

Une approche discrète de la rupture d'enrochements : un modèle d'interfaces cohésives endommageables

Claire Silvani

Cemagref. – Unité Ouvrages Hydrauliques – 3275 Route de Cézanne – CS 40061 – 13182
Aix-en-Provence Cedex 5 / LMA. – Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique – 31
Chemin Joseph Aiguier – 13402 Marseille Cedex 20

RESUME. Les barrages en enrochements sont composés de blocs rocheux dont la taille peut atteindre le mètre. Ces ouvrages présentent des déformations relativement importantes au cours du temps et peuvent également tasser au moment de leur remplissage ou lors d'une crue accidentelle. Ces déformations semblent liées à des ruptures de blocs à l'intérieur de l'ouvrage. Dans cet article, nous proposons un modèle discret capable de reproduire la rupture progressive et différée des blocs rocheux présents dans ce type d'ouvrage. Chaque bloc est représenté par un assemblage de particules, initialement liées par une cohésion qui peut diminuer progressivement au cours du chargement. Un modèle d'endommagement interfacial est proposé pour décrire cette décroissance progressive. Implémenté dans un code de calcul par éléments discrets, ce modèle permet de simuler la rupture d'un milieu granulaire composé d'enrochements modèles de barrage sollicité sous compression œdométrique.

MOTS-CLÉS : Milieu granulaire, rupture, endommagement.

ABSTRACT. Rockfill dams are mainly made from natural materials, coarse material, blocks, whose dimension can reach one meter. The measurements on site show some important post-construction deformations. Displacements are also observed during first filling or casual flood. Deformations seem to be linked to the blocks fracture. In this paper, we propose a model to account for the progressive and delayed blocks fracture. Each block is considered as an assembly of particles with initial cohesive bonds, the latter decreasing progressively during the loading. A damaging interface model is proposed to describe this progressive phenomenon. This model has been implemented in a numerical code based on a discrete element method. This model enables to reproduce the crushing of a granular medium composed of rockfill subjected to an œdometric compression.

KEYWORDS : Granular medium, fracture, damage.

1. INTRODUCTION

Les ouvrages de génie civil sont généralement étudiés comme des milieux continus, avec les méthodes de la mécanique des milieux continus. Ces méthodes conviennent cependant moins bien aux ouvrages ayant une nature discontinue, où le milieu est composé de grains comme les blocs rocheux, présents dans les ouvrages en enrochements. Ces milieux granulaires sont fortement marqués par leur nature discrète (rupture de grains, forme des blocs rocheux, etc.), alors que les modèles continus décrivent le milieu d'un point de vue macroscopique et présentent un certain nombre de paramètres qui n'ont que très peu de signification physique. Dans ce travail, nous utilisons une approche discrète pour décrire la rupture progressive (vitesse de fissuration finie) et différée (par rapport au chargement) de blocs rocheux supposés rigides et interagissant par contact et frottement. Ces ruptures sont en grande

partie responsables des tassements observés sur les barrages en enrochements au cours du temps et durant leur remplissage (Deluzarche 2004, Tran 2006).

La résolution du problème est effectuée à l'aide de simulations numériques discrètes basées sur la méthode NSCD (Non Smooth Contact Dynamics) proposée par (Moreau, 1988) et (Jean, 1999). Afin de reproduire la fissuration des grains (blocs rocheux) on suppose que le grain est constitué d'un assemblage de particules liées par cohésion. Les grains et les particules sont supposés être de même taille caractéristique notées D_s pour les grains et D_p pour les particules avec $D_p \ll D_s$. D'un point de vue numérique un grain est représenté par un assemblage de particules rigides dont la taille (diamètre D_p) est considérée comme représentative de la discrétisation ou de la maille élémentaire du grain, à l'intérieur duquel une fissure peut s'amorcer et se propager au niveau des zones de contacts entre les particules rigides. Des forces cohésives de traction existent initialement entre les particules (voir par exemple Delenne *et al.*, 2004), donnant ainsi au grain sa résistance initiale. On suppose alors que, pour une interface notée I , d'aire caractéristique $S \propto (D_p)^2$ en 3D et $S \propto (D_p)$ en 2D, soumise à une force de tension suffisamment élevée, la microfissuration et/ou la microcavitation puissent se développer, provoquant ainsi l'initiation de l'endommagement au niveau de l'interface et éventuellement la rupture de cette interface.

