

CONFORTEMENT DES BARRAGES EN MACONNERIE PAR DES RECHARGES AVAL EN REMBLAI OU EN ENROCHEMENTS

Strengthening of masonry dams by means of downstream backfill

Jean-Rémi LHERBIER, Mathieu ROY

ARTELIA Eau & Environnement, 6 rue de Lorraine 38130 Echirolles
jean-remi.lherbier@arteliagroup.com ; mathieu.roy@arteliagroup.com

Sarah DELMAS, Patrick LIGNIER

TRACTEBEL ENGINEERING S.A., Porte de l'Arénas – 455 promenade des Anglais 06200 Nice
sarah.delmas@tractebel.engie.com ; patrick.lignier@tractebel.engie.com

MOTS CLEFS

Confortement, barrage en maçonnerie, recharge aval, analyse sismique temporelle

KEY WORDS

Strengthening, masonry dam, downstream backfill, time history seismic analysis

RÉSUMÉ

Suite aux retours d'expérience de plusieurs accidents et à l'évolution de la réglementation, la nécessité de conforter certains barrages-poids en maçonnerie est apparue. Pour ce type d'ouvrage, un confortement par une recharge aval en remblai ou en enrochements est une solution souvent retenue qui a été mise en œuvre sur plusieurs ouvrages.

Une méthode de dimensionnement des recharges aval en situation statique basée sur la théorie du coin de Coulomb a été développée par TRACTEBEL. Cette méthode, applicable pour toute géométrie et rapide à mettre en œuvre, est présentée dans cet article. Elle est ensuite appliquée au cas du barrage de Dardennes, dont les travaux de confortement par recharge aval sont prévus en 2020. Afin de tester la fiabilité de cette méthode, celle-ci a été comparée aux résultats de calcul obtenus par une modélisation aux éléments finis ainsi que par des méthodes traditionnelles de géomécanique.

Par ailleurs, sous chargement sismique, les contrastes de raideur entre la maçonnerie et les matériaux du remblai aval nécessitent la mise en œuvre de calculs numériques. En effet, il convient de s'interroger sur l'apport réel du remblai en termes de raideur et sur sa capacité à modifier significativement le comportement sismique du système. En outre, un éventuel comportement dynamique déphasé entre le barrage et sa recharge peut interroger sur le comportement mécanique à l'interface entre ces deux éléments.

Dans la suite de l'article, la méthode de justification des barrages en maçonnerie confortés par remblai aval sous chargement sismique développée par ARTELIA est présentée. Cette méthode a notamment été mise en œuvre pour les barrages de La Lauch et de Bouzey. L'analyse dynamique temporelle des barrages sous séisme SES est réalisée à l'aide de modèles numériques aux différences finies. L'article décrit l'estimation préliminaire des modes propres du système, la vérification de la résistance de la maçonnerie pendant le séisme, l'évaluation des déplacements irréversibles et l'analyse fine de l'interface entre la maçonnerie et le remblai.

Au travers de ces deux méthodes développées par TRACTEBEL et ARTELIA, l'article présente ainsi une démarche complète de justification des barrages-poids en maçonnerie confortés par des recharges aval en situations statiques et dynamiques.

ABSTRACT

Due to accidents feedback and to the improvement of standard practice, a strengthening of several masonry dams appears to be necessary. For this type of dams, strengthening by means of downstream backfill is a solution often chosen which has been implemented for several dams.

TRACTEBEL has developed a simplified method to assess the force applied on the dam by the downstream backfill which can be applied for any geometry. This quick method is detailed in this article. Calculations have been carried out to design the downstream backfill of Dardennes Dam, which will be strengthened in 2020. In order to prove the reliability of this analytical method, the results are compared with two other methods - FEM numerical model and standard geomechanical calculations.

Under seismic load, the stiffness discrepancies between the masonry and the backfill materials require numerical calculations. Those are indeed necessary to evaluate the influence of the backfill to the whole system in terms of stiffness, and to assess if it can lead to an improvement of the seismic behavior of the dam. In addition, the potential shifted dynamic responses of the dam and the backfill require the mechanical behavior at this particular interface to be investigated.

