Comportement pseudo-statique des barrages en enrochement avec perré : modélisation par une approche mixte DEM-FEM

Pseudo static behaviour of rockfill dams with a dry stone pitching by a mixed DEM-FEM approach

Ali HAIDAR [1,2], Eric VINCENS [2,3], Fabian DEDECKER [1], Roland PLASSART [4]
[1] *ITASCA Consultants, SAS, Lyon, France*
[2] *LTDS, Ecole Centrale de Lyon, Université de Lyon, CNRS: UMR5513*
[3] *Fédération française des professionnels de la pierre sèche (FFPPS)*
[4] *EDF Hydro – Centre d'Ingénierie Hydraulique, La Motte-Servolex, France*

RÉSUMÉ – Un modèle numérique est proposé pour étudier le comportement pseudo-statique des barrages en enrochement avec perré. Une approche mixte, discrète pour le perré et continue pour le corps du barrage, a été développée. Une validation du modèle numérique est proposée sur la base d'essais expérimentaux, puis une analyse montre le rôle joué par le perré dans la tenue de ces barrages, notamment aux séismes.

ABSTRACT – A numerical model is proposed to study the pseudo-static behavior of rockfill dams with a dry-stone pitching. A mixed approach, discrete for the pitching and continuous for the dam body was used. A validation of the numerical model is proposed based on experimental tests before other analyses related to the role played by the dry-stone pitching in the resistance of such dams to earthquakes among others.

1. Introduction

Il existe dans le monde un vaste patrimoine d'ouvrages de génie civil construits selon la technique de la pierre sèche. Cette technique de construction millénaire consiste à assembler des moellons selon un schéma défini, sans mortier. S'il existe un vaste patrimoine de murs en pierre sèche pour la retenue des pentes, il existe aussi des barrages construits avec cette technique. Par exemple, en France, entre 1940 et 1960, 13 barrages en enrochement avec perré ont été construits. La plupart d'entre eux sont encore exploités par Électricité de France (EDF).

Une campagne expérimentale (dénommée ici campagne PEDRA) a été financée par EDF, impliquant des modèles physiques à échelle réduite de barrages en enrochement avec perré. Ces essais avaient pour but de mieux comprendre le comportement de ces structures face aux séismes et de créer une base de données pour des études numériques ultérieures.

Grâce à l'expérience acquise lors de simulations numériques menées sur des structures de retenue en pierres sèches (Deluzarche et al., 2004 ; Chen et al., 2012 ; Oetomo et al., 2014 ; Savalle et al., 2020), une approche mixte 3D DEM-FEM est proposée pour mieux comprendre la résistance sismique des barrages en enrochement avec perré. Plus précisément, une validation d'une telle approche pour ces structures est fournie sur la base de la campagne PEDRA avant de modéliser des barrages réels. Les logiciels ITASCA ont été utilisés pour répondre à cet objectif : *PFC3D* pour le tangage en pierre sèche et *FLAC3D* pour le corps du barrage. Un autre objectif est d'étudier et de comparer les facteurs de sécurité définissant la stabilité des barrages étudiés et d'analyser le rôle joué par le perré dans la résistance de ces structures.

2. Campagne expérimentale PEDRA

2.1. Objectif

Le comportement mécanique des barrages à forte pente avec un perré en pierres sèches sur les deux faces n'est à ce jour pas totalement compris malgré les diverses tentatives numériques pour modéliser ces barrages. En l'absence d'une base de données pour leur validation, ces approches numériques ont soulevé la question de leur validité. En 2014, EDF a dans ce cadre co-financé avec le ministère de l'écologie (France), des expériences à échelle réduite (projet PEDRA), consacrées à une meilleure compréhension du comportement mécanique des "Structures en maçonnerie de pierre sèches ou faiblement collées". L'objectif sous-jacent était de mieux quantifier la contribution du perré sur la résistance du barrage au séisme par des essais pseudo-statiques.

2.2. Étude de cas et résultats

Les modèles physiques sont des modèles réduits à l'échelle 1/10 dont les dimensions sont inspirées de celles du barrage de Portillon (Pyrénées, France). Ils mesurent 2 m de hauteur, 4,2 m de longueur et 2,25 m de largeur avec une pente de 45° sur les deux faces (Fig. 1). Ils ont été construits à l'intérieur d'une benne d'un camion-grue, par des maçons qualifiés en pierre sèche. Des expériences pseudo-statiques ont été réalisées en élevant la benne sur l'une de ses extrémités, à l'aide du camion-grue jusqu'à atteindre la rupture. Le barrage est construit sur une fondation en enrochement maintenue par des tiges d'acier soudées au camion à la base des 2 faces du barrage. Des plaques d'acier ont été soudées sur les 2 faces intérieures latérales de la benne puis recouvertes de polyane pour limiter le frottement entre le barrage et les parois latérales.

Quatre barrages ayant la même géométrie et les mêmes caractéristiques de remblai (porosité de 0,45 et coefficient d'uniformité de 2) ont été construits. Les différences résident dans les caractéristiques de perré, telles que : le type de pierre, l'épaisseur, les dimensions des blocs et l'interface avec le remblai (tableau 1). Les angles d'inclinaison à la rupture et les coefficients sismiques ultérieurs sont également indiqués dans le tableau 1.

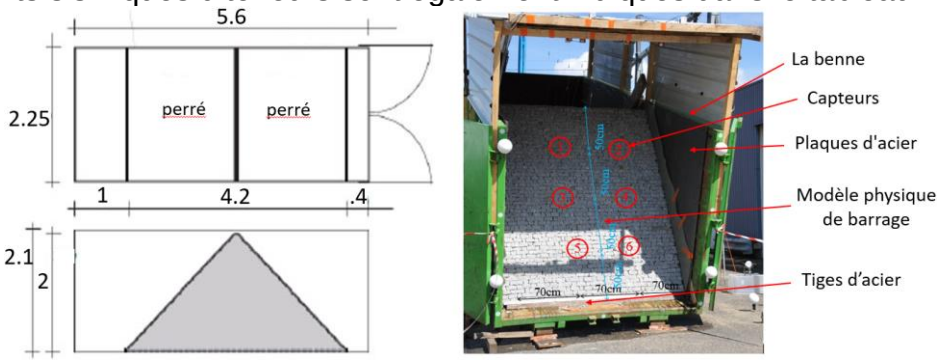

Figure 1. Exemple de modèle physique PEDRA à échelle réduite et ses dimensions en mètre

Tableau 1. Cas concernés par la campagne PEDRA et angles de rupture de basculement

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Type de tangage de la pierre	Granite (1 couche)	Schiste ordonné	Schiste désordonné avec ancrage dans le remblai	Granite (2 couches)
Densité de tangage	115 kg/m2	114 kg/m2	177 kg/m2	230 kg/m2
Épaisseur du bloc	5.6 cm	5 cm	5 à 12 cm	11.2 cm
Hauteur du bloc	5.6 cm	5 cm	3 à 25 cm	5.6 cm
Largeur du bloc	5 et 10 cm	3 à 40 cm	3 à 40 cm	5 et 10 cm
Frottement des blocs	29°	26.5°	26.5°	29°
Angle de rupture	24°	21°	29.5°	28°
Coefficient sismique	0.45	0.38	0.57	0.53

3. Description du modèle numérique

Ici, le corps du barrage (enrochement) a été modélisé comme un milieu continu sur *FLAC3D* tandis que le perré a été modélisé en utilisant une approche discrète avec *PFC3D.* Enfin, un couplage entre les deux logiciels a été utilisé pour permettre la continuité de comportement. Les quatre cas modélisés à partir de la campagne PEDRA sont présentés sur la Figure 2 tandis que les dimensions des blocs du perré sont indiquées sur la Figure 3.

