APPORTS ET LIMITES DES CALCULS CYCLIQUES POUR L'ANALYSE DU COMPORTEMENT DES BARRAGES-VOUTES

Advantages and limits of cyclic calculations for the analysis of arch dams

Vincent MOUY, Xavier MOLIN, Patrice ANTHINIAC
Tractebel, 5 rue du 19 mars 1962 - 92622 Gennevilliers CEDEX
vincent.mouy@tractebel.engie.com ; xavier.molin@tractebel.engie.com ; patrice.anthiniac@tractebel.engie.com

Mathieu ROY, Nicolas ULRICH, Frédéric ANDRIAN
ARTELIA, 6 rue de Lorraine 38130 Echirolles
mathieu.roy@arteliagroup.com ; nicolas.ulrich@arteliagroup.com ; frederic.andrian@arteliagroup.com

MOTS CLEFS

Calculs cycliques, barrages-voûtes, calculs non linéaires, interprétation de l'auscultation.

KEY WORDS

Cyclic calculations, arch dams, nonlinear calculations, monitoring analysis.

RÉSUMÉ

Avec l'augmentation significative des puissances de calculs, les calculs cycliques deviennent une approche séduisante d'analyse et de justification du comportement des barrages-voûtes. Cette nouvelle méthode permet d'analyser l'évolution éventuelle des comportements non-linéaires dans le temps et de gagner en confiance dans les résultats des modèles si certaines précautions de modélisation sont adoptées. Le présent article décrit quelques exemples où les calculs cycliques ont apporté une plus-value dans l'explication d'un comportement singulier ou dans la justification de la stabilité de barrages-voûtes. Les auteurs tentent par la même occasion de définir quelques situations-types pour lesquelles la prise en compte de l'histoire du chargement peut représenter un réel intérêt pour un barrage-voûte. Enfin, les limites de cette approche, mises en évidence par l'intermédiaire d'un cas d'étude, sont discutées.

ABSTRACT

The recent increase in computational power has allowed cyclic calculations to be considered as an effective method for the analysis and simulation of the behaviour of arch dams. This method allows studying the evolution of possible nonlinear behaviours through the years, and being more confident in the model's reliability, provided some modelling precautions are adopted. This paper describes some examples where cyclic calculations have allowed a better explanation of singular behaviours or a more adjusted justification of the stability of arch dams. The authors try inferring from these examples in which typical situations such calculations (e.g. taking into account the history of loading) are really worth for an arch dam. Eventually, some limits of this approach, highlighted through a case study, are discussed.

1. INTRODUCTION

Un barrage-voûte a par nature un comportement hyperstatique. En fonction de la variation des chargements thermiques et hydrostatiques qui se succèdent au cours de la vie de l'ouvrage, des fissures peuvent apparaître. Ces fissures permettent d'apporter au barrage la flexibilité dont il a besoin pour s'adapter aux différentes conditions de chargement auxquelles il est soumis et ne sont pas nécessairement dommageables au bon comportement de l'ouvrage. Les recommandations du CFBR pour la justification des barrages-voûtes [1] dressent d'ailleurs un bilan des fissures qui ont été observées sur les ouvrages, en indiquant celles qui traduisent un comportement normal des ouvrages, et celles potentiellement pathologiques qui nécessitent une surveillance et/ou une analyse particulière.

Ces fissures n'apparaissent pas nécessairement au premier remplissage, mais au fur et à mesure cycles de chargement été / hiver, remplissage et vidange du réservoir. En cas de comportement irréversible, elles peuvent également avoir un impact sur les chargements suivants.

Plusieurs stratégies de modélisation peuvent être mises en œuvre pour étudier le comportement de l'ouvrage.

Les fissures apparaissent dans les zones tendues et subissent une ouverture et fermeture selon les cycles de chargement saisonnier. Lorsqu'elles sont très rugueuses, avec des efforts de cisaillement faibles, aucun glissement n'est associé. Dans ce cas, un glissement d'origine cyclique n'est pas réaliste et le modèle représentera dès les premiers chargements le

comportement à terme du barrage. Cependant, lorsque la rugosité est faible (reprise de bétonnage) ou que les efforts de cisaillement sont importants (passage en caractéristique mécanique résiduelle) des déplacements irréversibles peuvent apparaître (glissement). Un cycle de chargement peut générer un déplacement dans un sens plus important que dans l'autre. Dans ce cas, il est nécessaire de modéliser une succession de cycles de chargement pour vérifier si le système tend vers une stabilisation.

Le présent article discute des calculs dits cycliques [2] [4], qui modélisent la succession des cycles de chargements, et peuvent être une alternative innovante, voire nécessaire dans certains cas, notamment pour l'analyse de comportements non-linéaires. On appelle ici sous le nom générique de « calculs cycliques » aussi bien des simulations de plusieurs cycles annuels (depuis la construction de l'ouvrage ou sur une fenêtre de temps limitée), que des calculs sur des événements "théoriques", afin de simuler des cycles "chargement-déchargement" de type saisonnier (« été-hiver » par exemple) ou bien hydrostatique («vidange-remplissage » par exemple) .

Cet article présente le retour d'expérience d'ARTELIA et de TRACTEBEL sur ces modèles cycliques.

Ces calculs requièrent une analyse préliminaire approfondie de l'ouvrage. Ils mettent généralement en jeu des mécanismes non-linéaires complexes, et le risque de dérive numérique ou l'utilisation de lois de comportement inappropriées est réel : plusieurs mécanismes physiques peuvent conduire et expliquer des déplacements irréversibles, et peuvent parfois se cumuler et interférer sur un même ouvrage : fluage du béton, gonflement du béton, fissuration progressive de l'ouvrage, adaptation de la fondation (cisaillement et adaptation locale). Certains ouvrages étant anciens, l'auscultation fine des déplacements (pendules / cocardes) n'est apparue que de manière progressive, si bien qu'il est rare d'avoir des séries d'auscultation qui couvrent l'ensemble de la vie de l'ouvrage (mise en eau comprise). La complexité de l'analyse et du calage des modèles s'en trouve alors accrue.

Les deux premières parties présentent des exemples concrets d'ouvrages pour lesquels des calculs cycliques ont été mis en œuvre pour compléter de l'auscultation, analyser et expliquer des phénomènes exceptionnels, et pour justifier la stabilité ou un confortement de barrage. Une dernière partie décrit les points d'attention et limites de ce type de modélisation.

2. APPORTS DES CALCULS CYCLIQUES POUR L'ANALYSE DE L'AUSCULTATION DANS DES SITUATIONS PARTICULIERES

2.1 Contexte – calage historique des données numériques ; problème des évènements singuliers

Dans les modélisations numériques traditionnelles, les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux peuvent être déterminées de plusieurs façons :

- Dans le cas d'ouvrages en cours de conception, ces caractéristiques sont choisies sur la base d'essais réalisés sur site et/ou de façon empirique ;
- Dans le cas d'ouvrages pour lesquels des données d'auscultation existent, un calage peut être effectué sur la base des analyses HST des dernières années. Ce type de calage est souvent réalisé à l'aide de chargements monotones censés représenter des variations de hauteur d'eau et des variations de température. Il est alors supposé qu'il soit possible de découpler les déplacements dus à la variation du chargement hydrostatique de ceux dus aux variations de températures. Les modules d'élasticité sont ajustés sur la base des variations hydrostatiques, et l'effet saisonnier permet d'ajuster le coefficient de dilatation thermique des matériaux.