In this respect, the design methodology of downstream backfill under seismic load developed by ARTELIA is presented. This method has been used for La Lauch and Bouzey dams. The time history seismic analysis under MCE is carried out by means of the finite difference element method. This article describes the preliminary assessment of the eigenmodes, the stress-strength analysis of the masonry during the earthquake, the evaluation of the displacement due to yielding and the analysis of the dam / backfill interface.

By means of the above-mentioned methodologies developed by TRACTEBEL and ARTELIA, the article provides a way to design the strengthening of masonry dams by means downstream backfill under both static and dynamic loads.

1. INTRODUCTION

1.1. Parc Français des barrages en maçonnerie

Le parc Français des barrages en maçonnerie compte 70 ouvrages de plus de 15 mètres de hauteur sur fondation, construits entre 1672 (Saint Ferréol, Haute-Garonne) et 1950 (Oule, Hautes-Pyrénées). Un inventaire du parc a été réalisé en 2014 dans le cadre d'un groupe de travail du CFBR [1]. Cet ensemble d'ouvrages présente une grande variété de profils, de hauteur sur fondation et de matériaux constitutifs, en relation directe avec l'évolution des connaissances et des techniques.

De profils massifs jusqu'à la moitié du XIX^e siècle, les barrages en maçonnerie ont progressivement évolué vers des conceptions plus élancées pour optimiser la quantité de matériau (profil Delocre). Suite à la rupture du barrage de Bouzey en 1895, qui a tragiquement mis en évidence le rôle des pressions interstitielles, les barrages du XX^e siècle sont épaissis et intègrent peu à peu des dispositifs de drainage, permettant d'accroître la hauteur sur fondation (Gnioure, 72m). Le développement du béton dès les années 20 signe la fin de l'emploi de la maçonnerie pour les ouvrages neufs.

1.2. Pathologies

Les pathologies les plus souvent rencontrées sur les barrages en maçonnerie sont les suivantes :

- Défaut d'étanchéité (par vieillissement de la maçonnerie notamment) ;
- Stabilité insuffisante, outre la sensibilité de ces maçonneries au temps, ces barrages possèdent des profils habituellement minces, la conception de ces ouvrages étant parfois antérieure à l'élaboration des théories aujourd'hui classiquement adoptées (rôle des sous pressions notamment) ;
- Marges de sécurité insuffisantes, compte tenu de l'évolution de la réglementation depuis la conception de ces barrages ;
- Sous-dimensionnement et/ou dégradation des évacuateurs de crues.

1.3. Accidentologie

En France, l'accidentologie relative aux barrages en maçonnerie se résume essentiellement à la rupture du barrage de Bouzey survenue en avril 1895. Ce n'est cependant pas le seul exemple de ce type d'événements à l'échelle mondiale, d'autres désordres importants et ruptures ayant été recensés [2]. Ce retour d'expérience montre que les deux causes principales d'accident sont le défaut de stabilité en situation de crue et les sous-pressions.

Barrage	Hauteur sur TN	Date de l'accident	Type d'accident	Cause probable	Confortement
Habra (Algérie)	35 m	1872	Rupture partielle de l'évacuateur	Crue, surverse	
		1881	Rupture de la rive droite	Crue, surverse	Reconstruction à l'identique
		1927	Rupture complète	Crue, surverse	
Cheurfas (Algérie)	35 m	1885	Rupture de l'appui rive droite	Crue, surverse	Tirants actifs, injections en fondation, régénération des maçonneries
Bouzey (Vosges)	15 m	1884	Glissement en pied de 35 cm vers l'aval, brusque augmentation des fuites	Sous-pressions	Recharge en pied aval, drainage de la fondation par puisards
		1895	Rupture brutale des 10 m supérieurs	Sous-pressions	Arase au niveau de la surface de rupture, injection des sols, enrochement en aval
Tigra (Inde)	24 m	1917	Rupture de deux blocs	Fortes sous-pression	Arase au niveau de la surface de rupture
Khadakwasla (Inde)	33 m	1961	Basculement d'un plot	Surverse, affouillement de la fondation	