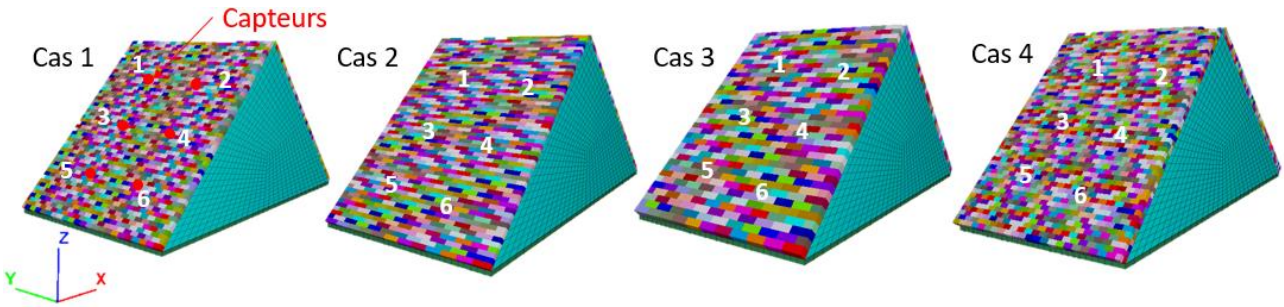

Figure 2. Modèles numériques des 4 cas PEDRA et position des 6 capteurs

En ce qui concerne les conditions aux limites, les 2 côtés latéraux du barrage étaient fixés dans la direction normale (direction y) tout en étant libres de se déplacer dans les autres directions. Afin de modéliser la présence de la couche de polyane, le coefficient de frottement est fixé à zéro sur les 2 faces latérales du barrage. Le barrage repose sur une fondation rigide fixe et une interface avec friction a été créée entre le corps du barrage et cette fondation. En ce qui concerne le perré, la rangée inférieure des blocs sur les faces amont et aval est fixée pour simuler la présence des tiges d'acier et les déplacements normaux (direction y) des 2 côtés latéraux ont été fixés pour simuler l'effet des 2 côtés de la benne.

Une étude paramétrique préliminaire a été réalisée pour analyser l'effet du maillage (corps du barrage) sur la réponse et optimiser les temps de simulation.

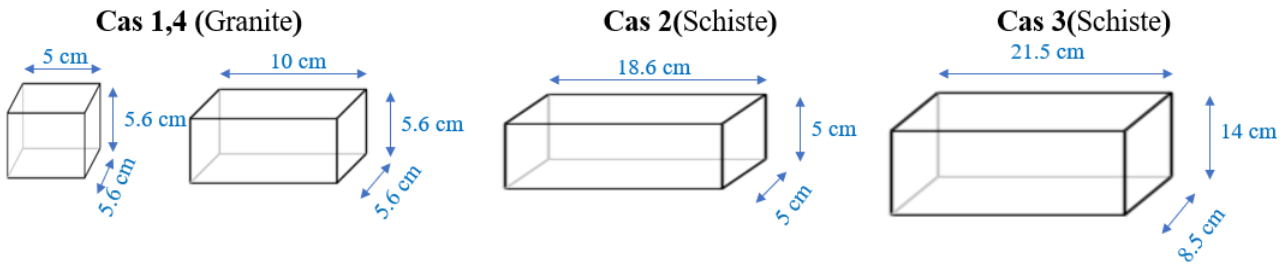

Figure 3. Dimensions des blocs pour les perrés, utilisés dans les modèles numériques

La construction du modèle numérique a été divisée en plusieurs étapes : la première a consisté à créer le corps du barrage (*FLAC3D*) et à atteindre son équilibre sous charge gravitaire. Ensuite, le perré en pierre sèche a été généré sur les 2 faces du barrage (*PFC3D*) et le couplage entre les deux logiciels a été activé impliquant une interface mécanique entre le corps du barrage et le perré. Ensuite, un nouvel équilibre sous charge gravitaire a été atteint.

Dans un deuxième temps, le basculement du modèle numérique a été simulé en faisant tourner le vecteur gravité avec un incrément de 1° jusqu'à l'obtention de la rupture. Un critère de convergence basé sur les forces déséquilibrées et l'énergie cinétique du perré a été développé pour détecter la rupture du barrage et stopper les simulations. Les déplacements des 6 capteurs (Figure 2) ont été tracés tout au long du processus de basculement. Ces capteurs ont été placés au même endroit que dans les expériences (2 capteurs en haut, 2 à mi-hauteur et 2 en bas) pour faciliter la comparaison.