Ces méthodes donnent des résultats généralement satisfaisants.

Le comportement réel de l'ouvrage est néanmoins différent. Lors de l'élaboration des recommandations pour la vérification des barrages-voûtes, les conditions de réalisation de ce calage ont été discutées, avec des pratiques différentes d'un bureau d'étude à l'autre : faut-il caler le modèle sur un comportement élastique linéaire ? Faut-il prendre en compte toute la fissuration du béton ? Ces deux hypothèses encadrent vraisemblablement le comportement réel de l'ouvrage.

Les effets hydrostatique (H) et saisonnier (S) d'une analyse HST sont estimés grâce aux mesures généralement disponibles sur la dernière partie de vie de l'ouvrage, et ne couvrent pas l'intégralité de la vie de l'ouvrage. Lorsque le barrage a connu une dérive significative, il peut y avoir une différence entre les effets H et S lors des premières années après la mise en eau, et le comportement actuel.

Alternativement, un calage modélisant les différents cycles de chargement est possible. Les modèles HST ont pour avantage leur rapidité de mise en œuvre, et permettent de multiplier les calculs. Ils peuvent également apporter des réponses sur la pertinence d'appliquer ou non des lois de fissuration, en analysant par exemple la déformée de la console de clef pour un chargement hydrostatique. Les calculs cycliques s'affranchissent de l'hypothèse d'un découplage entre les effets H et S, et permettent de prendre en compte les dérives éventuelles entre le remplissage du barrage et la situation actuelle.

Quelques exemples de calculs pour lesquels les modèles cycliques apportent une contribution intéressante à la bonne compréhension du comportement de l'ouvrage sont présentés ci-dessous.

2.2 Barrage de Bious

Le barrage de Bious est un barrage-voûte d'environ 59 m de hauteur, dont l'épaisseur varie entre 1.5 m (crête) et 8.5 m (pied).

En décembre 2016, le barrage a été soumis à une vague de froid importante, alors même que le remplissage du réservoir venait de se terminer après une vidange de deux mois. A cette occasion, les pendules ont mis en évidence des déplacements de la voûte vers l'aval, dépassant les records historiques mesurés jusqu'à présent.

La retenue avait été abaissée de manière préventive afin de revenir dans la plage des déplacements historiques.

A posteriori, le modèle numérique justifiant la stabilité de l'ouvrage a été utilisé pour analyser cet évènement exceptionnel, en particulier pour vérifier si ces mesures traduisaient un déplacement irréversible de l'ouvrage.

Le modèle avait été calé sur la base d'une analyse HST sur les déplacements :

Des simulations numériques ont permis, sur la base de ces éléments :

- De déterminer les modules de déformation du béton du barrage et rocher, ainsi que d'un matériau de remplissage qui a été utilisé entre le parement aval du barrage et la fouille du chantier,
- D'ajuster le coefficient de dilatation du béton,
- De valider l'utilisation des lois non linéaires utilisées (béton, et contact entre le barrage et la fondation), en analysant la déformée de la console de clef.

Afin d'étudier le comportement du barrage en décembre 2016, les chargements historiques – température extérieure mesurée à l'usine, et variation du niveau de retenue – ont été intégrés au modèle. La figure de droite ci-dessous présente les résultats mesurés (en noir), et calculés (en rouge sans prise en compte de la température, et en vert avec prise en compte).

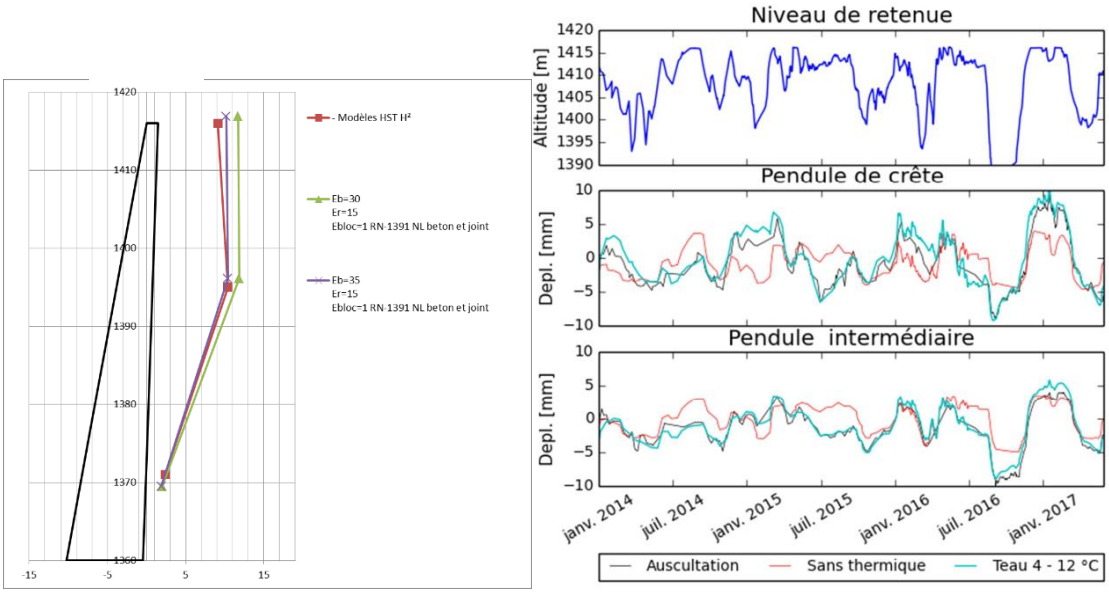

Figure 1 : (à gauche) comparaison de l'effet « H » entre les mesures d'auscultation et les résultats du modèle, (à droite) comparaison des déplacements mesurés par les pendules, et les résultats du modèle entre 2014 et 2016.

Le modèle avec prise en compte de la température permet de représenter remarquablement bien les déplacements mesurés. Notamment, il n'a pas été nécessaire de modifier les paramètres issus d'un simple calage HST pour obtenir une correspondance parfaite des courbes des séries historiques.

Le modèle sans prise en compte de la température (courbe rouge) est, lui, assez significativement différent des deux autres, ce qui montre bien la sensibilité de l'ouvrage aux effets thermiques.

Au final, le modèle n'a pas généré de déplacements irréversibles en décembre 2016. Les déplacements record s'expliquent par la conjonction d'une vague de froid, et d'un niveau de retenue particulière haut.

2.3 Cas du barrage de la Ville-Hatte

Le barrage de la ville-Hatte est un barrage à double voûtes d'environ 30 m de haut (15 m au-dessus du terrain naturel). La longueur de la crête de chaque voûte est d'environ 85 m. L'épaisseur est de 1,5 m en crête et 3 m en pied. Depuis sa construction, l'ouvrage a subi plusieurs événements significatifs : canicule de 2003, une crue en mars 2010 et une remontée rapide du niveau de la retenue en décembre 2011.

