MODELISATIONS PHYSIQUE ET NUMERIQUE DE LA STABILITE DU PAREMENT AVAL D'UN BARRAGE EN ENROCHEMENT AVEC PERRE

Physical and numerical modeling of stability of downstream pitching stones on rockfill dam

Olivier BORY, Jean-Jacques FRY, François LAIGLE

EDF Hydro-CIH, 4 alléee de Tignes, La Motte Servolex 73 290 olivier.bory@edf.fr; jean-jacques.fry@edf.fr; françois.laigle@edf.fr

Eric VINCENS ECL, 36 Avenue Guy de Collongue, Ecully 69 134 Cédex eric.vincens@ec_lyon.fr;

MOTS CLEFS

Barrages en remblai, CFRD, enrochement, perré, analyse de stabilité, angle de frottement, modèle physique

KEY WORDS

Embankment dams, CFRD, rockfill, pitching stones, stability analysis, friction angle, physical model

RÉSUMÉ

Les barrages en enrochement ont été construits empiriquement sans calcul de stabilité. Ensuite, les méthodes de justification de la stabilité développées pour les barrages en terre ont été appliquées aux barrages en enrochement. Cette pratique est acceptée, mais la taille des blocs pose deux difficultés de justification : d'abord elle peut exclure l'enrochement du domaine de la mécanique des milieux continus et ensuite elle exclut les mesures d'angle de frottement sur le matériau intact. Pour trouver une alternative à ces deux difficultés, le projet PEDRA répondant à l'appel d'offres C2D2 du RGCU-DRI MEEDDM a suggéré d'analyser la tenue des ouvrages en maçonnerie sèchepar le développement et la validation d'une approche en mécanique des milieux discrets. A cette fin, PEDRA a prévu le montage d'un modèle physique qui reproduit le comportement à la rupture d'un parement aval en enrochement avec son perré de pierres rangées à la main. Les caractéristiques du matériau et des modèles physiques sont décrits. Les résultats sont présentés sous forme de champs de déplacement relatif en fonction de la rotation du modèle. Ces modèles fournissent des études de cas uniques pour la justification de toute approche de la stabilité d'un perré en pierres sèches posé sur une pente en enrochement. Dans cet objectif, plusieurs approches classiques seront déployées pour retrouver les conditions de la rupture : modèle aux éléments finis, méthode des tranches, méthode cinématique. Les résultats sont comparés et les conditions de reproduction de la rupture sont discutées.

ABSTRACT

The rockfill dams were built empirically without stability calculations. Then, the stability analyses developed for earth dams were applied to rockfill dams. This practice is accepted, but the size of the blocks poses two difficulties of justification: first, it can exclude rockfill from the domain of continuum mechanics and, second, it excludes friction angle measurements on intact material. To find an alternative to these two difficulties, the PEDRA project responding to the C2D2 call of the RGCU-DRI MEEDDM suggested analyzing the performance of dry masonry structures by developing and validating a discrete mechanical approach. To this end, PEDRA has planned the assembly of a physical model that reproduces the failure behaviour of a downstream rockfill facing with its hand-stored stone perré. The characteristics of the material and physical models are described. The results are presented as relative displacement fields according to the rotation of the model. This type of model will be reconstructed on a vibrating table to be subjected to a parameterized seismic action. These models provide unique case studies to justify any approach to the stability of a dry stone perre on a rockfill slope. To this end, several classical approaches will be used to recover the failure conditions: finite element model, wafer method, kinematic method. The results are compared and the conditions for reproducing the rupture are discussed.

1. INTRODUCTION

1.1. Les barrages en enrochement à perrés en pierres sèches

EDF gère une une petite dizaine de grands barrages en enrochement (15 m <H < 30 m) avec perrés en pierre sèches, de fruit égal à 1/1 construits selon des techniques qui ne sont plus pratiquées aujourd'hui. Ces ouvrages sont constitués d'un enrochement le plus souvent déversé, parfois arrosé, rarement compacté, protégé par un perré, construit par une maind'œuvre spécialisée.