1.4. Méthodes de confortement des barrages

Les solutions de confortement des barrages en maçonnerie dépendent de la nature des désordres à traiter, des spécificités du site et sont choisies sur la base d'une analyse technico-économique. Elles sont de plusieurs types :

- Amélioration du drainage dans le corps du barrage et de sa fondation ;
- Réfection de l'étanchéité du barrage (par injections dans le corps de l'ouvrage, ou traitement du parement amont par rejointoiement, par enduit généralisé ou par mise en place d'une géomembrane ;
- Confortement de l'ouvrage par la mise en place d'une recharge aval ou par la mise en œuvre de tirants actifs.

A plusieurs reprises ces dernières années, la solution de confortement par recharge aval a été retenue sur des barrages en France. Les principes directeurs de la conception de cette solution sont les suivants :

- Une recharge aval stabilisatrice constituée d'un matériau pesant, de type enrochements tout-venant,
- Une couche de transition de matériau drainant entre le barrage et la recharge afin de collecter les éventuelles percolations au travers du barrage. Cette couche joue également un rôle mécanique, à savoir uniformiser les efforts appliqués par la recharge au barrage, en limitant le poinçonnement du parement du barrage par les plus gros éléments du matériau de la recharge.

La méthode de dimensionnement développée par TRACTEBEL pour la justification de ce type de confortement en situation statique est présentée et appliquée au barrage de Dardennes. Elle est suivie d'une présentation de la méthodologie de justification en situation sismique développée par ARTELIA et mise en œuvre pour les barrages de La Lauch et de Bouzey.

2. JUSTIFICATION EN SITUATION STATIQUE PAR LA METHODE DU COIN DE COULOMB

A l'occasion de plusieurs études de confortement de barrages en maçonnerie par des recharges aval, TRACTEBEL a mis au point une méthode simple de dimensionnement des recharges en enrochements, basée sur la théorie du Coin de Coulomb.

Les résultats issus de cette méthode ont été comparés aux résultats des calculs de poussée empruntés à la géomécanique ainsi que ceux de calculs ayant recours aux éléments finis.

Les paragraphes qui suivent exposent la synthèse des travaux réalisés par les équipes de TRACTEBEL qui a abouti à la mise en œuvre d'un nouvel outil de dimensionnement d'une recharge aval de confortement pour tout type de géométrie.

2.1. Description de la méthode

La stabilité du barrage en maçonnerie conforté est évaluée par l'intermédiaire d'un calcul aux solides indéformables, suivant une ou plusieurs coupes-types 2D représentatives de la géométrie du barrage.

Dans sa méthode de dimensionnement, TRACTEBEL propose d'évaluer l'action stabilisatrice apportée par la recharge aval à partir de la théorie du Coin de Coulomb. A un niveau donné du barrage, niveau dont on se propose d'étudier la stabilité, on considère l'équilibre d'un coin de recharge, découpé par un plan de rupture supposé, incliné ascendant vers l'aval. On décompose ensuite le poids (P) du coin en une force agissant sur le barrage (A) et la réaction de la partie restante de la recharge (R) ($\vec{P} = \vec{A} - \vec{R}$).

La réaction de la partie restante de la recharge sur le coin s'applique au tiers inférieur du plan incliné de rupture supposé. L'action du coin de la recharge sur le parement aval du barrage s'applique au tiers inférieur du contact barrage/enrochements.