Suite à ces évènements, les désordres suivants ont pu être identifiés :

- Augmentation de la piézométrie en rive droite accompagnée d'un déplacement irréversible localisé suite à la canicule de 2003 ;
- Fissuration traversante (entre le parement extérieur et la galerie de drainage centrale) peu ouverte et peu étendue en partie droite de la culée centrale observée depuis 2011.

En parallèle de cette fissuration de la culée centrale, un effondrement de la paroi de deux drains de la même culée a par la suite été constaté.

Il est précisé que la géologie du site, aux frontières de deux formations, est particulièrement complexe. Elle inclut une faille identifiée sous cette culée qui a fait l'objet d'un traitement lors de la construction du barrage mais dont une partie du remplissage argileux a été retrouvée par la dernière reconnaissance complémentaire. Les calculs effectués incluent donc une étude de sensibilité sur la qualité géotechnique du rocher sous cette culée.

Les calculs cycliques ont ici été effectués pour simuler uniquement les évènements jugés significatifs subis par l'ouvrage depuis sa construction jusqu'à une période contemporaine, ils prennent ainsi la forme d'une succession de situations historiques : construction, mise en eau, mi-saison, canicule de 2003, mi-saison, hiver, crue etc. Ces calculs ont permis de trouver des pistes d'explication pour les comportements singuliers observés. Dans ce sens, la fissuration observée en 2011 est probablement une conséquence de la canicule de 2003 et de l'hiver qui y a succédé. Les températures faibles de l'air en décembre 2010 coïncidant avec une cote de plan d'eau proche du minimum historique ont potentiellement amplifié cette fissuration pour la rendre visible. En effet, les calculs montrent que la durée importante des fortes températures combinée à la poussée de la voûte ont été de nature à générer un faible déplacement de la culée (<1 mm) vers l'aval. De par l'encastrement significatif de la voûte dans le rocher (~ 8 m), le retrait thermique associé à un hiver suivant la canicule a été empêché et a potentiellement pu déclencher une fissuration se traduisant par une part irréversible de l'ordre de 0.3 mm calculée.

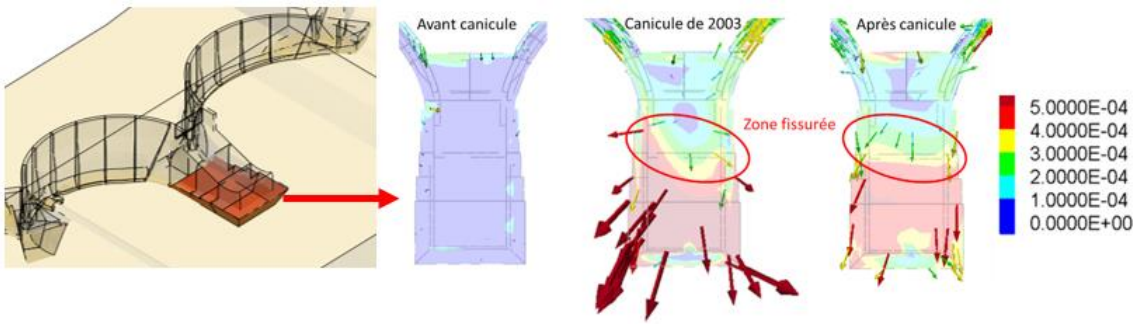

Figure 2 – Déplacements de cisaillement (mm) sous la culée centrale (vue en plan)

Une analyse traditionnelle appliquant un chargement monotone (chargement unique) n'aurait pas permis de retrouver la fissuration. En effet, la simulation de la canicule génère uniquement un glissement et la simulation d'un hiver considéré de manière indépendante n'entraine aucun comportement irréversible. La bonne simulation de l'état mécanique du barrage a donc nécessité le calcul successif de la canicule et de l'hiver normal qui lui a succédé.

2.4 Cas du barrage de Marèges

Le barrage de Marèges est un barrage-voûte à double courbure de 82 mètres de haut par rapport au terrain naturel construit en 1935. Depuis le début des années 80, le suivi de l'auscultation du barrage indique un mouvement irréversible du barrage, se traduisant par un déport de la crête vers l'amont et une surrection de la partie haute de l'ouvrage. Ce comportement est potentiellement attribué à un gonflement du béton lié à un phénomène d'alcali-réaction.

Ce gonflement induit une augmentation continue de la poussée de la voûte sur la culée de rive droite. Une étude de stabilité a donc été réalisée pour estimer le risque d'instabilité que cela peut engendrer.

Dans un contexte non-linéaire (fissuration au contact béton / rocher et dans les joints de clavage), l'ordre dans lequel les chargements sont appliqués est essentiel. Une méthodologie de calculs cycliques a donc été mise en œuvre par ARTELIA afin de simuler simultanément l'évolution périodique annuelle de la température du milieu extérieur et le gonflement du béton. Ce dernier a été modélisé par la loi de Charlwood, qui fait dépendre la vitesse de gonflement de la pression de confinement. Cette loi nécessite le calage de deux paramètres (vitesse de gonflement à contrainte nulle et contrainte limite de gonflement). Dans la pratique, la contrainte limite de gonflement est déterminée par tâtonnements sur la base d'un ordre de grandeur connu de manière semi-empirique.

La simulation cyclique des trois dernières vidanges décennales a permis de fiabiliser le modèle numérique. La méthodologie utilisée a consisté à appliquer successivement les chargements correspondants à une vidange, un remplissage puis un gonflement jusqu'à la date de la vidange suivante. L'évolution irréversible mesurée sur site est fidèlement reproduite, ce qui valide la représentativité des paramètres choisis au-delà de la pratique courante (figure suivante).

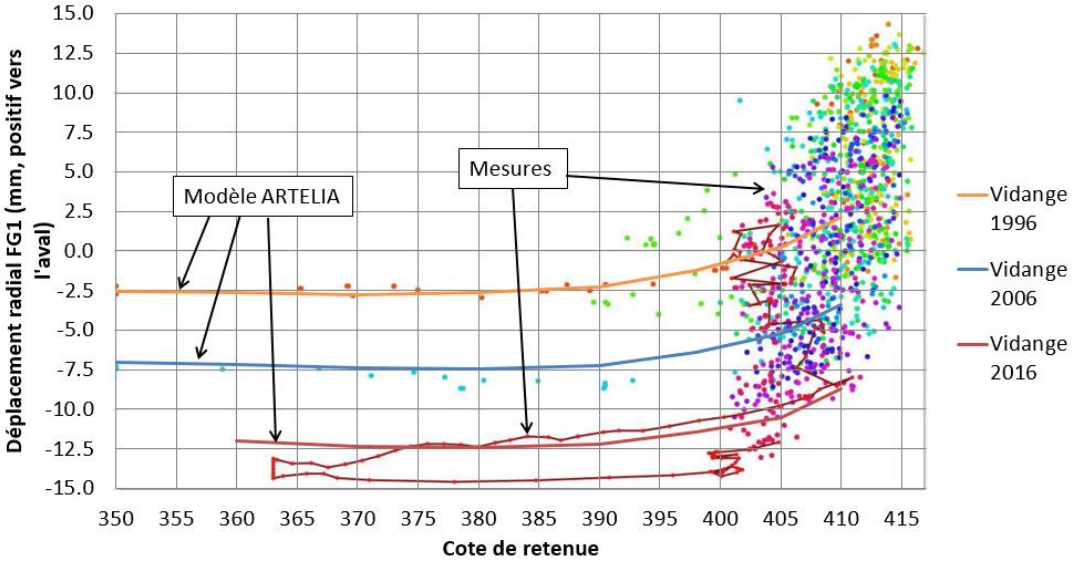

Figure 3 - Simulation des vidanges décennales du barrage de Marèges

2.5 Synthèse

Dans les exemples présentés précédemment, les calculs cycliques apportent une réelle plus-value par rapport à des analyses plus simples :