A la suite de cette introduction, la section 2 est dédiée à la présentation du modèle à interfaces cohésives basé sur une évolution de l'endommagement qui se fait de manière progressive et différée par rapport au chargement. Des simulations numériques illustratives sont présentées dans la section 3. Elles représentent des essais de compression œdométrique en deux dimensions d'un milieu granulaire composé d'enrochements modèles de barrage.

2. UN MODELE D'ENDOMMAGEMENT A INTERFACES COHESIVES ENDOMMAGEABLES

Le système (thermo) dynamique considéré dans cette section est une interface I entre deux grains. Tout comme les grains et les particules, l'interface I est supposée rigide : l'aire de la surface S occupée par I est alors constante, quelles que soient les forces s'appliquant sur l'interface. De plus, le saut de déplacement $\llbracket u \rrbracket$ à travers la surface S est supposé nul tant que l'interface I n'est pas détruite (i.e tant que S est clairement définie) et ne peut être considéré comme variable d'état. On va alors considérer une variable d'état (en l'occurrence interne) d pour caractériser l'endommagement par microfissuration et/ou microcavitation du matériau constitutif de l'interface I . On suppose que $0 \leq d \leq d_{\max} \leq 1$. Le modèle impose que, dès que $d = d_{\max}$ l'interface I se rompt. La valeur seuil $d_{\max}$ sera expliquée plus loin. Les interactions entre les particules désolidarisées ne sont plus de nature cohésive : les particules sont alors en contact-frottement sec, dont les interactions sont décrites par les équations de Signorini-Coulomb (Moreau, 1988). Ces équations ne seront pas décrites dans le présent document.

Le modèle d'endommagement à interfaces cohésives est basé sur les travaux de (Marigo, 1981). Les potentiels et lois d'état thermodynamiques pour décrire le système thermodynamique ont été détaillées dans les travaux de (Bonelli *et al.*, 2006). La condition nécessaire et suffisante pour que la dissipation intrinsèque soit positive est simplement donnée par $\dot{d} \geq 0$. Nous notons σ les contraintes agissant sur S . On suppose que l'état de contraintes est uniforme dans S . On suppose d'autre part que la surface effective qui récupère les efforts n'est plus S en raison de l'endommagement, mais $(1-d)S$

qui représente la partie de S non occupée par les micro-cavités. L'état de contraintes est donc uniforme dans la surface $(1-d)S$ et nulle dans la surface occupée par les micro-cavités. La résultante des efforts intérieurs agissant sur l'interface est alors donnée par :

$$F = (1-d)S\sigma.N \quad [\text{Eq.1}]$$

On note $F_N = F.N$ la composante normale de F suivant N telle que $F_N > 0$ lorsque I est soumise à une force de traction. La force tangentielle associée est alors définie par $F_T = F - F_N.N$. On écrit $u_N = \square u \square . N$ le déplacement relatif normal et $\dot{u}_T = \square \dot{u} \square - \dot{u}_N.N$ la vitesse relative tangentielle.

On introduit ensuite une surface seuil d'endommagement, clairement inspirée par les travaux de Marigo (Marigo, 1981). Afin de respecter la cohérence entre le modèle d'endommagement interfacial ici présenté et les équations de Mohr-Coulomb et de Signorini, la surface seuil d'endommagement f^d est exprimée par :

$$f^d(F_N, F_t, d) = \frac{1}{\mu} |F_t| + F_N - F_0(1-d) \quad [\text{Eq.2}]$$

avec μ le coefficient de frottement entre particules quand I est rompue. $F_0 > 0$ est le seuil d'endommagement initial. Dès que d atteint d_{max} [Eq.2] se réduit à la surface seuil de Coulomb.

