APPORTS DE LA PRISE EN COMPTE DES INTERACTIONS DYNAMIQUES AVANCEES DANS LA JUSTIFICATION AU SEISME DES BARRAGES RIGIDES

Effects of advanced dynamic interactions on seismic analyses of rigid dams

Jean-Rémi LHERBIER, Frédéric ANDRIAN., Pierre AGRESTI

ARTELIA Eau & Environnement, 6 rue de Lorraine 38130 Echirolles France

jean-remi.lherbier@arteliagroup.com; frederic.andrian@arteliagroup.com; pierre.agresti@arteliagroup.com

MOTS CLEFS

Barrages rigides, calculs sismiques temporels, interactions dynamiques, frontières radiatives, eau compressible.

KEY WORDS

Rigid dams, time history seismic analysis, dynamic interactions, free-field boundary conditions, water compressibility

RÉSUMÉ

La pratique actuelle de justification au séisme des barrages intègre la mise en œuvre de méthodes de calculs de niveaux de complexité croissants. Pour les barrages qui présentent un risque social significatif à l'aval, un calcul dynamique temporel est souvent recommandé. Le présent article se concentre sur cette dernière approche et son application pour les barrages rigides.

Le calcul des contraintes et des déplacements dans un barrage rigide en situation sismique nécessite la modélisation du barrage et de son interaction avec la fondation et le réservoir. Cette interaction peut être prise en compte avec des degrés de complexité variables.

D'un point de vue de l'interaction entre le barrage et la fondation, l'état de l'art considérait jusqu'à très récemment une fondation non-pesante. Seule la raideur du rocher était alors prise en compte dans les calculs. La mise en œuvre d'une fondation pesante avec des frontières radiatives est aujourd'hui de plus en plus utilisée par la profession.

Par ailleurs, la modélisation de l'interaction avec le réservoir se limitait assez fréquemment à la mise en œuvre de masses ajoutées sur le parement amont du barrage. Les approches de calculs ont néanmoins connu quelques évolutions utilisant la formulation intégrale. Ces dernières années, la modélisation de l'eau du réservoir en tant qu'éléments compressibles devient réalisable.

L'article rappelle les conditions qui ont permis de démontrer que seule l'utilisation des méthodes les plus avancées permet de retrouver l'amplitude du comportement sismique mesuré dans le cas du barrage-poids japonais de Tagokura.

Ensuite, l'analyse de la réponse des modèles numériques du barrage de Janneh et de Sainte-Engrâce est effectuée afin de mettre en lumière les apports de la prise en compte avancée de ces interactions dynamiques. Dans ce sens, la différence entre les réponses des modèles simplifiés et avancés est mise en évidence. L'utilité des modèles simplifiés est discutée, l'apport des modèles plus complexes mais également leurs limites sont analysés.

ABSTRACT

It is state-of-the-art to carry out several calculation approaches with increasing level of complexity when assessing the seismic stability of dams. If there is a significant risk downstream in case of failure during a seismic event, time history analyses are generally required. The current paper focuses on this type of analysis and on its application to rigid dams.

The stress-strain analysis of dams under seismic loads requires a numerical model of the dam, but also to consider its interaction with the foundation and the reservoir. This interaction may be taken into account by means of various levels of complexity.

Regarding the dam / foundation interaction, it was common practice until recently to consider a massless foundation. The foundation stiffness only was considered. However, foundation with mass and free-field boundary conditions tend to be more and more used.

On the other hand, the dam / reservoir interaction was frequently modeled by means of added masses applied on the dam upstream face. Some intermediate evolution in numerical approach has shown the boundary element method put into use. Nowadays, it is possible to directly model the reservoir as elements which take into account its compressibility.

This paper reminds the conditions and the assumptions, which have allowed the dynamic behavior of the Tagokura dam to be replicated with a high accuracy. More specifically, only the most complex numerical approach was able to simulate without a high value of artificial damping the monitored accelerations of the dam.

Then, the numerical models of Janneh and Sainte-Engrâce dams are described and analyzed in order to highlight the effects of advanced dynamic interactions. For this purpose, comparisons between simplified and advanced modelling approaches are carried out. The practicality of the simplified modelling approach is discussed, and the benefits owing to the advanced modelling approach as well as its limits are detailed.

1. INTRODUCTION

Les barrages sont généralement localisés dans des vallées ou des massifs montagneux qui sont par nature des accidents géologiques. Les sites d'implantation sont alors souvent traversés par des failles qui peuvent être actives, notamment pour les projets de barrages neufs à l'international. Par conséquent, la prise en compte du chargement sismique est un enjeu majeur à la fois dans la conception des nouveaux barrages mais également dans la réévaluation de la sécurité des barrages existants.