- Dans le premier cas, ils permettent une prise en compte précise de l'état thermique du barrage, dans un contexte d'évolution rapide des températures et des niveaux d'eau, ne pouvant pas être appréhendés précisément par les modèles HST, en raison de l'inertie thermique des structures, qui vient différer partiellement les effets thermiques tout en créant des gradients dans l'épaisseur de l'ouvrage, ainsi qu'en raison des effets thermiques liés aux variations de niveau du réservoir (température de l'eau vs température de l'air) ;
- Dans le deuxième cas, le phénomène suspecté d'avoir généré un désordre est la succession de deux cas de charge dont la simulation indépendante et monotone entraine un état de contraintes très différent ;
- Dans le troisième cas, la loi de comportement du matériau du barrage fait intervenir simultanément et de manière non linéaire, le facteur temps et l'état de contrainte dans le barrage. Les calculs cycliques permettent alors de cibler les jeux de paramètres permettant de reproduire le comportement du barrage.

Il est à noter (cf. par exemple barrage de Bious) que le fait de réaliser un modèle cyclique n'exclut pas un calage des paramètres par des analyses de type HST, qui peuvent donc donner d'excellents résultats dans certains cas, tout en étant plus simples à manipuler que des calages de paramètres réalisés directement sur un calcul cyclique.

On peut tenter de définir les deux situations dans lesquelles les calculs cycliques permettent de modéliser des phénomènes qui ne peuvent pas être appréhendés par les méthodes habituelles (de type analyse HST/HSTT) :

- Soit des évènements singuliers qui sortent du cadre de l'historique d'auscultation, et pour lesquels des effets complexes (inertie thermique, variation des températures en fonction du niveau d'eau…) ne permettent pas de découplage simple entre les différentes sollicitations,
- Soit des phénomènes mécaniques autres que le fluage, le retrait, et le gonflement, associés à des dérives saisonnières dont l'évolution n'est pas linéaire, et dépend significativement de plusieurs types de sollicitations. C'est ici le cas pour un barrage dont les comportements non-linéaires sont importants à la fois en été et en hiver mais pour lesquels les régions concernées par les non-linéarités sont différentes entre l'été et l'hiver.

3. APPORTS DES CALCULS CYCLIQUES EN PHASE DE CONCEPTION ET DE DEFINITION DE DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

3.1 Cas du barrage de Galens : optimisation d'un confortement sur la base de données historiques

3.1.1 Calage des données historiques

Cette méthode de calage a été appliquée dans le cadre de l'étude de stabilité et de confortement du barrage des Galens [4]. Il s'agit d'un barrage-voûte d'environ 23 m de haut et de 94 m de longueur. Ce ratio L/H de 4 le classe parmi les barrages voûtes implantés en vallée large. L'épaisseur maximale au niveau du terrain naturel est de 3 m.

Le barrage présente une fissure traversante au contact avec la fondation. Cette fissuration s'accompagne très probablement d'un glissement des consoles centrales vers l'aval. En raison d'une auscultation relativement récente, ce glissement n'a pas été mesuré directement puisqu'il se serait produit au cours des premières années après la première mise en eau. Des analyses HST existent seulement sur la dernière décennie. En revanche, une observation visuelle du parement aval met en évidence une fissuration diffuse et débitante.

Les calculs monotones montrent que le glissement le long du plan de fissuration qui se développe dans le béton ne peut être empêché que par la prise en compte de paramètres de résistance bien trop élevés (2 MPa de cohésion) pour une fissure traversante. Les difficultés de calage associées à une méthode traditionnelle ont alors conduit les auteurs à développer une nouvelle méthode de calage tenant compte de l'histoire des cycles thermiques subis par le barrage depuis sa construction. Cette méthode de calage amène alors à modéliser une cinquantaine de cycles été-hiver réguliers.

La figure ci-dessous représente l'organigramme de calcul mis en œuvre pour le calage du modèle numérique.

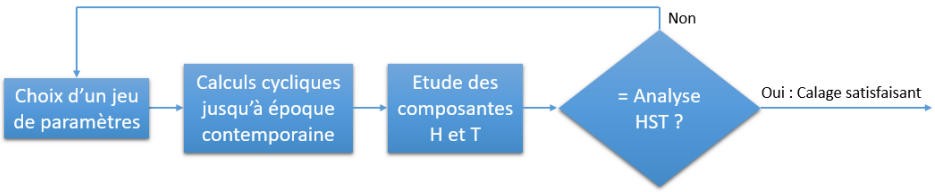

Figure 4 - Organigramme de calcul pour un calage utilisant des calculs cycliques

Dans ce calcul, le béton et le rocher suivent une loi élastique linéaire. Les non-linéarités sont modélisées au droit des joints verticaux de clavage (équipés de boîte de cisaillement) et de la fissure de pied suivant une loi de frottement de Coulomb avec une valeur initiale de cohésion et de résistance à la traction. Une succession de glissements vers l'aval en pied des consoles centrales en hiver est mise en évidence par le calcul. Ce glissement, significatif au début et s'atténuant par la suite, génère une évolution dans les écarts saisonniers calculés tels qu'illustrée sur la figure suivante. Le calage a ensuite été effectué en comparant la valeur finale calculée avec les données issues de l'analyse HST. Un choix volontairement pessimiste des paramètres de résistance (et de leurs évolutions) dans la fissure de pied exagère potentiellement le glissement par rapport à la réalité. En revanche, cette approche permet de vérifier la résistance du barrage dans des conditions moins favorables que celles du site.

