

## JUSTIFICATION DES BARRAGES POIDS-VOUTES EN BCR – DEUX CAS D'APPLICATION

### *Verification of RCC arch-gravity dams – Two case studies*

**Mathieu ROY, Geoffrey MATHIEU, Frédéric ANDRIAN.**

ARTELIA, 6 rue de Lorraine 38130 Echirolles

[mathieu.roy@arteliagroup.com](mailto:mathieu.roy@arteliagroup.com) ; [geoffrey.mathieu@arteliagroup.com](mailto:geoffrey.mathieu@arteliagroup.com) ; [frederic.andrian@arteliagroup.com](mailto:frederic.andrian@arteliagroup.com)

**Stéphane FRAY, Vincent BOINAY, Jean-Christophe GIRARD.**

TRACTEBEL ENGINEERING, 5 rue du 19 mars 1962, 92622 Gennevilliers

[stephane.fray@tractebel.engie.com](mailto:stephane.fray@tractebel.engie.com) ; [vincent.boinay@tractebel.engie.com](mailto:vincent.boinay@tractebel.engie.com) ; [jean-christophe.girard@tractebel.engie.com](mailto:jean-christophe.girard@tractebel.engie.com)

#### **MOTS CLEFS**

Barrages poids-voûtes, Béton compacté au rouleau, BCR, calculs thermo-mécaniques, calculs sismiques, Combinaison quadratique complète, CQC

#### **KEY WORDS**

Arch-gravity Dams, Roller Compacted Concrete, RCC, thermo-mechanical calculations, seismic calculations, Complete quadratic combination, CQC

#### **RÉSUMÉ**

*La stabilité d'un barrage poids-voûte en BCR repose en grande partie sur l'effet d'arc. Le monolithisme du barrage doit donc être assuré en toute situation. Cependant, les contraintes thermiques de traction induites par refroidissement après hydratation du ciment et les mouvements en situation sismique peuvent être de nature à ouvrir les joints, déclencher des fissures et mettre en cause la stabilité du barrage. Des modèles numériques 3D sont donc élaborés afin d'évaluer ces phénomènes et de concevoir des dispositions constructives adaptées.*

*Un calcul thermo-mécanique du barrage de Janneh (Liban) a été réalisé par ARTELIA afin de simuler le comportement de l'ouvrage depuis le début de la construction jusqu'à 30 ans après la première mise en eau. Le modèle 3D non-linéaire prend en compte le programme de construction, la génération de chaleur par hydratation du ciment, le durcissement progressif du béton, les cycles annuels de marnage liés à l'exploitation du barrage et l'évolution saisonnière de la température de l'air et de l'eau. Les résultats permettent notamment d'optimiser le nombre et le traitement des joints de dilatation et d'ajuster la position du rideau de drainage.*

*La deuxième partie de l'article s'intéresse à un barrage en cours de construction en Asie du Sud-Est. Ce barrage, d'abord conçu en barrage poids, a été modifié en barrage poids-voûte pour reprendre les sollicitations sismiques, importantes dans la région. Le comportement du barrage et de l'effet voûte en situation sismique est évalué à l'aide d'un modèle 3D, en recourant à une méthode pseudo-dynamique de modélisation de l'interaction sol-structure et de certains effets non linéaires, tels que l'ouverture des joints de dilatation verticaux et du contact béton-rocher. L'étude analyse en particulier l'impact d'un monolithisme partiel, en fonction du niveau de retrait thermique accepté et du type de clavage des joints inter-plots, sur le comportement du barrage et le développement des effets d'arcs.*

#### **ABSTRACT**

*The stability of an RCC arch-gravity dam mainly relies on the arch effect. The monolithism of the dam must therefore be guaranteed at any time. However, the tensile stresses induced by concrete cooling after cement hydration and the vibrations of the dam during an earthquake may lead to an opening of the joints and the cracks which can question the stability of the dam. 3D numerical models are therefore developed in order to investigate the behaviour of the dam and design appropriate construction provisions.*

*A thermo-mechanical calculation of the Janneh dam (Lebanon) has been performed by ARTELIA in order to simulate the behaviour of the structure from the construction to 30 years after the first impounding. The 3D non-linear numerical model takes into consideration the construction program, the heat generation by cement hydration, the hardening of the concrete, the annual operating cycles and the annual variations of air and water temperature. The results allow to optimize the number and the treatment of the vertical joints and to adjust the location of the grout curtain.*

*The second part is focused on a dam under construction in South-East Asia. This dam, first designed as a gravity dam, was enhanced into an arch-gravity dam, to improve its behavior under seismic conditions, which are critical in the area. A pseudo-dynamic 3D modelling methodology was implemented including the foundation-structure interaction and non-linear effects at the vertical expansion joints and at the dam-foundation contact. The article presents the study of the dam behavior and its arching effect under seismic loading. The study assesses in particular the impact on the dam behavior of a partial monolithism, resulting from the thermal shrinkage and the degree of grouting of the joints.*

## 1. INTRODUCTION

Les barrages poids-voûtes en Béton Compacté au Rouleau (BCR) sont des ouvrages massifs dont la stabilité repose en partie sur l'effet d'arc. Leur monolithisme doit donc être garanti, autant que nécessaire, dans toutes les situations de chargement pour lesquels l'effet voûte est requis.

La dissipation de la chaleur d'hydratation du ciment après coulage du BCR peut cependant conduire à des contraintes de traction thermiques significatives, pouvant générer des fissures de nature à mettre en cause le monolithisme du barrage. Pour répondre à cette problématique, les barrages-voûtes en béton conventionnel sont construits par plots indépendants et sont généralement équipés d'un dispositif de refroidissement dissipant la chaleur d'hydratation. A la fin de la construction, le béton s'est ainsi suffisamment refroidi. Un clavage des joints peut alors être réalisé afin de parachever le monolithisme avant la première mise en eau.

Les barrages en BCR sont quant à eux construits par couches successives. Des joints de dilatation verticaux induits sont généralement utilisés pour localiser la fissuration d'origine thermique. Cependant, en l'absence de dispositif de refroidissement, et à cause du caractère massif de ces ouvrages, la dissipation de la chaleur d'hydratation peut durer plusieurs dizaines d'années. Pendant les premières années, les joints sont donc principalement fermés et le monolithisme est assuré. A long terme cependant, ces joints peuvent s'ouvrir sous l'effet des tractions d'origine thermique et ainsi mettre en cause le monolithisme, et donc la stabilité de l'ouvrage.

L'évaluation de l'historique des températures et des efforts qui en résultent est donc un enjeu majeur pour les barrages poids-voûte en BCR. Des calculs thermo-mécaniques doivent par conséquent être réalisés afin de justifier leur stabilité depuis le début de la construction jusqu'à ce qu'un régime stationnaire ait été atteint. Les dispositions constructives (relatives aux joints ou au dispositif de drainage notamment) peuvent alors être définies en fonction des conclusions de ces calculs.