4. Modélisation constitutive et calibration

4.1. Remblai

Deux modèles constitutifs du corps du barrage ont été testés : d'abord, le modèle élastique parfaitement plastique de Mohr-Coulomb puis un modèle élastoplastique plus raffiné mais plus complexe, dénommé LK Enroch, développé par EDF.

4.1.1. Mohr-Coulomb

Le modèle de Mohr-Coulomb (MC) contient cinq paramètres, dont le module d'Young E, le coefficient de Poisson υ, l'angle de frottement interne ϕ, la cohésion C et l'angle de dilatance Ψ. Le processus de calibration est basé sur des essais triaxiaux expérimentaux, réalisés sur des grands échantillons avec le matériau du remblai et des pressions de confinement de 100 et 200kPa (tableau 2). L'appareil triaxial du laboratoire GeM a été utilisé. Cependant, dans le barrage à échelle réduite, la pression de confinement se situe dans la gamme de 1 à 10kPa et après une revue de la littérature, une procédure a été conçue pour adapter l'ensemble des paramètres du modèle à cette faible pression de confinement.

Concernant l'angle de frottement interne du remblai, les graphiques de Leps ont été principalement utilisés pour identifier l'angle de friction interne (Leps, 1970) pour la pression moyenne et la densité correspondantes. Pour l'angle de dilatation du remblai Ψ, l'approche de Bolton (Bolton, 1986) a été utilisée pour des conditions de déformation plane et une densité relative 0<ID <0,4 :

$$\Phi - \Phi_{crit} = 0.8\,\Psi \qquad (1)$$

Φ_{crit} désigne l'angle de frottement à l'état critique : il a été trouvé égal à 38° dans les expériences réelles. En conséquence, le module d'Young est égal à 50MPa pour une pression de confinement de 100kPa. En considérant la dépendance typique du module d'Young avec la pression moyenne et une pression moyenne d'environ 10kPa, le module d'Young est estimé égal à 10MPa. La cohésion C a été fixée à 0 et le coefficient de Poisson à 0,2.

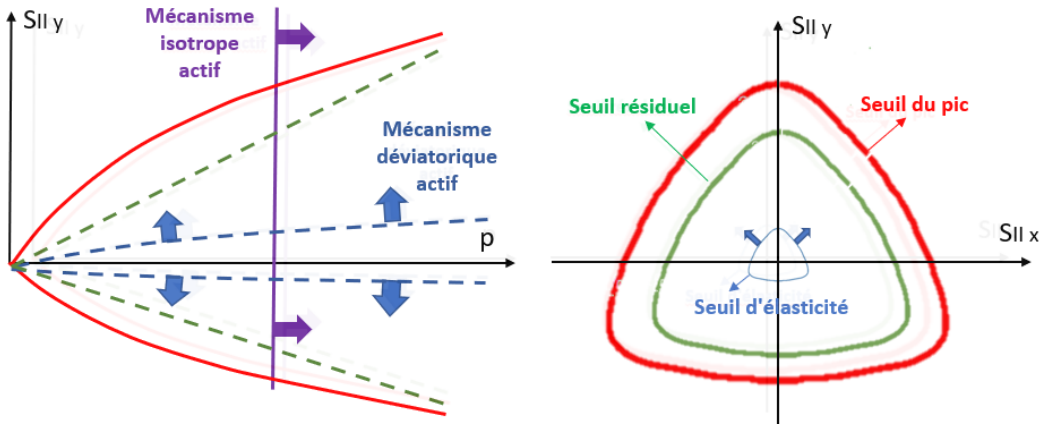

Figure 4. Critère de la loi LK Enroch, dans les plans méridien (à gauche) et déviatorique (à droite). SII est le deuxième invariant du tenseur des contraintes déviatoriques.