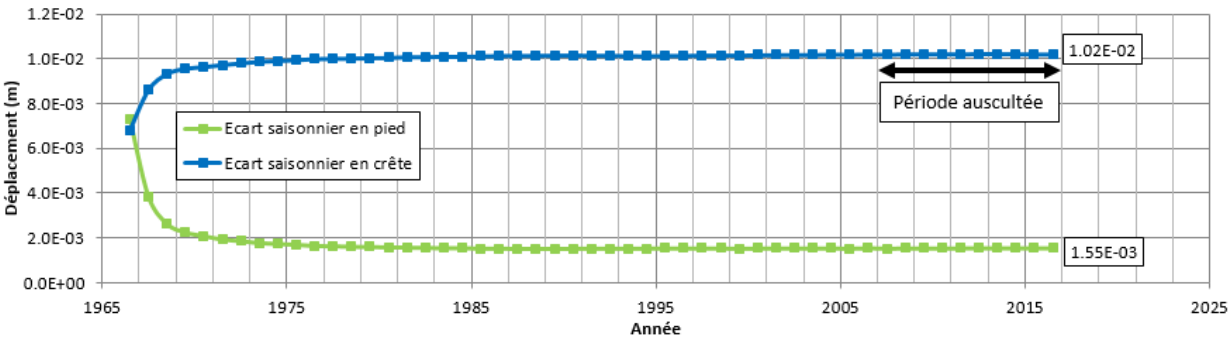

Figure 5 - Evolution calculée des respirations saisonnières en crête et en pied d'ouvrage

3.1.2 Optimisation d'un confortement

Dans le cas du barrage des Galens, la mise en œuvre de calculs cycliques a également permis de comparer l'efficacité à court et à long terme de plusieurs solutions de confortement (épaississement des consoles en rive, butée de pied à l'aval, tirants actifs). Les critères retenus pour cette analyse étaient, entre autres, leur capacité à réduire les déplacements irréversibles, et leur capacité à améliorer les marges de sécurité dans le cas d'un hiver centennal.

L'utilisation des calculs cycliques dans cette étude présente plusieurs intérêts :

- La prise en compte des cycles saisonniers subis par l'ouvrage depuis sa construction a permis de reproduire le comportement irréversible de la voûte dû à son adaptation. La situation initiale de l'étude de confortement est alors une situation contemporaine qui inclut déjà cette adaptation. Une approche utilisant un chargement monotone pour dimensionner le confortement aurait abouti à un surdimensionnement. En effet, le modèle aurait mis en évidence instantanément une partie de l'adaptation de la voûte qui a eu lieu en réalité de manière progressive pendant ses premières années.
- Les calculs cycliques permettent également d'évaluer l'efficacité à long terme du confortement, notamment en étudiant l'influence de celui-ci sur le résidu de dérive de la crête vers l'aval pour les dix années suivant le confortement. Ici, un dimensionnement sécuritaire a été adopté, interdisant toute adaptation significative attribuée à un glissement du barrage en situation confortée.

Une analyse multicritère montre que la solution par épaississement des consoles de rives est la plus appropriée au cas du barrage. Cette solution permet d'adopter une augmentation de l'épaisseur d'arc en fonction de l'abscisse curviligne de manière analogue à ce qui aurait été adopté dans le cas d'une voûte moderne. Par ailleurs, cette solution est la seule parmi les variantes étudiées qui apporte une isolation thermique aux consoles confortées, diminuant les respirations saisonnières de l'ordre de 20%.

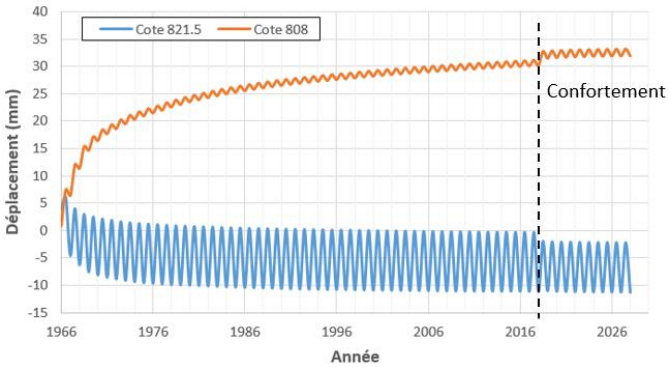

Figure 6 : Evolution du déplacement calculé en pied (orange) et en crête (bleu) de la console de clé du barrage de Galens

3.2 Cas du barrage de Janneh : Optimisation des dispositions constructives

Le barrage de Janneh est un barrage poids-voûte en BCR d'environ 150 mètres de hauteur sur fondation actuellement en cours de construction au Liban. La stabilité de ce barrage repose en grande partie sur l'effet d'arc pour l'ensemble des situations de projet. Le monolithisme doit donc être assuré dès la première mise en eau. Or, la dissipation de la chaleur d'hydratation du ciment après coulage du BCR peut conduire à des contraintes de traction d'origine thermique significatives, pouvant générer des fissures de nature à remettre en cause le monolithisme du barrage, et donc sa stabilité.

Par ailleurs, le schéma d'exploitation de l'ouvrage est tel que le marnage annuel prévu est de l'ordre de 80 mètres, lié à sa fonction d'approvisionnement en eau potable. Ce comportement périodique particulier associé à la problématique de dissipation de la chaleur d'hydratation 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. Un modèle numérique 3D a donc été élaboré afin d'étudier les éventuels mouvements irréversibles au cours des cycles d'exploitation et à mesure que la masse du barrage refroidit.

Le modèle fait varier de nombreux paramètres simultanément : hauteur du barrage suivant l'avancement de la construction, niveau d'eau dans la retenue, température du milieu ambiant, chaleur d'hydratation du ciment, module d'Young du béton. Les évolutions temporelles de ces paramètres sont données par des mesures spécifiques (températures, caractéristiques du béton) ou accordées au programme prévisionnel de construction. La cote de retenue est supposée suivre un cycle annuel de vidange/remplissage régulier d'une année sur l'autre. La période simulée s'étend du début de la construction jusqu'à la trentième année après le premier remplissage. Le pas de temps des calculs cycliques est de 10 jours. Des études de sensibilité sur certains paramètres (température de placement, chaleur d'hydratation du béton) ainsi que sur la raideur et la résistance des matériaux ont été effectuées afin de vérifier la robustesse du modèle (pas d'accumulation d'erreurs numériques au fil des cycles) et celle de la conception du barrage.

Les résultats des calculs cycliques montrent l'apparition de mouvements irréversibles dus au refroidissement progressif de l'ouvrage. En revanche, le modèle ne met en évidence aucune accumulation de déplacements irréversibles dus aux cycles annuels de marnage. D'une manière générale, la sécurité de l'ouvrage est très satisfaisante.

Les résultats ont par ailleurs permis de quantifier précisément les tractions et ouvertures des joints en fonction du temps, permettant de définir les dispositions constructives pertinentes à mettre en œuvre :

- Le nombre, la position et le traitement des joints de dilatation verticaux sont optimisés. Dans la conception actuelle, cinq joints seulement seront coffrés et munis de boites de cisaillement. Un dispositif d'injection sera provisionné, mais ne sera vraisemblablement utilisé qu'après un refroidissement suffisant du barrage, c'est-à-dire après une vingtaine d'années.
- La position des galeries de drainage dans le corps de l'ouvrage et celle du voile d'injection sont déportés vers l'aval en rive afin d'éviter la zone d'ouverture du contact béton / rocher en partie amont.