La rupture de l'interface I apparaît lorsque I est suffisamment endommagée, soit lorsque d atteint d_{max} et est contrôlée par la surface seuil de rupture suivante :

$$f^r(F_N, F_t, d) = \frac{1}{\mu} |F_t| + F_N - F_R(1-d) \quad [\text{Eq.3}]$$

où $F_R \geq F_0$ est la force maximale en traction que peut supporter I . F_R est encore appelée cohésion ou force à la rupture. La loi d'évolution de l'endommagement est donnée par la loi suivante :

$$\square d = \frac{1}{\eta} \left\langle \frac{f^d(F_N, F_t, d)}{F_0} \right\rangle H^-(-f^r(F_N, F_t, d)) + \delta(f^r(F_N, F_t, d)) \quad [\text{Eq.4}]$$

$\langle . \rangle$ correspond aux crochets de MacCauley et H^- est la fonction d'Heaviside modifiée telle que $H^-(x) = 0, \forall x \leq 0$. La distribution de Dirac δ indique que, dès que $f^r(F_N, F_t, d) = 0$, d « saute » à sa valeur maximale, et les surfaces seuils d'endommagement et de rupture se réduisent à une seule surface seuil, la surface seuil de Coulomb que l'on a déjà évoqué précédemment. Les particules ne sont pas alors autorisées à se recoller. Remarquons que la valeur d'endommagement de rupture d_{max} (avec $d_{max} < 1$) est différente pour chaque interface, et va dépendre de la résultante des efforts F qui lui est appliquée. Ainsi si $F \rightarrow F_0$ l'endommagement avant rupture aura plus le temps d'évoluer que si $F \rightarrow F_R$; l'occurrence de la rupture arrivera plus rapidement et l'endommagement n'aura que peu de temps pour évoluer. Ce modèle d'endommagement interfacial a été implémenté dans un logiciel de modélisation numérique discrète basée sur la méthode Non Smooth Contact Dynamics (LMGC90).

2.1. SIMULATIONS D'UN MILIEU GRANULAIRE SEC

Nous considérons un milieu granulaire constitué d'une collection de grains rigides en deux dimensions soumis à une compression œdométrique (pas de déplacements latéraux donc). L'état initial est visible sur la figure 1. L'échantillon (hauteur initiale $H=45$ cm, largeur $L=48$ cm) est composé de 75 grains (de diamètre compris entre 5 ou de 6 cm), et chaque grain est constitué de 55 à 75

particules, de diamètre D_p compris entre 5 et de 6 mm. Le nombre total de particules atteint $N_p=4980$. Les particules, de diamètre D_p , sont initialement « collées » entre elles pour constituer le grain. D'un point de vue numérique, D_p est représentative de la dimension caractéristique de la maille élémentaire du grain. Une analyse dimensionnelle permet d'écrire que $\sigma_0 \propto F_0 / (D_p^3 e)$ et $\sigma_R \propto F_R / (D_p^3 e)$ (dans le cas 3D on remplacera $(D_p e)$ par $(D_p)^2$). σ_0 représente une constante matérielle assimilable à la contrainte seuil d'endommagement, σ_R représente une constante assimilable à la contrainte seuil de rupture (ou contrainte de rupture instantanée en traction simple) et e est l'épaisseur unité. F_0 et F_R apparaissent être liés à la taille de la discrétisation D_p et sont donc des paramètres numériques : plus D_p est faible plus les forces seuils F_0 et F_R seront faibles. En revanche les paramètres σ_0 et σ_R peuvent être considérés comme des paramètres matériau, tout comme le rapport ou nombre sans dimension $r = F_0 / F_R = \sigma_0 / \sigma_R$. Dans toutes les simulations $\mu=1$.

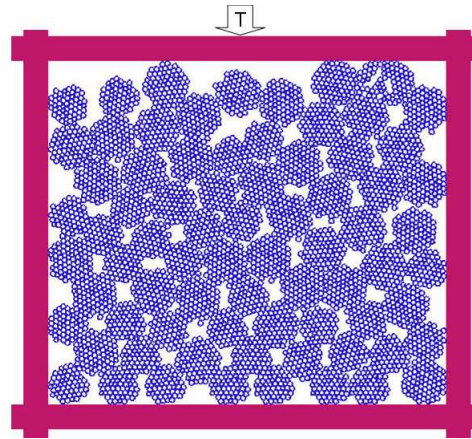


Figure 1 : Echantillon composé de 75 grains (blocs) soumis à un chargement axométrique (chaque grain est composé d'une soixantaine de particules collées entre elles initialement).

La déformation axiale est définie par $\varepsilon = |U| / L$ où U est le déplacement macroscopique induit par la force appliquée T . La contrainte axiale est notée σ telle que $\varepsilon = |T| / (eL)$ avec e l'épaisseur (unité) de l'échantillon. On pose ensuite v le rapport entre les interfaces cohésives restantes sur le nombre d'interfaces cohésives initiales.