Or, au travers des diverses études menées sur des ouvrages ayant été sollicités par des séismes, un contraste significatif apparaît entre le comportement observé lors d'événements sismiques et celui calculé à l'aide de simulations numériques. En particulier, il existe très peu de cas historiques de ruptures de barrages suite à un séisme tandis que les situations sismiques sont parmi les cas les plus critiques lors des études.

On peut donc se poser la question d'une surestimation du chargement sismique dans les méthodes de calcul utilisées jusqu'à présent. Les conséquences d'une telle surestimation du chargement sismique peuvent être significatives dans les projets, puisqu'elles peuvent aboutir à un surdimensionnement des nouveaux projets ou à la mise en œuvre de travaux de réhabilitation non nécessaires des ouvrages existants.

La collaboration entre le JCOLD et le CFBR entre 2014 et 2016 a permis de qualifier, calibrer et éventuellement valider les méthodes numériques pour les calculs sismiques des barrages rigides. Quelques années après cette collaboration, le présent article rappelle les principaux facteurs à prendre en compte pour simuler de manière satisfaisante le comportement sismique mesuré du barrage de Tagokura.

Par la suite, l'analyse prédictive du comportement au séisme des barrages de Janneh et de Sainte-Engrâce est détaillée. Pour l'ensemble des cas, une étude comparative entre une approche d'interaction barrage / fondation / réservoir simplifiée et une approche d'interaction avancée est effectuée. Quelques utilités des approches simplifiées sont rappelées et par la suite, les apports et les limites éventuelles des approches avancées sont mis en avant.

Les équipes d'ARTELIA mettent systématiquement en œuvre l'approche d'interaction dynamique avancée pour la fondation depuis 2011 et pour le réservoir depuis 2014 pour les calculs sismiques temporels des barrages qu'elles étudient.

2. ETAT DE L'ART

En France, les méthodologies d'études sous chargement sismique des barrages rigides s'appuient principalement sur le rapport du groupe de travail « barrages et séismes » [1]. Les recommandations provisoires du groupe de travail « GT-voûtes » [2] apportent quelques précisions sur les approches associées. Les conditions de chargement sont définies dans l'arrêté de 2018 [3]. La pratique préconise la mise en œuvre d'une approche graduée, c'est-à-dire l'étude du barrage sous sollicitation sismique suivant des méthodes à la complexité croissante jusqu'à justification de la stabilité de l'ouvrage. Les modalités de mise en œuvre de cette approche dépendent du zonage sismique du site et de la classe du barrage. Ainsi la justification des barrages au chargement sismique s'étend d'une simple vérification de la conformité de l'ouvrage aux règles du génie civil jusqu'à la réalisation d'analyses dynamiques temporelles.

Pour ces dernières, la méthodologie la plus couramment mise en œuvre jusqu'à récemment consiste à considérer la fondation comme non-pesante. Ainsi, seule la rigidité de la fondation est prise en compte. La propagation des ondes n'y est pas étudiée, autorisant un maillage relativement lâche qui permet de maîtriser les temps de calculs.

Par ailleurs, l'interaction entre le réservoir et le barrage est simulée de manière classique par la considération de masses ajoutées selon la distribution de Westergaard [4] ou de Zangar [5]. Pendant une période intermédiaire, l'approche par formulation intégrale ou éléments aux frontières a été mise en œuvre. L'évolution des capacités de calcul permet peu à peu la modélisation directe de l'eau du réservoir en tant qu'éléments compressibles.

Une collaboration de trois années de 2014 à 2016 entre le CFBR et son homologue japonais le JCOLD a permis de mettre à la disposition des partenaires français, dont ARTELIA, les données d'auscultation de plusieurs barrages japonais ayant subi des séismes d'envergure. Les résultats des calculs ont confirmé un décalage significatif du comportement sismique des ouvrages auscultés avec ceux simulés à l'aide des approches de calculs simplifiées.

Un calage et une validation des méthodes de calcul sous chargement sismique sur la base d'une rétro-analyse ont par conséquent été entrepris. Les études se sont focalisées sur l'utilisation des frontières radiatives ainsi que sur la modélisation du réservoir en tant qu'éléments compressibles pour les barrages rigides dans la mesure où l'utilisation des méthodes simplifiées est maîtrisée par la profession.

3. ELEMENTS DE PRINCIPE ET APPORT DES APPROCHES D'INTERACTION AVANCEE

3.1.Prise en compte numérique

Les modèles numériques présentés par la suite sont réalisés à l'aide des logiciels de modélisation bi- et tridimensionnelle FLAC et FLAC3D, développés par Itasca. Il s'agit de codes de calcul aux différences finies suivant un schéma de résolution explicite.

Les modèles numériques incluent directement la fondation en prenant en compte sa masse et sa raideur. Le signal sismique est alors appliqué en pied de modèle et les équations de propagation des ondes y sont résolues avec une approche pas-à-pas (temporelle et géométrique).

Les frontières radiatives prises en compte dans les modèles sont une succession d'amortisseurs [6] permettant :

- D'absorber les ondes sortantes en pied de modèle ;
- D'absorber les ondes liées à une différence d'oscillations entre une colonne de fondation de hauteur équivalente soumise au même chargement sismique et les frontières latérales du modèle. Cet artifice numérique permet notamment de limiter l'extension du modèle en supprimant aux frontières latérales les oscillations parasites générées par tout déplacement relatif entre le barrage et la fondation.



Figure 1 : Schéma mécanique du fonctionnement des frontières radiatives avec FLAC et FLAC3D [6]

Par ailleurs, l'interaction entre le barrage et le réservoir est étudiée en modélisant directement l'eau du réservoir en tant qu'éléments volumiques compressibles. Dans ce cas, une attention particulière doit être apportée aux types d'éléments utilisés pour éviter les phénomènes de verrouillage numérique (génération de contraintes parasites à cause de l'incapacité de certains types éléments à se déformer). Dans le cas des logiciels FLAC et FLAC3D, un type d'élément unique validé contre les phénomènes de verrouillage numérique est utilisé pour l'ensemble du modèle. Ces éléments sont formulés suivant un schéma de discrétisation mixte qui traite de manière séparée les parties déviatoires et les parties isotropes des tenseurs de contraintes et de déformation [6].

D'un point de vue numérique, la considération d'interactions dynamiques avancées entre le barrage, la fondation et le réservoir implique :

- La modélisation d'éléments supplémentaires liés au réservoir ;
- Une densité de maillage plus élevé en fondation.

A titre de comparaison, le modèle tridimensionnel du barrage de Janneh compte 9000 éléments pour le modèle avec interactions dynamiques simplifiées contre 88000 pour le modèle avec interactions dynamiques avancées.

L'ordre de grandeur des temps de calculs est de quelques secondes pour un calcul temporel avec interactions dynamiques simplifiées contre une heure environ pour un calcul temporel avec interactions dynamiques avancées.



Figure 2 : Modèles numériques du barrage de Janneh avec interactions dynamiques simplifiées (à g.) et avancées (à dr.)

Il convient de noter que le maillage de la fondation et du réservoir doit être suffisamment dense pour pouvoir y résoudre avec une précision suffisante l'équation de propagation des ondes [7]. La densité du maillage requise augmente avec la valeur de la fréquence maximale pouvant être résolue par le système. Par conséquent, pour maîtriser les temps de calculs, une limitation de la plage de fréquences étudiée à 15 ou 20 Hz est le plus souvent considérée pour les grands barrages. Pour les fréquences supérieures, la réponse du système est généralement négligeable. La justification peut être faite par une analyse modale pour déterminer les masses modales cumulées à cette fréquence.

3.2. Interaction entre le barrage et la fondation

Dans la majorité des cas, la fondation d'un barrage peut être considérée comme étant un milieu semi-infini plus ou moins homogène. Ainsi, une onde sortante se propage sans être réfléchie dans une certaine proportion vers l'espace lointain.

En l'absence de frontières radiatives, les ondes sont piégées au sein du modèle numérique : au contact d'une frontière extérieure, les ondes se réfléchissent en direction de l'intérieur du modèle. Ainsi, ces ondes sollicitent de nouveau le barrage. Les ondes sismiques ne s'atténuent que du fait d'un amortissement visqueux considéré dans les matériaux.

Depuis la fin des années 2000, A.K. Chopra [8] signale que ne pas prendre en compte les frontières radiatives dans les modèles peut entrainer une surestimation jusqu'à un facteur 3 de la réponse sismique mesurée des barrages rigides.

Dans le cadre de la collaboration entre le CFBR et le JCOLD, les équipes d'ARTELIA ont effectué une analyse paramétrique sur la base d'un profil bidimensionnel d'un des plots du barrage de Tagokura. Seul le barrage et la fondation ont été considérés. La fondation est munie d'une masse et des frontières radiatives décrites précédemment. L'étude de sensibilité porte sur le rapport entre le module d'Young du barrage E_b et celui de la fondation E_f.

L'amortissement supplémentaire obtenu grâce à la mise en œuvre des frontières radiatives est de l'ordre de 10 à 12 %, mais peut atteindre 20% lorsque E_b/E_f = 4. Ces résultats sont valables dans le domaine des basses fréquences (<5 Hz) soit la plage habituelle des premières fréquences propres des grands barrages rigides.

3.3.Interaction entre le barrage et le réservoir

Lors d'un séisme le champ de surpressions par l'entrainement de l'eau par le parement amont du barrage p(x,y,t) peut être décrite par les équations suivantes [9] dans le cas d'une analyse bidimensionnelle :

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Avec c la vélocité des ondes de compression dans l'eau et ∇^2 l'opérateur Laplacien.

En supposant que la solution est un champ de pression harmonique de fréquence ω , défini par :

$$p(x, y, t) = P(x, y)e^{-i\omega t}$$

On obtient :

$$\nabla^2 P + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 P = 0$$

Trois régimes de solution existent, dépendant du ratio $R=f_{barrage}/f_R$ entre la fréquence propre du barrage $f_{barrage}$ et celle du réservoir $f_R=c/4H$ avec H la hauteur d'eau :

- Si R<1, la solution de P(x,y) est réelle. En particulier, lorsque le barrage se comporte comme un ouvrage rigide et lorsque l'eau est supposée incompressible, la solution coïncide avec l'approche de Westergaard ;
- Si R=1, un phénomène de résonance entre le barrage et le réservoir est observé ;
- Si R>1, la solution de P(x,y) est complexe : une génération d'ondes de pressions intervient dans le réservoir.
 Celles-ci sont créées au droit du parement amont du barrage et se déplacent en direction de l'amont.

Ces phénomènes ont été reproduits par le calcul en simulant le cas d'un barrage-poids soumis à une série d'oscillations sinusoïdales de fréquence croissante.



Figure 3 : Distribution des ondes de pression au sein d'un réservoir d'un barrage-poids

D.05 – Apports de la prise en compte des interactions dynamiques avancées dans la justification au séisme des barrages rigides page 4

Les masses ajoutées de Westergaard ne sont donc qu'un cas particulier de l'un des régimes possibles d'interaction entre le barrage et le réservoir. Dans ce sens, dans le cas où R<1, la distribution des masses n'est pas systématiquement identique à celle définie par Westergaard. Le cas de génération d'ondes de pression dans le réservoir (R>1) introduit un amortissement supplémentaire du système estimé à environ 2 à 3%.

Il est précisé que dans l'ensemble des études, aucune absorption supplémentaire des ondes au fond de la retenue n'est prise en compte. En effet, le coefficient d'absorption correspondant est très variable et ne peut être déterminé que par des essais in situ encore relativement lourds et coûteux. Il est donc impossible de l'estimer au préalable en phase de conception et il est préférable de le négliger en l'absence de données vérifiées.

4. RETRO-CALCULS DU BARRAGE DE TAGOKURA

4.1. Présentation du barrage et des données sismiques

Le barrage-poids de Tagokura au Japon a une hauteur maximale sur fondation de 145 m et une longueur en crête de 462 m. Ce barrage a été étudié dans le cadre de la collaboration CFBR-JCOLD [10][11].



Figure 4 : Elévation aval et coupe amont-aval sur le plot déversant 17 du barrage de Tagokura

Le comportement sismique du barrage est ausculté à l'aide de 5 jeux de sismographes 3D :

- 4 répartis sur la hauteur du plot central 22. Le plus bas se situe au niveau de la galerie inférieure, soit 20 m audessus du contact béton-rocher et le plus haut est positionné en crête ;
- 1 positionné sur le rocher de fondation en rive droite à proximité de la crête.

L'analyse qui suit se base sur les données recueillies lors du séisme Niigata-Chuetsu du 23 Octobre 2004, de magnitude 6.8 et dont l'épicentre est situé à 37 km du barrage. Ce séisme est survenu en situation de réservoir plein.



Figure 5 : Accélération amont-aval enregistrée au niveau de la galerie inférieure lors du séisme Niigata-Chuetsu

Les valeurs d'accélération maximum enregistrées sont de 0.9 m/s² en galerie inférieure et de 4.5 m/s² en crête. A défaut d'enregistrement des accélérations au rocher, les données obtenues en galerie inférieure sont considérées comme étant l'accélération du rocher en champ libre.

Compte tenu de la faible valeur d'accélération de pic enregistré au niveau de la galerie, il est supposé que le comportement non-linéaire du barrage (glissement, décollement, endommagement) a été négligeable lors de ce séisme. Les inspections visuelles de l'ouvrage n'ont permis de déceler aucun désordre majeur. Une augmentation des débits de drainage a néanmoins été enregistrée suite au séisme.

Les calculs ont donc été réalisés sur la base d'un comportement élastique linéaire du système et a permis de simplifier l'analyse du comportement sismique.

La détermination des spectres d'accélérations mesurées et de la fonction de transfert entre la galerie inférieure et la crête permettent de déterminer les deux premières fréquences propres du barrage comme étant 2.88 Hz et 3.85 Hz.



Figure 6 : Fonction de transfert entre la galerie inférieure et la crête du barrage de Tagokura issue des données mesurées D.05 – Apports de la prise en compte des interactions dynamiques avancées dans la justification au séisme des barrages rigides

4.2. Comparaison des approches de modélisation de la fondation

En première approche et afin d'évaluer la validité des méthodes avec une interaction dynamique simplifiée, celles-ci ont été mise en œuvre à l'aveugle sur un modèle bidimensionnel de l'ouvrage. Une fondation non-pesante a donc été considérée et le réservoir a été modélisé à l'aide de masses ajoutées selon la formule de Westergaard. Un amortissement visqueux de 1% est pris en compte dans le modèle. Cette valeur faible d'amortissement a uniquement vocation d'éviter la modélisation d'une résonance non amortie du système mais n'a aucun sens physique réel.

Les résultats sont comparés à ceux d'un modèle mettant en œuvre une approche d'interaction dynamique avancée qui par la suite s'est avérée très efficace pour reproduire le comportement mesuré du barrage. Pour ce modèle avancé, aucun amortissement visqueux n'est pris en compte puisque la modélisation de manière avancée de l'interaction introduit un amortissement équivalent.



Figure 7 : Spectres des accélérations calculées en crête du barrage de Tagokura avec et sans prise en compte des approches d'interaction avancées

La comparaison met en évidence une surestimation d'un facteur allant de 2 à 3 des accélérations avec la méthode d'interaction dynamique simplifiée, confirmant les travaux de Chopra [8]. Un amortissement fictif très important de l'ordre de 15% serait nécessaire pour faire correspondre le comportement modélisé et celui ausculté tandis qu'une valeur de 5% est plus généralement admise dans le béton, en particulier pour des sollicitations faibles [12].

En contrepartie, une analyse qualitative des spectres de réponses montre que les fréquences propres du système sont pratiquement identiques avec les deux approches.

4.3. Prise en compte des interactions avancées

Une série d'analyse a également été réalisée en mettant en œuvre la modélisation avancée des interactions dynamiques, c'est-à-dire avec prise en compte des frontières radiatives et modélisation du réservoir en tant qu'éléments compressibles. Cette série de calcul a été progressivement améliorée suivant 4 étapes :

- La 1ère étape consiste en la réalisation d'un calcul à l'aveugle ;
- La 2ème étape est un calage des modules de Young du béton du barrage et du rocher de fondation pour prendre en compte les effets 3D du barrage, construit dans une vallée relativement étroite ;
- La 3ème étape est la modification de la géométrie de la fondation pour être conforme aux plans de construction avec la prise en compte de l'inclinaison du toit du rocher à l'amont immédiat du barrage ;
- La 4ème étape ajoute la composante verticale du séisme, jusqu'ici négligée.

Les résultats en termes de fonction de transfert en accélération sont présentés ci-dessous et comparés avec les données mesurées.



Figure 8 : Fonction de transfert en accélération entre la crête et la galerie inférieure du barrage de Tagokura pour chaque étape de calcul

D.05 – Apports de la prise en compte des interactions dynamiques avancées dans la justification au séisme des barrages rigides page 6

La 1ère étape de calcul aboutit à une surestimation du comportement sismique du barrage à 2 et 6 Hz, ainsi qu'une sous-estimation aux environs de 4 Hz. L'ordre de grandeur de la réponse de l'ouvrage demeure néanmoins acceptable, comparativement aux résultats des modélisations avec une approche d'interaction simplifiée.

Par la suite, le calage des modules d'Young permet une amélioration du comportement du barrage à 2 et 6 Hz, qui est ensuite légèrement amélioré avec la modélisation plus réaliste de la géométrie du toit rocheux.

La prise en compte de la composante sismique verticale permet d'aboutir à une réponse très satisfaisante du modèle numérique mis en œuvre par ARTELIA. En effet, la modélisation des interactions fondation-réservoir-barrage permet la transmission des ondes verticales entre le rocher et le réservoir qui les transmet à son tour au barrage. La meilleure reproduction des signaux mesurés est particulièrement vraie au niveau de la plage de fréquence d'intérêt de 3 à 5Hz, qui correspond à la fréquence propre du réservoir. Le comportement simulé correspond dans l'ensemble à celui mesuré, avec moins de 20% d'erreur, là où les modélisations avec une approche d'interaction simplifiée surestiment la réponse avec un facteur de l'ordre de 3.

A la suite de ces simulations, une modélisation tridimensionnelle du barrage de Tagokura a été réalisée. Les effets de la vallée étant directement modélisés, les caractéristiques des matériaux antérieures au calage de l'étape 2 ont été prises en compte. L'amélioration des résultats liée à la considération précise de la géométrie du toit rocheux n'étant pas significative (étape 3), celle-ci n'a pas été considérée pour les calculs 3D. Par contre, la composante verticale a été prise en compte (étape 4) puisque son impact semble significatif. La deuxième composante horizontale a également été prise en compte dans les calculs. Les résultats sont illustrés ci-après.



Figure 9 : Fonction de transfert entre la galerie inférieure et la crête du barrage de Tagokura du modèle 3D

Les résultats obtenus s'avèrent donc satisfaisants, bien que légèrement moins fidèles que ceux obtenus avec l'analyse bidimensionnelle à l'étape 4. La différence peut provenir de l'écart entre la modélisation du réservoir représenté comme un canal et la réalité où celui-ci s'étend en rive gauche. Ainsi, le comportement réel du réservoir est probablement plus proche de celui d'un milieu semi-infini, ce qui le rapproche du comportement simulé en 2D.



Figure 10 : Comparaison des vues en plan de la retenue du barrage in-situ (Google Earth©) et du modèle 3D

5. BENCHMARK DU BARRAGE DE JANNEH

5.1.Présentation du barrage

Le barrage-poids arqué de Janneh est en cours de construction au Liban. ARTELIA a fourni une assistance avancée à la conception du barrage et assure la supervision de sa construction. Le barrage présente une hauteur maximum sur fondation de 157 m et 300 m de longueur en crête.



Figure 11 : Vue en plan et coupe amont-aval du plot central du barrage de Janneh

Ce barrage en Béton Compacté au Rouleau (BCR) présente la particularité d'avoir été arqué pour deux raisons :

- Augmenter la résistance au séisme et prévenir un éventuel glissement global qui dépasserait les critères admissibles en situation sismique ;
- Réaliser une économie significative de béton en adoptant un profil au pied aval tronqué puisque le barrage résiste désormais grâce à un effet d'arc même pour les situations statiques.

Ces optimisations significatives de la géométrie de l'ouvrage ne peuvent être envisagées qu'avec la mise en œuvre de méthodes numériques avancées, notamment pour les calculs sismiques. Ces calculs mettent en œuvre la modélisation de l'eau en tant qu'éléments compressibles et l'utilisation de frontières radiatives.

Les calculs statiques et sismiques de ce barrage ont été l'un des thèmes imposés du 14ème atelier de comparaison des méthodes numériques pour les barrages (benchmark) organisé par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) en 2017 [13]. Ce thème, auquel ont participé 15 organismes internationaux, a permis de mettre en évidence les apports des différentes méthodes d'analyse à travers la mise en œuvre de méthodes de calculs de complexité croissante. L'influence de plusieurs paramètres a ainsi été étudiée :

- La modélisation d'interactions dynamiques simplifiées (fondation non pesante et masses ajoutées de Westergaard);
- La modélisation d'interactions dynamiques avancées (fondation pesante, frontières radiatives et éléments compressibles du réservoir) ;
- Le comportement non-linéaire de l'interface barrage / fondation.

5.2. Quelques principaux résultats du benchmark

En l'absence de comportement non-linéaire à l'interface barrage / fondation, soit dans une configuration semblable à celle étudiée pour le barrage de Tagokura, les résultats suivants à l'échelle du panel de participants sont obtenus :

Interactions dynamiques	Déplacements amont/aval maximum en crête du plot central	Déplacements amont/aval maximum en crête d'un plot rive droite	Contrainte de traction verticale maximum sur la face amont du plot central	Contrainte d'arc de traction maximum en crête du plot central
	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)
Simplifiées	75-100	30-60	1-2	4.5-6
Avancées	50-90	18-47	0.5-1	2.1-3

Tableau 1 : Tendances des résultats des calculs des participants au 14^{ime} atelier de comparaison de la CIGB

Les écarts significatifs entre la réponse des modèles avec et sans prise en compte des interactions dynamiques avancées sont confirmées et sont de l'ordre de :

- 20% en termes de déplacements ;
- 50% en termes de contraintes.

Lorsqu'un comportement non-linéaire est modélisé à l'interface barrage / fondation, la réponse des modèles est diminuée du fait de l'énergie dissipée au droit de l'interface suite aux déplacements irréversibles. Par ailleurs, une réduction significative des déplacements irréversibles au droit de l'interface est calculée lorsque les interactions dynamiques avancées sont prises en compte.



Figure 12 : Déplacements irréversibles du pied amont du plot central du barrage de Janneh calculés par trois participants (dont les formulateurs) en considérant les interactions dynamiques simplifiées (à g.) ou avancées (à dr.)

En revanche, l'analyse des spectres de réponse en accélération en crête du barrage montre qu'indépendamment des approches d'interaction dynamique mises en œuvre, les fréquences propres calculées sont très similaires.



Figure 13 : Spectres de réponse en crête du plot central du barrage de Janneh calculés par plusieurs participants (dont les formulateurs) en considérant les interactions dynamiques simplifiées (à g.) ou avancées (à dr.)

Au bilan, par rapport au modèle élastique linéaire mettant en œuvre une interaction dynamique simplifiée, les résultats obtenus mettent en évidence une diminution de la réponse sismique du modèle du barrage de Janneh liée :

- A l'interaction dynamique avancée entre le barrage et la fondation d'un ordre de grandeur 25 à 50% ;
- A l'interaction dynamique avancée entre le barrage et le réservoir d'un ordre de grandeur 20 à 25% ;
- Au comportement non-linéaire de l'interface barrage / fondation d'un ordre de grandeur 10 à 15%.

6. ANALYSE DE CAS DU BARRAGE DE SAINTE-ENGRACE

6.1. Présentation du barrage

Le barrage de Sainte-Engrâce est un barrage-poids arqué situé dans les Pyrénées Atlantiques. Il présente la particularité d'être surplombé par une voûte mince en béton. Sa hauteur maximale sur fondation est de 42 m (32 m + 10 m) et sa longueur en crête est de 49 m.



Figure 14 : Elévation aval et coupe amont-aval de plus grande hauteur sur fondation du barrage de Sainte-Engrâce

6.2. Limites des frontières radiatives

L'analyse du comportement sous chargement sismique du barrage est réalisée en comparant les résultats des modèles avec et sans prise en compte des frontières radiatives. L'influence de celles-ci apparait plus faible que celle trouvée dans les études de cas présentés précédemment. Les accélérations maximum calculées sur la hauteur du barrage sont présentées ciaprès pour deux valeurs de ratio entre les modules d'Young du barrage (Eb) et de la fondation (Ef).



Figure 15 : Accélérations maximales calculées sur la hauteur du barrage de Ste-Engrâce

Dans l'ensemble des cas, l'influence des frontières radiatives est faible. La vallée dans lequel s'inscrit le barrage est particulièrement encaissée. Les déplacements du barrage sont alors en phase et de même intensité à altitude égale par rapport à ceux de la fondation. Les ondes parasites générées par le barrage et qui sont absorbées par les frontières radiatives sont par conséquent faibles.

En particulier, lorsque le module d'Young du barrage est similaire à celui du rocher, l'influence des frontières radiative est négligeable : les accélérations calculées en crête sont pratiquement identiques.

Lorsque E_b/E_f vaut 2, l'écart entre les accélérations maximales calculées en crête par les deux modèles augmente à 23%. En effet, un rocher plus souple autorise des déplacements relatifs plus importants entre le barrage et la fondation.

7. CONCLUSION

Les approches simplifiées de modélisation des interactions dynamiques entre le barrage, la fondation et le réservoir, avec la considération respectivement d'une fondation non-pesante et de masses ajoutées représentent une approche rodée par la profession. Elles impliquent des efforts de modélisation et des temps de calculs limités et permettent de retrouver les principales fréquences propres du système. En revanche, elles peuvent entraîner une surestimation de la réponse sismique du barrage d'un ordre de grandeur significatif.

Les approches avancées de modélisation des interactions dynamiques, moins répandues, ont été validées sur des cas réels à l'occasion de la collaboration JCOLD-CFBR. L'évolution des capacités de calculs rend cette approche de plus en plus abordable de nos jours.