Figure 1: Perré en cours de construction 0 Castillon (gauche) et d'Araing (droite)

Les perrés sont de trois types: (1) en pierres naturelles ou taillées sur une seule face et agencées sur la tranche, (2) en pierres taillées en moellons posées perpendiculairement à la pente et (3) en pierres hourdées.



1 - Pierres naturelles



Figure 2 : Les trois types de perrés

3 – Pierres hourdées

L'épaisseur (normale au parement) est de 1.28 m à Escoubous et inconnue à Portillon. Le perré de Portillon est en moellons de 35 cm « de queue au minimum assisée » posés sur un assise de pierres cassées.

1.2.La problématique des perrés et de leur modélisation

Ces perrés peuvent présenter des pathologies, propres aux enrochements et parfois inconnues des CFRD actuels : fissuration des pierres, déplacements des pierres et plissements des couches, extrusion de pierres, boursouflures ou bombement ou vitesse de déplacements constante dans le temps.

La réévaluation de la stabilité de ces barrages en enrochement par modélisation en éléments finis statique et sismique n'a pas montré d'anomalies sur les barrages de Greziolles, Araing et Escoubous. A contrario la stabilité des barrages de Grandes Pâtures et du Laurenti était insuffisante. La modélisation aux éléments finis est totalement justifiée avec des mailles dont la taille est 30 fois la taille maximale des blocs. Mais elle n'est plus applicable quand elle attribue une loi de comportement à une maille dont la taille est celle du bloc. La modélisation du perré en éléments finis sort donc de son domaine d'application. Cela suscite l'intérêt de tester d'autres approches : comme celle des éléments discrets [2,5,6].

L'approche discrète est sur le plan théorique plus adaptée à la modélisation des barrages en enrochement de petite ou moyenne taille, que l'approche continue. Cependant, le manque d'expérience fait qu'il n'est pas possible de prendre pour argent comptant les résultats d'une modélisation sans précédent. Les paramètres numériques cachés tels que l'amortissement ont une grande influence sur les résultats sans critères clairs pour leur ajustement. D'autres paramètres physiques tels que la rigidité de contact sont difficiles à mesurer et ne peuvent pas être implémentés dans le calcul avec leur valeur réelle, sans risquer de sérieux problèmes de temps de calcul. Enfin, différents scénarios d'hypothèses pourraient correspondre à la performance observée. Il n'a pas été possible de trouver dans la littérature une étude de cas avec toutes les données nécessaires à la validation. Afin de réduire ces incertitudes un ensemble complet de propriétés physiques et mécaniques à trois échelles différentes : celles du bloc, de l'essai triaxial et de la structure est nécessaire à l'étalonnage des paramètres numériques. Cette étape de validation est capitale avant de promouvoir l'utilisation des approches discrètes. Cette étape est un des objectifs principaux du projet PEDRA.

Ainsi, le second chapitre présente les résultats de la modélisation de perré par l'approche discrète de 2004, qui suscite cette validation [2]. Le troisième chapitre présente les modèles physiques de PEDRA. Le quatrième chapitre dresse un premier bilan. Les autres interprétations nécessiteront un programme de développement supplémentaire (comportement dynamique sur table vibrante).

2. LA MODELISATION INTIALE PAR LA METHODE DES ELEMENTS DISCRETS

L'analyse du comportement du barrage d'ESCOUBOUS a été entreprise avec une approche discrète dans le cadre du projet MICROBE financé par le MEDDTL [2]. Cette approche, saluée par le Prix de l'innovation de la CIGB lors du congrès de Montréal en 2003, a montré la bonne stabilité de cet ouvrage, notamment grâce à l'importance du perré qui augmenterait l'angle de frottement de la pente de 15 à 20° et justifierait une bonne tenue sismique. La géométrie du barrage d'une hauteur de 20 m a été simplifiée avec un fruit constant H/V=1/1,. Malgré cette simplification, la construction en éléments discrets fut complexe avec des macro-éléments de blocs réguliers au cœur et irréguliers à la périphérie (Figure 3). Le perré aval est représenté par un empilement de blocs rectangulaires constitués de 4 billes collées entre elles. Le perré amont bétonné est composé de blocs collés entre eux et constitués de deux billes. Le modèle comprend 20 000 billes. La modélisation montre qu'avec un angle de frottement de 39° pour l'enrochement, le remblai et son perré sont stables avec une pente de 50° par rapport à l'horizontale (rotation de la base de 5°) mais ne l'est plus à 55°. D'autre part le remblai reste stable sous sollicitation sismique d'accélération maximale de 0,5g. Est-ce que ces résultats représentent bien la réalité ou dépendent-ils d'un biais numérique des éléments discrets?



Figure 3 : Le barrage et sa modélisation en éléments discrets [2]

3. LES MODELES PHYSIQUES

3.1. Objectif

Le projet PEDRA fournit à EDF l'opportunité d'approfondir la connaissance du comportement des perrés sous chargement extrême. EDF après avoir financé la modélisation par approche discrète [2,5 et 6], veut valoriser les premiers résultats en comparant leur prédiction à l'observation de modèles physiques. Ces derniers sont des modèles réduits de remblai en blocs concassés avec perré en pierres taillés. Les remblais sont testés jusqu'à la ruine, pour connaître la marge de sécurité de l'état initial. L'objectif est double : (1) observer le comportement de l'ouvrage sous chargement extrême et (2) utiliser ces résultats pour valider les futures modélisations. Ces modèles seront ensuite testés sous chargements sismiques.

3.2. Les perrés

Les perrés à reproduire s'inspirent de ceux des barrages de Portillon (pavés de granite de forme polyédrique ou polygonal taillés en biseau) et d'Araing (pierres rectangulaires de schiste). Les pierres retenues sont :

- 1. des pavés en granite taillés cubiques ou rectangulaires
- 2. des pavés de schiste taillés rectangulaires.

3.2.1. Perré de pierres taillées en granite

Le pavé de pierres cubiques a un côté de dimension moyenne 50 mm. Les largeurs minimales et maximales des pavés sont respectivement de 40 mm et 60 mm. Le pavé rectangulaire a les dimensions de 50x50x100mm. Le poids du perré est de 115 kg/m². Un essai a été mis au point pour caractériser le frottement à l'ENTPE sur les épontes de 6 pavés de granite découpés (figure 4). L'angle de frottement entre les pavés a été mesuré par 10 essais répétitifs entre 6 et 3 pavés placés sur 3 pavés. La valeur moyenne de l'angle de frottement de contact entre les pavés est égale à 29° et l'écart type est égal à 2° (Figure 4).

pavé dessous	Pavé dessus	moyenne 10 essais en °	ecart type °
1	4	29	1,5
2	5	29	1,1
3	6	31	2,2
1	5	28	1,8
2	6	29	3,3
3	4	31	2,3
1	6	29	2,6
2	4	30	1,2
3	5	27	2,5
Moyenne		29	2



Figure 4 : Résultats et dispositif de plan incliné de l'essai de glissement sur plan incliné d'épontes de pavé de granite

3.2.2. Les 4 perrés testés

Quatre perrés sont testés (Figure 5) dont le tableau 1 regroupe les caractéristiques.







Figure 5 : Photographies des perrés : à gauche perrés 1 et 4 au centre perré 2 et à droite perré 3

Expérience	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Roche mère des pierres du perré	Granite	Schiste	Schiste	Granite
Angle de frottement pierre / pierre (°)	29	26,5	26,5 ?	29°
Hauteur des pierres du perré (cm)	5-6	5	3-25	5-6
Largeur des pierres du perré (cm)	5-10	3-40	3-40	5-10
Epaisseur des pierres du perré (cm)	5-6	5	5-12	2*5-6

Tableau 1 : Propriétés des perrés testés

Le premier perré est constitué d'un seul rang de pavés de granite carrés (avec quelques rares rectangles). Le second perré est en blocs de schiste dits « ordonnés », la forme est rectangulaire d'une profondeur de 5 cm, d'une hauteur moyenne de 5 cm et d'une longueur moyenne de 18 cm et d'écart-type de 8 cm. Le troisième perré est toujours en schiste mais en blocs « désordonnés » d'une hauteur entre 3 et 25 cm, d'une longueur comprise entre 3 et 40 cm et d'une épaisseur allant de 5 à 12 cm. Le dernier perré est une double rangée de pavés de granite majoritairement carrés.

3.3.Le principe de l'essai

Le remblai est construit sur un plan horizontal, qui est ensuite progressivement incliné, afin de trouver la pente limite. Le plan incliné n'est autre que la base d'une benne soulevée par une grue de traction finement asservie pour éviter les accélérations (Figure 6). La benne a 5,60 m longueur utile, 2,25 m de largeur et 2,1 m de hauteur. Le levage est réalisé grâce à un crochet sur la benne par un camion grue (Figure 6). Le barrage pèse 27 tonnes, la benne 2 tonnes et la capacité de levage de la grue est de 30 tonnes.



Figure 6 : Principe de la rotation du modèle par levage



Figure 7 : La benne brute (1) préparation des parois (2) et du fond (3) chargée avant essai (4)

Les portes s'ouvrent complètement et ne gênent pas lors des essais. Le parement aval est celui situé du côté des portes. Les bords de la benne n'étant pas plats et lisses (Figure 7.1), des plaques d'acier ont été soudées sur les côtés. Ces plaques sont graissées et recouvertes d'un polyane pour limiter les frottements entre le barrage et les parois (Figure 7.2). Le barrage sera construit sur un lit d'enrochement retenu par des tiges d'acier soudé sur le fond de la benne (Figure 7.3).

Le modèle physique est une maquette simplifiée à l'échelle 1/10 du barrage de Portillon. La maquette avec perré mesure 2 m de hauteur, 4,20 m de longueur et 2,25 m de largeur. La maquette est dotée d'un perré côté amont et d'un perré côté aval (Figure 8), construits par des muraillers professionnels. Les deuxperrés symétriques avec un fruit de 45°s'imbriquent l'un dans l'autre au sommet du barrage (Figure 8).



Figure 8 : Construction des perrés du modèle 1 avec liteaux et cordeaux et crête terminée

3.4.Les mesures

Quatre acquisitions des déplacements ont été mises en place : capteurs à cable (ENTPE), photogramétrie (EDF-DTG Service Topo), laser 3D et caméra rapide (ENTPE).

Concernant les capteurs à câble, chaque point de mesure est composé de 2 capteurs ce qui permet de déterminer les déplacements du mouvement du perré dans les deux dimensions de la benne (tangentielle et normale à sa base).

Les positions des 6 points de mesure des déplacements sont précisés dans la figure 9.

Figure 9 : Positions des cibles des capteurs à câble sur le perré



Le principe de la photogrammétrie est appliqué avec une acquisition à l'aide d'appareils photos numériques plein format dotés d'objectifs calibrés géométriquement. Pour cela, quatre appareils sont mis en œuvre, avec un déclenchement couplé, ce qui permet d'obtenir quatre photos simultanées de la même scène depuis des points de vue différents afin de reconstruire un nuage de points 3D par corrélation d'image. Les appareils sont calibrés à partir de repères topographiques matérialisés par des cibles rétroréfléchissantes soit collées sur la benne soit posées sur des trépieds placés autour de la benne et utilisées comme référentiel topographique. Chaque photo nécessite une mémoire de 42 Mo et 2s d'enregistrement. La restitution est la carte des déplacements à différents temps de la rotation de la benne.