Nous appliquons tout d'abord un échelon de force maintenu constant dans le temps, afin d'analyser la réponse du milieu granulaire soumis à une sollicitation de fluage. La figure 2 montre l'influence du temps caractéristique η . Ce paramètre décale d'une part la réponse du système dans le temps : plus η est élevé, plus le système évolue lentement, les tassements apparaissent plus tard par rapport à des valeurs de η plus faible (figure 2, gauche). La rupture est donc bien différée. D'autre part, la figure de droite montre qu'un adimensionnement du temps par le temps caractéristique est possible : η semble donc un paramètre adimensionnel pertinent. Du point de vue quantitatif, le paramètre η modifie légèrement la réponse du système, comme le montre l'évolution de v sur la figure 3 (gauche). Notons également que la fraction d'interfaces cohésives v évolue de la même manière que la déformation ε pendant la phase de fluage (figure 3, droite). Ceci signifie que la cinétique du système est gouvernée par les décohésions progressives d'interfaces.

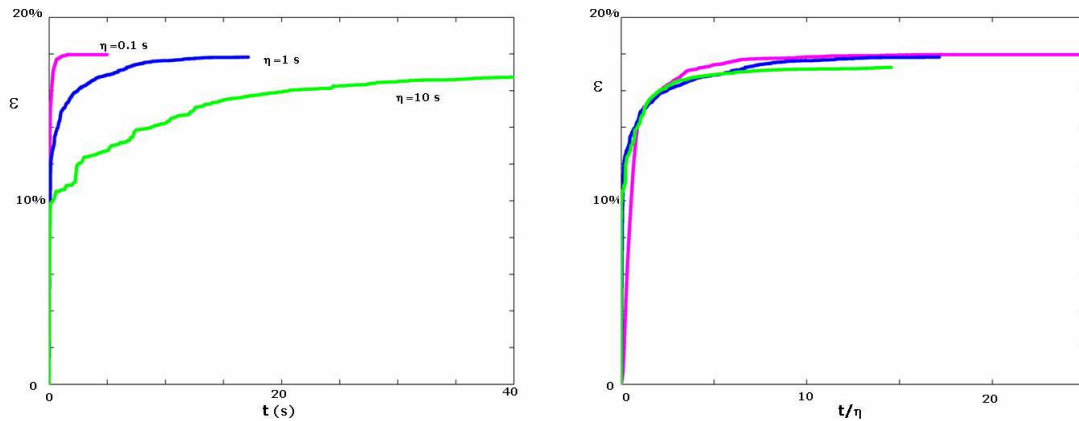


Figure 2 : Essai œdométrique de fluage. Influence du paramètre η . Déformation axiale en fonction du temps (à gauche) et en fonction du paramètre adimensionnel (à droite).
($r = 0.1$, $\sigma_R = 200$ kPa, $\sigma_{\text{chargement}} = 16$ kPa)

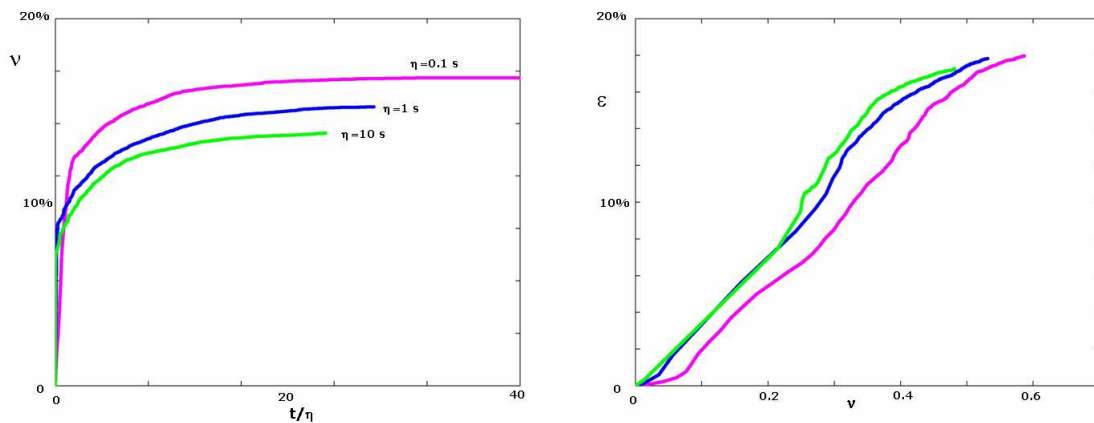


Figure 3 : Essai œdométrique de fluage. Influence du paramètre η . Fraction relative d'interfaces cohésives rompues en fonction du temps adimensionné (à gauche). Déformation axiale en fonction de la fraction relative d'interfaces cohésives rompues (à droite).
($r = 0.1$, $\sigma_R = 200$ kPa, $\sigma_{\text{chargement}} = 16$ kPa)