En particulier, dans le cadre de cette collaboration les calages effectués dans les modèles ont uniquement porté sur les modules d'Young de la fondation et du barrage. Aucune modification n'a été effectuée sur la formulation mathématique des frontières radiatives ni sur leur mise en œuvre numérique. Le nombre de paramètres faisant l'objet de calage est donc limité et il n'existe pas nécessairement plusieurs configurations réalistes qui permettent de reproduire le comportement mesuré du barrage. La prise en compte de la composante verticale du séisme, couplée avec une transmission des ondes entre le réservoir et le rocher semble être le principal facteur qui a permis d'obtenir le meilleur calage entre comportement calculé et comportement mesuré. Dans une moindre proportion, la géométrie de la retenue ainsi que le choix des modules d'Young influencent également les résultats.

De manière préalable à la réalisation d'un calcul, il est possible d'estimer l'influence des frontières radiatives. Trois paramètres sont identifiés à ce stade :

- L'encaissement de la vallée dans lequel le barrage est construit. L'apport des frontières radiatives est faible lorsque la vallée est très encaissée (ratio L/H ~1) ;
- Le ratio E_b/E_f des modules de Young du béton du barrage (E_b) et du rocher de fondation (E_f). Un rocher relativement raide diminue l'apport des frontières radiatives ;
- L'inertie globale de l'ouvrage : un barrage lourd et libre de se mouvoir génère des ondes parasites plus importantes qui seraient piégées dans le modèle en l'absence des frontières absorbantes.

Ainsi, pour l'analyse sismique prédictive des barrages de Sainte Engrâce et de Janneh, bien que le ratio E_b/E_f soit égal à 1 pour les deux cas, l'influence des frontières radiatives est évidente dans le cas du barrage de Janneh mais reste discutable dans le cas du barrage de Sainte-Engrâce à cause de l'encaissement de sa vallée.

De manière analogue, une influence relativement faible des frontières radiatives sur le comportement sismique du barrage de Monticello a pu être constatée [14]. Celle-ci peut s'expliquer par la faible inertie de ce barrage voûte ainsi que par un ratio E_b/E_f relativement faible, limitant par conséquent l'énergie associée aux déplacements relatifs entre le barrage et sa fondation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Mathieu Roy et Nicolas Ulrich pour leurs contributions significatives aux travaux de recherches décrits dans le présent article. Emmanuel Robbe est également remercié pour les échanges enrichissants sur les méthodes de calcul ainsi que le partage des résultats de son travail sur l'analyse du comportement du barrage de Monticello.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] MEDDE DGPR « Risque sismique et Sécurité des ouvrages hydrauliques » Octobre 2014 ;
- [2] CFBR « Recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages-voûtes » Octobre 2018;
- [3] Ministère de la transition écologique et solidaire « Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages » ;
- [4] H.M. Westergaard « Water Pressures on Dams During Earthquakes » Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol 98, 1933;
- [5] C.N. Zangar « Hydrodynamic Pressures on Dams Due to Horizontal Earthquake Effects » Engineering Monograph, No. 11, Bureau of Reclamation, 1952 ;
- [6] Itasca Consulting Group « FLAC3D Manual »;
- [7] R. L. Kuhlemeyer, J. Lysmer « Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems » ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal, 1973;
- [8] A.K. Chopra « Earthquake analysis of arch dams : factors to be considered », 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 2008, Beijing China ;
- [9] P.M. Viera Ribeiro, S.F. Da Silva, L.J. Predoso « Analytical and numerical studies of dam reservoir interaction in concrete gravity dams », 23rd ICOLD Congress, May 2009, Brazilia ;
- [10] F. Andrian., P. Agresti « JCOLD CFBR Collaboration, Analyses of seismic records on concrete dams in Japan, Tagokura dam, Back-analysis by means of a progressive modeling », Octobre 2014, Chambéry France ;
- [11] F. Andrian., P. Agresti « Effects of radiative boundary conditions on seismic analysis of gravity dams » 2017 ;
- [12] J. Fouqué, E. Robbe, N. Humbert, E. Bourdarot, EDF-CIH « Comparison between seismic records and finiteelement analysis », Tagokura Dam, JCOLD-CFBR Collaboration, 2014 ;
- [13] F. Andrian., P. Agresti, G. Mathieu « Theme B: Static and seismic analysis of an arch-gravity dam, Synthesis report» - 14th International ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analyses of Dams, 2017, Stockholm Sweden;
- [14] E. Robbe « Seismic back analysis of Monticello arch dam Blind prediction workshop and additional analyses » -USSD 2017 conference.