

Prédiction du comportement de barrage en enrochement de grande taille à l'aide d'une modélisation tridimensionnelle

Prediction of the behavior of very high CFRD using a 3D modelling

Chen Y., Fry J.-J., Laigle F.
EDF-CIH, Le Bourget-du-Lac, France

Vincens E., Froio F.
Université de Lyon, LTDS, UMR CNRS 5513, École Centrale de Lyon, Lyon, France

RÉSUMÉ : Cet article montre comment une modélisation 3D permet de prévoir et de s'affranchir des pathologies observées sur les très grands barrages en enrochement. Ainsi, pour retrouver les pathologies du masque en béton observées sur un grand barrage, il faut utiliser un modèle tridimensionnel et considérer l'effet de la vallée, le zonage du corps du barrage, la séquence de construction, les interfaces entre la fondation et le remblai, la plinthe et le masque et celle entre le remblai et le masque et enfin une loi de comportement prenant en compte la forte non linéarité de la compressibilité et de la résistance avec la contrainte. La loi utilisée, L&K-Enroch, a été développée au sein d'EDF-CIH pour prendre en compte l'irréversibilité des déformations des enrochements bien compactés ou peu compactés sous charges déviatoires et isotropes pour les enrochements. La modélisation de la construction et de la mise en eau d'un barrage réel est prise comme exemple. Les résultats de la simulation expliquent, d'une manière plus convaincante, les pathologies des fissures sur le masque des grands CFRD.

ABSTRACT: This paper points out the key factors for detecting defects and avoiding them in the design of very high CFRD, based on a 3D modelling. In order to fit the observed cracks on the concrete slab on a high CFRD, a 3D modelling is required, taking into account the valley effect, the zoning of the dam body, the sequence of construction, as well as the interface between the foundation and the embankment, the interface between the plinth and the face slab, and that between the embankment and the face slab and finally a constitutive model able to catch the strong non linearity of compressibility and strength versus the state of stress. The constitutive model developed by EDF-CIH, known as L&K-Enroch, is an elastoplastic model that takes into account irreversible deformations of poorly or highly compacted rockfill under deviatoric and isotropic loading of rockfill. The 3D modelling of an existing CFRD is introduced in this paper as an example. The results of this modelling explain, in a rather convincing way, the pathology of cracks on the slab face of high CFRD.

MOTS-CLÉS : Grand barrage, CFRD, enrochement, modélisation, fissures, analyse numérique, loi de comportement

KEYWORDS: Large dam, CFRD, rockfill, modelling, cracks, numerical analysis, constitutive model

1 INTRODUCTION

Le barrage en enrochement à masque amont (CFRD) est en plein développement, car il a une grande stabilité et sa résistance remarquable au séisme. Le plus grand CFRD atteint 233 m à Shuibuya en Chine. Cependant, des fissures sur le masque amont en béton ont été souvent observées sur un grand nombre de très grands CFRD (Tianshengqiao-1, Aguamilpa, Campos Novos, Barra Grande, Mohale) attirant l'attention sur les limites de la conception traditionnelle basées principalement sur l'expérience et le jugement d'ingénierie.

Pour éviter de tels déboires, les experts disposent de la modélisation numérique pour mieux comprendre les pathologies observées sur ces ouvrages récemment construits, principalement des fissures, préciser ou compléter les solutions pour éviter ces désordres.

2 LOI DE COMPORTEMENT L&K-ENROCH

Afin de modéliser le comportement mécanique des très grands barrages en enrochement, une loi de comportement décrivant les déformations déviatoires et isotropes sous fortes contraintes adaptée est indispensable. Dans ce contexte, la loi de comportement L&K-Enroch a été développée au sein d'EDF-CIH (Laigle 2004, Silvestre 2007), afin d'améliorer la

pertinence de la modélisation numérique des barrages en enrochement. Le modèle L&K-Enroch est une loi de comportement dérivée du modèle L&K, développé pour la modélisation des massifs rocheux. La plupart des concepts ont été conservés mais l'extrapolation de certaines notions aux enrochements en fait un modèle « dérivé ».