On réalise ensuite une analyse paramétrique sur la contrainte seuil d'endommagement σ_0 , σ_R est fixé ($\sigma_R = 200$ kPa). La figure 4 (droite) montre que r influence l'amplitude de la déformation durant la phase de fluage. Notons que le cas où $r \rightarrow 1$ correspond à une interface parfaitement fragile alors que le cas où $r \rightarrow 0$, correspond à une surface seuil d'endommagement avec un seuil d'endommagement nul. Ces deux cas représentent les bornes inférieure et supérieure de la réponse finale. Une analyse paramétrique sur la contrainte seuil de rupture σ_R est également menée ($\sigma_0 = 50$ kPa). La figure 4 (gauche) montre que le seuil de rupture σ_R a une influence sur l'amplitude de la déformation différée, phase qui s'opère après la déformation instantanée suite à l'application de l'échelon. Ainsi l'amplitude des déformations différées sera d'autant plus grande que r est faible (ou σ_R élevé). Il est cependant difficile de conclure sur l'amplitude des déformations finales.

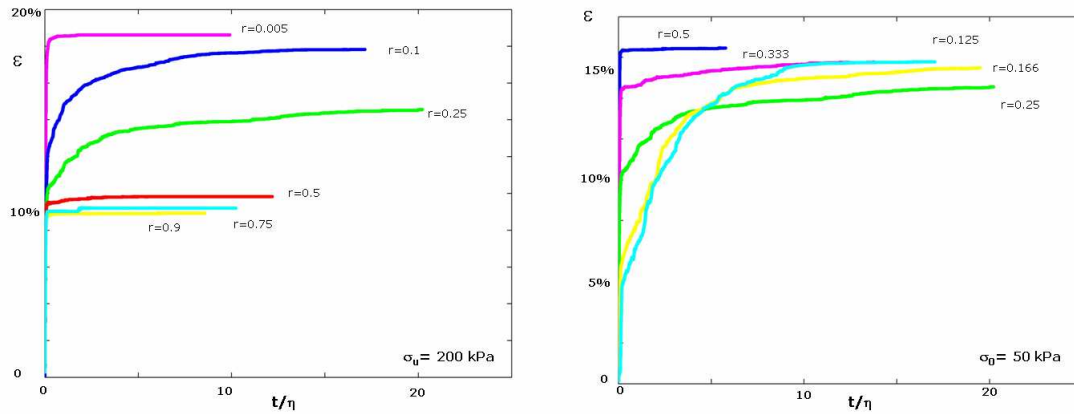


Figure 4 : Essai œdométrique de fluage. Influence du paramètre r . σ_0 variable et $\sigma_R = 200$ kPa (à gauche), σ_R variable et $\sigma_0 = 50$ kPa (à droite). ($\eta = 1$ s, $\sigma_{\text{chargement}} = 16$ kPa)

Ensuite, on examine la réponse en imposant au système une vitesse de contrainte constante. La figure 5 montre la réponse de l'échantillon sollicité à vitesse de contrainte constante. Les résultats montrent que le milieu étudié se comporte comme la plupart des milieux granulaires : le milieu présente une diminution de sa compressibilité lors de l'augmentation du chargement, ce qui conduit à une courbure convexe de la courbe de contrainte-déformation (le matériau se réorganise afin de résister à la charge axiale). On observe également des sauts de déformation axiale, qui correspondent à des ruptures brutales d'un ou de plusieurs grains de façon simultanée. Lorsqu'on arrête le chargement, si on choisit de maintenir la contrainte constante dans le temps, on obtient alors une réponse au fluage. Si on choisit de maintenir la déformation constante, on observe alors une relaxation du matériau.