Soumis aux sollicitations dynamiques d'un séisme, en raison des mouvements amplifiés de consoles, les barrages poids-voûtes développent davantage d'effets d'arcs que dans les cas statiques, et leur stabilité repose alors sur une contribution plus importante des appuis en rives, ce qui est bénéfique dans le cas de sites fortement exposés aux séismes. Dans ce processus, les ouvertures en pied amont et au contact béton / rocher associés dans les cas extrêmes à des mouvements non linéaires irréversibles (glissements en fondation ou entre plots le long des joints de dilatation), doivent être évalués, et leur compatibilité avec les contraintes d'exploitation et de sécurité vérifiée. L'impact d'un monolithisme partiel lié à un contrôle plus ou moins strict du retrait thermique et du clavage des plots est un aspect important dans la conception et la justification de stabilité de ce type de barrage en BCR.

La première partie de cette publication présente la méthodologie développée par ARTELIA pour l'analyse thermo-mécanique et la définition des dispositions constructives du barrage de Janneh. Elle est suivie d'une présentation de la méthodologie mise en œuvre par TRACTEBEL pour la justification d'un barrage poids-voûte dans un contexte de sismicité intense et de géologie relativement difficile.

## 2. CALCUL THERMO-MECANIQUE : CAS DU BARRAGE DE JANNEH

### 2.1. Brève présentation du barrage

Le barrage de Janneh est un barrage poids-voûte en béton compacté au rouleau (BCR) actuellement en construction au Liban. D'une hauteur prévisionnelle de 157 m sur fondation, il a pour vocation l'approvisionnement en eau du district de Jbeil, l'irrigation de la plaine de Nahr Ibrahim et la production d'hydroélectricité (100 MW).

Les organes de sécurité du barrage consistent en un évacuateur de crues à seuil libre et saut à ski implanté en partie centrale et en une vidange de demi-fond. La conception de la fouille est convergente, de manière à éviter tout glissement global vers l'aval. Dans la conception actuelle, le barrage est muni de 5 joints de dilatation verticaux traversants. Ces joints sont coffrés et munis de boîtes de cisaillement et d'un dispositif d'injection.

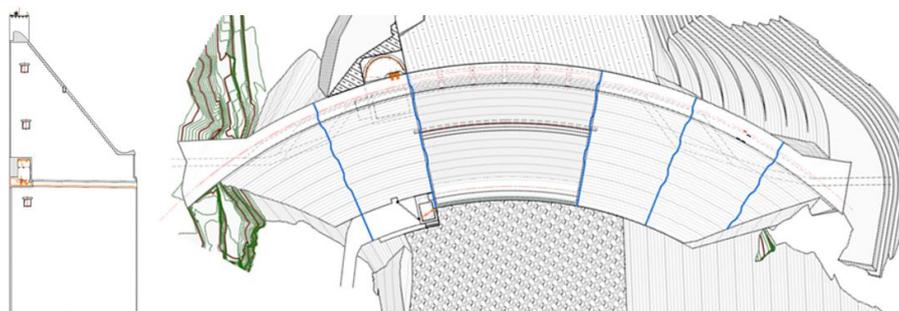


Figure 1 – Coupe dans le plot central (g.) - Vue en plan (dr.)

Le schéma d'exploitation de l'ouvrage est tel que le marnage annuel prévu est de l'ordre de 80 mètres, entre la cote de retenue normale (RN) de 839 maintenue entre les mois de décembre à mai, et la cote minimum d'exploitation (CME) de 760 au milieu de l'été. Cette variation annuelle de charge hydrostatique s'accompagne d'une variation périodique des conditions thermiques auxquelles le barrage est soumis : outre l'évolution saisonnière habituelle de la température du milieu extérieur, l'abaissement du plan d'eau en été entraîne un réchauffement significatif du parement amont au contact de l'air.

Ce comportement périodique particulier associé à la problématique de dissipation de la chaleur d'hydratation évoquée dans l'introduction justifie de réaliser un calcul thermo-mécanique temporel depuis le début de la construction jusqu'à la fin de la période de refroidissement du barrage.

## 2.2. Modèle numérique 3D

### 2.2.1. Généralités

Les calculs sont réalisés avec le logiciel FLAC3D, développé par Itasca. Ce logiciel utilise la méthode des différences finies avec un schéma d'intégration explicite particulièrement adapté pour traiter les problèmes tridimensionnels avec de fortes non-linéarités.

Le modèle numérique consiste en une reproduction maillée du barrage et d'une partie de la fondation. Le barrage est divisé verticalement par les cinq joints de dilatation et horizontalement par des couches de 3 mètres d'épaisseur implémentées pour simuler la construction progressive du BCR.

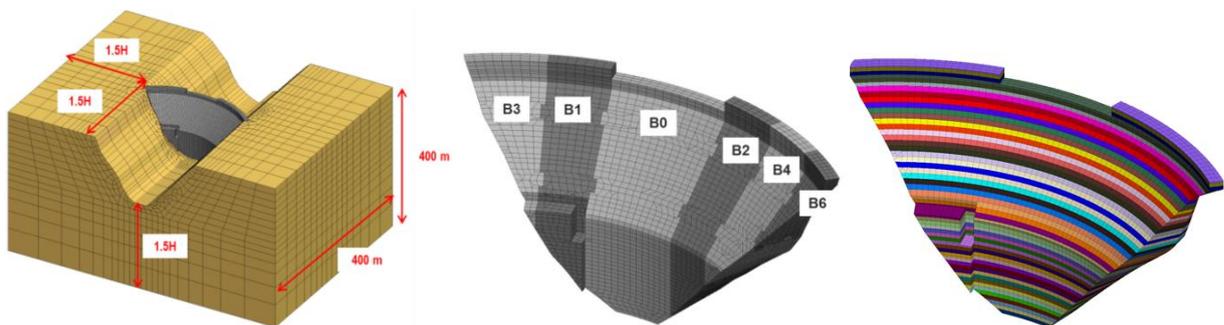


Figure 2 - Géométrie du modèle (g.) - Division par plot (ce.) - Division par couches (dr.)

### 2.2.2. Hypothèses mécaniques

Le béton et le rocher de fondation suivent une loi de comportement élastique-linéaire. Le durcissement progressif du béton est pris en compte sous la forme d'une augmentation du module d'Young  $E_c$  en fonction de l'âge du béton  $t$  (en jours) selon la formule suivante, où  $E_{c,\infty}$  est le module final (Figure 3, Conrad et al. 2005) :

$$E_c(t) = 1.129 E_{c,\infty} \exp(-5.0t^{-0.63})$$

Le modèle est par ailleurs équipé de deux types de joints non-linéaires :

- Le contact béton /rocher ;
- Les cinq joints de dilatation verticaux équipés de boîtes de cisaillement.