4. LIMITES DES CALCULS CYCLIQUES – MISE EN EVIDENCE PAR UN CAS D'ETUDE

4.1 Contexte

Les calculs cycliques étant associés à des comportements non-linéaires importants, toutes les recommandations de prudence associées aux calculs non-linéaires s'appliquent. Les retours d'expériences de ces calculs soulignent que, les paramètres entrant en jeu étant plus nombreux, les sources d'erreurs potentielles sont plus nombreuses et la détermination de l'ensemble des paramètres du calcul devient plus complexe et coûteuse en temps de calcul. Des erreurs d'origine numérique peuvent également intervenir. L'analyse critique des résultats, avec éventuellement une étude de sensibilité, devient particulièrement crucial. Les principales questions qui sont soulevées concernent :

- L'ordre d'application des chargements ;
- Le choix des lois de comportement et d'interface utilisées ;
- Le paramétrage des choix de calculs ;
- La convergence des calculs.

Afin d'illustrer certaines difficultés pouvant être posées par les calculs cycliques, les résultats issus du thème A du benchmark 2017 du CIGB sont présentés ([5] et [6]).

4.2 Présentation du cas d'étude (Benchmark CIGB 2017)

L'ouvrage étudié est un barrage-voûte mince en vallée large, d'environ 40m de hauteur, et soumis à des cycles thermiques importants induisant une forte fissuration du barrage. L'auscultation a montré que cette fissuration s'est développée progressivement (cf. figures suivantes).

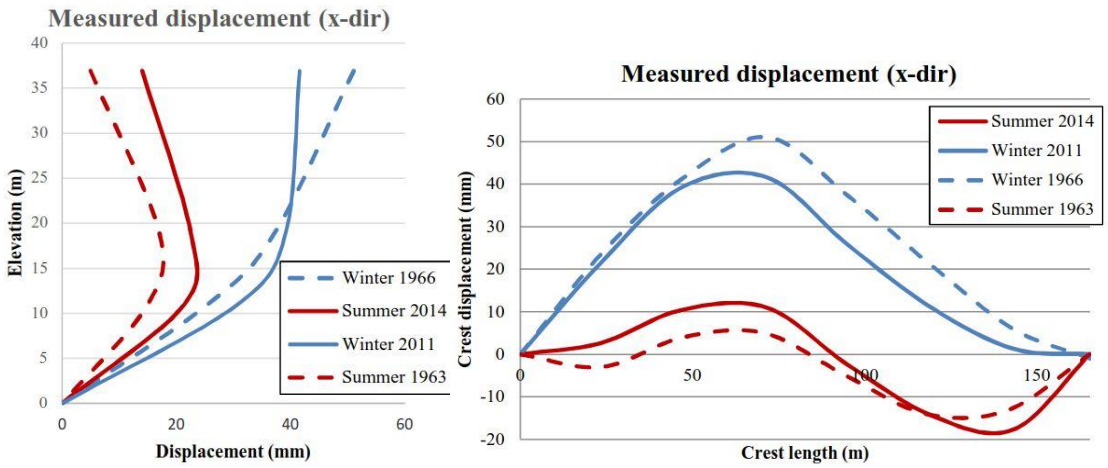

Figure 7 : Déplacement mesuré de la console de clé (à gauche) et de la crête (à droite)

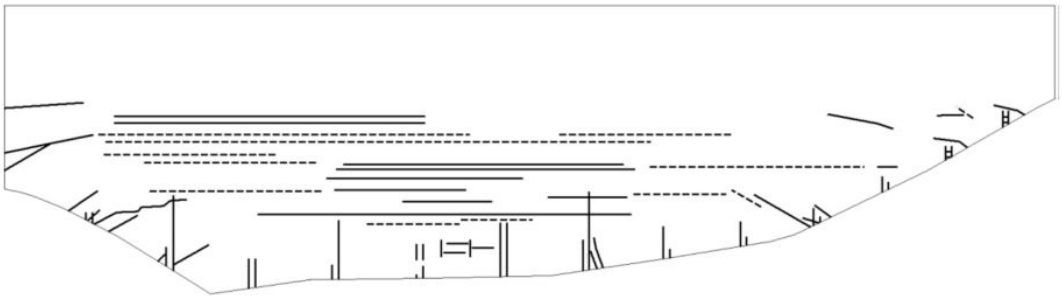

Figure 8 : Cartographie de la fissuration observée

L'objectif de l'étude était de modéliser cette fissuration afin de :

- Vérifier que la cartographie de fissuration obtenue par le calcul correspond à ce qui a été observé,
- Vérifier si les déplacements obtenus correspondent aux déplacements mesurés, et notamment si les allures des déformées sont similaires,
- Etudier les contraintes dans le barrage après redistribution des efforts.

Il était demandé de modéliser un cycle unique de chargement correspondant aux températures les plus extrêmes subies par l'ouvrage au cours de sa durée de vie, et de déterminer des cartographies de fissuration et les déformées de l'ouvrage.

Les calculs réalisés par les nombreux participants ont dans leur majorité permis de retrouver une cartographie de fissuration représentative d'un point de vue qualitatif de ce qui est observé, et des allures et amplitudes de déformées voisines des déplacements mesurés sur l'ouvrage au bout de 50 ans environ, alors que le calcul ne se reposait que sur la simulation de deux saisons successives, représentant les températures les plus extrêmes subies par le barrage sur son historique de chargement.

Les formulateurs du sujet ont discuté de la progressivité de la fissuration observée, avec deux explications avancées : un ouvrage ferraillé et la ductilité des aciers qui pourrait réduire la vitesse d'ouverture des fissures chaque saison, et des chargements non identiques d'une saison à l'autre, avec des fissures plus importantes qui apparaissent lors des épisodes exceptionnels de froid / chaud.

4.3 Etudes de sensibilité réalisées

Ce barrage étant soumis à une fissuration relativement intense, son comportement global est fortement non linéaire (impacté par l'état de fissuration), si bien qu'il s'agit d'un candidat parfait pour mettre en évidence qu'un même état thermique peut aboutir à des états mécaniques différents en fonction de l'historique de chargement.

Afin de mettre en évidence ce phénomène, plusieurs études de sensibilité ont été réalisées : l'ordre d'application des chargements, le pas de temps de calcul, les paramètres des matériaux non-linéaires utilisés, et paramètres de calculs.

Le cas de référence est un cas de chargement pseudo-cyclique (application successive de 4 chargements : hiver froid, été chaud, hiver froid, été chaud) ; chaque chargement thermique est appliqué avec 5 étapes de calculs mécaniques, puis relaxé en une seule étape. La loi d'ouverture de fissure est une loi fragile, avec orientation fixe, et perte totale de résistance au cisaillement. Le critère de convergence est de 1% sur la force ou le déplacement.

Les discussions sur l'effet des études de sensibilité portent sur l'amplitude des déplacements maximaux observés au niveau de la console de clé (en été comme en hiver) ; en effet, sauf dans le cas d'application brutale des chargements thermiques, il n'y a, sur l'ensemble des résultats présentés, aucune différence manifeste entre les cartographies de fissuration obtenues (aspect strictement similaire).

On pourra se référer à [6] pour les résultats détaillés.

4.3.1 Sensibilité par rapport à l'historique de chargement

3 modèles extrêmes ont été calculés, pour 3 historiques de chargements différents, avec dans tous les cas un remplissage initial du réservoir à la température d'équilibre : situation de référence (pseudo-cyclique avec 1er cas de charge thermique de type « hiver froid », suivi d'un été chaud, et d'une seconde saison identique), calcul similaire, mais avec situation initiale de type « été chaud », suivi d'un hiver froid et d'une seconde saison identique, et calcul cyclique avec application préalable de deux saisons avec des températures plus modérées (50 % de la variation thermique d'une saison rude), suivi d'un calcul identique au calcul de référence. Ce dernier calcul permet de représenter un historique de chargement plus réaliste, et de mettre en évidence l'éventuel intérêt d'un calcul avec des données historiques de température (cas nommé « preliminary moderate load »).

L'illustration ci-dessous présente en pointillés les déplacements obtenus lors du premier chargement extrême, et en traits pleins pour le second, la couleur indiquant le cas considéré.

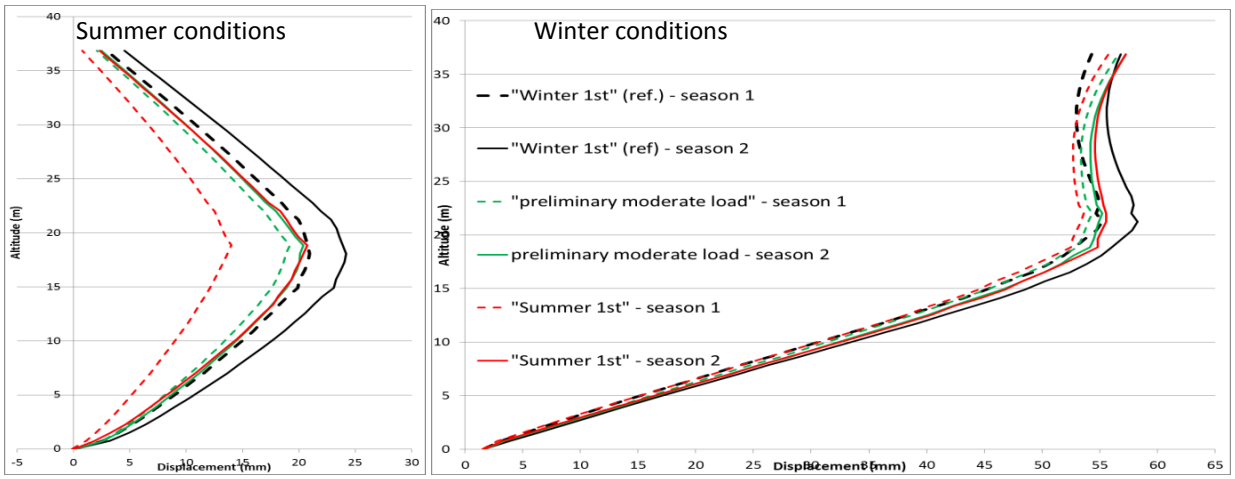

Figure 9 : Déplacement de la console de clé (à gauche) et de la crête (à droite) calculés pour plusieurs cycles saisonniers

Il est constaté qu'il y a, sur la seconde saison de chargement, quasiment pas de différences (largement inférieures) 1 mm) entre le cas où le chargement initial est un chargement été extrême, et celui où le chargement est progressif, mais que dans le cas où le barrage subit initialement un hiver rude, cela conduit à des **déplacements maximaux supérieurs d'environ 3 à 4 mm** vers l'aval par rapport aux autres modèles, ce qui représente une augmentation du déplacement de 24 % en été, et environ 6 % en hiver.

4.3.2 Sensibilité par rapport aux pas de temps de chargement

Pour un même historique de chargement, un modèle a été réalisé en appliquant brutalement les cas de chargements thermiques (au lieu des 5 étapes de calcul dans le modèle de référence). Ce dernier modèle présente une cartographie de fissuration diffuse, et une moindre inflexion de la console de clef, ne correspondant pas aux observations réalisées sur l'ouvrage. L'écart en termes de déplacement, par rapport au modèle de référence, est de **6.3mm (été) et 7.6 mm (hiver)**. Pour un même historique de chargement thermique, les différences des résultats sont donc le double de ce que l'on peut obtenir pour des historiques de chargement radicalement différents.

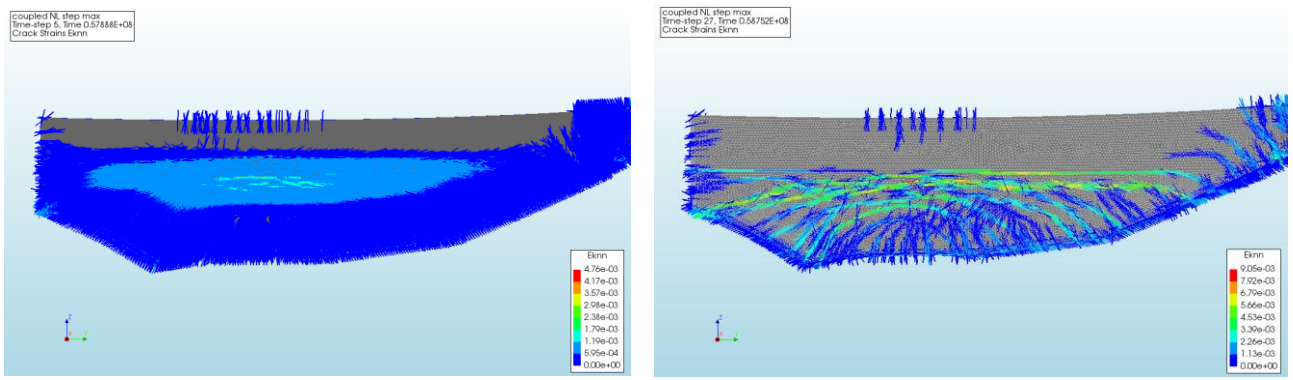

Figure 10 : Cartographies de fissuration calculées pour une application brutale du chargement (à gauche) et le cas de référence de pas de calculs (à droite)

En diminuant le pas de temps de calcul, les contraintes de traction apparaissent progressivement sur quelques éléments, et sont annulées à chaque étape avant d'affecter les éléments adjacents. Par conséquent, les fissures apparaissent plus localisées, mais avec des ouvertures plus importantes.

L'application du chargement avec un pas de temps de calcul élevé donne un résultat qui est très différent de la cartographie de la fissuration réellement observée sur le barrage. Il est donc nécessaire, dans ces domaines, d'appliquer les chargements de manière progressive, si l'objectif recherché est d'obtenir une cartographie réaliste des fissures.

4.3.3 Sensibilité par rapport aux paramètres mécaniques des lois de fissuration

Afin de tester la robustesse du modèle, plusieurs paramètres mécaniques ont été modifiés un par un – tous les autres paramètres restant inchangés : lois d'ouverture des fissures avec orientation fixe ou variable, maintien ou non d'une résistance résiduelle au cisaillement dans le joint, rupture fragile ou avec énergie de fracturation.