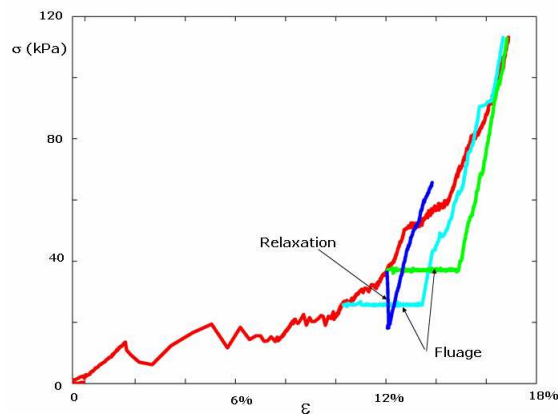


Figure 5: Essai de compression œdométrique à vitesse de contrainte constante illustrant le fluage du matériau à contrainte constante et la relaxation des contraintes à déformation imposée ($r = 0.5$, $\sigma_R = 200$ kPa, $\eta = 1$ s, $\dot{\sigma} = 11$ kPa/s).

2.2. SIMULATIONS D'UN MILIEU GRANULAIRE SATURÉ

On cherche ici à compléter les effets du temps sur la rupture de blocs rocheux en y ajoutant l'influence de l'eau. La présence d'eau induit des effets à court terme et à long terme sur le comportement mécanique des enrochements (Frossard, 2005). Le modèle doit donc être capable de reproduire les tassements instantanés lors du mouillage (encore appelée contraction ou effondrement sous mouillage) et au cours du temps, accélérés par la présence d'eau. Afin de tenir compte de la présence de l'eau, nous ferons les hypothèses fortes d'une infiltration instantanée et d'une répartition homogène de l'eau infiltrée à l'intérieur du grain. Ces hypothèses sont éloignées de la réalité : la diffusion de l'eau dans les roches est un phénomène lent car diphasique puisque l'eau doit chasser l'air pour rentrer au cœur de la roche. Les hypothèses choisies, très défavorables, permettront cependant de saisir clairement l'influence de la variation des paramètres du modèle avec l'eau. On choisit de diminuer σ_0 et σ_R pour tenir compte de l'influence de l'eau. η reste fixé. L'introduction de l'eau dans le milieu a d'autres effets en plus de la diminution de la résistance des roches avec l'eau : elle induit des forces de déjaugage et elle favorise le glissement entre les blocs à l'intérieur du milieu. Les travaux de (Silvani *et al.*, 2007) ont montré que ces effets avaient peu d'influence sur l'évolution du milieu, ils seront donc ici négligés. Dans les simulations suivantes $\eta = 1s$. On se limite ici à des simulations de fluage pour évaluer le comportement du milieu saturé.

On reprend le dispositif expérimental et le même matériau de la figure 1. Dans cet essai, on diminue instantanément les seuils d'endommagement et de rupture, pendant les essais de fluage. On considère que le matériau sec correspond au paramètre $r = 0.25$. σ_0 est diminué instantanément de 20, 40, 60 et 98% (figure 6, gauche). L'amplitude des déformations différées est bien toujours proportionnelle à la diminution de σ_0 . La présence d'eau permet donc d'accélérer les déformations de fluage du milieu granulaire. Ensuite σ_R est diminué instantanément de 10, 25, 40 et 50% (figure 6, droite). Lors de la diminution de σ_R , il existe une composante instantanée (déformation de pente infinie au moment de la saturation, surtout significative lorsque σ_R diminue de 40 ou 50%) ainsi qu'une composante différée dans la déformation ; alors que lors de la diminution de σ_0 il existe seulement une composante différée dans la déformation. Lorsqu'on diminue σ_R , le seuil de rupture est abaissé instantanément ; il en découle des décohésions instantanées qui induisent la composante instantanée des déformations. Alors que lorsqu'on diminue σ_0 , c'est le seuil de d'endommagement qui est abaissé instantanément, les interfaces vont s'endommager à des contraintes plus faibles et à des vitesses plus élevées, ce qui va seulement agir sur la composante différée des déformations.

3. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons introduit un modèle à interfaces cohésives endommageables afin de reproduire la rupture progressive et différée de blocs rocheux sous chargement constant. Ces ruptures sont d'une importance majeure, car elles sont la cause principale des tassements post-construction des barrages en enrochements. D'autre part, elles sont favorisées également au moment du remplissage. Une approche discrète est retenue afin de tenir compte de la nature discontinue des ouvrages en enrochements. Chaque bloc est modélisé comme un assemblage de particules liées par cohésion. Les simulations d'essais œdométriques montrent que le modèle permet de reproduire la phénoménologie observée en expérimental avec très peu de paramètres. L'influence de l'eau sur la rupture est également étudiée et intégrée dans le modèle d'endommagement interfacial, en supposant un degré de

saturation uniforme à l'intérieur du bloc. On considère que les seuils d'endommagement et de rupture sont affectés par l'eau. L'étude paramétrique montre que le modèle permet de reproduire les déformations instantanées et différées lors du mouillage. L'étude des phénomènes de rupture dans les barrages est un problème important car les tassements induits peuvent mener à des fissurations puis à la rupture du noyau étanche à l'intérieur de ces ouvrages.

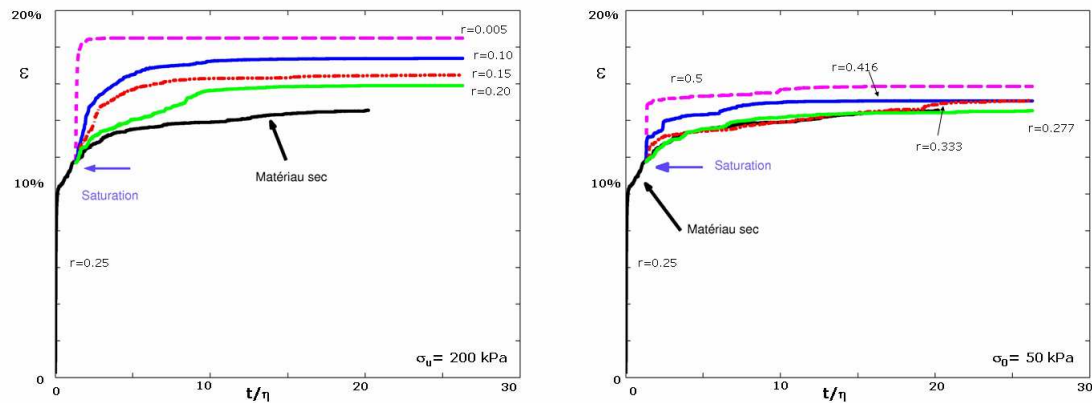


Figure 6 : Evolution des déformations de fluage lors la saturation avec σ_0 variable et $\sigma_R = 200$ kPa (à gauche), σ_R variable et $\sigma_0 = 50$ kPa (à droite). ($\eta = 1$ s, $\sigma_{\text{chargement}} = 16$ kPa).

4. BIBLIOGRAPHIE

- Bonelli S., Désoyer T., Silvani C. (2006) « Fracture of rigid solids: a discrete approach based on a damaging interface modelling » Soumis à *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*.
- Delenne J.Y., El Youssofi M.S., Cherblanc F., Bénét J.C. (2004) « Mechanical behaviour and rupture of cohesive granular media » *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 28, p. 1577-1594.
- Deluzarche R. (2004), « Modélisation discrète des enrochements- Application aux barrages », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon.
- Frossard E. (2005) « Note sur le comportement macroscopique des matériaux granulaires mis en œuvre dans les barrages » Note interne du projet MICROBE, Coyne et Bellier.
- Jean M. (1999) « The non-smooth contact dynamics method » *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol.177, p. 235-257.
- Marigo J.J. (1981) « Formulation d'une loi d'endommagement d'un matériau élastique » *C. R. Acad. Sci. Paris*, série II, t292, p. 1309-1312.
- Moreau J.J. (1988) « Unilateral contact and dry friction in finite freedom analysis » In J.J Moreau and P.D Panagiotopoulos, éditeurs: *Non Smooth Mechanics and Application, chapitre CISM Courses and Lectures*, vol.302, Springer-Verlag, p. 1-82.
- Silvani C., Bonelli S., Philippe P., Désoyer T. (2007) « Buoyancy and local friction effects on rockfill settlements: a discrete modelling » *Computers and Mathematics with Applications*, à paraître, vol.x, p. xx.
- Tran H. (2006), « Analyse et modélisation du vieillissement des barrages en enrochements par une approche micromécanique », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon.