détaillée. Elle prend en compte la géométrie réelle du barrage et de sa fondation présentant des épaulements rocheux particulièrement marqués, les principaux enrochements du zonage, l'éventuel glissement entre les enrochements et la fondation, les glissements entre le masque et les enrochements, et les différents joints du masque amont.

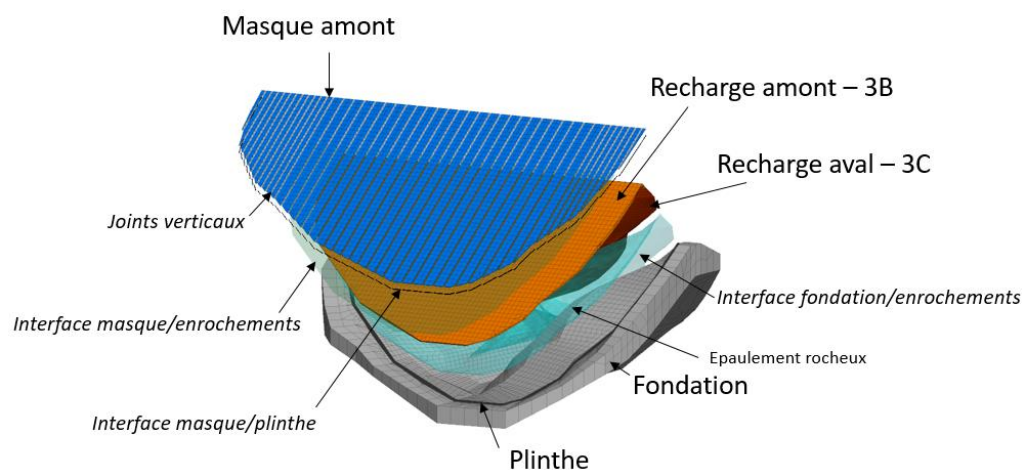


Figure 11 : Modèle numérique de Nam Ngum 3

3.2.1. Modélisation du masque amont

L'implantation des joints verticaux ainsi que leurs ouvertures initiales suivent les dispositions prévues par l'entreprise de construction.

Le masque est modélisé à l'aide d'éléments volumiques qui suivent une loi de comportement élastique. Il est lié aux enrochements et à la plinthe périphérique à l'aide d'interfaces qui suivent une loi de frottement de Coulomb et permettant une ouverture normale. Les joints verticaux sont également modélisés à l'aide d'interfaces. L'ouverture initiale des joints dépend de leur position sur le masque :

- Les joints centraux sont des joints de compression présentant une ouverture initiale de 5 cm ;
- Les joints extérieurs sont des joints de traction sans ouverture initiale ;
- Les joints intermédiaires présentent une ouverture initiale de 2,4 cm.

Une méthode simplifiée aurait consisté à modéliser le masque de façon monolithique avec un module d'Young réduit et à déterminer les espacements et ouvertures initiales appropriées en fonction des contraintes calculées. Cependant, cela n'aurait pas permis d'appréhender les contraintes maximales de compression dans le masque si les joints de compression venaient à se refermer totalement à long terme.

3.2.2. Modélisation prédictive et application de l'effet d'échelle

3.2.2.1. Modélisation des enrochements

Les enrochements suivent une loi de comportement de type Hardening Soil Model [21]. Le calage a été effectué à l'aide d'essais triaxiaux et œdométriques réalisés en laboratoire. Un effet d'échelle a ensuite été appliqué comme décrit au §2.1.1.

La loi de comportement a été adaptée pour tenir compte de la réduction de l'angle de frottement interne avec l'augmentation de la contrainte de confinement.

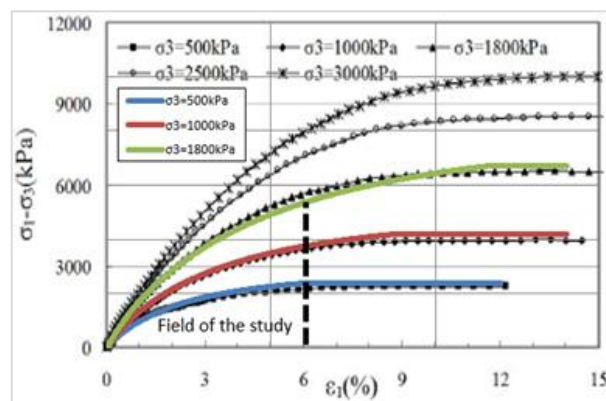


Figure 12 : Calage de la loi de comportement d'un type d'enrochement du barrage de Nam Ngum 3 sur les essais triaxiaux

Les principaux paramètres obtenus à l'issue du calage sont donnés dans le tableau ci-dessous, la description de ces paramètres est faite dans le document [21].

Tableau 2 Paramètres obtenus après calage en utilisant une loi Plastic-Hardening

Matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Coefficient de Poisson	E_{50}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	m	R _f	OCR	Ψ (°)	φ ₀ (°)	δφ (°)	e ₀
3B	2200	0.2	70	70	140	0.17	0.9	40	3.5	50	3	0.25
3C	2170	0.2	56	56	112	0.15	0.9	40	5	48	5	0.28

3.2.2.2. Résultats à l'issue de la construction

Avec les paramètres ainsi obtenus, le tassement calculé à l'issue de la construction des enrochements est de 1,9m soit environ 1% de la hauteur totale du barrage. Ce tassement est dans la moyenne de ce qui est observé sur les grands CFRDs.

En revanche, le module d'Young apparent est relativement faible (82 MPa), traduisant un risque d'endommagement du masque amont. En particulier, la figure ci-dessous issue des travaux de Frossard [19] montre la corrélation entre les CFRDs dont le masque amont est endommagé, la déformabilité des enrochements, et le facteur de forme de la vallée.

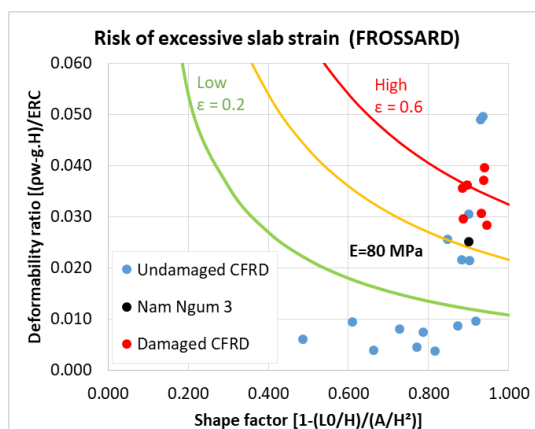


Figure 13 : Risque d'endommagement du masque en fonction de la déformabilité des enrochements et du facteur de forme de la vallée

3.2.3. Modélisation prédictive et application du comportement différé

Dans le cas du barrage de Nam Ngum 3, le fluage a été appliqué seulement à partir de la fin de la construction des enrochements.

Une valeur moyenne de tassement différé tirée de la littérature, de l'ordre de 60 cm a été adoptée en première approche dans l'attente des données d'auscultation. Ces déplacements s'accompagnent d'une augmentation des contraintes de compression dans le masque. La figure suivante montre les contraintes de compression maximales dans le masque amont après 30 ans de service avec et sans joint verticaux.

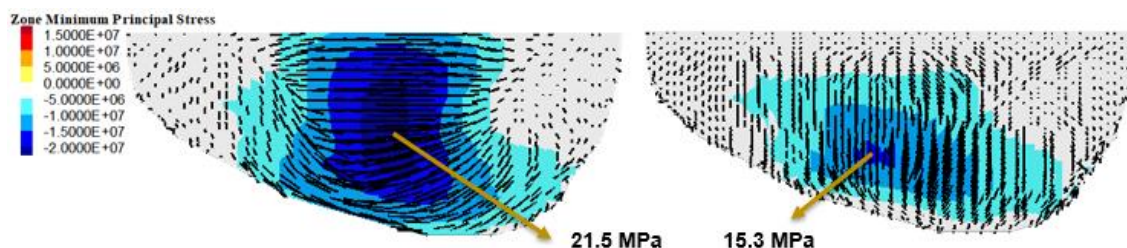


Figure 14 : Contraintes maximales de compression dans le masque amont après 30 ans de service. Sans joints (g.), avec joints (d.).

Ces résultats montrent que :

- Le masque présente effectivement un risque de désordre si aucune disposition constructive n'est prise. En ce sens, les joints verticaux prévus sont correctement dimensionnés et permettent de réduire ce risque en diminuant d'environ 30% les contraintes de compressions.
- Le comportement différé augmente les contraintes de compression dans le masque de 15% si les joints de compression sont modélisés, ou de 20% dans le cas contraire.

Par ailleurs, ce comportement différé peut potentiellement déclencher une ouverture de quelques centimètres entre le masque amont et le béton extrudé sur la partie supérieure du masque. La longueur de cette ouverture peut atteindre 70m et nécessite un dispositif d'injection. Il est cependant possible de mettre en œuvre un joint horizontal articulé pour apporter de la souplesse au masque dans cette zone. Cette possibilité a été modélisée ce qui a montré que la présence de ce joint peut effectivement réduire la valeur de ces ouvertures.

La figure ci-dessous montre l'ouverture entre le masque et le béton extrudé après mise en eau et après 30 ans de service, avec et sans joint horizontal articulé. Il s'agit d'une vue en élévation aval et en transparence, permettant de distinguer les appuis rocheux.

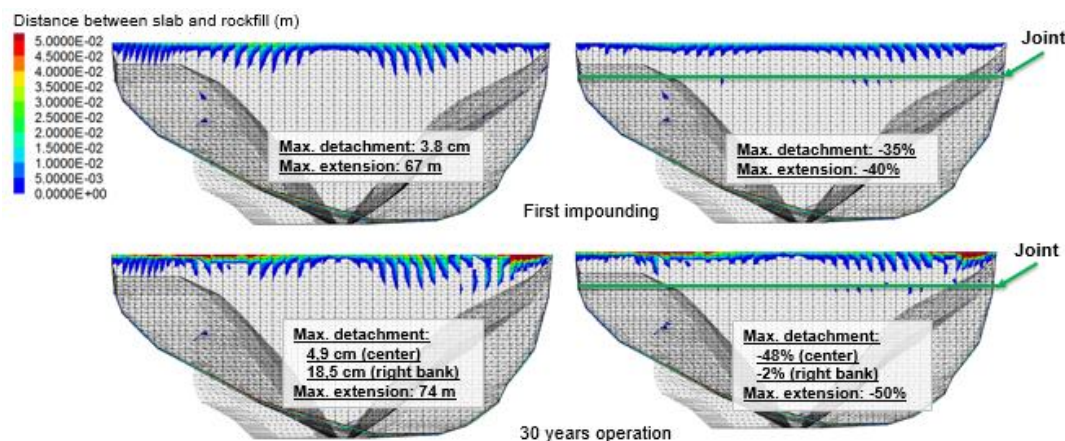


Figure 15 : Ouverture entre le masque et les enrochements. Après mise en eau (haut), après 30 ans (bas), sans joint horizontal (g.), avec joint horizontal (d.).

3.2.4. Modélisation explicative

Le barrage de Nam Ngum 3 est en cours de construction et des tassomètres électromagnétiques et hydrauliques ont été installés afin suivre l'évolution des déformations des enrochements.

Les données obtenues permettent de réaliser un modèle explicatif basé sur les données d'auscultation.

Les premiers résultats de ce modèle montrent des enrochements moins déformables que ceux initialement prévus. En particulier, le module d'Young apparent varie entre 150 MPa et 200 MPa en fonction des zones du barrage. Il est probable que ce module diminue d'ici la fin de la construction avec l'augmentation des contraintes de confinement mais il restera probablement supérieur aux 80 MPa de module apparent obtenu lors de l'analyse prédictive.

A ce stade, l'hypothèse la plus probable pour expliquer cet écart est que le compactage lors de la mise en place des enrochements a tendance à réduire significativement la granulométrie, réduisant ainsi l'effet d'échelle tout comme l'effet du comportement différé.

3.3. Discussion

Deux cas d'application de modèles numériques tridimensionnels ont été présentés montrant les capacités de ces outils dans l'analyse et la conception des barrages à masque amont en béton. Les principaux mécanismes de déformation ont été modélisés et il est possible aujourd'hui d'avoir une méthode rationnelle d'analyse pour ces ouvrages.

L'élément le plus important pour une modélisation correcte est le modèle de comportement représentant l'enrochement. Les modèles élastiques sont à proscrire si l'objectif de modélisation est d'obtenir un état de contraintes et déformations représentatif de l'ouvrage et plus particulièrement du masque en béton.

Les caractéristiques mécaniques des enrochements peuvent être déterminées à partir d'essais de laboratoire en incluant les corrections nécessaires (effets d'échelle). Elles peuvent, et même, elles devraient être vérifiées à partir du suivi des ouvrages par analyse inverse, ce qui constitue un modèle accompagnateur de projet (14).

Un point non abordé par les modélisations concerne les déformations par rupture de particules lors d'un mouillage. Ce phénomène propre aux enrochements construits en condition sèche (cf. [12], [13]) est caractérisé par l'incrément de déformations à charge constante par l'effet d'une variation d'humidité. C'est encore aujourd'hui un sujet de recherche dans le domaine des sols non-saturés aussi bien dans la compréhension du phénomène que dans la manière de le modéliser numériquement.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Cooke J.B. (1998) Empirical design of the CFRD. *Hydropower & Dams*, Issue 6. Pgs 24-27.
- [2] Marques Filho P., Pinto N.L de S. (2005) CFRD dam characteristics learned from experience. *Hydropower & Dams*. Issue 1. Pgs 72-76.
- [3] Pinto N.L de S. (2007) Very High CFRD dams – Behavior and Design Features. *Proceedings of the III Symposium on CFRD Dams Honoring J. Barry Cooke*. Florianapolis 25-27 October. Pgs 3-16.
- [4] Johannesson P. & Tohlang S.L. (2007) Lessons learned from Mohale. *International water power & Dam Construction*. Vol 59, N° 8. Pg 16-25
- [5] Frossard E., Hu W., Dano C., Hicher P.Y. (2012) Rockfill shear strength evaluation: a rational method based on size effects *Géotechnique* Vol. 62, n°5, 415-427, Mai 2012.
- [6] Sukkarak R., Pramthawee P., Jongpradist P., Kongkitkul W., Jamsawang P. (2017) Deformation analysis of high CFRD considering the scaling effects, Juin 2017.
- [7] Frossard E., C. Nieto Gamboa (2015) Effets d'échelle dans la résistance au cisaillement des remblais granulaires - incidences sur la stabilité et le comportement des grands barrages en enrochement. 25^{ème} Congrès des grands barrages. Stavanger, Juin 2015.
- [8] Andrian F., Monkachi M., Ulrich N., Ducos X. (2018) The Nam Ngum 3 CFRD dam : an advanced numerical analysis to prevent upstream face damages. *HYDRO 2018*, Gdansk.
- [9] Silveira J.F.A., Bandeira O.M. (2017) Analysis of the CFRD behavior related to the rockfill deformability and its leakage consequences after reservoir filling. 31^{ème} SNGB, ICOLD.
- [10] Nieto-Gamboa C.J. and Lopez-Caballero F. (2010), "Non Linear Modeling of a Rockfill Dam. First part: Inverse Analysis". *Proceedings of the 2nd International Conference on Geotechnical Engineering*. Pgs 519-529. Hammamet- Tunisie.
- [11] Ducos X, Monkachi M. Bercher Q. (2018), Nam Ngum 3 HPP – New high CFRD dam in Laos PDR, ASIA 2018.
- [12] Oldecop, L. and E. Alonso (2001). A model for rockfill compressibility. *Géotechnique* 51 (2), 127–139.
- [13] Oldecop, L. and E. Alonso (2003). Suction effects on rockfill compressibility. *Géotechnique* 53 (2), 289–292.
- [14] Mestat, P. (1993). Lois de comportement des geomatériaux et modélisation par la méthode des éléments finis. Etudes et recherches des laboratoires de ponts et chaussées-série géotechnique gt52, LCPC.
- [15] Anthinac P., A. Carrere, D. Develay, R.H. Andrzejewski (2002) "The contribution of numerical analysis to the design of CFRDs", *Hydropower & Dams*, Vol.9, Issue 4.

- [16] Imaizumi H, Sardinha A.E.(1985) "A study of deformations in concrete face rockfill dams". Concrete Face Rockfill Dams – Design, Construction and Performance. Edited by J.B. Cook and J.L. Sherard. ASCE.
- [17] Gratwick, C., P. Johannesson, S. Tohlang, T. Tente, and N. Monapathi (2000). Mohale dam, lesotho. In CIGB-ICOLD (Ed.), Proceedings of the International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams., pp. 257–272.
- [18] Tardieu B., O. Ozanam (1997) Le modèle accompagnateur de projet – conception et suivi des grandes infrastructures. Ed. Hermes 159 pgs. ISBN 2-86601-613-0.
- [19] Frossard E. (2009) On the structural safety of large rockfill dams. 23^{ème} Congrès du CIGB, Brasilia.
- [20] Shen Z. (1991) Experiment study of rockfill creep characteristic, Proceedings of the Sixth Soil Mechanics and Foundation Engineering Science Conference, Shangai.
- [21] Itasca Consulting Group (2018) FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions. Mineapolis.