Selon la logique adoptée pour le développement du modèle L&K, la résistance de l'enrochement est uniquement régie par une composante de frottement et une composante de dilatance. D'un point de vue physique, l'hypothèse est faite que le corps d'un barrage en enrochement est assimilé, à moindre échelle et par homogénéisation, à un massif rocheux sans cohésion. Cette hypothèse justifie l'application du modèle L&K aux enrochements moyennant certaines adaptations. D'un point de vue rhéologique, le modèle L&K-Enroch est un modèle élastoplastique à écrouissage isotrope avec un mécanisme isotrope et un mécanisme déviatoire. La loi de comportement L&K-Enroch peut reproduire le comportement mécanique principal des enrochements comme observé au laboratoire :

- Un comportement non-linéaire et ductile sous chargement déviatoire. La partie réversible est très réduite, et la résistance au cisaillement est atteinte pour une déformation de cisaillement relativement élevée.

- Une phase de radoucissement possible au-delà de la résistance maximale, plus ou moins marqué en fonction du couple densité du matériau – contrainte de confinement.
- Un comportement ultime en grandes déformations représentant l'état critique.
- Un comportement volumique contractant ou dilatant en fonction de la densité du matériau et de l'état de contrainte.
- Un comportement volumique contractant significatif pour le matériau de faible densité, représentant des enrochements peu compactés ou non compactés, comme la plupart des CFRD construits au milieu du XX^e siècle en France.
- Un mécanisme isotrope produisant les déformations volumiques induites par la charge hydrostatique, qui pourrait simuler la rupture des enrochements dans les grands CFRD.

3 HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

Afin de mieux comprendre les mécanismes de dégradation observés sur les grands CFRD, la modélisation 3D avec le code FLAC 3D de la construction et de la mise en eau du barrage de Mohale (Afrique du Sud) est prise en exemple.

3.1 Géométrie de la vallée

La prise en compte de l'impact de la forme de la vallée justifie le modèle 3D qui contient 29 874 mailles (Figure 1). Le maillage a été réalisé par le projet de recherche ECHO. Le modèle est séparé en 7 groupes distinguant les matériaux utilisés sur la partie amont ou aval: 3B (amont) ; 3C ; 3C1 ; 3C2 (aval) ; masque ; fondation, dans l'ordre des phases de construction. Cette distinction permet à tout moment de changer les caractéristiques des matériaux ou les phases de construction.

3.2 Discontinuités cinématiques

Les discontinuités du mouvement entre le remblai et sa fondation et le remblai et le masque sont prises en compte par des joints aptes à glisser ou s'ouvrir en vue de les reproduire.

3.3 Historique de construction

L'histoire du barrage doit être ensuite soigneusement reproduite. La construction du barrage est réalisée en 69 phases : la montée du remblai en 41 phases et le bétonnage du masque en 28 phases. La mise en eau est faite en 28 étapes

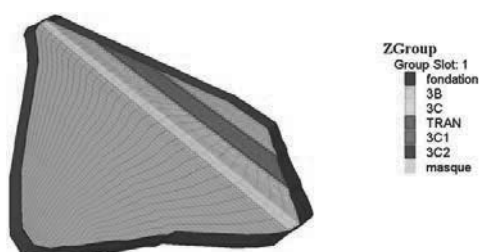


Figure 1. Géométrie du modèle présentant les différents groupes

3.4 Choix de la loi de comportement

Le comportement ductile des enrochements nécessite une loi de comportement adaptée. La loi L&K-Enroch est implantée dans le logiciel FLAC 3D.

3.5 Calage des paramètres

Peu de résultats expérimentaux (triaxiaux ou œdométriques) sont disponibles sur le matériau du barrage de Mohale pour identifier les paramètres de modèle. Le calage est fait en plusieurs étapes. Tout d'abord, il s'appuie sur le matériau « basalte de San Francisco (granulométrie No.2) » dont les propriétés sont voisines et accessibles. Les deux matériaux sont

similaires au niveau de la géologie, du poids volumique, de l'indice des vides et de la forme des grains. Mais la dimension du matériau 3C du barrage de Mohale ($d_{50} > 25$ mm) est plus grande que celle du Basalte San Francisco ($d_{60} = 19,8$ mm).

Suite à un premier calcul, les déplacements apparaissent largement sous-estimés par rapport aux valeurs mesurées. Un ajustement sur les résultats d'auscultation est inévitable. Il concerne deux paramètres (Figure 2) : le module de Young (E) et la pression de consolidation initiale (P_{co}). Une fois que la pression moyenne dépasse la pression critique qui a un sens de pression de rupture plus que de pression de consolidation, l'indice des vides diminue rapidement et le module œdométrique se trouve fortement diminué.

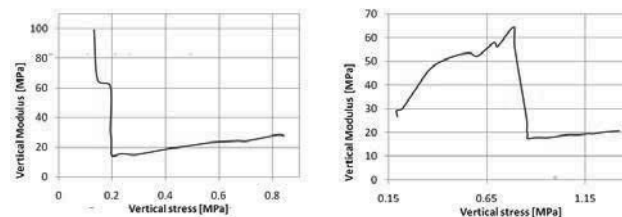


Figure 2. Module de déformation fonction de la contrainte verticale (à gauche : granulométrie serrée (3C) ; à droite : granulométrie étalée (3B), d'après Marulanda, 2009).

La pression critique est la pression isotrope en deçà de laquelle, la dilatance est visible et au delà de laquelle, il y a une forte hausse de la compressibilité par rupture des blocs. Elle est fixée au point de changement brutal du module vertical. Les valeurs ajustées pour le matériau amont (3B) et le matériau aval (3C) sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Paramètres ajustés pour le modèle L&K-Enroch

| Matériau | 3B | 3C |
|----------------------------------|------|------|
| Module d'Young E (MPa) | 35,2 | 22,5 |
| Pression critique P_{co} (MPa) | 0,8 | 0,2 |

4 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

4.1 Intérêt de la loi de comportement L&K-Enroch

La comparaison avec le modèle de Mohr-Coulomb, calé avec la méthode de Barton et Kjaernsli (1981) et les mesures expérimentales pour le module de Young (Chen, 2012), montre que si ce dernier reproduit les tassements mesurés in-situ en phase de construction de manière satisfaisante, en ignorant l'impact de la pression hydrostatique sur le comportement de l'enrochement, il n'arrive pas à simuler correctement le comportement de l'ouvrage en phase de mise en eau. Il tend à sous-estimer l'influence de la Zone 3C en aval sur le comportement global du barrage et ne permet pas de simuler le déplacement en travers de la vallée. Le modèle L&K-Enroch intègre une surface de charge isotrope prenant en compte l'influence de la pression hydrostatique sur le comportement de l'enrochement. La surface de charge isotrope du modèle L&K-Enroch s'exprime avec le premier invariant de contrainte I_1 par :

$$f^s(\underline{\sigma}; p_c) = \frac{I_1}{3} - p_c \quad (1)$$

où p_c est définie par l'équation 2.

$$p_c = p_{c0} \cdot e^{\beta \cdot \varepsilon_v^p} \quad (2)$$

Dans laquelle, p_c désigne la pression critique, ε_v^p la déformation volumique plastique, p_{c0} et β sont des paramètres du modèle. Ce mécanisme isotrope a un impact important sur

les résultats de la modélisation : il est indispensable pour modéliser correctement le comportement des grands CFRD. En phase de construction, les résultats obtenus par les deux modèles correspondent bien aux mesures in-situ (7,4% d'erreur). A la fin de la mise en eau, l'écart entre les mesures et le calcul des maxima du déplacement amont-aval et du tassement avec le modèle de Mohr-Coulomb est de 117,3% et 42,5% respectivement au lieu de 6,5% et 25,8% avec L&K-Enroch.

Sauf mention spéciale, les résultats présentés sont obtenus en utilisant le modèle L&K-Enroch.

4.2 *Interprétation concernant l'origine des fissures de traction par flexion des grands CFRD*

La construction du masque amont du barrage de Mohale est effectuée en deux phases, afin d'avoir une protection vis-à-vis des crues. En effet, la première phase du masque achevée, permet de disposer d'un batardeau incorporé au CFRD.

Selon les résultats de l'analyse, aucune séparation entre le masque et le remblai n'est constatée lors de la première phase de construction du masque. Ensuite, la construction du remblai se poursuit, d'abord par la zone aval du remblai (zone 3C). Une fois que l'altitude de la partie amont du remblai et celle aval atteignent le même niveau (El. 2040 m). La construction se finit couche par couche (amont et aval en même phase) jusqu'à la crête (El. 2078 m). Pendant ces phases de construction, les enrochements du corps du barrage continuent à se déformer à cause du poids des couches rajoutées. En revanche, le masque amont en béton ne se déforme que très peu (le module de Young du béton est 100 à 1000 fois plus rigide que celui de l'enrochement), de telle sorte qu'une séparation horizontale importante (environ 26 cm) entre le masque et le remblai à l'altitude 2040 m se produit juste avant la construction de la deuxième partie du masque (Figure 3). C'est l'endroit où l'on a observé une fissure horizontale. Cette séparation a été également détectée sur les bords du masque.

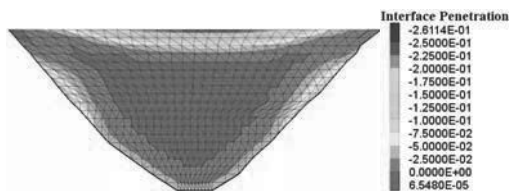


Figure 3. Séparation (<0) en m entre le masque et le remblai avant la deuxième phase de construction du masque

Pour valider l'hypothèse que le passage de la construction est bien à l'origine de la fissuration, la construction intégrale du masque une fois achevée, la totalité de la construction du remblai a été modélisée. Aucune séparation significative n'y est constatée. Si le fluage des enrochements est négligé, le tassement des enrochements n'a alors aucune influence sur la déformation du masque et son possible détachement (Figure 4).

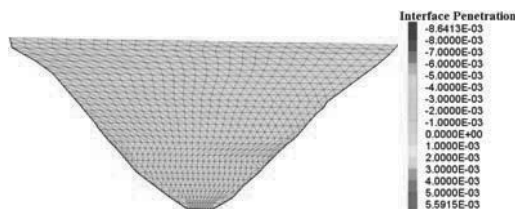


Figure 4. Séparation (<0) en m entre le masque et le remblai à la fin de la construction (Le masque construit après achèvement du remblai)

Une fois que le vide existe entre le masque et le remblai, le masque travaille en porte-à-faux, ce qui peut induire l'apparition de fissures horizontales dues au poids propre du masque et de la pression d'eau.

4.3 *Interprétation concernant l'origine des fissures de compression des grands CFRD*

Une fissure de compression a été souvent détectée au centre du masque lors de la phase de mise en eau. Ces fissures, qui ont ici une direction verticale, ont été observées dans plusieurs grands barrages tels que Tianshengqiao-I (Chine), Campos Novos (Brésil), Barra Grande (Brésil) ou Mohale (Lesotho).

D'après les simulations présentées, une forte contrainte de compression d'environ 22 MPa au centre du masque est constatée lors de la phase de mise en eau finale (Figure 5). L'orientation de la contrainte principale en compression est horizontale. Cette forte compression peut dépasser la limite de la résistance à la compression du béton (20-25 MPa) et produire cette fissure verticale constatée au centre du masque.

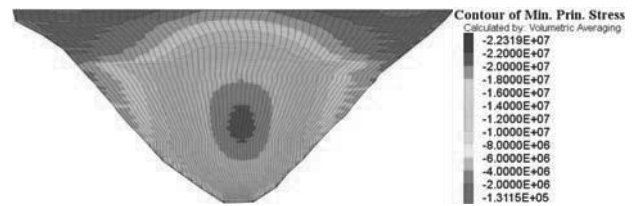


Figure 5. Champs de la contrainte principale majeure en Pa dans le masque en dernière phase de mise en eau

Le déplacement des enrochements vers le centre de la vallée accentué par la mise en eau entraîne le masque et provoque une zone de compression et une zone de traction au sein du masque. Le déplacement maximal simulé de la rive gauche vers la rive droite est d'environ 5,8 cm et le déplacement maximal simulé de la rive droite vers la rive gauche est d'environ 6,0 cm (Figure 6). Le déplacement des enrochements vers le centre de la vallée induit une sollicitation tangentielle sur le masque par frottement. Il produit donc l'augmentation de contraintes de compression dans la partie centrale du masque et des contraintes de traction proches des rives.