On présente ci-dessous les écarts en termes de déplacements maximaux calculés sur la console de clé pour des états thermiques similaires, et tous autres éléments identiques par ailleurs :

- En introduisant une énergie de fracturation (au lieu d'une rupture fragile) : jusqu'à : 15.5 mm (hiver) et 3.5 mm (été), soit de l'ordre de 5 fois plus que les différences en fonction de l'historique de chargement,
- En modifiant la loi d'ouverture de fissure (tout en conservant une rupture fragile) : jusqu'à : 10 mm (hiver) et 11 mm (été), soit de l'ordre de 3 à 4 fois plus que les différences en fonction de l'historique de chargement,

Ces paramètres ne sont pas mesurables, et les valeurs fournies par la bibliographie sont des fourchettes assez larges.

4.3.4 Sensibilité par rapport aux paramètres numériques du modèle

De la même manière que précédemment, la robustesse du modèle vis-à-vis de questions numériques a été testée, vis-à-vis de plusieurs modifications des paramètres : Taille du maillage, type de maillage (hexaédrique ou tétraédrique), type d'algorithme et critère de convergence.

- maillage hexaédrique au lieu de tétraédrique de mêmes dimensions : 4 mm (hiver) / 5 mm (été), soit un peu plus que les différences en fonction de l'historique de chargement
- taille du maillage augmentée (taille d'éléments x2) : pas de changement significatif,
- Type d'algorithme : pas de changement significatif (pour les algorithmes qui convergent),
- Critère de convergence à 0.2% au lieu de 1% : 8.5 mm (hiver) et 2.5 mm (été), soit également un peu plus que les différences obtenues en fonction de l'historique de chargement. Ces valeurs, étonnamment importantes, résultent des difficultés de convergences des algorithmes pour des calculs aussi fortement non linéaires.

4.4 Synthèse

Les résultats du benchmark soulignent que, indépendamment du choix du mécanisme physique expliquant la dérive et l'apparition progressive des fissures, plusieurs difficultés (intrinsèquement liés à la nature fortement non-linéaires des phénomènes modélisés) apparaissent avec ce type de calculs :

- La question du choix de modélisation du phénomène, qui, même si celui-ci est bien identifié, fait appel à de nombreux paramètres qui ne sont pas mesurables (comportement en traction et ou cisaillement après rupture dans le cas présent), qui ont une influence majeure sur les résultats finaux,
- La sensibilité à des paramètres purement numériques de modélisation qui font appel à l'expérience et au bon sens du modélisateur (forme ou orientation du maillage, critère de convergence, …).

Ces deux difficultés entrainent des incertitudes liées à la modélisation, qui nécessitent une prudence particulière dans la présentation et l'interprétation des résultats, en particulier pour les phases de calage des paramètres. En effet, le choix des paramètres physiques et numériques du modèle peut avoir un impact quantitatif sur les résultats plus important que l'historique de chargement, sur lequel se concentre pourtant intuitivement la majeure partie de l'attention du modélisateur.

Concernant ce dernier point, il apparait que, dans ce cas, l'historique de chargement n'a pas d'influence, pour peu que le chargement le plus défavorable ne soit pas appliqué immédiatement sur un ouvrage non fissuré.

5. CONCLUSION

Les mécanismes physiques qui entrent en jeu dans le comportement d'un barrage-voûte sont multiples et peuvent s'avérer complexes.

L'enjeu principal de la modélisation d'un barrage voûte est habituellement la détermination et la justification des mécanismes qui participent au comportement de l'ouvrage : fluage, gonflement, fissuration, déplacements irréversibles, etc. Cette détermination est souvent d'autant plus difficile à faire avec certitude que :

- L'auscultation des premières années de vie de l'ouvrage (quand l'essentiel du comportement irréversible s'est produit) est souvent inexistante,
- Comme cela a été mis en évidence dans les ateliers de calculs organisés par la CIGB, des modèles reposant sur des hypothèses différentes peuvent reproduire de manière qualitative les mesures d'auscultation, mais peuvent conduire à des états de contrainte significativement différents ([7] et [8]).

Historiquement, la puissance de calcul étant limitée, les ingénieurs ont développé des méthodes simplifiées pour analyser le comportement des barrages-voûtes. Ces pratiques ont montré leur efficacité et demeurent la référence dans la justification des ouvrages : le choix de paramètres adaptés permet en effet généralement de modéliser en une seule étape de calcul le comportement à terme de la structure (par exemple lorsque les fissures travaillent essentiellement en ouverture).

La puissance des calculs ayant été décuplée ces dernières années, il est toutefois désormais possible de réaliser des calculs qui reproduisent plusieurs cycles saisonniers de la vie d'un barrage.

Comparativement aux méthodes de calcul historiques, ces calculs cycliques présentent un réel intérêt dans le cas de la prise en compte de certains phénomènes complexes, notamment lorsque ces phénomènes comportent soit une forte influence d'effets thermiques difficiles à modéliser simplement (inertie thermique, …), soit la présence d'importantes non linéarités. Les exemples décrits dans le présent article illustrent ainsi des situations où les calculs cycliques ont eu une vraie plus-value, telles que :

- le support à l'auscultation et l'analyse de situation particulière ;
- la modélisation d'une situation de projet dont le comportement dépend de l'historique du chargement ;
- des adaptations de la voûte en cisaillement, où des déplacements irréversibles sont pressentis. Il est alors démontré l'intérêt d'analyser l'impact de ces déplacements irréversibles sur les chargements suivants (été ou hiver).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient pour leur participation dans les projets décrits dans cet article :

- Pierre Agresti et Alain Yziquel (ARTELIA) ;
- Claire Jouy (TRACTEBEL).

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] CFBR, 2018, Recommandations pour la justification du comportement des barrages-voûtes – Document provisoire

[2] Andrian. F. et al. , 2018, Safety of Existing Arch-Dams, Partie III – Chargements Cycliques, XXVI CIGB, Q101-R41, Vienne.

[3] Roy M. et al., 2017, Thermo-Mechanical Calculations of the Janneh Dam - 14th International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, ICOLD-CIGB, September 6-8, 2017.

[4] Andrian. F. et al., Les calculs cycliques pour accompagner le suivi et la maintenance (?) des barrages-voûtes, Méthodes et techniques innovantes dans la maintenance et la réhabilitation des barrages et des digues, Colloque du CFBR 2018, 27-28 novembre 2018, Chambéry.

[5] R. Malm et al., 2017, "Description and synthesis of theme A - Thermal cracking of a concrete arch dam", 14th ICOLD Benchmark Workshop on numerical analysis of dams.

[6] V. Mouy et al., 2017, "Behaviour of a thin arch dam under thermal load, with brittle behaviour", 14th ICOLD Benchmark Workshop on numerical analysis of dams, Stockholm 2017

[7] "Theme A : effect of concrete swelling on the equilibrium and displacements of an arch dam", 11th ICOLD benchmark workshop on numerical analysis of dams, Valencia, 2011

[8] "Theme B : "Analysis of a concrete faced rockfill dam including concrete face loading and deformation", 10th ICOLD benchmark workshop on numerical analysis of dams, Paris, 2009

[9] Bulletin 155, Du bon usage des modèles numériques dans l'ingénierie des barrages, CIGB