MODELISATION DE LA CONSTRUCTION ET DE LA MISE EN EAU DU BARRAGE EN ENROCHEMENT A NOYAU BITUMINEUX DE LA ROMAINE 2 (QUEBEC, CANADA)

Numerical modelling of construction and impoundment of the Asphaltic Core Rockfill Dam of Romaine-2 (Québec, Canada)

Roland PLASSART, François LAIGLE

EDF Hydro – CIH, Savoie Technolac, 73290 La Motte-Servolex (France) roland.plassart@edf.fr ; francois.laigle@edf.fr

Hugo LONGTIN, Eric PELOQUIN

Hydro-Québec, Montréal (Canada) longtin.hugo2@hydro.qc.ca; peloquin.eric@hydro.qc.ca

MOTS CLEFS

Enrochements, Tassements, Cisaillement, Porosité, Compactage.

KEY WORDS

Rockfill, Settlements, Shearing, Porosity, Compaction.

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'une collaboration technique multi-métiers visant à partager leurs pratiques, leurs méthodes et leurs expériences, EDF Hydro (CIH) et Hydro-Québec ont proposé d'échanger sur leurs connaissances du comportement des barrages en enrochements. Le sujet d'étude s'est concentré en particulier sur le cas des barrages en enrochements à noyau en béton bitumineux (Asphaltic Core Rockfill Dam, ou ACRD), en s'appuyant sur l'opportunité offerte par la réalisation récente du barrage de La Romaine 2, nouvel ACRD de grande taille dans le parc d'Hydro-Québec. L'expérience d'EDF sur ce type d'ouvrage se limite jusqu'ici au barrage à noyau bitumineux de Lastioulles (France) aux caractéristiques assez différentes, mais son expérience plus large sur les barrages en enrochements, notamment à masque amont (CFRD), a permis de réaliser une modélisation numérique du barrage de La Romaine 2, adaptée de la démarche spécifique établie par EDF et utilisant le modèle rhéologique L&K-Enroch. Cette démarche « en aveugle » a été confrontée aux mesures d'auscultation réalisées depuis le début de la construction du barrage (2010) jusqu'à son achèvement (2013) puis jusqu'à la fin de la mise en eau de la retenue (2015). Au final, grâce à une meilleure prise en compte des phénomènes physiques à l'œuvre dans ce type d'ouvrage (comportement volumique notamment) et une démarche spécifique de caractérisation des matériaux en place au moyen d'essais de laboratoire, le modèle L&K-Enroch a montré sa capacité à assurer une bonne représentation et une meilleure prédiction du comportement que d'autres modèles traditionnellement utilisés pour ce type d'étude.

ABSTRACT

Within a partnership in multiple scientific domains, EDF Hydro (CIH) and Hydro-Québec Production have shared their knowhow on the behaviour of rockfill dams. One of the topics focuses on Asphaltic Core Rockfill Dams (ACRDs), pursuant to the recent construction of the La Romaine-2 dam, a new large ACRD within the Hydro-Québec power grid. Until now, EDF experience with this type of embankment has been limited to the Lastioulles dam (France), a smaller asphalt core dam with quite different characteristics. Nevertheless, EDF is experienced in modelling of numerous Concrete Faced Rockfill Dams (CFRDs) and therein adopted a specific analysis process using a rheologic constitutive model for rockfill called L&K-Enroch. This process has been adapted to the Romaine-2 dam, using laboratory tests results, and then compared to monitored data recorded during the construction phase (2010-2013) and after reservoir filling (2015). At the end, with respect to specific internal mechanisms (in particular the volumetric behaviour) and a thorough characterization of the in situ rockfill properties provided by laboratory tests, the L&K-Enroch model shows good agreement with real construction and impoundment behaviors and validates the global process of the analysis.

1. INTRODUCTION

1.1.Contexte

Dans le cadre d'une collaboration sur plusieurs sujets techniques, EDF Hydro (CIH) et Hydro-Québec Production ont partagé leurs connaissances et leurs expériences sur le comportement des barrages en enrochements. Le sujet d'étude s'est concentré en particulier sur le cas des barrages en enrochements à noyau en béton bitumineux (Asphaltic Core Rockfill Dam, ou ACRD), en s'appuyant sur l'opportunité offerte par la réalisation récente du barrage de La Romaine 2, nouvel ACRD de grande taille dans le parc d'Hydro-Québec [1].

L'expérience d'EDF sur ce type d'ouvrage se limite jusqu'ici au barrage à noyau bitumineux de Lastioulles (France), ouvrage de plus petite taille et aux caractéristiques assez différentes. Néanmoins, EDF dispose d'une solide expertise dans la modélisation des barrages en enrochements, principalement à masque amont (Concrete Face Rockfill Dam, ou CFRD), en utilisant une démarche d'analyse spécifique et un modèle de comportement spécialement développé en interne et appelé *L&K-Enroch* [2][3][4].

Après avoir décrit le modèle de comportement et la procédure de calage des paramètres à partir des essais de laboratoire et des essais sur site, l'article propose une application de la méthode à la modélisation numérique de la construction et de la mise en eau du barrage de la Romaine 2. Les résultats sont ensuite interprétés et comparés aux enregistrements réalisés sur place [5][6][7].

1.2. Aperçu du barrage de la Romaine 2

Le complexe hydroélectrique d'Hydro-Québec dont fait partie le barrage de la Romaine 2 est localisé sur la côte nord du fleuve St-Laurent, sur la rivière de la Romaine, dans le nord-est du Québec. L'aménagement final qui doit s'achever en 2021 avec la mise en eau du barrage de la Romaine 4 prévoit une puissance installée totale de 1500 MW.

Le site de la Romaine 2 comprend un barrage principal de 110 m de haut et 6 digues de fermeture au design similaire et atteignant pour certaines 80 m de haut. La capacité installée est de 645 MW, équipée de deux turbines Francis. Le choix d'un dispositif d'étanchéité par noyau bitumineux a été dicté par l'absence à proximité du site de matériaux imperméables classiques.

La construction du barrage principal a commencé en 2010 et s'est achevée en 2013. Le réservoir a été rempli en un an entre 2014 et 2015.



Figure 1 : localisation du barrage de la Romaine 2 au Québec (gauche) et sur le cours de la rivière la Romaine (droite)

Pour conserver toutes les propriétés d'étanchéité du noyau bitumineux, les recharges d'enrochement se doivent d'éviter les mouvements excessifs, ce qui nécessite un contrôle drastique de la densité du matériau mis en place, que ce soit en conditions sèches ou saturées [6][8]. Le noyau bitumineux est encadré de part et d'autre par des pierres concassées avec un diamètre maximum des particules de 80 mm (zone 3M). La zone de transition mêle des pierres concassées et des enrochements filtrés présentant un diamètre maximum de 200 mm (zone 3N). Les recharges amont et aval sont divisés en deux zones, internes et externes, présentant respectivement un diamètre maximum de blocs de 600 mm (zone 3O) et de 1200 mm (zone 3P).



Figure 2 : coupe du barrage de la Romaine 2 (adapté de [6])

2. COMPORTEMENT DES ENROCHEMENTS ET MODELE RHEOLOGIQUE

Ce paragraphe propose un résumé des spécificités du comportement des enrochements et une description succincte du modèle constitutif développé par EDF pour ces matériaux.

2.1.Spécificités du comportement des enrochements

Malgré des différences potentiellement marquées selon la taille et l'agencement des particules, des comportements spécifiques aux enrochements peuvent être identifiés et doivent être pris en compte dans les modèles. Ces spécificités sont principalement :

- Un comportement fortement non linéaire et très ductile, c'est-à-dire présentant des grandes déformations avant d'atteindre le pic de contraintes (pouvant être de l'ordre de 10%) ;
- Une résistance au cisaillement fortement dépendante de l'état de contrainte, et donc de la hauteur du barrage ;
- Une grande déformabilité volumique, particulièrement en compression, en lien avec la porosité du matériau ;
- Une possible déformation volumique sous chargement isotrope, en particulier pour les grands barrages.



Figure 3 : essais de compression triaxiale sur du basalte de San Francisco (adapté de [9])

2.2. Modèle rhéologique

Le modèle de comportement développé par EDF a pour ambition de reproduire les spécificités de comportement des enrochements décrites ci-dessus. Ce modèle, appelée *L&K-Enroch*, a été historiquement développé pour répondre à des problématiques de justification de vieux barrages en enrochement à masque amont du parc EDF présentant des fruits élevés et des densités relativement faibles (faible compaction).

Le modèle *L&K-Enroch* est une version dérivée du modèle *L&K* [10], développé pour modéliser le comportement déviatoire et volumique des roches à court et long terme. A ce titre, les enrochements sont considérés dans le modèle, à grande échelle et par homogénéisation, comme analogues à une masse rocheuse sans cohésion.

D'un point de vue rhéologique, *L&K-Enroch* est un modèle élastoplastique intégrant les concepts d'irréversibilité et de grandes déformations sous sollicitations déviatoires et isotropes.

2.2.1. Mécanisme plastique

Le mécanisme plastique est une variation du modèle classique de *Hoek&Brown* (*H&B*). La forme des différents seuils est décrite dans le repère des contraintes principales et pilotée par les paramètres usuels de *H&B* : a, m et s. Considérant les enrochements comme un matériau dépourvu de cohésion, le paramètre « s » est défini égal à zéro.

Comme le montre le comportement global des enrochements, le modèle est également fortement dépendant des variations de volume lors d'une sollicitation. Ces variations sont pilotées par la position du point de chargement par rapport au seuil caractéristique, aussi appelé seuil de dilatance, et au seuil résiduel, respectivement défini par l'angle de dilatance caractéristique (ψ_0) et l'angle de frottement résiduel (ϕ_{res}).

La figure 4 présente les différents seuils du modèle dans le plan des contraintes principales mineures et majeures, et propose une illustration théorique d'un essai triaxial, où le chemin de contraintes suivi est mis en correspondance avec la réponse en déviateur et en déformation volumique en fonction de la déformation axiale. Cet exercice met en évidence la possibilité de caler les seuils en fonction des essais classiques de laboratoire.



Figure 4 : seuils du modèle L&K-Enroch et illustration théorique de la réponse et du chemin de contrainte suivi lors d'un essai triaxial

2.2.2. Mécanisme isotrope

A une pression de confinement donnée, des déformations volumiques apparaissent malgré l'absence de déviateur. Ce comportement isotrope est introduit dans le modèle via une surface « cap », formant une droite verticale dans le plan des contraintes principales mineures et majeures (figure 4). Au-delà d'une pression de consolidation donnée (p_{c0}), la pression de consolidation isotrope additionnelle est pilotée par la déformation volumique plastique ε_v^p et le paramètre β , selon l'équation (1).

$$p_c = p_{c0} e^{\beta \varepsilon_v^{p}} \tag{1}$$

3. METHODE APPLIQUEE A LA MODELISATION NUMERIQUE DU BARRAGE DE LA ROMAINE 2

La méthode d'analyse spécifique suivie pour modéliser le barrage de la Romaine 2 avec le modèle *L&K-Enroch* passe d'abord par l'établissement du modèle géométrique et géotechnique. Elle nécessite ensuite la détermination des paramètres rhéologiques des différentes classes d'enrochements. Et il faut enfin simuler les scénarios de chargement représentant la construction du barrage et la mise en eau du réservoir.

3.1. Modèle géométrique et géotechnique

La modélisation numérique du barrage est réalisée avec le logiciel aux différences finies FLAC 8.0 [11]. Le modèle géométrique est basé sur la coupe 2D amont-aval du barrage (figure 2), avec comme simplification majeure de considérer la fondation et les batardeaux avec un modèle élastique. Le noyau bitumineux est modélisé avec un modèle élastoplastique radoucissant (*strain-softening*) calé sur des essais triaxiaux. Les enrochements sont divisés en quatre zones présentant des propriétés différentes liées à leur courbe granulométrique, comme mentionné au paragraphe 1.2.

3.2. Identification des propriétés des enrochements

Par souci de clarté, ce paragraphe se concentre sur le calage d'une seule des zones d'enrochement parmi les quatre, à savoir la zone 3P, la recharge externe du barrage. Les autres zones ont été traitées selon la même démarche.

Pendant la phase de dimensionnement, les matériaux d'enrochement ont été étudiés à travers une campagne d'essais de laboratoire (triaxiaux et œdomètres) réalisés sur des échantillons à taille réduite et à densité contrôlée [1]. De plus, pour

estimer l'impact de la saturation sur le comportement des matériaux dans la recharge amont lors du remplissage de la retenue, les essais ont été réalisés à la fois en conditions sèches et saturées.

Concernant l'effet d'échelle, pour les matériaux de la zone 3P, la dimension maximale des particules a été réduite de 1200 mm à 28 mm. Des travaux d'évaluation de l'impact de l'effet d'échelle sur le calage des paramètres des modèles d'enrochement [12][13] ont montré que cet effet d'échelle joue essentiellement sur le module et la résistance au cisaillement, dans le sens où plus les particules sont grandes, plus le module et la résistance sont petits. Les essais de laboratoire tendent donc à surestimer la résistance du matériau en grand et à limiter sa déformation.

En revanche, d'un autre côté, un écart significatif a été relevé entre la porosité des échantillons testés en phase d'étude (en moyenne de l'ordre de 33% pour un échantillon sec) et la porosité réelle mesurée en place [6] en déduction d'essais de compaction de contrôle (de l'ordre de 24%). Une porosité plus élevée des échantillons de laboratoire tend cette fois à sousestimer la résistance du matériau en grand et à amplifier sa déformation.

Ces deux écarts entre essais de laboratoire et matériau en place ont donc des effets antagonistes, mais avec un effet qui semble toutefois plus marqué pour la porosité. Il a donc été décidé à ce stade de ne pas tenir compte de l'effet d'échelle et de prendre en compte la différence de porosité en relevant le module d'Young selon une démarche interne utilisant des abaques dépendant de la porosité (exemple d'une modification de 300 à 600 MPa pour le matériau 3P en conditions sèches), et de modifier les déformations volumiques des courbes œdométriques issues des essais de laboratoires pour servir de support au calage de la composante isotrope du modèle.

Comme autres paramètres à fixer en amont du calage sur essais, il y a également l'angle de dilatance initial et l'angle de frottement résiduel. Les incertitudes de mesure sur échantillons sont fortes (plus de 10°), ce qui incite à une détermination plus théorique à partir de la formule (2) proposée par Barton [14] pour évaluer un angle de frottement apparent (ϕ '). A pression de confinement σ_n et angle de frottement de base ϕ_b donnés, les paramètres de rugosité R et de résistance équivalente S sont évalués grâce à des abaques qui dépendent également de la taille des particules moyennes, de la nature géologique des blocs et de la porosité.

$$\varphi' = R \cdot \log\left(\frac{S}{\sigma_n}\right) + \varphi_b \tag{2}$$

Tous les paramètres physiques étant fixés, les paramètres de seuils restants et les paramètres d'écrouissage sont fixés pour caler au mieux les courbes issues des essais triaxiaux (déviateur et déformation volumique), comme illustré en figure 5 (courbes en pointillés rassemblant les essais en conditions sèches et saturées). De leur côté, les paramètres du mécanisme isotrope sont calés sur les courbes des essais œdométriques. Les calages sont réalisés à la fois en conditions sèches et saturées.



Figure 5 : calage du modèle L&K-Enroch sur essais triaxiaux pour le matériau 3P, en conditions sèches et saturées et à différents confinements : contraintes déviatoires (gauche) et déformations volumiques (droite)

3.3. Scenarios de chargement

La simulation de la construction du barrage se fait couche par couche, avec une épaisseur de 2 m pour chaque couche. De la même façon, le remplissage du réservoir est simulé par un incrément de chargement hydrostatique traduisant une montée de l'eau par pas de 2 m. La modélisation ne prenant pas en compte l'écoulement (modèle *no flow*), le chargement hydrostatique est intégré dans le modèle par deux composantes (figure 6) :

- Considérant la forte porosité de la recharge amont, la pression d'eau est supposée égale dans chaque niveau hydrostatique. Pour chaque nœud du modèle situé sous le niveau d'eau, la pression hydrostatique et les paramètres saturés sont appliqués simultanément. Les paramètres demeurent secs au-dessus du niveau d'eau.
- En plus de la pression de pore, la poussée hydrostatique est appliquée mécaniquement sur la surface de la recharge amont située sous le niveau d'eau.



Figure 6 : conditions de chargement hydraulique pendant la mise en eau : théorie (gauche) et modèle (droite)

4. ANALYSE DES RESULTATS

4.1.Phase de construction du barrage

Une fois les paramètres des matériaux et les conditions initiales et aux limites appliquées, la phase de construction du barrage est simulée. Les déplacements ont été remis à zéro après la mise en place et la stabilisation de la fondation et des batardeaux pour observer les seuls effets de la construction du corps du barrage.

La figure 7 présente les tassements calculés à la fin de la construction. Si la répartition des tassements est assez classique et conforme aux modèles prédictifs précédents [5], les valeurs maximales d'environ 25 cm dans le cœur du barrage sont en revanche plus faibles d'un facteur deux.



Figure 7 : tassements calculés en fin de construction du barrage de la Romaine 2

Ce résultat peut également être comparé aux auscultations disponibles dans la littérature [7], consistant en des inclinomètres positionnés de part et d'autre du noyau sur toute la hauteur de l'ouvrage (figure 8).



Figure 8 : comparaison des tassements calculés et mesurés dans deux inclinomètres verticaux

C1.03 - Modélisation de la construction et de la mise en eau du barrage en enrochement à noyau bitumineux de la Romaine 2 (Québec, Canada) page 6

L'inclinomètre INV-01 a été mis en place dans la zone de transition 3N côté amont de la recharge, tandis que l'inclinomètre INV-03 mesure les tassements dans la recharge interne à l'aval du noyau (zone 3O). Les deux profils de tassements sont comparés aux résultats des calculs en figure 8. Les données cumulent les tassements mesurés entre avril 2012 et novembre 2013. Si une sous-estimation des tassements maximaux est observable dans la zone de transition côté amont, les calculs concordent plutôt bien avec les auscultations, ce qui est d'autant plus notable que la procédure de calage du modèle ne se base que sur des essais de laboratoire et des mesures de densité en place.

4.2.Phase de remplissage du réservoir

Le remplissage du réservoir est simulé après remise à zéro des déplacements dus à la construction. Les tassements dus à la mise en eau sont présentés en figure 9. L'effet combiné de la poussée hydrostatique et de la saturation du matériau génère un tassement relatif important de la recharge amont. Les valeurs maximales calculées pour le tassement sont de l'ordre de 25 cm, très proches des données d'auscultation. Ces dernières n'ayant pas encore été publiées, la superposition des résultats de calculs et des valeurs auscultées suite à la mise en eau ne peut être présentée dans cet article sur le modèle de la figure 8, mais pourra faire l'objet d'une publication ultérieure.



Figure 9 : tassements calculés après remplissage du barrage de la Romaine 2

Concernant une particularité du modèle *L&K-Enroch*, la figure 10 permet de vérifier l'activation effective du mécanisme isotrope dans une large zone des enrochements en fin de mise en eau, justifiant l'utilisation d'un modèle de ce type pour une bonne évaluation du comportement global du barrage, en particulier du fait de sa hauteur importante générant des contraintes de confinement relativement élevées.



5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La modélisation numérique de la construction et de la mise en eau du barrage en enrochements à noyau bitumineux de la Romaine 2 a montré des résultats satisfaisants qui valident la méthode globale d'analyse pour ce type d'ouvrage. Malgré un calage des paramètres du modèle « en aveugle », combinant l'utilisation pertinente des essais de laboratoire et des essais en place, les tassements calculés sont globalement du même ordre de grandeur que les tassements issus de l'auscultation.

La procédure de calage a néanmoins dû tenir compte des différences d'uniformité et de porosité entre les échantillons de laboratoire et la réalité du matériau en place. Au-delà de l'effet d'échelle, une partie de l'écart peut en effet s'expliquer par une sous-estimation de la densité des enrochements liée à une meilleure compaction en place. Les tassements sont ainsi inférieurs à ceux prévus par les modèles prédictifs, uniquement basés sur les essais de laboratoire lors de la phase d'étude du projet [5], mais également aussi par rapport aux planches d'essais [6][8][15].

La bonne compaction constatée sur site, meilleure même que dans les préconisations de conception, a également un effet important sur la réduction du tassement des enrochements lors du passage en conditions saturées au moment de la première mise en eau de la recharge amont. Ce constat est encore à préciser en se comparant aux auscultations réalisées lors du remplissage du réservoir (publication en cours).

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Longtin, H., Péloquin, E., Verret, D., Beauséjour, N., Hammamji, Y. & Rattue, A. 2012. Romaine-2 hydroelectric project: design of the first large asphaltic core rockfill dam in North America. CDA 2012 Annual Conference, Saskatoon.
- [2] Fry, J.-J., Laigle, F. & Frossard, E. 2006. Nouvelles approches d'analyse des barrages en enrochement. 22^{ème} Congrès ICOLD-CIGB, Barcelone.
- [3] Silvestre, A. 2010. Development of a Constitutive Model for Rockfill Application for CFRD Stability. Hydro 2010, Lisbonne.
- [4] Chen, Y. 2012. Modélisation du comportement mécanique des grands CFRD Identification des caractéristiques des enrochements et comportement du masque d'étanchéité amont. Thèse de Doctorat. ECL, Lyon.
- [5] Longtin, H., Verret, D., James, M, Grenier, S., Noel, J-F. & Hammamji, Y 2013. Romaine-2 hydroelectric project: numerical stress-deformation analyses of the dam and dikes. CDA 2013 Annual Conference, Montréal.
- [6] Vannobel, P., Smith, M., Lefebvre G., Karray, M., & Ethier, Y. 2013. Control of rockfill placement for the Romaine-2 asphaltic core dam in northern Québec. CDA 2013 Annual Conference, Montréal.
- [7] Smith, M. 2015. Rockfill settlement measurement and modelling of the Romaine-2 dam during construction, CIGB-ICOLD 2015 Annual Conference, Stavanger.
- [8] Verret, D., Grenier, S., Longtin, H. & Kara, R. 2013. Romaine-2 hydroelectric project: Large scale test fills for ACRD dam and dikes design. CDA 2013 Annual Conference, Montréal.
- [9] Marsal, R. J. 1973. Mechanical Properties of Rockfill, Embankment-Dam Engineering. In J. Willey & Sons (eds), Casagrande Vol.: 109-200.
- [10] Kleine, A. 2007. Modélisation numérique du comportement des ouvrages souterrains par une approche viscoplastique. Thèse de Doctorat. INP Lorraine, Nancy.
- [11] Itasca Consulting Group, Inc. 2015. FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 8.0. Minneapolis.
- [12] Chen, Y., Fry, J.-J., Laigle, F., Vincens, E. & Froiio, F. 2012. Numerical Analysis of High CFRD Using an Elastoplastic Consitutive Model. 24th ICOLD-CIGB Congress, Kyoto.
- [13] Frossard, E., Hu, W., Dano, C., & Hicher, P.-Y. 2012. Rockfill shear strength evaluation: a rational method based on size effect. Géotechnique 62(5): 415-427.
- [14] Barton, N. & Kjaernsli, B. 1981. Shear Strength of Rockfill. Journal of the Geotechnical Engineering Division 107(7): 873-891.
- [15] Grenier, S., Verret, D., Longtin, H., Mathieu, B. & Hammamji, Y 2013. Romaine-2 hydroelectric project: use of falling weight deflectometer and plate load tests on large-scale rockfills. CDA 2013 Annual Conference, Montréal.