MODELISATION DU COMPORTEMENT AU SEISME DES REMBLAIS SATURES AVEC CODE-ASTER

Modelling the seismic behaviour of saturated embankment dams with Code-Aster

Philippe KOLMAYER, Astrid MONDOLONI
EDF Hydro CIH 4 Allée de Tignes, 73290 La Motte Servolex
philippe.kolmayer@edf.fr ; astrid.mondoloni@edf.fr

Marc KHAM, Vinicius ALVES FERNANDES
EDF R&D, 7 bd Gaspard Monge, 91120 Palaiseau
marc.kham@edf.fr ; vinicius.alves-fernandes@edf.fr

MOTS CLEFS

Barrage en terre, terres, sol saturé, pression interstitielle, séisme, sollicitations cycliques, modèle de comportement élastoplastique cyclique.

KEY WORDS

Embankment dams, earth, saturated soil, pore pressure, earthquake, seismic loading, elasto-plastic constitutive model for cyclic behaviour

RÉSUMÉ

Les barrages en remblai sont le type de barrage le plus sensible aux séismes, notamment lorsqu'ils présentent un risque de montée de pression interstitielle. De nombreux désordres observés sur plusieurs d'entre eux suite à des phénomènes de liquéfaction dans la structure ou en fondation en attestent. Cependant, les remblais modernes, mieux compactés, résistent souvent bien malgré des sollicitations sismiques pouvant être très élevées. Les méthodes d'analyse doivent pouvoir rendre compte de ces deux constats pour être sécuritaire et économique. Des modélisations numériques avancées, fortement non linéaire, permettent de satisfaire ces deux objectifs.

La présente communication vise à décrire la méthodologie développée par EDF autour de la loi de comportement de Hujeux et de Code_Aster applicable pour reproduire toutes phases de la vie d'un barrage en remblai (construction, mise en eau, séisme, réplique, vidange rapide).

L'utilisation des éléments finis permet de modéliser les structures en remblai dans toutes leur complexité géométrique, (en particulier des barrages zonés) dont les matériaux constitutifs ou de fondation sont susceptibles de présenter des montées de pression interstitielle. L'approche couplée en contraintes effectives permet d'intégrer les effets favorables des dissipations de pression, mais aussi de prédire le comportement post-sismique des structures, voire éventuellement d'enchainer plusieurs calculs sismiques ou de justifier des effets d'un confortement en statique ou au séisme.

Le modèle de Hujeux est brièvement présenté et sa capacité à représenter les phénomènes physiques essentiels du comportement cycliques est illustrée. Les spécificités numériques de la méthodologie concernant les conditions aux limites, les conditions initiales et l'amortissement sont exposées. Enfin la méthodologie est mise en œuvre sur deux cas extrêmes de comportement de barrage en remblai au séisme : le glissement du parement amont du barrage de Von Norman Inférieur lors du séisme de San Fernando ; le bon comportement du barrage d'Aratozawa lors du séisme de Iwate-Miyagi pour lequel des enregistrements de l'accélération et des mesures de pression interstitielle dans le remblai rendent possible une validation quantitative de la méthodologie.

ABSTRACT

Embankment dams are the most sensitive type of dam to earthquakes, as can be seen from the disturbances observed on several of them following the liquefaction of the materials constituting the embankment or foundation. On the other hand, modern embankments are able to withstand very high seismic loads.

Methods of analysis must be able of accounting for these two findings in order to be safe and economical. Highly non-linear numerical modelling approaches satisfy both objectives. This communication describes the methodology developed by EDF around the constitutive model of Hujeux and Code-Aster to analyze any phase of the life of an embankment dam (construction, impoundment, earthquake, aftershock, rapid drawdown).

Using a finite-element code makes it possible to model the whole geometry of the structures, in particular zoned dams or the particular stratigraphy of their loose foundation materials which are likely to show pore pressure increases. The coupled effective stress approach allows for the integration of the favourable effects of pore pressure dissipations, but also predicts the post-seismic behaviour of the structures, or possibly several seismic calculations or to justify the effects of a static or seismic reinforcement.

The Hujeux model is briefly described and its ability to represent the essential physical phenomena of cyclic behaviour is illustrated. The numerical specificities of the methodology concerning boundary conditions, initial conditions and damping are explained. Finally the methodology is applied on two extreme historical cases of embankment dams subjected to strong motions: the sliding of the upstream face of Lower Von Norman dam during the San Fernando earthquake; the good behaviour of the Aratozawa dam during the Iwate earthquake for which acceleration records and pore pressure measurements are available, enabling a quantitative validation of the methodology.

1. INTRODUCTION

Le retour d'expérience mondial montre que les barrages sont des ouvrages qui résistent bien aux sollicitations sismiques. Les barrages en remblai s'avèrent toutefois le type de barrage le plus sensible, en particulier lorsque le séisme peut générer des pressions interstitielles. Les barrages de Sheffield (E.U), Chang (Inde) et Fujinuma (Japon) se sont ainsi rompus après que les matériaux du barrage ou de la fondation se sont liquéfiés. Sur le barrage de Van Norman (E.U.) la rupture n'a été évitée que miraculeusement lors du séisme de San Fernando après la liquéfaction du remblai hydraulique amont. A l'inverse les remblais modernes se comportent bien au séisme même pour des sollicitations extrêmes comme le montre le cas du barrage d'Aratozawa qui a été soumis jusqu'à 1g à la sa base.

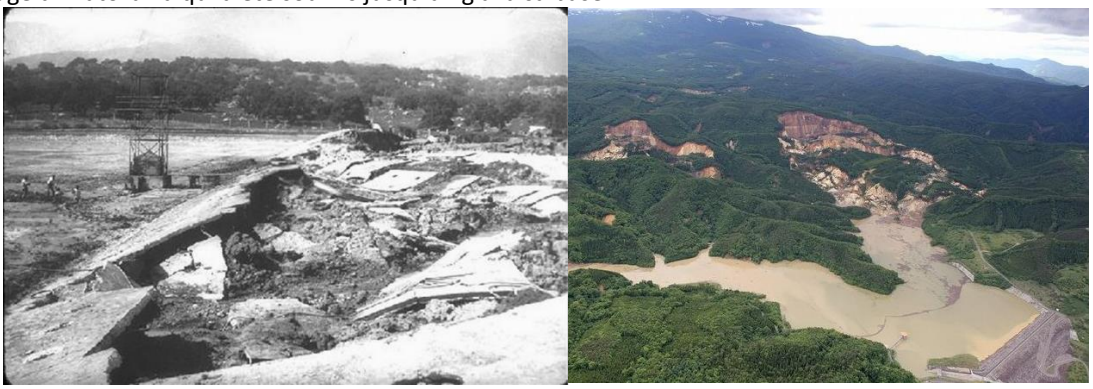

Figure 1: rupture du barrage de Sheffield (1925) et le barrage d'Aratozawa (2008) avec le glissement de terrain

Entre ces deux extrêmes, les méthodes d'analyse, pour être pertinentes, se doivent d'être suffisamment sécuritaires pour garantir la sûreté hydraulique, mais aussi les plus fines et les plus représentatives possible pour éviter le cumul des conservatismes et fournir les variables d'intérêt pour l'analyse de la stabilité[1].

La présente communication vise à décrire la méthodologie développée par EDF autour de la loi de comportement de Hujeux et de Code_Aster applicable pour reproduire toutes les phases de la vie d'un barrage en remblai (construction, mise en eau, séisme, réplique, vidange rapide). L'utilisation des éléments finis permet de modéliser les structures en remblai dans toutes leurs complexités géométriques, en particulier des barrages zonés dont les matériaux constitutifs ou de fondation sont susceptibles de présenter des montées de pression interstitielle. L'approche couplée en contraintes effectives permet d'intégrer les effets favorables des dissipations de pression, mais aussi de prédire le comportement post-sismique des structures, voire éventuellement d'enchainer plusieurs calculs sismiques ou de justifier des effets d'un confortement en statique ou au séisme. La capacité du modèle de Hujeux à capter les phénomènes physiques lors d'un séisme est décrite et la juste représentation de la méthodologie est exposée à travers les applications sur les barrages de Van Norman Inférieur et Aratozawa.

2. LES ASPECTS ESSENTIELS DU COMPORTEMENT CYCLIQUE DU SOL SATURE ET LE MODELE DE HUJEUX

Les aspects essentiels du comportement dynamique dont doit être capable de rendre compte un modèle de comportement adapté au cas des sols avec montée de pression interstitielle [1]concernent :

1) La dépendance de la rigidité à l'état de contrainte : la variation de la vitesse des ondes de cisaillement avec la profondeur est la manifestation évidente de cette dépendance. Sur ouvrage, il est toujours possible d'approcher les profils de vitesse à partir de corrélations de la littérature [10], mais cette dépendance doit être modélisée si l'on souhaite intégrer soit le remplissage de la retenue, soit l'influence des variations de pression interstitielle induites par le séisme qui peuvent fortement diminuer les contraintes effectives.
2) Le comportement déviatoire du sol sous sollicitation de cisaillement : la réponse d'un échantillon de sol lors d'un essai cyclique de cisaillement pur à déformation imposée permet de dégager deux courbes essentielles du comportement du sol , la courbe de dégradation du module de cisaillement (équivalent) et la courbe d'amortissement du matériau fonction toutes deux de l'amplitude de la déformation imposée lors des cycles. La littérature est riche de telles courbes tenant compte de la nature des matériaux (argile, sable graviers). Ces courbes sont, par ailleurs, à la base de la méthode dite « linéaire équivalente ».
3) Le comportement volumique sous sollicitation déviatoire : en condition drainée le sable lâche se densifie sous une sollicitation cyclique tandis qu'en condition non drainée il présente des montées de pression interstitielle. La juste représentation de cette évolution des pressions (ou des déformations volumiques) est essentielle pour les matériaux saturés lâches car elle est à l'origine du phénomène de liquéfaction observé pour ces matériaux. À l'inverse un matériau plus dense voit son caractère contractant limité et présente pour des cisaillements plus importants une diminution des pressions interstitielles sous l'effet de la dilatance qui confère au matériau un regain de rigidité. Enfin l'état de contrainte initial avec en particulier un déviateur autour duquel sont réalisés les cycles de contraintes modifie l'amplitude des variations de pression interstitielle [12].
4) Le comportement volumique sous sollicitation isotrope : il s'agit d'un aspect secondaire du comportement dynamique des sols car la sollicitation sismique impose principalement une sollicitation de cisaillement.

La loi de comportement de Hujeux [5] est un modèle élastoplastique à plusieurs mécanismes développée pour rendre compte du comportement cyclique des géomatériaux évoqués précédemment Dans sa partie monotone, le modèle comprend 3 mécanismes déviatoires correspondant aux trois plans orthogonaux de l'espace (eq.1) et un mécanisme isotrope pour le comportement volumique (eq.2). Les invariants de contraintes p_i et q_i relatifs aux mécanismes déviatoires correspondent respectivement à la trace et au second invariant des contraintes déviatoires après projection du tenseur de contraintes sur le plan i considéré. L'equation 4 permet de rendre compte de la contractance/dilatance (avec $\dot{\varepsilon}_{vi}^p$ et $\dot{e}_{vi}^p$ 4 correspondant respectivement aux incréments de déformations volumiques plastiques et déviatoires pour le mécanisme du plan i) et reprend le concept de l'état critique (eq.3) où p_c et p_{c0} sont la pression critique et la pression critique initiale correspondant à l'état de densité de référence du matériau. Le paramètre d représentant la distance entre la droite d'état critique et la droite de consolidation isotrope dans le plan (ln(p'),e). Les mécanismes sont couplés via la pression critique dont l'évolution dépend de la déformation volumique plastique totale ε_v^p. Le modèle possède pour chaque mécanisme monotone son pendant cyclique. En détectant les cycles charge/décharge le modèle réinitialise les mécanismes cycliques, mais garde en mémoire l'extension monotone de chaque mécanisme.

$$f_i\left(q_i, p_i, \varepsilon_v^p, r_i\right) = q_i - p_i \ sin\,\varphi \left(1 - b \ ln\left(\frac{p_i}{p_c}\right)\right) r_i \quad \text{i} \in [1,3] \qquad \textbf{EQ.1}$$

$$f_{iso}\left(p', \varepsilon_v^p\right) = p' - p_c \ d \ r_{iso} \qquad \textbf{EQ.2}$$

$$p_c = p_{c0} \ exp\left(\beta \ \varepsilon_v^p\right) \qquad \textbf{EQ.3}$$

$$\frac{\dot{\varepsilon}_{vi}^p}{\dot{e}_{vi}^p} = \alpha \ \left(sin\,\psi - \frac{q_i}{p_i}\right) \qquad \textbf{EQ.4}$$

L'évolution de l'écrouissage isotrope et cinématique est basé sur la déformation plastique, déviatoire pour les mécanismes déviatoires et volumique pour le mécanisme isotrope.

$$r_i = r_i^{ela} + \frac{\int \varepsilon_{d\,i}^p dt}{a_{cyc} + (a_{mon} - a_{cyc})\alpha(r_i) + \int \varepsilon_{d\,i}^p dt} \quad \text{i}\in[1,3] \qquad \textbf{EQ.5}$$

La variable d'écrouissage r_i correspond au rayon mobilisé par le mécanisme pour l'état de contrainte actuel. Le comportement du matériau dépend de ce rayon et des différents rayons caractéristiques qui sont des paramètres du modèle pour les mécanismes déviatoires (3 rayons) comme isotrope (1 rayon). Ainsi le comportement du sol peut être décomposé suivant trois sous-domaines:

- Domaine élastique sans dissipation d'énergie et des déformations réversibles.

$$K = K_0 \left(\frac{p}{p_{ref}}\right)^n \text{ et } G = G_0 \left(\frac{p}{p_{ref}}\right)^n \qquad \textbf{EQ.6}$$

- Domaine hystérétique ou pseudo-élastique: de l'énergie est dissipée à l'apparition des déformations déviatoires plastiques, mais aucune déformation volumique associée n'est générée.

$$\alpha(r_i) = 0 \ si \ r_i < r^{hyst} \qquad \textbf{EQ.7}$$

- domaine intermédiaire pour lequel des déformations volumiques associées aux déformations de cisaillement sont générées.

$$\alpha(r_i) = \left(\frac{r_i - r^{hyst}}{r^{mob} - r^{hyst}}\right)^m \ si \ r_i > r^{hyst} \qquad \textbf{EQ.8}$$

- domaine mobilisé pour lequel toute la résistance au cisaillement est mobilisée.

$$\alpha(r_i) = 1 \ if \ r_i > r^{mob} \qquad \textbf{EQ.9}$$

Les paramètres du modèle sont donnés dans le tableau ci-après.

Paramètres élastiques	K_0 (MPa), G_0 (MPa), n
Angle de frottement et de dilatance	ϕ, ψ
Paramètres des seuils plastiques	b, d
Paramètres d'état critique	p_{c0}, β
Paramètres d'écrouissage des mécanismes déviatoires et isotropes	a_mon, a_cyc, c_mon, c_cyc
Paramètres gérant les déformations volumiques plastiques	α, m
Rayons caractéristiques des mécanismes	r^{ela}, r^{hyst},r^{mob}, r^{iso}

La formulation de l'élasticité non linéaire permet de rendre compte de la dépendance des modules élastiques avec l'état de contrainte. Il est ensuite possible de retrouver analytiquement (eq.10) les différents paramètres en fonction des profils de vitesse et du coefficient de Poisson donnés par [10].

$$V_s(z) = \sqrt{\frac{G(z)}{\rho}} = \sqrt{\frac{G_0 \ (p'/p_0)^n}{\rho}} = V_{S0} \ z^m \qquad \textbf{EQ.10}$$

avec z la profondeur et m un paramètre fonction du matériau et de l'état de saturation [10].

Grâce aux différents domaines de comportement et à l'écrouissage progressif du rayon r_i, le modèle est capable de reproduire la courbe de dégradation G/G_{max} et la courbe d'amortissement. Le rayon élastique conditionne la déformation de début de la dégradation et explique l'absence d'amortissement initial. L'activation des déformations volumiques lors du passage du domaine hystérétique au domaine intermédiaire explique l'allure parfois non monotone des courbes au voisinage du rayon hystérétique.

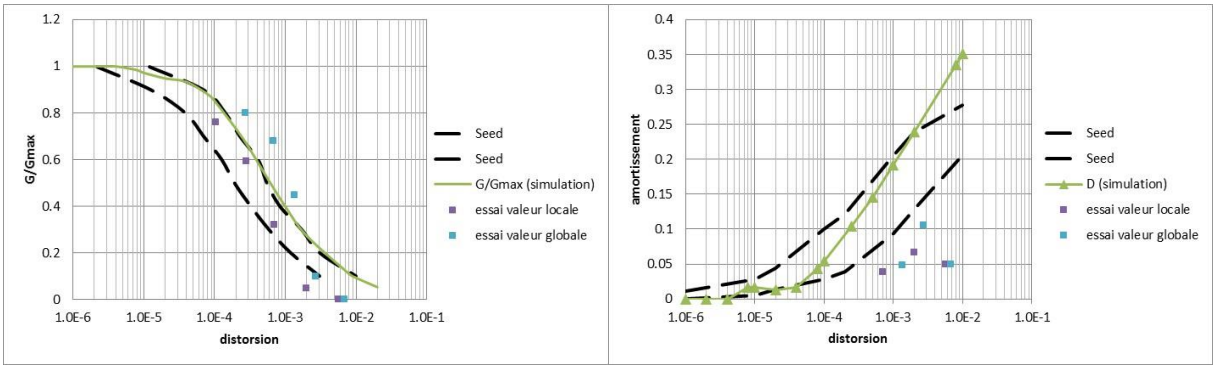

Figure 2: comparaison des courbes de dégradation et d'amortissement pour un sable du Rhône avec les fuseaux de Seed [9] (globale et locale correspondant à des analyses sur toute la hauteur de l'échantillon ou uniquement autour de la jauge de déformation collée sur une portion de celle-ci)

Via le couplage entre les incréments de déformation volumique et de déformation déviatoire, le modèle génère lors d'essais triaxiaux cycliques non drainés à contrainte imposée des pressions interstitielles augmentant avec la contrainte de cisaillement relative. Ces essais répétés pour différents confinements et déviateurs de contraintes permettent de tracer la courbe de liquéfaction normalisée dans le plan « nombre de cycles-Cyclic Stress Ratio ».
Le calage des paramètres est facilité par l'utilisation de la macro-commande CALC_ESSAI_GEOMECA qui permet de réaliser avec Code-Aster les simulations correspondant aux essais géotechniques de laboratoire classiques sur un point matériel (triaxiaux drainés et non drainés en monotone ou cyclique, œdomètre, essai de cisaillement cyclique) et de visualiser rapidement les résultats.

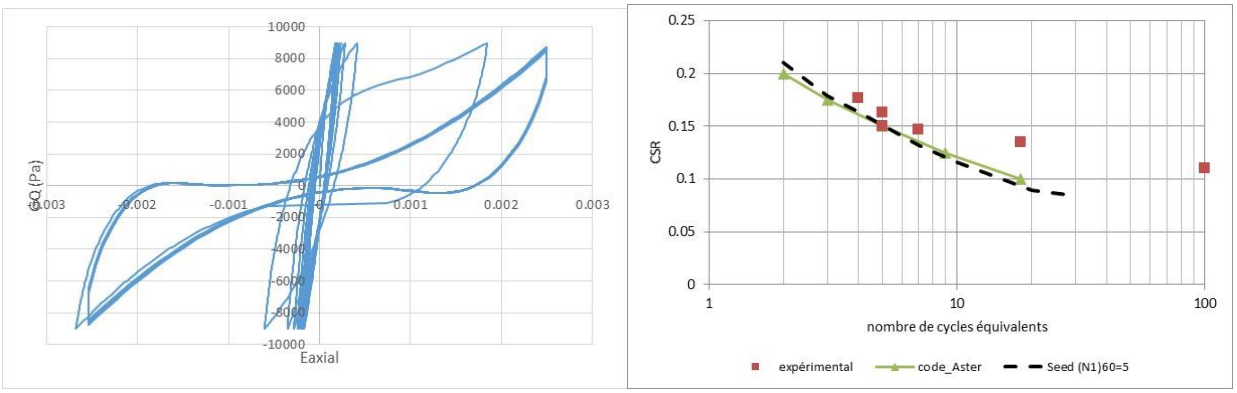

Figure 3: triaxial cyclique dans le plan axial,q et courbe de liquéfaction dans le plan « nombre de cycles-CSR » pour un sable du Rhône

3. AUTRES ASPECTS PRATIQUES DE LA METHODOLOGIE DANS CODE-ASTER

3.1.Dimension du maillage

Pour une bonne modélisation de la propagation des ondes de fréquence f_0, il est usuellement conseillé de disposer d'environ 8 éléments (en linéaire) ou 8 nœuds (en quadratique) pour la longueur d'onde λ=Vs / f_0 où f_0 est la plus grande fréquence d'intérêt et Vs la vitesse des ondes de cisaillement. Il est conseillé de respecter cette condition d'autant que la distorsion et les montées de pression interstitielle tendent à réduire la vitesse des ondes de cisaillement et donc à restreindre la plage de fréquence pour une juste modélisation.

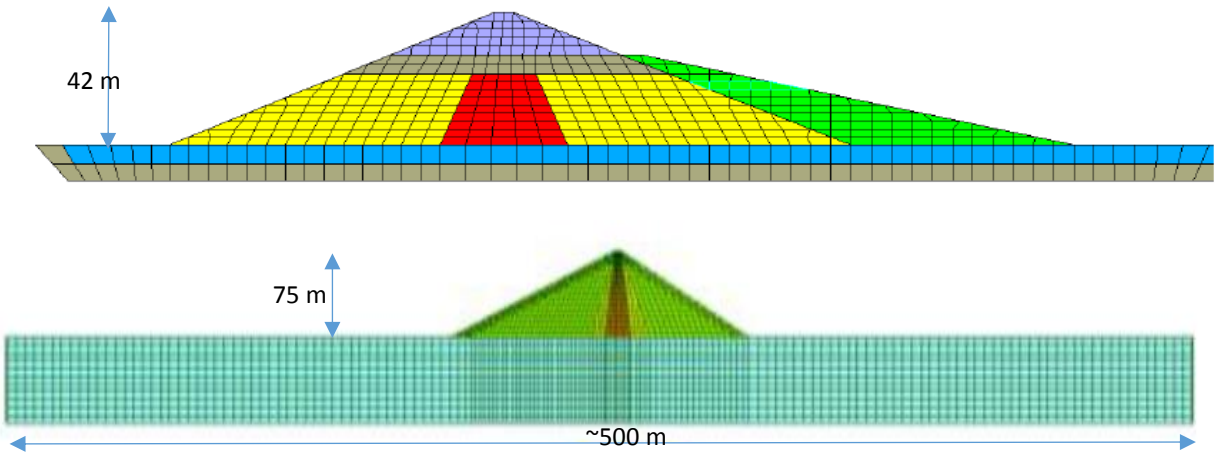

Figure 4: exemple de maillages utilisés pour les barrages de Van Norman (haut) et Aratozawa (bas)

3.2.Conditions initiales

La méthodologie développée vise à prédire directement les déformations irréversibles induites par le séisme grâce aux différents mécanismes plastiques. Elle nécessite donc un état de contrainte initial réaliste, aussi proche que possible de l'état existant sur l'ouvrage. Dans ce but, la méthodologie reproduit au mieux les différentes phases de la vie de l'ouvrage, construction, mise en eau, consolidation, permettant aussi une vérification de la pertinence de la modélisation par comparaison avec des mesures d'auscultation. L'état de contrainte calculé conditionne les profils de vitesse et donc la bonne propagation des ondes de cisaillement dans la structure.

3.3.Conditions aux limites

Les fortes non linéarités de la loi de comportement conduisent à restreindre autant que raisonnable les dimensions du modèle. Les petites dimensions de la fondation ne permettent pas toujours de s'affranchir des effets de bord sur les ondes diffractées par le barrage. Ces effets indésirables sont atténués par l'utilisation d'éléments absorbants placés autour de la fondation (bleu sur la Figure 5).
Ces éléments servent également à introduire l'accélérogramme sous la forme d'une onde plane de cisaillement à incidence verticale (en rose sur la Figure 5). La transposition du signal à la base de la fondation nécessite une déconvolution qui peut être réalisée avec une approche linéaire équivalente avec la commande DEFI_SOL_EQUI de Code_Aster.
La méthodologie prévoit une étape de modification des conditions aux limites entre les phases statiques et le calcul sismique : les conditions d'encastrement des premières sont remplacés par des ressorts (en noir sur la Figure 5) précontraints (en vert sur la Figure 5) permettant d'assurer le parfait équilibre du système avant l'application du signal sismique et d'imposer des vitesses pour appliquer l'onde plane incidente tout en absorbant les ondes réfléchies. La forme « bateau » héritée des anciennes approches avec le code de calcul Gefdyn est remplacée par une forme rectangulaire (Figure 4). Elle rend possible d'imposer des conditions de champs libre qui peuvent être différentes sur les deux frontières latérales du modèle (Figure 5).

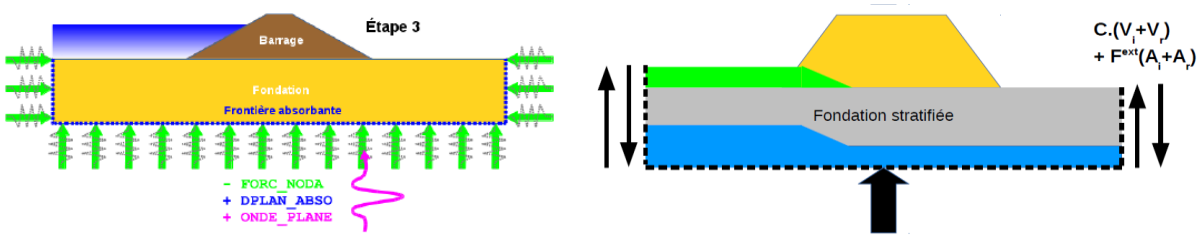

Figure 5: conditions aux limites imposées sur les faces inférieures et latérales du modèle pour le calcul sismique avec Code_Aster

3.4.Amortissement

La méthodologie introduit trois sortes d'amortissement de natures différentes : l'amortissement radiatif, l'amortissement numérique et l'amortissement matériau :

1) La modélisation avec des éléments absorbants qui empêchent le piégeage des ondes réfléchies dans le modèle de dimension finie évite d'introduire un amortissement radiatif dont le calage hors enregistrement est difficile à justifier.
2) Un amortissement numérique faible est introduit par le schéma numérique temporel implicite HHT [8]. Cet amortissement purement artificiel est souhaitable pour stabiliser le calcul en éliminant les oscillations hautes fréquences apparaissant au cours du calcul. Le schéma HHT présente la particularité de pouvoir, pour un pas de temps fixé, cibler les hautes fréquences (en général au-delà de 15 Hz) qui ne présentent pas d'intérêt pour le comportement au séisme des digues.
3) Enfin le plus important est l'amortissement matériau lié à la plastification du matériau. Ce dernier donné en Figure 2 diffère légèrement des données expérimentales. Cette évolution de l'amortissement d'une valeur nulle dans le domaine élastique du matériau à plus de 30% pour des distorsions supérieures à 10^{-2} permet de reproduire les phénomènes d'amplification à très faible distorsion mais aussi de désamplification pour les très fortes sollicitations (Figure 9) sans avoir à jouer sur l'amortissement numérique.

4. APPLICATION AU BARRAGE DE VAN NORMAN INFERIEUR

Le barrage de Van Norman inférieur est le cas historique de liquéfaction dans le monde des barrages. Reproduire le glissement suite à la liquéfaction du remblai amont lors du séisme de San Fernando est un impératif de validation de la méthodologie développée.

L'ouvrage est un barrage de type « remblai hydraulique » construit au début du 20ème siècle en Californie. L'ouvrage initial de 22 m a été rehaussé jusqu'à plus de 42 m et son pied aval a été renforcé par une recharge aval en enrochement pour en accroître la sécurité. Il a été touché par le séisme de San Fernando de février 1971 d'une magnitude de 6.6 sur l'échelle de Richter et avec une accélération maximale à la base de l'ouvrage évaluée à 0.59g. Le parement amont a glissé sur plusieurs dizaines de mètres et la crête de l'ouvrage s'est affaissée de plus de 8 m sous l'effet de la liquéfaction du remblai amont. Cette « quasi-rupture » est à l'origine de la réévaluation au séisme de très nombreux barrages en remblais. Le profil de rupture du barrage reconstitué par [9] est donné sur la Figure 6.

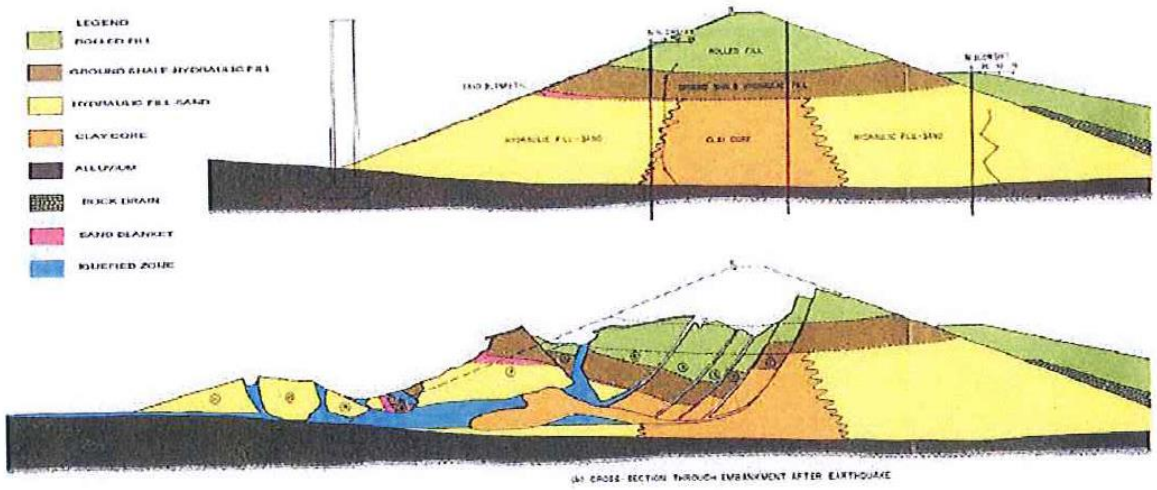

Figure 6 : coupe type initiale du barrage Van Norman Inférieur et profil de rupture reconstitué

Le calage des paramètres a été réalisé sur la base des données fournies par Seed[9]. En l'absence de profil de vitesse, on remarquera que le module de cisaillement retenu pour le sable du remblai conduit à une vitesse normalisée V_{s1}* des ondes de cisaillement voisine de 190 m/s soit inférieure à la limite de liquéfaction avancée par [11]. Le modèle rend compte de la densité particulièrement lâche du remblai hydraulique en affectant une valeur faible à la pression critique p_{ci}=80kPa. La Figure 7 illustre le mécanisme de rupture du remblai qui reproduit bien celui reconstitué par [9].

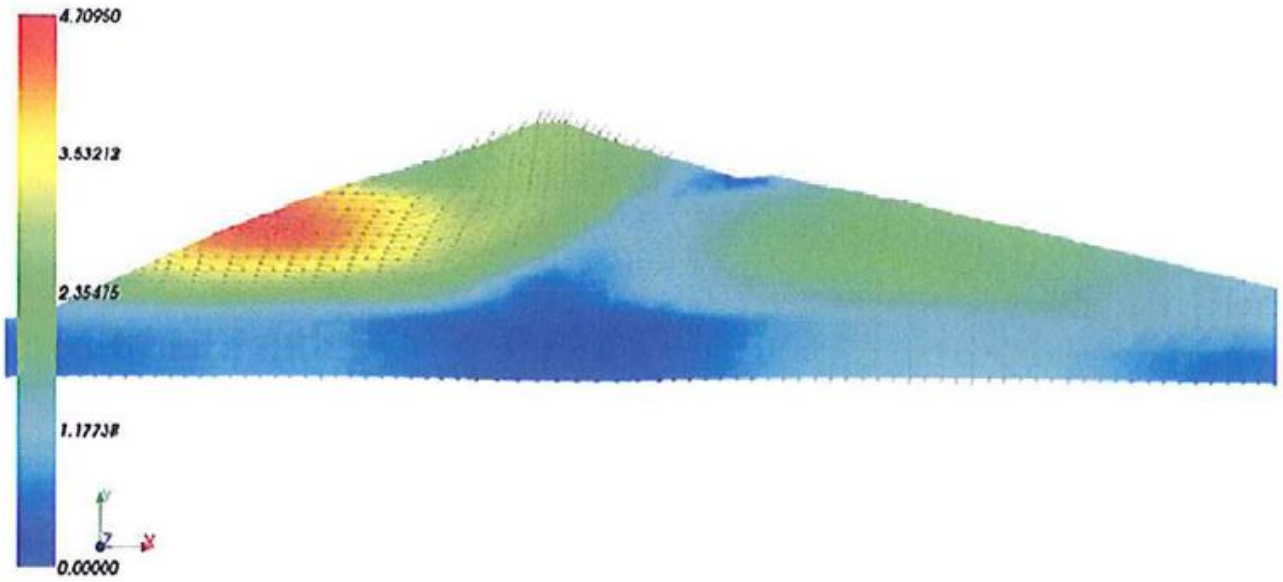

Figure 7: isovaleurs des déplacements (m) induits par le séisme à 15 secondes

5. APPLICATION AU BARRAGE D'ARATOZAWA

L'exemple du barrage d'Aratozawa proposé comme cas d'étude durant la collaboration CFBR-JCOLD est particulièrement intéressant pour tester les conservatismes de la méthodologie car malgré une accélération maximale à la base de 1g l'ouvrage n'a pas présenté de désordre significatif.

5.1.Présentation du barrage d'Aratozawa

Le barrage d'Aratozawa est un barrage zoné du nord du Japon, d'une hauteur de 75 m environ et fondé au rocher. Construit au début des années 2000, il a été frappé le 14 juin 2008 par le séisme d'Iwate-Myiagi Nairiku d'une magnitude de 7.2 et dont l'épicentre se trouvait à environ 15km. Les accélérations du séisme de 2008 ont été enregistrées par trois accéléromètres situés en galerie, au centre et en crête du barrage (Figure 8). L'accélération maximale dans la direction amont-aval mesurée à la base du barrage (en galerie) atteint 10.24 m/s^2, tandis que celle mesurée en crête est désamplifiée d'un facteur deux, à 5.25 m/s^2. Cet amortissement important laisse présager de l'influence prépondérante des non linéarités du sol sur cette réponse. Malgré cette très forte accélération à la base, l'ouvrage est resté parfaitement fonctionnel suite à ce séisme. Seules quelques fissures longitudinales, et un tassement en crête de 19 cm au niveau des parements, et d'environ 40 cm au-dessus du noyau ont été observés. Enfin, des capteurs de pression interstitielle positionnés dans le noyau (Figure 8) fournissent des mesures de pression hydraulique après le séisme de 2008. Par exemple, la pression interstitielle dans la cellule #16 a augmenté de 314kPa à 535kPa, soit $\Delta u = u - u_0 = 221kPa$ et $r_U = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v_0}} = 0.3$.

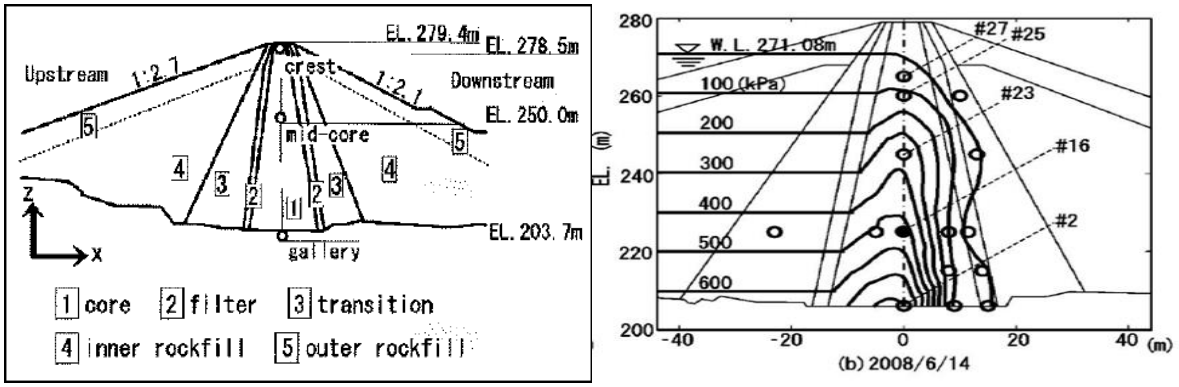

Figure 8 : coupe type initiale du barrage d'Aratozawa (position des capteurs et des mesures de pression interstitielle)

5.2.Comparaison des résultats

La méthodologie mise en œuvre a montré l'importance des profils de vitesse pour une juste propagation du signal sismique à travers le remblai. Les paramètres élastiques du modèle de Hujeux habituellement peu significatifs pour le comportement monotone sont déterminants pour retrouver la fréquence fondamentale initiale du barrage. Les calculs réalisés en mécanique pure, en bloquant la génération de pression interstitielle, permettent de reproduire la désamplification de l'accélération en crête illustrant le rôle primordial des courbes de dégradation et d'amortissement. Les calculs hydromécaniques modifient très peu les évolutions temporelles des accélérations, tandis que le tassement en fin de séisme est augmenté d'un dizaine de centimètres. L'approche couplée hydromécanique permet d'accéder aux montées de pression interstitielle qui sont assez bien reproduites par les différents jeux de paramètres testés en partie basse du barrage, mais surestimées en partie haute (Figure 10). La méthodologie autorise une prise en compte simplifiée de la non saturation sur la base du modèle de Boutonnier [13] qui permet une meilleure estimation des variations de pression dans les zones à faible pression en adaptant la compressibilité de l'eau.

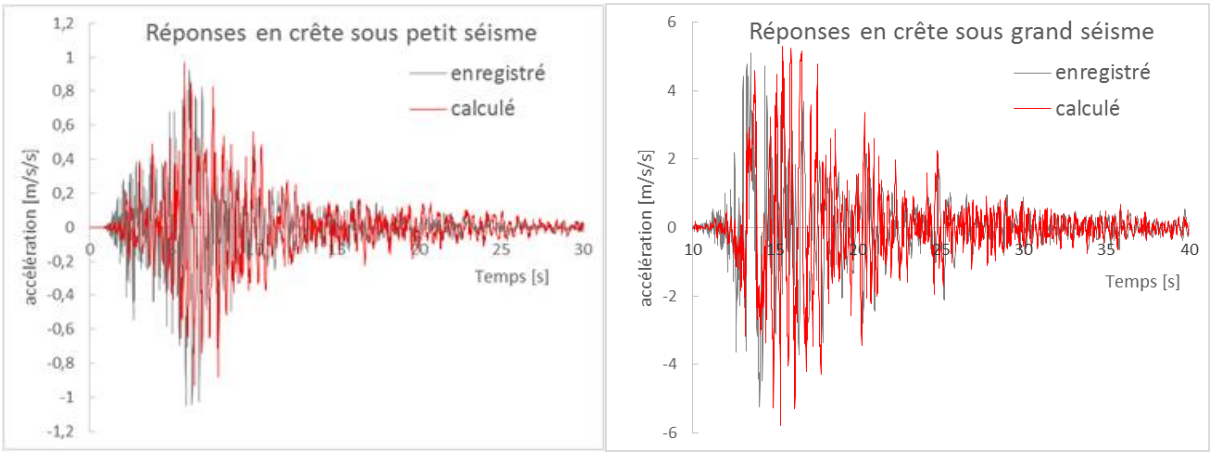

Figure 9: accélération en crête du barrage pour un petit séisme (0.025g) et le séisme de Iwate (1g)

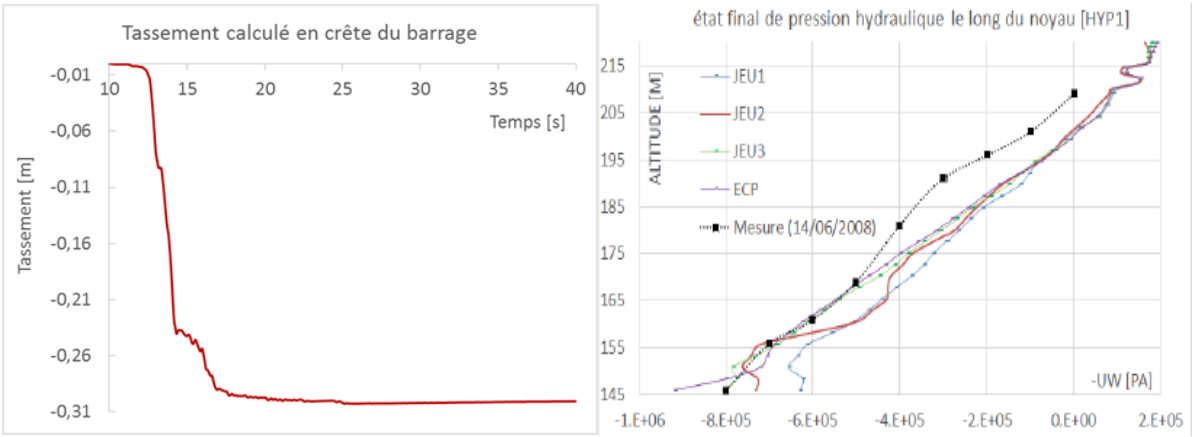

Figure 10: tassement en crête en cours de séisme (gauche) et pression interstitielle le long du noyau en fin de séisme

6. CONCLUSION

Les barrages en remblai dont les matériaux constitutifs de la structure ou de la fondation peuvent présenter des montées de pression interstitielle sont les plus sensibles au séisme. Une méthodologie basée sur les éléments finis et une loi rhéologique représentative constitue une approche complémentaire pertinente aux méthodes simplifiées. La méthodologie développée par EDF autour de Code_Aster et du modèle de Hujeux s'inscrit dans ce cadre.

Le modèle élastoplastique de Hujeux permet de rendre compte des principaux aspects du comportement cyclique des géomatériaux qu'il s'agisse de la propagation du signal sismique, de la dégradation des modules, de l'augmentation de l'amortissement ou encore de la génération des pressions interstitielles lors des cycles.

L'intégration dans Code-Aster de la loi de Hujeux et la méthodologie développée permettent de disposer d'un outil pouvant tenir compte de toute la complexité géométrique des ouvrages zonés et de leur fondation et fournissant directement les variables d'intérêt pour l'analyse du comportement sismique des barrages en remblais. L'activation de différentes options permet une utilisation incrémentale du modèle en mécanique pure, en hydromécanique saturée ou encore non saturée.

Appliquée à deux cas extrêmes que sont le glissement du parement du barrage de Van Norman Inférieur induits par la liquéfaction et le bon comportement du barrage d'Aratozawa malgré une sollicitation de 1g à la sa base, la méthodologie s'avère à la fois sécuritaire en reproduisant le glissement et limitée dans ses conservatismes pour reproduire les faibles désordres et les montées de pression interstitielle observés sur un ouvrage moderne fortement sollicité.

L'accroissement des capacités de calculs et la parallèlisation réduisent de plus en plus les temps de calculs nécessaires aux analyses non linéaires. La méthodologie est ainsi numériquement toujours plus performante, avec des temps de calcul de 24 h pour des taux de montée de pression d'environ entre 80 et 99%, taux qui demandent de nombreuses itérations pour assurer la convergence numérique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le JCOLD et le CFBR qui ont mis à disposition les données et les enregistrements sismiques sur différents barrages japonais dont le barrage d'Aratozawa. A. Modaressi et F. Lopez-Caballero sont également remerciés pour leur aide précieuse pour le transfert de la loi de Hujeux vers Code_Aster.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] MEDDE – DGPR « Risque sismique et Sécurité des ouvrages hydrauliques » - Octobre 2014 ;

[2] Code_Aster, 2001. General public licensed structural mechanics finite element software, included in the Salomé-Méca simulation platform. Website http://www.code-aster.org

[3] Kham, M., Kolmayer, P., Matsumoto, N., "Advanced numerical modeling of Aratozawa dam response under Miyagi 2008 strong earthquake", 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engoneering, Rome, 2019

[4] Kham, M., "Calculs statiques et dynamiques sur des ouvrages géotechniques", doc Code-Aster U2.04.08, mai 2018

[5] Aubry D., Modaressi A., « Manuel scientifique GEFDYN », Document scientifique de l'Ecole Centrale Paris, Laboratoire LMSSMat, 1996.

[6] Modaressi H., Modélisation numérique de la propagation des ondes dans les milieux poreux inélastiques. *Thèse de doctorat de l'École Centrale Paris, 1987.*

[7] Foucault A., Kham M., Voldoire F. Loi de comportement de Hujeux pour les sols. Document de Référence du Code_Aster R7.01.23-A, EDF R&D, 2009

[8] Greffet N., "Algorithme dynamique non linéaire" Documentation R5.05.05 du Code_Aster, 2013

[9] Seed H.B., Lee K.L., Idriss I.M., Makdisi F.I., "The slides in the San Fernando dams during the earthquake of February 9, 1971", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, GT7, pp. 651-688, 1975.

[10] Sawada Y., Takahashi T. "Study on the material properties and the earthquake behavior of rockfill dams", Proceedings of 4th japan earthquake engineering symposium, pp.695-702, 1975

[11] Andrus R.D., Stokoe K.H., 2000, "Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity", J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE, Nov. 2000, Vol. 126, p. 1015-1025

[12] Youd et al., 1998, "Liquefaction Resistance of Soils: summary report from 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils", J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE 127(10), 817-83

[13] Kham M., Boutonnier L., M., Kolmayer, « Gradual modeling of Aratozawa dam under strong earthquake », EWG Symposium, Roma, 6-7 feb. 2017