Sous l'effet de ces contraintes de compression et de la gravité et du bourrelet du remblai qui apparaît au pied du masque, des fissures de flexion inclinées en pied de masque peuvent s'ajouter aux fissures de compression.

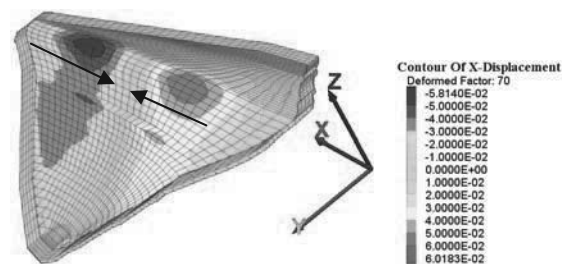


Figure 6. Déplacements longitudinaux (X) en m à fin de mise en eau

On peut aussi se poser la question de l'influence des joints verticaux du masque. En effet, l'épaisseur du masque diminue au niveau des joints, ce qui pourrait provoquer une concentration de contraintes à ces endroits là. Dans le cas de Tianshengqiao-1, l'épaisseur du masque est diminuée de 13 cm au niveau des joints verticaux (Cao et al., 2008).

4.4 *Interprétation concernant l'origine des fissures de traction pure des grands CFRD*

Le béton a une résistance à la traction de l'ordre de 2 MPa. En phase de construction, les simulations numériques révèlent l'existence de contraintes de traction d'environ 6 MPa dans le masque et le long des rives (Figure 7). Ces tractions sont générées par les déplacements des enrochements vers le centre de la vallée. Afin de résister à ces efforts de traction, une à deux rangées d'aciers sont mises dans le masque. Tandis qu'un joint le long de la plinthe relâche les tractions au contact des rives.

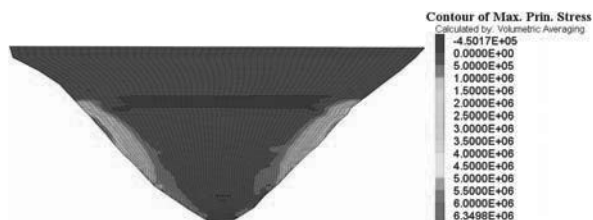


Figure 7. Traction (>0) aux bords du masque en fin de construction

A la fin de la mise en eau, on observe l'existence d'une bande horizontale à la cote El. 2040 m dans laquelle se développent des contraintes de traction verticales (Figure 8). D'autres contraintes de traction désolidarisent les bords du masque des rives.

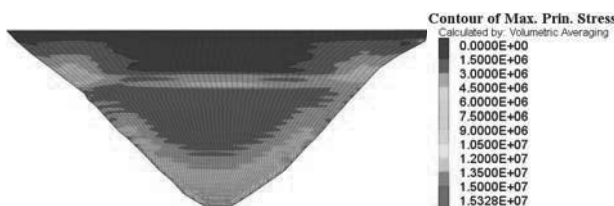


Figure 8. Contraintes de traction (>0) en Pa sur la partie supérieure et les bords (rives) du masque amont à la fin de la mise en eau

Ces tractions peuvent générer des fissures horizontales du masque, identiques à celles de Aguamilpa, Mohale

4.5 Interprétation concernant la qualité des enrochements de la zone 3C des grands CFRD

Afin de vérifier l'impact de la déformabilité des enrochements aval sur le comportement global du barrage, trois simulations avec des modules différents de la zone 3C (aval) ont été réalisées. Les valeurs des modules de la zone 3C sont : 25 MPa, 50 MPa et 100 MPa. En revanche, le module de Young dans la zone 3B est constant et égal à 100 MPa. La comparaison entre les trois calculs est présentée ci-dessous.

Le détachement horizontal entre le masque et le remblai diminue lorsque le module en Zone 3C augmente. Si le barrage est construit avec un matériau de module identique en amont (3B) et en aval (3C), le détachement du masque sera moins fort. Le détachement augmente de 166% en moyenne, lorsqu'on utilise un matériau avec un module de 25 MPa au lieu de 100 MPa dans la zone de 3C. On peut aussi constater que la différence de l'ampleur du détachement entre les matériaux de 100 MPa et de 50 MPa est faible. On peut donc accepter que les matériaux utilisés entre la zone de 3B et la zone de 3C aient des modules différents, à condition de borner ce contraste. Selon l'analyse paramétrique précédente, un rapport maximum de 2 pourrait être toléré.

En phase de mise en eau, la traction au centre du masque augmente lorsque le module de déformation dans la zone 3C diminue. Ceci montre également l'effet positif d'un module fort dans la zone 3C sur le comportement du masque amont. En revanche, l'impact de la déformabilité de la Zone 3C sur la compression détectée au centre du masque est très faible d'après les résultats de notre simulation.

5 CONCLUSION

Les modélisations numériques présentées dans ce travail constituent une contribution à l'analyse du comportement mécanique des grands CFRD. Elles tentent d'expliquer les pathologies observées sur les grands CFRD, notamment la fissuration détectée sur le masque amont en béton.

D'après les résultats des simulations effectuées, les contraintes de compression générées en phase de mise en eau expliquent clairement la fissure verticale observée sur le masque amont. Pour y remédier, nous conseillons d'ajouter des joints verticaux de compression au centre du masque, qui dissiperont

la compression concentrée et de renforcer les armatures dans le masque.

Les fissures horizontales observées, soit en phase de construction, soit en phase de mise en eau, proviennent de la compressibilité excessive des enrochements en 3B et 3C après la construction du masque. D'un point de vue mécanique, deux types de fissures horizontales sont à distinguer : la fissure de traction par flexion (due à une sollicitation de flexion engendrant de la traction en fibre tendue du masque) et la fissure de traction directe.

Les fissures de traction par flexion sont principalement causées par le détachement du masque de son support. Une fois que le masque perd son support, il travaille comme un système en porte-à-faux. Les fissures horizontales sont ensuite générées par le poids du masque ou la charge hydraulique. Les simulations montrent que le phasage de construction joue un rôle essentiel dans l'apparition de ce type de fissure. Si les conditions le permettent, il faudrait commencer la construction du masque après celle du remblai afin d'éviter l'impact des déformations différées des enrochements sur le masque amont. Selon les simulations numériques, l'impact de la déformabilité de la Zone 3C est significatif sur le comportement du masque. Cet impact est d'autant plus important que le barrage est haut. On conseille d'utiliser en Zone 3B et Zone 3C des matériaux dont les modules de déformation ne soient pas très différents.

Pour éviter les fissures de traction directe, on conseille d'utiliser un écran anti-adhérence pour éviter que les contraintes se transmettent de la bordure profilée au masque (Chen, 2012), de diminuer la déformabilité de la Zone 3C et d'ajouter un joint horizontal sur la partie supérieure du barrage (vers 1/3 de la hauteur du barrage).

6 RÉFÉRENCES

- Cao K., Wang Y., Xu Y. and Liu S. 2008. Concrete Face Rockfill Dam, China Water Power Press
- Chen Y., Fry J.J., Laigle F., Vincens E., and Froio F. 2012. Numerical Analysis of High CFRD Using an Elastoplastic Constitutive Model. *International symposium on dams for a changing world, ICOLD 2012* Kyoto, Japon.
- Barton N. and Kjaernsli B. 1981. Shear Strength of Rockfill, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.*
- Laigle F. 2004. Modèle Conceptuel pour le Développement de Lois de Comportement adaptées à la Conception des Ouvrages Souterrains. Thèse de Doctorat, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), Ecole Centrale de Lyon.
- Macedo-Gomez G., Castro-Abonce J. and Montanez-Cartaxo L. 2000. Behaviour of Aguamilpa Dam, *CFRD 2000*, Beijing.
- Marsal R-J. 1967. Mechanical properties of rockfill, *Embankment Dam Engineering, Casagrande Volume.*
- Marulanda C. and Anthiniac P. 2009. Analysis of a concrete face rockfill dam including concrete face loading and deformation. *10th Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, Paris, France
- Silvestre A. 2007. Modélisation numérique du comportement des ouvrages souterrains par une approche viscoplastique. Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine.
- Silvestre A. 2010. Projet ACABECE : Description de la loi de comportement retenue pour la modélisation rhéologique des enrochements.