La comparaison des mesures par capteurs à cable avec les mesures stéréoscopiques montre un bon accord entre les deux, confirme la séparation en déplacements instantanés et différés et une tendance de la benne à se déformer lors du levage. Il est difficile de connaître l'influence de la benne dans les déplacements différés. Ainsi, la stabilisation des déplacements différés régit la durée du palier, dans le temps imparti.

(a)

3.5.L'enrochement

3.5.1. Granulométrie et forme des grains

La granulométrie et la forme des grains conditionne l'angle de frottement de l'enrochement [1,3 et 4].

L'enrochement est constitué de blocs provenant de la carrière de Meaux-la-Montagne (Beaujolais). La nature géologique de la roche est un granite. Le rocher est sain. La roche a été concassée, tamisée et lavée. La forme des particules sont angulaires (Figure 10.a). Le libellé commercial de la granulométrie des blocs est 40-70 mm. La distribution granulométrique est plus large et s'étend à un 10/80 mm avec d_{50} égal à 40 mm et Cu égal à 2 (Figure 10.b).





(b)

Figure 10: (a) Photographie de l'enrochement et b) granulométrie

3.5.2. Propriétés mécaniques

Trois échantillons triaxiaux d'un diamètre de 1 m et d'une hauteur de 1,5 m d'enrochement déversé ont été cisaillés à faible densité minimale à l'Ecole Centrale de Nantes. Des déformations supérieures à 10 % sont nécessaires pour atteindre la résistance des échantillons. Les valeurs de l'angle de frottement atteignent (Figure 11):

- Essai PEDRA1 φ'= 42,3° à σ'3=100 kPa
- Essai PEDRA2 ϕ '= 39,5° à σ '3=200 kPa
- Essai PEDRA3 ϕ' = 41,4° à σ' 3=100 kPa.

Test	Masse (kg)	Diamètre (m)	H (m)	^{γd} (kg/m³)	e ₀	σ'c (kPa)	€1,max (%)
1	1662	0.993	1.504	14.00	0.86	100	12.5
2	1680	0.989	1.502	14.29	0.82	200	17.3
3	1660	0.987	1.503	14.16	0.84	100	17.3

Tableau 2 : Identification des essais triaxiaux



Figure 11 : Courbes triaxiales

3.6. Pente limite de l'enrochement

Un modèle physique du remblai sans perré est construit pour tester la procédure de chargement par rotation de la benne d'une part et pour mesurer la pente limite (ou angle de repos) d'autre part. La pente limite permet d'avoir accès à l'angle de frottement des enrochements. L'enrochement est déversé dans la benne basculante sa pente initiale aval est de 24° et sa hauteur de 1,7m. Quatre cellules de déplacement sont collées sur les pierres de la face aval. Le palier dure assez longtemps pour permettre la stabilisation (Figure 12).



Figure 12: Rotation et déplacements de la pente du barrage en enrochement

Il est impressionnant d'observer que le fluage augmente avec la diminution de la marge de sécurité (Figure 13). Ce fluage a été remarqué 10 ans auparavant par la modélisation MED, mais il pouvait être un artifice numérique ; il est confirmé par cet essai. De 24° à 36°, la pente ne se déforme pas. La déformation de la pente commence dès que l'angle d'inclinaison de la benne passe à 12°, c'est-à-dire pour un angle de pente de 24+12=36°. De 36° à 41°, les déformations de la pente sont simultanées à la rotation de la benne . De 41° à 46°, les déformations sont principalement différées et s'amortissent quand la benne ne tourne pas. Au-delà de 46°, surviennent des déplacements très importants, correspondant au glissement/roulement des pierres le long de la pente du remblai. A 48°, les mouvements sont permanents. La question de la valeur de l'angle de frottement se pose : en statique , elle serait 46°, mais en dynamique elle atteindrait 48°. Elle chute de 46 à 42 puis à 39,5° quand la contrainte σ_3 passe de 0 à 100 puis 200 kPa.

3.7. Résultats du premier modèle du 23 avril 2014

3.7.1. Mesures des capteurs à cable

La benne a été levée par paliers constants de 0 à 18°, et ensuite variables jusqu'à 24° (Figure 12). Jusqu'à une rotation de 16° (pente à 61°), les points ne se déplacent pas dans la benne, le «barrage » est rigide (Figures 12 et 13). De 16° à 18° (61° à 63°), de faibles déplacements sont visibles (< 2 mm). De 18° à 24° (63° à 69°), les déplacements croissent avec l'inclinaison. A partir de 24°, les déplacements deviennent très importants.



Figure 13: Modèle 1 - Paliers effectués lors de l'inclinaison de la benne et déplacements des capteurs à câble



Figure 14 : Modèle 1 - Déplacements des pavés dans la direction de la hauteur de la benne



Figure 15 : Modèle 1 - Déplacements des pavés dans la direction de la longueur de la benne

3.7.2. Mesure au Laser scan 3D

La mesure 0 du Laser scan met en évidence un creux d'environ 2 cm dans la partie supérieure du perré. Malgré ce creux le scan montre la très bonne qualité de construction du perré. La figure 20.1 montre la différence obtenue par laser scan 3D entre l'instant initial et le palier 32, rotation de 23,5°, c'est-à-dire le dernier palier en voie de stabilisation. Cette figure 20.1 nous permet d'observer les déformations du perré en s'affranchissement du « creux » initial. L'ordre de grandeur des déplacements maximaux avant rupture recoupe bien celui des capteurs : de l'ordre de 2,5 cm. Un léger effet de « vague » est vu en crête avant l'effondrement. On note aussi un effet de bord, où les déplacements des pavés sont plus petits. A noter qu'à ce stade les déplacements sont déjà très importants et dans la zone d'instabilité de l'ouvrage.

3.7.3. Photogrammétrie

La figure 16 représente le perré à 16H33 dans la benne. La photographie du parement est pivotée et ce dernier est représenté horizontal. La partie ensoleillée est en bas du perré, la partie ombragée est en haut. La figure de gauche montre la formation du bourrelet lors du dernier palier, celle de droite montre l'effondrement.



Figure 16 : Perré à 16h33 avant la rupture (gauche) et pendant la rupture (droite)

La rupture a mis environ 30 secondes à se déclencher à partir du palier à 24° d'inclinaison de la benne. Elle était précédée par un intense bruit de cailloux qui roulent (bruit de douche) et la chute de quelques gravillons. Un bourrelet au centre s'est développé, une fissure est apparue sur le coin supérieur gauche et soudain une vague a emporté la crête. La déformation correspondant au déplacement limite du masque sur la hauteur est de l'ordre de 1%. Les déplacements limites sont de 2,5cm.

Le principe et la réalisation de ce type de modèle physique et la qualité des résultats du premier test a convaincu EDF de poursuivre les expériences par trois autre types de perré. D'une part l'importance des premiers résultats demandait confirmation et d'autre part l'analyse de la nature du perré sur la stabilité de l'ouvrage exigeait d'autres configurations. Pour Les mêmes raisons, il nous semble important de reproduire de manière concise les résultats obtenus par les autres modèles.

3.8. Deuxième modèle du 6 mai 2015: perré en blocs de schiste ordonnés

Pour les trois autres modèles de perrés, les déplacements des points suivis par les capeurs à cable, normaux et tangentiels au repère de la benne, sont représentés en fonction de la rotation de la benne ; tandis que les déplacements totaux sont tracés en fonction du temps. Ces informations permettent au modélisateur de retrouver la courbe de chargement et les principales variables à simuler.



Figure 17 : Deuxième modèle : déplacements mesurés par les capteurs à cables





Figure 18 : Troisième modèle : déplacements mesurés par les capteurs à cables



3.10.Quatrième modèle du 16 Juillet 2015 : Double rangées de pavés de granite

Figure 19 : Quatrième modèle : déplacements mesurés par les capteurs à cables

3.11. Comparaison des déformées du perré

La Figure 20 compare les champs de déplacements de chaque perré juste avant rupture



Figure 20 : Déformées avant rupture des perrés : 1 Haut Gauche / 2 Haut Droite / 3 Bas Gauche / 4 Bas Droite

4. LEÇONS ET INTERPRETATION

Les essais à la rupture de ces modèles physiques donnent directement le coefficient sismique critique de ces barrages : k_c =tan(α) avec α l'angle de rotation à la rupture. Le coefficient sismique critique est très fort et montre l'excellente résistance apportée par le perré.

L'influence de l'angle de frottement est mise en évidence par la comparaison entre le modèle 1 et 2. Avec l'angle de frottement banc sur banc qui passe de 26° à 29°, l'angle de rotation passe de 66° à 69°.

L'effet de l'épaisseur du perré est mise en évidence par la comparaison entre le modèle 1 et 4. Avec un rapport épaisseur sur hauteur du barrage qui passe de 2,5 à 5%, l'angle de rotation passe de 69° à 73°. Ce qui engendre une augmentation de facteur de sécurité F=tan(73°)/tan(69°) de 25%. La comparaison entre les modèles 2 et 3 confirme le rôle de l'épaisseur du perré par l'effet d'ancrage des blocs irréguliers de schiste.

Modèle à la rupture	Sans perré	Perré 1	Perré 2	Perré 3	Perré 4
e/H (épaisseur perré/hauteur)	0	0,028	0,025	0,025 à 0,06	0,056
angle du perré/horizontale (°)	46	69	66	74,5	73
α angle de rotation (°)	22	24	21	29,5	28
k _c	0,40	0,45	0,38	0,57	0,53

Tableau 3 : Le coefficient sismique critique des modèles physiques testés

Les résultats des 4 modèle physiques ont été reportés pour être des tests de qualification de toute méthode d'analyse de barrage en enrochement avec perré : analyse par la méthode des éléments finis, analyse par éléments discrets ou calcul à la rupture. Ils serviront de tests de qualification.

5. CONCLUSION

Les premières modélisations en éléments discrets ont mis en évidence le rôle spectaculaire de peau de confinement sur la stabilité joué par le perré (Deluzarche, 2004). Dix ans après, le projet Pedra confirme ces résultats de modélisations en éléments discrets. Quatre modèles physiques de barrage en enrochement avec perré à l'échelle 1/10 ont été menés à la rupture par rotation de la gravité. Le gain de résistance apporté par le perré à un fruit de 1 est net : le coefficent sismique critique est de l'ordre de 0,4-0,5. Ces résultats devront être complétés par des essais sur table vibrante. Ces modèles physiques sont une référence incontournable pour toute méthode d'analyse de barrage en enrochement avec perré.

REMERCIEMENTS

Nous tenons vivement à remercier Joachim BLANC-GONNET, Stéphane COINTET et Jean-Claude MOREL de l'ENTPE et Philippe REBUT et Rémi BOUDON de EDF-DTG les artisans de ces modèles et de leur métrologie.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- BARTON, N., KJAERNSLI, B. "Shear strength of Rockfill". Journal of the geotechnical engineering division. ASCE.107 No. 7, 1981, p.873-891.
- [2] DELUZARCHE R., Modélisation discrète des enrochements. Application aux barrages. 2004, Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon.
- [3] MARSAL, R. J. "Mechanical properties of rockfill." In Embankment dam engineering: Casagrande volume. Eds R. C. Hirschfeld and S. J. Poulos, New York: Wiley, 1972, pp. 109–200.
- [4] MAMBA, M., Résistance au cisaillement des enrochements et des matériaux grossiers : application aux calculs des barrages, Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois, 1989.
- [5] PLASSIARD, J. P., FRY, J. J., & DEDECKER, F., "Bidimensional Discrete Element Simulations of Ageing Effects in Rockfill Dams", LTBD09, Graz 2009.
- [6] TRAN, H., Analyse et modélisation du vieillissement des barrages en enrochements par une approche micromécanique. PhD Thesis, Ecole Centrale de Lyon, 2006.