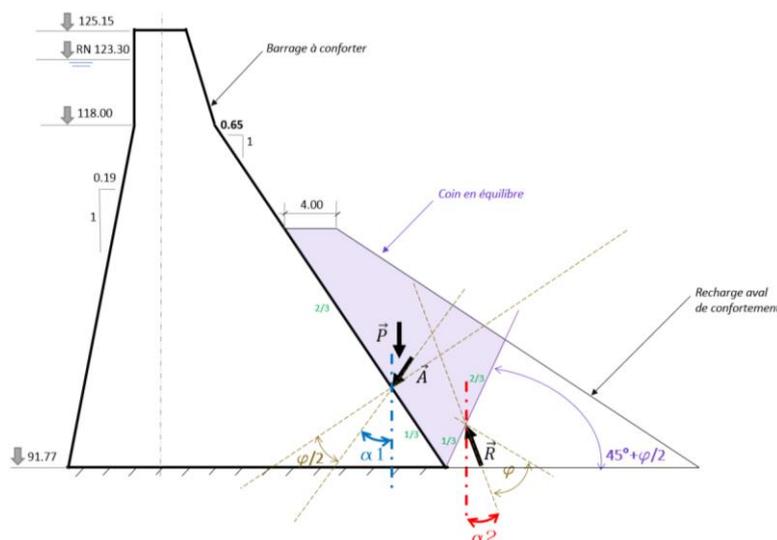


Figure 1 : Illustration du coin de Coulomb

Le choix du plan incliné de rupture est choisi de manière à minimiser l'apport stabilisateur de la recharge aval. Deux cas se présentent :

- Dans le cas d'un parement aval vertical, ce plan de rupture est incliné à $45^\circ + \varphi/2$ par rapport à l'horizontale. Le coin peut alors être supposé en équilibre limite tel que défini par la théorie de Rankine. Dans ce cas, la position de la ligne d'action de la réaction de la partie restante du massif est connue et passe par le tiers inférieur du plan. La poussée du barrage sur le remblai est alors également connue ;
- Dans le cas d'un parement aval incliné, la poussée d'un coin de remblai est de pente quelconque mais passe par la base du parement aval. Cette poussée est donnée par la formule de Poncelet ou de Muller-Breslau. En dérivant cette formule, le plan de rupture peut être déterminé en fonction de l'inclinaison de du parement aval et du talus du remblai, ainsi qu'en fonction de l'angle de frottement du remblai, supposé non-cohésif, et celui de l'interface écran/remblai. Ce calcul conduit à des inclinaisons légèrement différentes de $45^\circ + \varphi/2$, mais néanmoins proches.

Le coin de matériau ainsi délimité est considéré comme un milieu pesant pulvérulent et indéformable en équilibre limite, glissant d'une part sur le parement aval du barrage et de l'autre sur le plan de rupture.

En adoptant une inclinaison constante à $45^\circ + \varphi/2$ et en supposant un équilibre limite de Rankine, on obtient la possibilité de calculer pour un niveau donné, l'action de la recharge aval sur le barrage sans passer par une estimation des coefficients de poussée.

Deux hypothèses sur la direction des forces \vec{R} et \vec{A} sont réalisées afin d'obtenir une décomposition unique :

- la réaction (\vec{R}) est inclinée de l'angle de frottement interne des enrochements (φ), par rapport à la perpendiculaire au plan de rupture ;
- l'action du coin (\vec{A}) est inclinée de $\varphi/2$ par rapport à la normale à la surface de contact barrage/recharge.

Par projection sur l'axe vertical et l'axe horizontal, on obtient respectivement :

$$A \cos \alpha_1 = P - R \cos \alpha_2 \quad \text{et} \quad A \sin \alpha_1 = R \sin \alpha_2$$

Permettant d'aboutir à :

$$A = P / [\cos \alpha_1 (1 + \tan \alpha_1 / \tan \alpha_2)]$$

Ces hypothèses vont vers une obtention de la poussée minimale de stabilisation :

- Si la réaction de la partie restante de recharge (R) se rapproche de la perpendiculaire au plan de rupture, la composante horizontale de la poussée sur le barrage, qui apporte la stabilité, s'accroît. A contrario, plus il y a de frottement à l'interface, plus la partie restante du remblai va empêcher le coin à l'équilibre de s'appuyer sur le barrage en maçonnerie ;
- Si l'on ne suppose aucun frottement à l'interface barrage poids/recharge, la composante de la poussée horizontale s'accroît également.