Tableau 2. Calibration des paramètres de Mohr-Coulomb à différentes pressions de confinement

Pression de confinement	Φ (°)	Ψ (°)	C (kPa)	E (MPa)	υ
200 kPa (essais triaxiaux réels)	39	2	0	52	0.2
100 kPa (essais triaxiaux réels)	42	6	0	50	0.2
1-10 kPa (paramètres extrapolés)	52	18	0	10	0.2

4.1.2. LK Enroch

LK Enroch est un modèle constitutif déduit d'un ancien modèle développé par EDF (Centre d'Ingénierie Hydraulique - CIH) pour la modélisation des massifs rocheux et portant principalement sur les ouvrages souterrains tels que les tunnels. Plus précisément, LK Enroch est un modèle élastoplastique avec un mécanisme plastique isotrope et déviatorique et un écrouissage isotrope (Fig. 4).

Il a été successivement utilisé pour modéliser les pathologies observées sur la face amont des barrages en enrochement à parement de béton (Chen, 2012). LK Enroch intègre 16 paramètres, divisés en plusieurs groupes dont la signification physique est donnée dans le tableau 3. La plupart de ces paramètres ont été calibrés en simulant des essais triaxiaux réalisés par GeM (en utilisant la méthode des essais et erreurs). D'autres ont été calibrés sur la base de certaines études antérieures trouvées dans la littérature. Par exemple, les paramètres du mécanisme isotrope ont été obtenus en utilisant l'approche de Hicher et Rahma (Hicher et al., 1994). Le résultat de la calibration est présenté sur la Figure 5 et comparé avec les résultats des tests triaxiaux réels mentionnés ci-dessus.

Ensuite, une modification de certains paramètres a été effectuée pour adapter le modèle à une pression plus faible. De tels modèles ne sont généralement pas adaptés pour modéliser le comportement des matériaux granulaires pour une pression de confinement inférieure à quelques dizaines de kPa. En particulier, les paramètres de seuil de pic a_{peak} et m_{peak} ont été modifiés afin d'obtenir une valeur de pic proche de celle fournie par la charte de Leps (Leps, 1970). Les valeurs finales des paramètres de LK Enroch sont fournies dans le tableau 3.

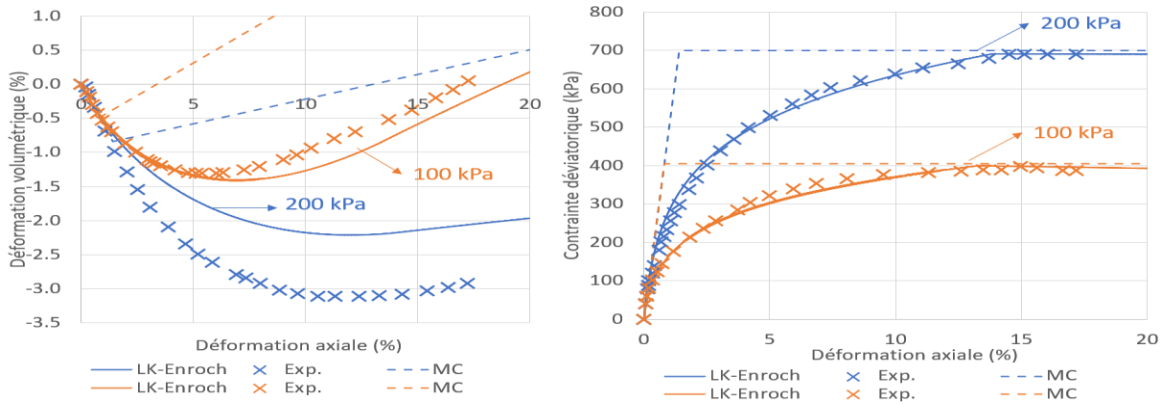

Figure 5. Expériences et simulations d'essais triaxiaux pour le remblai à l'aide des modèles MC et LK Enroch : déformation volumétrique (à gauche) et contrainte déviatorique (à droite).