Chacun de ces joints suit une loi de comportement de type frottement de Coulomb sans résistance à la traction. Ils peuvent par conséquent s'ouvrir, glisser, et refermer des zones précédemment ouvertes en cas de chargement opposé. Les joints verticaux sont au surplus équipés de boîtes de cisaillement, interdisant tout déplacement relatif radial entre deux plots adjacents.

### 2.2.3. Hypothèses thermiques

Dans le modèle, les matériaux suivent une loi de comportement thermique isotrope. Les échanges thermiques suivants sont reproduits :

- Conduction thermique dans le corps des matériaux ;
- Convection thermique avec l'eau et l'air ;
- Radiation solaire sous la forme d'une augmentation de la température de l'air sur le parement aval plus exposé au soleil ;
- Génération de chaleur par hydratation du ciment dans le corps du barrage.

Les quantités de chaleur impliquées dans ces échanges dépendent de la température du milieu extérieur et des propriétés des matériaux. Les températures de l'air ambiant et de l'eau de la rivière utilisées dans le modèle sont des moyennes journalières des températures relevées sur site. Les propriétés thermiques des matériaux sont déterminées sur la base d'essais spécifiques en laboratoire ou bien sont des valeurs conservatives issues de la littérature. Des analyses de sensibilité ont par ailleurs été effectuées afin d'éprouver la pertinence des valeurs choisies.

Un des paramètres fondamentaux du calcul thermique est la chaleur d'hydratation du ciment puisqu'elle détermine la montée en température du béton (Figure 3). Le ciment prévu pour la construction du barrage bénéficie d'une chaleur d'hydratation relativement faible (220 J/g à long terme). Dans la conception actuelle, la formulation du BCR comprend 80 kg de ciment et 70 kg de pouzzolane par mètre cube de béton. Il en résulte une montée en température adiabatique de 8°C.

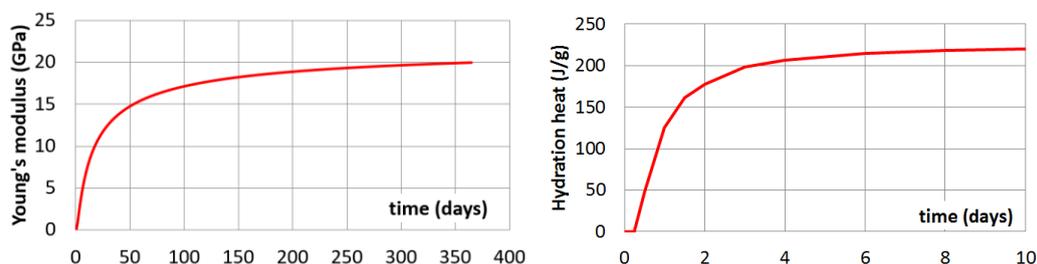


Figure 3 - Evolution du module d'Young (g.) et de la chaleur d'hydratation du ciment (dr.) en fonction du temps

La montée en température du béton dépend de la température du milieu extérieur au moment où il est coulé. En hiver, l'air froid dissipe une large part de la chaleur d'hydratation du ciment et limite la montée en température du béton. En été, c'est l'inverse. La durée de la construction du barrage étant de l'ordre de deux années, un zonage thermique initial s'établit dans le corps du barrage entre les zones plus froides coulées en hiver et celles plus chaudes coulées en été. Ce zonage thermique tend à s'estomper avec les années, se transformant en zonage de contraintes et de déplacements.

La date de début de construction du barrage est donc un élément déterminant dans le comportement du barrage. Deux dates de commencement ont ainsi été testées par le calcul, la première en hiver (1<sup>er</sup> février) et l'autre en été (1<sup>er</sup> août). Au regard de l'avancement des travaux, le commencement en hiver est aujourd'hui plus probable. Il s'agit du cas présenté dans la suite.

#### 2.2.4. Hypothèses hydro-mécaniques

Les pressions interstitielles sont prises en compte dans le modèle sous la forme de variables d'état. Les calculs sont donc effectués en termes de contraintes effectives. A chaque étape, les pressions interstitielles sont calculées en cohérence avec le système de drainage et le niveau de la retenue.

Le critère de perméabilité au contact béton/rocher et au droit des joints verticaux est fixé à 0.2 mm d'ouverture. Dès que l'ouverture d'un joint dépasse cette valeur limite, la pleine pression hydrostatique est appliquée sur les deux lèvres du joint, sous réserve que la zone du joint en question soit en contact avec le réservoir.

### 2.3. Méthodologie de calcul

#### 2.3.1. Calcul temporel

Les calculs ont pour but de simuler aussi fidèlement que possible le comportement thermo-mécanique réel du barrage du début de la construction jusqu'à 30 ans après la première mise en eau. Les évolutions temporelles des paramètres suivants sont prises en compte :

- Construction progressive du barrage, en conformité avec le programme de construction ;
- Hydratation du ciment ;
- Durcissement du béton ;
- Variation saisonnière de la température de l'air et de l'eau sur la base des mesures effectuées sur site ;
- Variation du niveau de retenue conforme aux cycles annuels d'exploitation.

### 2.3.2. Couplage thermo-mécanique

Le couplage thermo-mécanique utilisé consiste en une alternance entre les calculs thermiques, qui visent à déterminer la distribution de températures à une date donnée, et les calculs mécaniques qui traduisent les variations de température en déformations puis en contraintes par la loi de Hooke (expression simplifiée 1D donné ci-dessous) :

$$\sigma = E\varepsilon = E\alpha\Delta T$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de dilatation thermique,  $\Delta T$  est l'écart de températures entre deux calculs mécaniques et  $E$  est le module d'Young du matériau.

Le pas de temps des calculs thermiques est d'une heure. La durée entre deux calculs mécaniques varie en fonction des étapes de calcul mais est de l'ordre de la dizaine de jours.

### 2.4. Résultats des calculs

Le modèle numérique permet de visualiser les cartographies et les historiques des températures, contraintes et déplacements dans l'ensemble de l'ouvrage.

L'historique des températures montre qu'un état stationnaire est atteint après une vingtaine d'années. La température maximale calculée est de l'ordre de 26°C. Cette valeur, relativement faible par rapport au retour d'expérience sur des barrages en BCR de dimensions équivalentes, est rendue possible par un environnement thermique favorable, un dosage en ciment et une chaleur d'hydratation du ciment limités. La baisse maximale de température est d'environ 13°C après 30 ans. Cette valeur est calculée au cœur du barrage, dans les zones bétonnées en été.

Cette baisse de température conduirait à des contraintes thermiques de traction de l'ordre de 2.6 MPa si le retrait thermique était empêché. Au contraire, la présence des joints non-linéaires permet un relâchement significatif de ces contraintes qui sont converties en ouvertures (Figure 4). Après 30 ans, seules quelques zones majoritairement situées à des singularités géométriques conservent des tractions supérieures à 1 MPa, qui est la résistance à la traction du béton prise comme hypothèse de calcul.

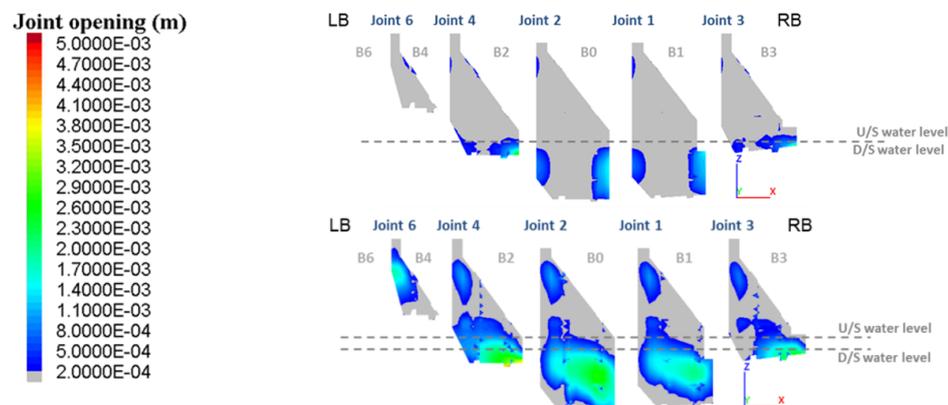


Figure 4 - Ouverture des joints verticaux  
Fin de la construction (haut) - CME après 30 ans (bas)

Au droit des joints, la localisation des ouvertures dépend de la situation de calcul (RN, CME) mais également de la date de début de construction. Comme évoqué précédemment, les ouvertures les plus significatives sont situées là où le retrait thermique est le plus important, c'est-à-dire dans les parties coulées en été.

A retenue normale, il n'y a aucun problème de fuites puisque l'étendue des ouvertures est limitée par l'effet d'arc. A la cote minimale d'exploitation cependant, les ouvertures sont plus larges et traversent le barrage en plusieurs endroits. Des joints waterstops doivent par conséquent être provisionnés. En revanche, la stabilité du barrage ne nécessite pas d'effet d'arc pour cette cote de retenue. Corollairement, les résultats du calcul confirment que les injections de clavage ne sont pas possibles à la fin de la construction puisque les joints sont fermés et qu'elles ne peuvent/doivent être envisagées qu'après 20 à 30 ans.

La stabilité mécanique du barrage est évaluée en utilisant une représentation de l'état de contrainte au contact béton/rocher. En chaque point du contact, un vecteur donne la direction et la norme de la contrainte de cisaillement tandis qu'un cercle – orienté de manière à visualiser la direction de la contrainte normale – traduit la résistance au cisaillement. Le rapport entre le rayon du cercle et la norme du vecteur donne la marge vis-à-vis d'un glissement local.

Cette représentation permet d'apprécier la symétrie du comportement du barrage. A retenue normale, les ouvertures, qui correspondent à des contraintes normales nulles (absence de cercle), sont concentrées dans la partie amont du contact où les excavations sont divergentes (ligne d'entrée en terre). Le développement de l'effet d'arc se traduit par un déport des

résultantes vers l'aval et à mi-hauteur du contact. L'influence de la date de début de construction est également visible : les zones où la contrainte normale est plus faible sont celles qui ont été coulées en été.

Un facteur de sécurité global à l'échelle du barrage peut être également être calculé. D'après les calculs ce facteur de sécurité est suffisant dans toutes les situations rencontrées ; la stabilité du barrage est jugée très satisfaisante. C'est une conséquence notable de la convergence géométrique vers l'aval des excavations qui exclut tout glissement global du barrage.

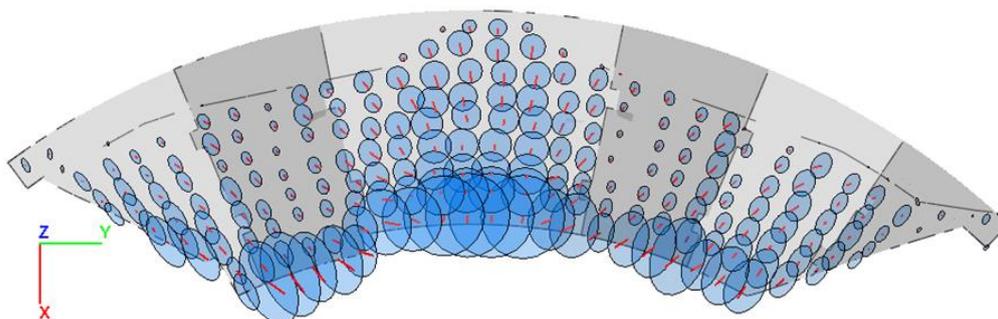


Figure 5 - Etat de contrainte à l'interface béton /rocher après 30 ans

## 2.5. Conclusion et définition des dispositions constructives

Sur la base des conclusions des calculs thermo-mécaniques, la conception du barrage de Janneh est validée. Les cinq joints de dilatation seront coffrés, munis de boîtes de cisaillement et de joints waterstops. Un dispositif d'injection sera également provisionné afin de conserver une possibilité de diminuer les ouvertures au contact béton/rocher et par conséquent les débits de fuite si nécessaire. Le cas échéant, ces injections ne pourront être réalisées qu'après un refroidissement suffisant du barrage, c'est-à-dire après une vingtaine d'années.

Afin de relâcher les éventuelles contraintes de traction d'arc qui subsisteraient dans le corps de l'ouvrage, chaque plot sera équipé côté amont d'un ou deux joints induits, régulièrement espacés entre les joints principaux et équipés de waterstops.

La localisation du dispositif de drainage est par ailleurs ajustée en fonction des résultats du modèle numérique. En rive, les galeries sont légèrement décalées vers l'aval de manière à éviter l'ouverture du contact en partie amont.

## 3. CALCUL SISMIQUE : CAS D'UN BARRAGE EN COURS DE CONSTRUCTION EN ASIE DU SUD-EST

### 3.1. Brève présentation du barrage

Le projet en objet, en cours de construction en Asie du Sud-Est, est un barrage BCR/BCV de 74 m de haut, conçu dans un premier temps en tant que barrage poids. Malgré une fondation rocheuse composée de tufs volcaniques de qualité moyenne, il a été estimé que la configuration favorable de la vallée permettrait la mobilisation d'un effet voûte améliorant, à moindre coût, le comportement du barrage vis-à-vis de l'aléa sismique, important dans la région.

Le profil poids initial, dimensionné pour les cas statiques et les situations sismiques d'exploitation (SBE) par des méthodes pseudo-statiques ou spectrales simplifiées, a été conservé (avec un fruit total de 0.95), tandis que l'axe rive à rive a été arqué suivant un rayon de 120 m environ ce qui correspond à un angle d'ouverture de 55 degrés.

Le corps du barrage est composé de 3 plots. La maîtrise des eaux en phase de crues ou de vidange est assurée par trois pertuis de demi-fond et un évacuateur de surface, implantés respectivement dans le plot central et le plot rive gauche.

### 3.2. Modèle numérique 3D

#### 3.2.1. Généralités

Le modèle numérique présenté vise à évaluer le comportement du barrage sur sa fondation en situation sismique, d'exploitation SBE et extrême SMP, en considérant la réponse dynamique de l'ouvrage et son interaction avec la fondation et le réservoir.

L'étude de l'ouvrage comprend une phase d'initialisation du modèle, avec les étapes suivantes :

- **Construction du barrage** : réalisée suivant le planning prévu par l'Entreprise, cette étape comprend le chargement de poids propre par couches sur les 3 plots verticaux, ainsi que le retrait thermique avec possibilité d'ouverture des joints de dilatation ;
- **Mise en eau du réservoir** : phase durant laquelle la pression hydrostatique du réservoir et les sous-pressions associées sont ajoutées.

Une étude dynamique est ensuite menée, comportant une analyse modale, une recombinaison CQC des réponses spectrales (d'exploitation, SBE  $p_{ga} : 0.38g$  et extrême SMP :  $p_{ga} : 0.65g$ ) puis application du champ d'accélération CQC sur le même modèle, tout en conservant les éléments non-linéaires dans les joints de dilatation de la phase d'initialisation, et introduisant la possibilité d'ouverture du contact béton/fondation.

Cette méthode, similaire à la méthode des efforts latéraux [5], a été mise en oeuvre du fait de sa robustesse et de sa pertinence en raison du caractère prédominant des modes principaux dans chaque direction - environ 80% de la masse totale de l'ouvrage et parce qu'elle permet d'appréhender le comportement dynamique et non linéaire de l'ouvrage, et d'identifier d'éventuels optimisations/ajustements de conception, tout en s'affranchissant de la complexité de calculs temporels et non-linéaires.

L'analyse se focalise sur les éléments jugés sensibles à ce stade du projet, à savoir, les déformations en clef, l'ouverture des joints verticaux de dilatation et le risque d'ouverture au niveau du contact barrage fondation, tout en intégrant la sensibilité des résultats au retrait thermique du béton et au clivage des joints de dilatation, paramètres essentiels du développement de l'effet voûte.

### 3.2.2. Modélisation

L'étude de l'ouvrage, réalisée sur le logiciel DIANA-FEA, comprend un maillage hexaédrique linéaire, de 2m pour le barrage et jusqu'à 50m pour le bac de fondation. Les dimensions de ce dernier sont telles qu'indiqué en Figure 6. Des éléments joints « no tension » sont adoptés à l'interface barrage fondation et dans les 2 joints de dilatation inter-plots (en rouge sur la Figure 6). Les pertuis d'évacuation des crues ainsi que leurs principales structures associées sont représentés. La fondation, dont le module est environ 6 fois inférieur à celui de béton, a été modélisée par des éléments non pesants (Figure 6, à gauche) et bloqués en déplacement sur son pourtour. Dans l'analyse dynamique, l'interaction couplée de l'ouvrage avec le réservoir est modélisée par une interface fluide / structure, qui détermine en fonction des déplacements du parement amont l'impact sur la réponse fréquentielle de l'ouvrage. En raison du caractère linéaire de l'approche modale/spectrale l'hypothèse d'un fluide incompressible est adoptée [6].

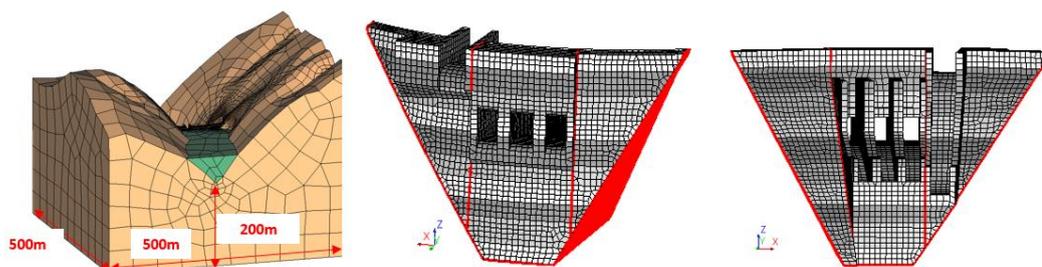


Figure 6 - Vue 3D du modèle avec maillage

### 3.2.3. Chargement et analyses

L'ouvrage est soumis au poids propre, à la pression hydrostatique, aux sous-pressions et au retrait thermique suivant les hypothèses suivantes :

- **PP** - Poids propre - Chargement par couches de 10 m de chacun des 3 plots indépendants ;
- **RN** – Retenue Normale – Chargement hydrostatique de 70,5 mètres de colonne d'eau appliquée sur le parement amont. La sous-pression correspondante est imposée sur les faces supérieures des éléments joints du contact barrage-fondation, suivant un schéma triangulaire classique, avec réduction de sous-pression de 2/3 au droit du voile de drainage placé à 10m du pied amont.
- **RT** – **Retrait Thermique** – Chargement relatif à la dissipation de la chaleur d'hydratation des bétons, avec une hypothèse de température moyenne après prise du béton de 40°C et d'un refroidissement à long terme de 15°C par conduction et échange thermique avec l'atmosphère et le réservoir [3][1].

L'ouvrage subit également les sollicitations sismiques (**SBE et SMP**), modélisées sous forme de chargements de champ d'accélération CQC, obtenus à partir de la réponse spectrale et de l'analyse modale de l'ouvrage obtenue par recombinaison CQC des accélérations modales. Les valeurs du champ appliqué dans chacune des 3 directions de sollicitation sont les accélérations CQC « signées » en chaque nœud du modèle suivant le mode propre principal correspondant. Les 3 chargements obtenus ainsi sont ensuite combinés suivant la méthode de Newmark [4], puis ajoutés aux charges statiques. Dans les résultats présentés ci-après la composante sismique principale est orientée vers l'aval ou l'amont suivant les cas, et les secondaires (affecté d'un coefficient de Newmark 0.3) sont respectivement dirigées vers la rive droite et verticalement ascendante. En raison de la quasi-symétrie de l'ouvrage, l'orientation de la composante rive-à-rive n'affecte pas significativement les résultats.

Sont distingués les cas réservoir plein ou vide et leur incidence sur les fréquences propres et la réponse spectrale. L'accélération verticale est définie par un ratio de l'accélération horizontale, ratio variant de 2/3 à 1, en raison des spécificités sismo-tectoniques du site, dont la source prépondérante est située à une distance inférieure à 10 km [5]. Les chargements sont ensuite appliqués sur un modèle comportant des non-linéarités (joints verticaux de dilatation et éventuellement ouverture du contact béton rocher). La Figure 7 présente les spectres horizontaux et verticaux à 5%, ainsi que les fréquences propres des modes principaux dans les 3 directions.

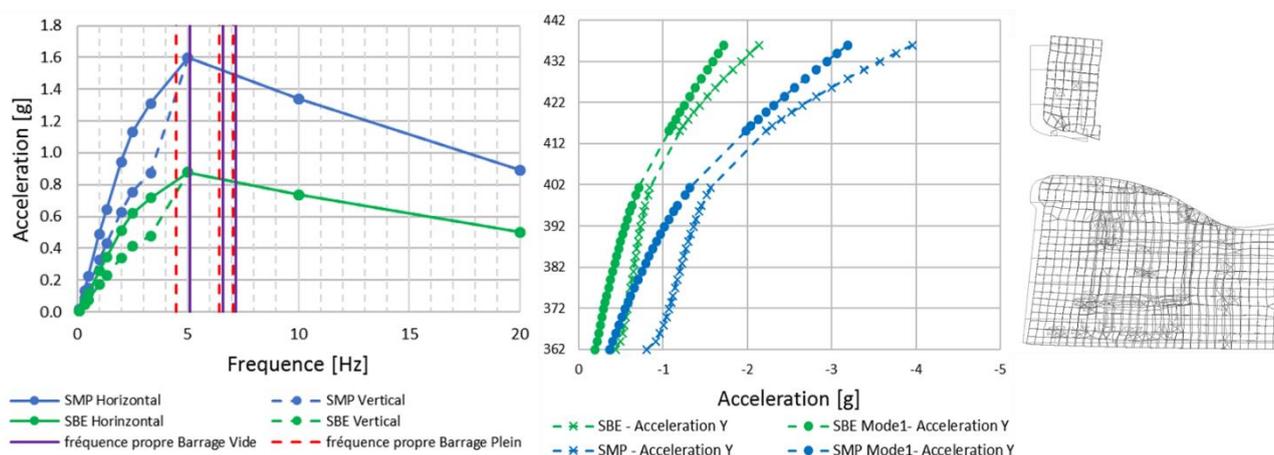


Figure 7 - Spectres d'accélération (SBE et SMP) et modes propres (g.) Profil des accélérations en clef de l'ouvrage selon le nombre de modes cumulés (ct et dr.)

### 3.2.4. Joints de dilatation inter-plots et situation analysées

Le clavage des joints inter-plots et l'effet du retrait thermique du béton sont étudiés suivant les conditions suivantes de long terme (béton à l'équilibre thermique ambiant):

- Clavage « parfait » : Le béton est refroidi à température ambiante moyenne avant clavage. Il n'y a alors pas de retrait thermique une fois le clavage réalisé;
- Clavage « partiel » : Le clavage est réalisé 6 mois après la fin de construction du barrage, alors que son cœur est encore chaud. Le béton poursuit alors son refroidissement naturel ;
- Sans clavage : Cas extrême où les joints ne sont pas clavés, et où le béton se refroidit naturellement.

Dans les deux dernières situations, les joints verticaux seront donc, à long terme, plus ou moins ouverts.

L'ouverture possible du contact barrage-fondation (sans modification du profil de sous pression) est considérée pour les situations sous sollicitations sismiques, là où des tractions apparaissent.

### 3.3. Résultats

#### 3.3.1. Déplacements

Il est constaté comme attendu (Figure 8) que l'effet du clavage et du contrôle des températures du béton limitent les déplacements du barrage vers l'aval. Les différences entre les situations de clavage « partiel » et « parfait » sont peu prononcées, et se manifestent principalement sur les élévations basses du barrage.

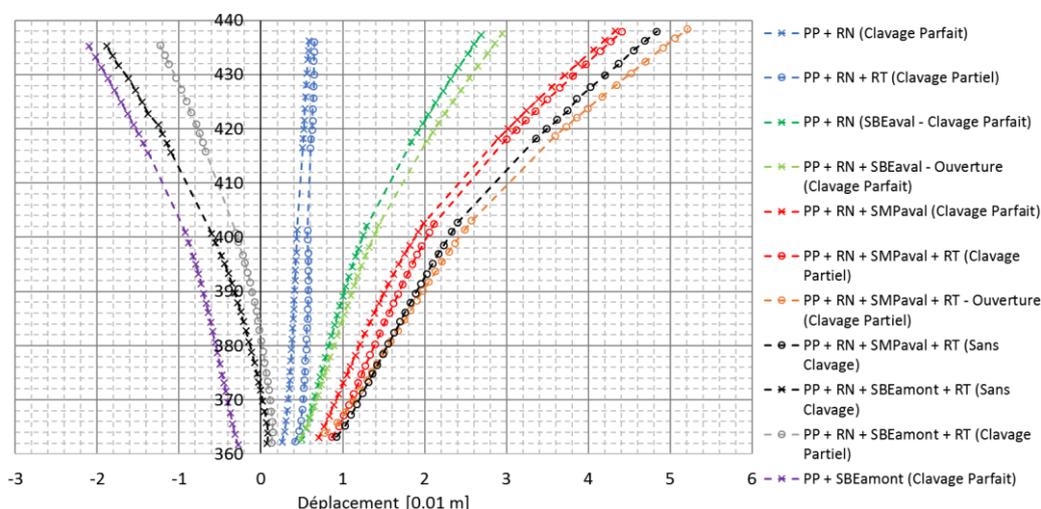


Figure 8 - Déplacement d'une coupe en clé du parement amont

En effet, au moment du clavage, le BCR reste chaud, alors que la crête est quasiment à l'équilibre. L'ouvrage non clavé ni refroidi (« sans clavage ») subit des déformations plus marquées. L'ouverture du contact barrage fondation, avec le relâchement des tractions du pied amont, majore d'autant plus les déformations vers l'aval.

Ces résultats mettent en évidence le mécanisme et les effets du clavage et du contrôle thermique qui réduisent les déformations et favorisent le développement actif des arcs.

#### 3.3.2. Comportement des joints de dilatation

La Figure 9 montre qu'en absence de clavage et de contrôle thermique du béton, les joints de dilatation restent ouverts sous le chargement hydrostatique de la retenue normale ; mais que, sous sollicitation sismique extrême vers l'aval (SMP), ils se referment plus ou moins uniformément. Ainsi, l'absence de clavage n'empêche pas le développement d'arcs actifs pour les sollicitations extrêmes vers l'aval (SMP).

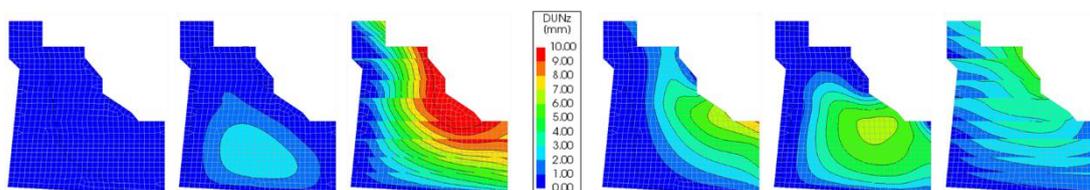


Figure 9 - Ouverture du joint vertical rive gauche sous chargement hydrostatique (g.) et avec application du SMP vers l'aval (dr.)

La Figure 10 met en évidence l'action du séisme d'exploitation (SBE) vers l'amont sur l'ouverture des joints de dilatation, en situation normale de réservoir plein (à droite sur la figure) ou exceptionnel de réservoir vide (à gauche). En cas de clavage même « partiel » la poussée de l'eau « maintient le contact » des plots, mais ce n'est pas le cas sans clavage, où des ouvertures pluri-millimétriques apparaissent. Ainsi, lorsque le réservoir est vide, le clavage « parfait » limite fortement les ouvertures, qui sont plus conséquentes avec le clavage « partiel ».

A noter que les franges horizontales, sans réelle signification pour l'étude, correspondent à un programme de chargement simplifié avec mise en place de plots de 10 m d'épaisseur, séparés par des arrêts de bétonnage prolongés.

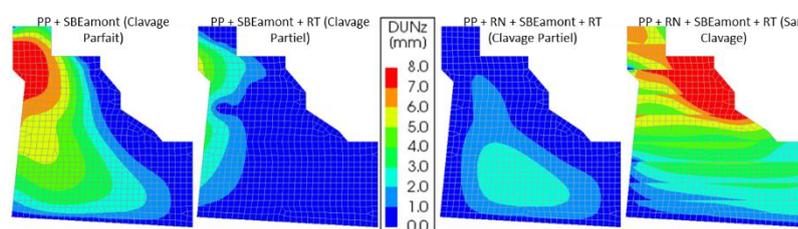


Figure 10 - Ouverture des joints verticaux rive gauche sous différentes conditions sismiques SBE vers l'amont

### 3.3.3. Contact barrage fondation

La Figure 11 montre la distribution des contraintes au contact barrage fondation sous la combinaison de charges PP + RN + SBE vers l'aval et pour les trois hypothèses de clavage des joints, « Parfait » à gauche, « Partiel » à droite et sans clavage en bas, respectivement avec ou sans refroidissement préalable du béton.

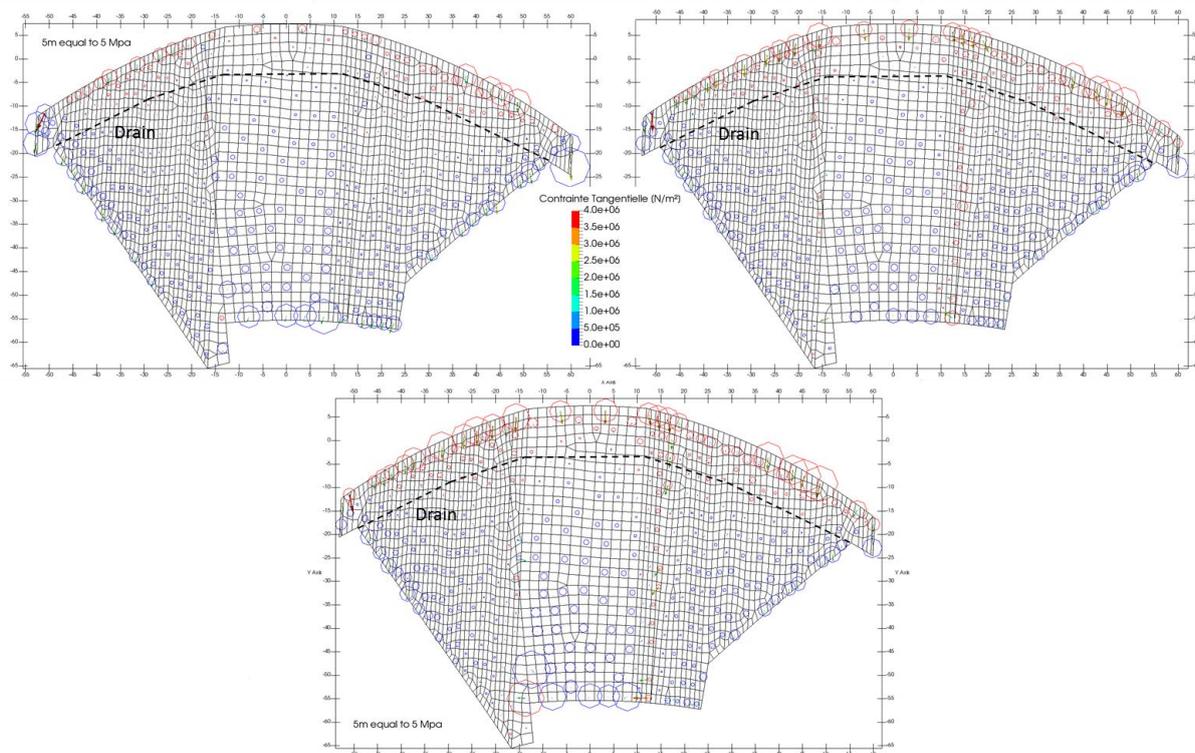


Figure 11 - Contact barrage fondation sous PP + RN + SBE aval - Clavage "Parfait" (g.) - Clavage "Partiel" (dr.) – sans Clavage (b.)

Nota : les cercles représentent les contraintes normales et les flèches les contraintes tangentielles

Une zone à l'amont du contact apparaît en traction (cercles rouge) : d'extension limitée elle affecte peu les voiles d'injection et drainage. Il est observé que l'effet du clavage « parfait » limite l'extension et l'intensité de la zone en traction, et favorise un transfert d'effort (effets d'arc) vers les rives avec des contraintes de compression plus marquées.

### 3.3.4. Ouverture du contact barrage fondation

L'examen des contraintes normales sur la surface de contact barrage/fondation permet d'évaluer le degré d'ouverture potentielle de cette zone. Le tableau 12 donne le pourcentage de surface comprimée à travers différentes sections de la fondation, pour les différentes situations introduites dans ce papier. Elle met en évidence l'effet significatif du clavage sur l'extension de la zone tendue en pied amont, ainsi que la redistribution des contraintes de compression vers les rives lorsqu'on relâche les tractions de pied amont.

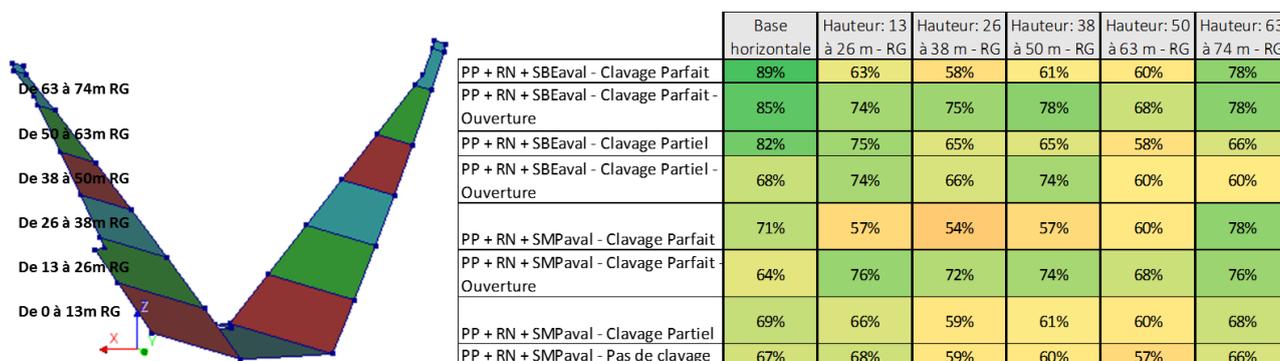


Figure 12 - Pourcentage surface comprimée du contact barrage fondation

### 3.4. Conclusion

L'étude présentée visait à évaluer le comportement dynamique de l'ouvrage dans une phase préliminaire de dimensionnement, en recourant à une méthode dynamique simplifiée, basée sur une analyse modale et réponse spectrale, permettant de modéliser l'interaction dynamique sol-structure et certains effets non linéaires significatifs, tels que l'ouverture des joints de dilatation verticaux et du contact béton-rocher. Malgré les limitations de la recombinaison CQC, cette méthode s'avère pertinente dans le cas présent en raison de la prédominance marquée des modes principaux. Nettement plus simple et rapide à mettre en œuvre qu'une analyse dynamique temporelle, elle a permis de valider les principales dispositions du projet et d'orienter les études ultérieures.

En effet, elle montre que sous sollicitations sismiques, les niveaux de contraintes et d'ouverture potentielle des joints de dilatation et du contact de la fondation restent dans un domaine acceptable sous SBE, et que l'ouverture du contact béton rocher depuis le pied amont permet une redistribution favorable des contraintes sous SMP.

Le calcul met en évidence les effets bénéfiques du clavage et du contrôle thermique assurant un béton à température ambiante avant clavage sur le développement des effets d'arc, et corrélativement sur l'ouverture du contact de la fondation ainsi que des joints de dilatation.

### CONCLUSION GENERALE

Les barrages poids-voûtes en BCR ont la particularité de présenter une stabilité poids suffisante pour certains chargements et de permettre la mobilisation d'un effet d'arc assurant la stabilité dans d'autres situations. Leur monolithisme parfait et permanent n'est donc pas requis, ni souhaitable dans la mesure où les moyens pour l'assurer sont onéreux et peuvent faire perdre l'intérêt pour ce type d'ouvrage. Les moyens conventionnels pour assurer le monolithisme parfait d'un barrage voûte consistent généralement en des injections de clavage de ses joints de dilatation, après stabilisation thermique du béton, obtenu le plus souvent par refroidissement actif après sa mise en place.

Diverses solutions techniques/constructives alternatives et moins contraignantes ont été explorées pour des barrages poids-voûtes en BCR, tolérant un clavage « imparfait » et une certaine ouverture « rémanente » des joints après construction. Les deux études présentées dans ce papier visent à évaluer ces solutions et vérifier qu'elles permettent d'assurer la stabilité du barrage et son comportement acceptable dans les situations considérées : cycles d'exploitation normale dans le premier cas, situations normale et accidentelle sismique dans le second.

Dans le premier cas, un calcul thermo-dynamique a permis de qualifier le comportement thermique de l'ouvrage et d'évaluer l'évolution temporelle de l'ouverture des joints et du contact avec la fondation au cours des trente premières années. Les résultats obtenus, satisfaisants du point de vue de la stabilité, valident la conception de l'ouvrage et permettent d'optimiser les dispositions constructives à mettre en œuvre.

Dans le deuxième cas présenté, une méthode dynamique simplifiée a permis d'appréhender la réponse de l'ouvrage sous forte sollicitation sismique et d'estimer certains effets non linéaires déterminants, tels que l'ouverture des joints de dilatation et le décollement du contact avec la fondation. Cette méthode a permis une première estimation de l'incidence d'un clavage plus ou moins « imparfait » et d'orienter la conception de l'ouvrage pour une phase d'étude ultérieure.

### REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier A. Yziquel (ARTELIA) pour sa participation active au développement et à la validation de la méthode de calcul, ainsi que l'ensemble du personnel d'EBML pour leur constante coopération au cours des études du barrage de Janneh.

Les auteurs souhaitent remercier C. Noret Duchene et C. Daux (TRACTEBEL) pour leur disponibilité et leur aide, qui ont contribué à la rédaction de cet article.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Conrad M., Aufleger M., Husein Malkawi A. I. (2005). Investigations on the Modulus of Elasticity of young RCC. In: Proc. of the 4th Int. Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain, pp. 729-733
- [2] Roy M., Andrian. F., Mathieu G., Yziquel A. (2017). Thermo-mechanical Calculations of the Janneh Dam. 14<sup>th</sup> International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, Stockholm, Sweden
- [3] Problème thermiques posés par la construction des barrages-réservoirs, A. Stucky, M. H. Derron, 1957 ;
- [4] Earthquake spectra and design, N. M. Newmark and W. J. Hall;
- [5] Response Spectra and Seismic Analysis for Concrete Hydraulic Structures, U. S Army Corps of Engineers, EM 1110-2-6050, 30 June 1999;
- [6] Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures, U. S Army Corps of Engineers, EM 1110-2-6051, 12/22/2003;