La stabilité générale du barrage après confortement est ensuite évaluée le long de l'interface barrage/fondation et le long d'autres surfaces de rupture potentielles (au sein du barrage notamment), en tenant compte de l'action de la recharge aval comme une action extérieure, décomposée en un effort vertical et un effort horizontal, qui s'appliquent au tiers inférieur du contact barrage/recharge.

2.2. Etude de cas et validation de la méthode

2.2.1. Objectifs

Dans le but de valider les résultats obtenus à partir de la méthode approchée développée par TRACTEBEL, une étude comparative a été menée sur le barrage de Dardennes. Cette étude consiste à estimer à partir d'autres méthodes l'action exercée par la recharge aval sur le barrage :

- Modélisation numérique aux éléments finis à l'aide du logiciel DIANA FEA (Finite Element Analysis) v10.2 ;
- Calculs de poussée empruntés à la géomécanique.

2.2.2. Présentation du barrage

Le barrage de Dardennes, construit entre 1909 et 1912 et mis en service au printemps 1913 (remplissage définitif), est un barrage poids arqué en maçonnerie de moellons calcaires liés au mortier de chaux, de 154 m de longueur en crête et de 37,50 m de hauteur au-dessus des fouilles.

Suite en particulier au constat de l'augmentation des sous-pressions en fondation, plusieurs études de stabilité du barrage ont été réalisées, notamment après réalisation de reconnaissances géotechniques. Il apparaît que l'ouvrage doit être conforté. La solution d'une recharge aval a été retenue à la suite d'une étude technico-économique.

2.2.3. Modèle numérique aux éléments finis

2.2.3.1. Objectifs de l'étude et hypothèses retenues

Une modélisation non-linéaire aux éléments finis a été réalisée à l'aide du logiciel DIANA. Les caractéristiques de la recharge et ses dimensions ont été définies sur la base d'une étude de stabilité du barrage après confortement (modélisation 2D en solides indéformables).

La recharge a été modélisée et le modèle éléments finis a permis de tenir compte des déformations des ouvrages pour l'estimation des efforts appliqués par la recharge sur le barrage.

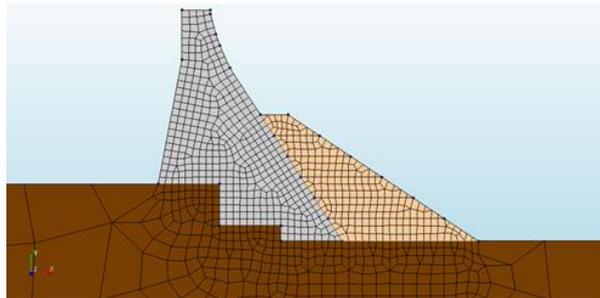


Figure 2 : Modèle éléments finis (barrage en gris et recharge aval en orange)

Des éléments d'interface non-linéaires permettent le glissement et l'ouverture du joint au droit des contacts barrage/fondation, barrage/recharge et recharge/fondation.

Les matériaux de la recharge ont été associés à une loi de comportement élasto-plastique avec un critère de rupture de type Mohr-Coulomb. Un angle de frottement de 40° a été pris en compte dans l'étude, de la même manière que pour le calcul initial basé sur la méthode des solides indéformables. Le poids volumique du matériau de la recharge a été pris égal à 21 kN/m^3 . Les caractéristiques suivantes ont été considérées dans la modélisation :

- interface barrage/fondation – angle de frottement interne : 45° puis dégradé jusqu'à divergence du calcul (rupture) – cohésion nulle – Résistance à la traction nulle ;
- interface barrage/recharge – angle de frottement interne : 40° – cohésion nulle ;
- interface recharge/fondation – angle de frottement interne : 45° – cohésion nulle.

Afin de modéliser au mieux le comportement des ouvrages et l'action de la recharge sur le barrage, la modélisation tient compte d'un historique de chargement pour la fondation (initialisation des contraintes), et le barrage (application du poids propre, mise à zéro des déplacements, mise en eau du barrage jusqu'à la cote de Retenue Normale). La recharge de confortement est construite en 6 étapes (couches de 3 m d'épaisseur).

Au travers de cette modélisation, le gain de stabilité apporté par la recharge aval a été évalué. Une analyse c-phi réduction a été mise en œuvre. Celle-ci consiste à dégrader les caractéristiques mécaniques de l'interface barrage/fondation jusqu'à obtenir l'instabilité de l'ouvrage, qui se traduit par un calcul qui diverge.

Le modèle aux éléments finis a notamment permis de calculer la résultante au droit du contact supposé entre le barrage et la fondation, selon la géométrie supposée du fond de fouille (ici marche d'escalier) et de prendre en compte l'effet stabilisateur apporté par la recharge aval par modélisation de celle-ci (butée).

2.2.3.2. Comparaison des résultats

Les résultats numériques suivants sont obtenus en situation de Retenue Normale et comparés à ceux de la méthode analytique présentée précédemment.

	Effort horizontal	Effort vertical	Résultante
Modélisation Eléments finis (EF)	0,72 MN/ml	0,91 MN/ml	1,16 MN/ml
Méthode TRACTEBEL (CC)	0,71 MN/ml	0,94 MN/ml	1,18 MN/ml
Ecart CC par rapport au modèle éléments finis	-2,0 %	+3,7 %	+1,6 %

Le barrage est stable sans amorce de déplacement irréversible pour angle de frottement barrage/fondation de 45°. Les résultantes de l'action de la recharge calculées avec les deux méthodes sont très proches avec des écarts inférieurs à 5%. Les hypothèses d'une action mécanique minimale de la recharge tel que supposée avec la méthode du coin de Coulomb sont validées par le calcul.

Dans le cadre de l'analyse c-phi réduction, les caractéristiques mécaniques de l'interface barrage/fondation ont volontairement été dégradées jusqu'à obtenir l'instabilité de l'ouvrage. On a ainsi pu observer pour la situation normale d'exploitation une amorce de rupture du barrage sans et avec recharge aval pour respectivement les angles de frottement à l'interface barrage/fondation de 45° et 33°. Ce début de rupture induit des déplacements irréversibles de l'ouvrage. Ces déplacements mobilisent une réaction plus importante de la recharge aval pour stabiliser le barrage, comme le montrent les résultats ci-après.

	Effort horizontal	Effort vertical	Résultante
Modélisation Eléments finis (EF)	0,97 MN/ml	0,91 MN/ml	1,32 MN/ml
Méthode TRACTEBEL (CC)	0,71 MN/ml	0,94 MN/ml	1,18 MN/ml
Ecart CC par rapport au modèle éléments finis	-26.5 %	+4.1 %	-10,9 %

Cette valeur maximale de la force stabilisatrice de la recharge ne doit cependant pas être prise en compte pour son dimensionnement en raison principalement du changement possible des conditions de circulation de l'eau, et donc des sous-pressions, à l'interface barrage/fondation provoqué par les déplacements irréversibles avec une dégradation possible du coefficient global de sécurité.

2.2.4. Calculs de poussée empruntés à la géomécanique

Compte tenu des faibles déplacements auscultés de l'ouvrage entre son niveau RN et la vidange, les hypothèses de coefficient de poussée active ou passive ne peuvent être appliquées.

Pour la suite, on suppose donc un état de poussée des terres au repos. Plusieurs formules donnent une estimation de cette poussée pour une recharge horizontale et infinie :

- coefficient de poussée des terres au repos : $K_o = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \sin \varphi\right)$;
- simplification de la formule précédente : JAKY (1994) : $K_o = (1 - \sin \varphi)$ pour les matériaux granulaires.

Appliquées aux enrochements de la recharge aval ces formules donnent respectivement $K_o = 0,31$ et $0,357$.

Il s'agit ici d'une approximation de la poussée. Dans le cas d'une recharge aval à géométrie complexe non horizontale et non infinie, la recharge se termine très près du barrage avec un talus à pente raide. Il est probable que celle-ci exerce une poussée stabilisatrice inférieure à celle des terres au repos.