Tableau 3. Paramètres du modèle LK Enroch

Paramètres généraux			
E = 50MPa	*Module d'Young*	υ = 0.2	*Coefficient de Poisson*
n_{elas} = 0.5	*Exposant de la loi élastique*	σ_c = 100 MPa	*Résistance en compression simple*
Paramètres du seuil d'élasticité			
a_0 = 0.87	*a du seuil d'élasticité*	m_0 = 0.1	*m du seuil d'élasticité*
Paramètres du seuil de pic			
a_{pic} = 0.815	*a du seuil du pic*	m_{pic} = 0.89	*m du seuil du pic*
Paramètres d'écrouissage			
γ_{pic} = 0.125	*Taux de déformation du seuil d'élasticité au seuil de pic*	γ_{res} = 0.8	*Taux de déformation du seuil de pic au seuil résiduel*
X_{ams} = 0.005	*Paramètre dans la loi d'écrouissage pré-pic*	μ = 2	*Paramètre dans la loi d'écrouissage post-pic*
Paramètres de déformations volumiques			
Φ_{res} = 38°	*Angle de frottement résiduel*	Ψ_{c0} = 38.5°	*Angle de dilatance caractéristique*
Paramètres du mécanisme isotrope			
P_{c0} = 15kPa	*Pression de consolidation initiale*	β = 35	*Loi d'écrouissage isotrope*

4.2. Pierre sèche et interface entre le corps du barrage et la pierre

Une loi de contact linéaire avec frottement est utilisée pour les contacts entre les blocs de perré. Un coefficient de friction de 0,55 est utilisé pour les contacts entre les blocs de granite dans les cas 1 et 4, et un coefficient de friction de 0,5 est utilisé pour les contacts entre les blocs de schiste dans les cas 2 et 3. Les angles de frottement entre blocs de granite et de schiste ont été obtenus expérimentalement dans la campagne PEDRA par des essais de glissement. Le module effectif E* a été trouvé égal à 50 MPa et le rapport de rigidité K* égal à 2. Un amortissement global typique de 0,7 est utilisé.

La même loi de frottement linéaire a été utilisée pour l'interface "perré-corps du barrage" avec un frottement d'interface égal à l'angle de frottement bloc-bloc. Cependant, pour le cas 3, l'angle de frottement de l'interface a été pris égal à l'angle de frottement interne du remblai en raison des ancrages de certains des blocs de perré dans le remblai. Dans ce cas, l'interface mécanique est déplacée à l'intérieur du corps du barrage et une partie du remblai contribue à la résistance mécanique du perré.

5. Résultats et discussion

5.1. Validation : angles de rupture et déplacements

Tout au long des simulations, les déplacements au niveau des 6 capteurs placés sur la face aval des barrages ont été enregistrés.

Les angles de rupture par basculement obtenus par les simulations, à l'aide des modèles MC et LK Enroch, sont présentés sur la figure 6 (à gauche). Les deux modèles constitutifs ont permis d'estimer précisément l'angle de rupture et la résistance des barrages. La différence de résultats entre les deux modèles constitutifs réside dans le champ de déplacement. Les déplacements (expériences, modèles MC et LK Enroch) au niveau des capteurs 1 et 3 dans le cas 4 sont présentés sur la Figure 6 (à droite), comme exemple de résultats typiques obtenus. Comme prévu, le modèle MC sous-estime les déplacements pour la plupart des capteurs et dans la majorité des cas : le modèle est caractérisé par un domaine élastique très raide (élasticité linéaire) qui génère un comportement rigide alors que des déformations irréversibles apparaissent pour de très petites déformations dans le cas des matériaux granulaires réels. Au contraire, on peut noter que le modèle plus sophistiqué de LK Enroch donne une évolution des déplacements très proche des déplacements expérimentaux. Cette caractéristique est liée à la possibilité de créer un petit domaine élastique linéaire initial et à l'existence d'un écrouissage isotrope non linéaire pour les deux mécanismes.

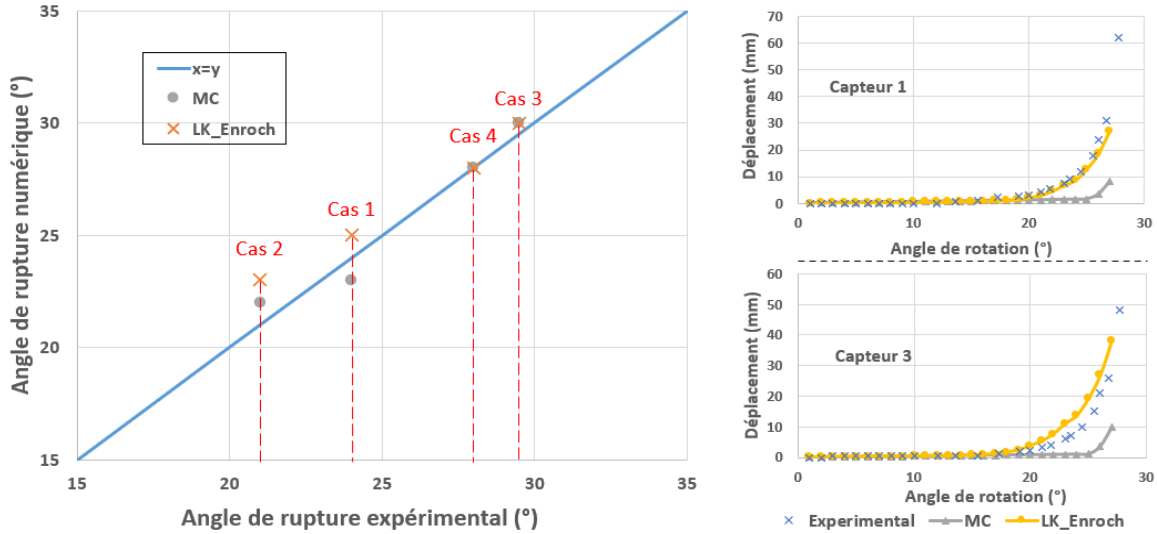

Figure 6. Angles de rupture pour les 4 cas simulés avec MC et LK Enroch (à gauche) et déplacements au niveau de 2 capteurs dans le cas 4 (à droite)

5.2. Facteurs de sécurité

L'évaluation des facteurs de sécurité est une étape importante dans le processus de justification et de conception de toute structure, y compris les barrages. Ici, deux types de facteurs de sécurité sont étudiés et quantifiés en considérant le modèle LK Enroch pour le corps du barrage. Le premier F_ϕ est le facteur de sécurité calculé par réduction de la résistance du corps du barrage, obtenue principalement par la diminution de l'angle de frottement interne (Eq. 2). Il peut refléter la marge de sécurité contre un effondrement statique. Deux sous cas ont été considérés : un cas "sans eau" dans un réservoir hypothétique et un cas "avec eau" d'un réservoir rempli à 90 % de sa hauteur maximale (0,9*hauteur du barrage).

Le deuxième facteur de sécurité F_θ est lié à l'effet de la gravité par la rotation du barrage : il reflète une marge de sécurité contre les effets inertiels horizontaux. Il est défini par l'équation 3 dans laquelle α est la pente de la face du barrage (ici égale à 45 °) et $\theta_{rupture}$ l'angle de rotation de rupture.

$$F_\phi = \frac{\tan(\phi_{initial})}{\tan(\phi_{réduit})} \quad (2)$$

$$F_\theta = \frac{\tan(\alpha + \theta_{rupture})}{\tan(\alpha)} \quad (3)$$

Des simulations ont été réalisées dans chaque cas : une réduction incrémentale de l'angle de frottement interne du corps du barrage (cas de F_ϕ) ou une augmentation incrémentale de la rotation de basculement (cas de F_θ) sont traitées après avoir atteint un équilibre statique. L'état final de chaque simulation correspond au moment où la rupture apparait (selon les critères décrits au paragraphe 3). Les facteurs de sécurité déduits sont regroupés dans le tableau 4.

Tout d'abord, on peut noter que la présence de l'eau a peu d'influence sur les résultats obtenus. En effet, la rupture est généralement déclenchée dans le tiers supérieur du barrage où la pression hydrostatique sur le front amont est relativement faible.

Deuxièmement, le perré semble jouer un rôle clé puisque sa présence tend à augmenter les facteurs de sécurité d'un coefficient 2 (en moyenne) par rapport au cas sans perré. Les cas 3 et 4 conduisent à des facteurs de sécurité plus élevés que les cas 1 et 2. Cela provient principalement 1) de l'ancrage des blocs du perré dans le corps du barrage ce qui augmente l'épaisseur mécanique équivalente (épaisseur moyenne) du perré, 2) du poids plus élevé du perré dans les cas 3 et 4 par rapport aux cas 1 et 2.

Enfin, le cas 1 est légèrement plus résistant que le cas 2 en raison de la plus grande résistance (coefficient de frottement) des blocs de granite du perré par rapport aux blocs de schiste (Tableau 1).

Tableau 4. Résultat des facteurs de sécurité pour les 4 cas

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	sans perré
F_ϕ (sans eau)	2.2	2.1	3.0	3.2	1.3
F_ϕ (avec eau)	2.1	2.0	3.0	3.0	1.3
F_θ	2.7	2.5	3.7	3.3	1.3

6. Conclusion

Un modèle numérique permettant d'étudier le comportement mécanique des barrages en enrochement avec perré en pierres sèches a été développé en utilisant une approche mixte DEM-FEM : DEM pour le perré et FEM pour le corps du barrage. La validation de cette approche a été réalisée en reproduisant quatre constructions différentes obtenues au cours d'une campagne expérimentale. Il s'agissait de maquettes à échelle réduite de barrages puis inclinées dans un camion-grue jusqu'à la rupture.

Deux modèles constitutifs différents ont été testés pour le corps du barrage : un modèle élastique parfaitement plastique et un modèle plus raffiné consistant en un modèle élastoplastique avec deux mécanismes plastiques associés à un écrouissage isotrope. La calibration des paramètres du modèle a été strictement réalisée à l'aide d'expériences réelles et de résultats de la littérature. Des essais pseudo-statiques (essais de basculement) ont ensuite été simulés.

Les deux modèles constitutifs ont permis d'obtenir l'angle de rupture réel avec une grande précision. Cependant, un modèle constitutif sophistiqué était nécessaire pour reproduire le champ de déplacement de la face aval du barrage avec celui de la campagne expérimentale. Cependant un tel modèle, sophistiqué et plus délicat à manipuler et à calibrer, peut ne pas être nécessaire lorsque la résistance du barrage est la seule caractéristique évaluée.

Le rôle clé du perré a été étudié en analysant deux facteurs de sécurité différents. Le perré augmente les facteurs de sécurité d'un facteur minimum de deux dans le cas des systèmes à échelle réduite étudiés. Deux structures différentes de perré peuvent conduire à une résistance similaire, qui est liée principalement à l'épaisseur du perré et a son poids dans la résistance du barrage. Pour finir, afin de tirer des conclusions définitives pour ces structures, des simulations de barrages en enrochement avec perré en pierres sèches doivent être effectuées à échelle réelle.

7. Remerciements

Les auteurs remercient EDF - Centre d'Ingénierie Hydraulique qui a financé à la fois la campagne expérimentale, qui a permis de valider le modèle numérique, et le travail de recherche présenté dans cet article.

8. Références bibliographiques

Bolton M. (1986). The strength and dilatancy of sands. Geotechnique; 36(1): 65–78.

Chen Y. (2012). Modélisation du comportement mécanique des grands CFRD: Identification des caractéristiques des enrochements et comportement du masque d'étanchéité amont. PhD thesis. Ecole Centrale de Lyon.

Deluzarche R. (2004) Modélisation discrète des enrochements : Application aux barrages. PhD thesis. Ecully, Ecole centrale de Lyon.

Hicher P, Rahma A. (1994). Micro-macro correlations for granular media. Application to the modelling of sands. European Journal of Mechanics. A. Solids; 13.

Leps TM. (1970). Review of shearing strength of rockfill. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division; 96(4): 1159–1170.

Oetomo J. (2014). Comportement des murs de soutènement en pierre sèche: une modélisation par approche discrète. PhD thesis. Ecole centrale de Lyon.

Savalle N, Vincens É, Hans S. (2020). Experimental and numerical studies on scaled-down dry joint retaining walls: Pseudo-static approach to quantify the resistance of a dry-joint brick retaining wall. Bulletin of Earthquake Engineering; 18(2): 581–606.