A titre de comparaison, les résultats du modèle éléments finis donnent un coefficient de poussée qui varie entre 0.24 et 0.27, bien inférieur à celui donné par les formules de coefficient de terre au repos. La méthode adoptée par TRACTEBEL dite du coin de Coulomb qui estime la poussée minimale de la recharge se rapproche plus de la réalité.

3. JUSTIFICATION EN SITUATION SISMIQUE

3.1.Méthodologie

Bien que le remblaiement aval de barrages-poids qui ne vérifient pas les critères de stabilité soit une pratique courante, le nombre d'études dynamiques approfondies demeure relativement limité. Conformément au rapport « Risque sismique et Sécurité des ouvrages hydrauliques » [3], la stabilité de ces barrages doit être justifiée par application d'une approche graduée, consistant à réaliser des calculs de complexité croissante jusqu'à vérification des critères. Le nombre et la complexité des étapes à appliquer sont fonction de la classe de l'ouvrage et de la zone de sismicité. En France métropolitaine, cette méthodologie se limite le plus souvent à une vérification des critères suivant des méthodes pseudo-statique et dynamique simplifiée.

Dans le cas des barrages-poids confortés par un remblai aval, il n'existe pas de méthodes dynamiques simplifiées à proprement parler. En effet, du fait de la différence de rigidité entre les matériaux du barrage et ceux de la recharge, l'analyse sismique de ce type de barrage nécessite généralement l'emploi de méthodes de calcul plus élaborées. A ce propos, les recommandations [3] précisent que « l'analyse du comportement de ces ouvrages sous charge sismique n'est pas aisée car il est difficile d'estimer le comportement différentiel dynamique des deux structures pendant le séisme, en particulier la valeur de la poussée de la recharge sur l'ouvrage rigide. Un calcul bidimensionnel aux éléments finis paraît indispensable ».

Dans ce contexte, ARTELIA a développé une méthodologie basée sur l'utilisation de modèles numériques avancés afin d'obtenir des résultats plus réalistes. Cette méthodologie comporte :

- L'application des méthodes analytiques (type stabilité des pentes, analyse en blocs rigides) dans des situations statiques et pseudo-statiques afin de définir les dimensions préliminaires de la recharge. Ce point n'est pas présenté dans la suite de l'article bien qu'il soit également mis à profit pour vérifier les ordres de grandeur des résultats trouvés par les méthodes de complexité supérieure ;
- Une analyse modale du barrage seul et du barrage conforté pour évaluer l'influence de la recharge aval sur le comportement dynamique ;
- Une modélisation sismique temporelle non-linéaire ;
- Une analyse des contraintes dans la maçonnerie ;
- Une évaluation des déplacements irréversibles post-sismiques ;
- Une analyse fine du comportement à l'interface entre le barrage et sa recharge aval.

3.2.Caractéristiques principales des modèles numériques réalisés par ARTELIA

Les modèles numériques s'attachent à représenter la géométrie 2D de la section de plus grande hauteur. Ils comportent une reproduction maillée du barrage et d'une partie de la fondation. Dans le cas éventuel d'une vallée étroite où des effets tridimensionnels seraient attendus, une géométrie 3D serait également envisageable.

L'analyse modale préliminaire est effectuée à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural Analysis.

Les calculs temporels sont effectués avec le logiciel FLAC, développé par Itasca. Ce logiciel aux différences finies utilise un schéma de résolution explicite particulièrement adapté à la modélisation de problèmes comportant de fortes non-linéarités ainsi qu'aux problèmes dynamiques.

Les matériaux modélisés suivent des lois de comportement différentes. Le rocher de fondation et le barrage en maçonnerie sont généralement modélisés à l'aide d'une loi élastique linéaire tandis que la recharge aval et les éventuelles couches supérieures de sol dans la fondation suivent des lois non-linéaires plus ou moins élaborées. Dans le cas des deux études présentées, une loi élastique parfaitement plastique avec un critère de Mohr-Coulomb a été utilisée. Le modèle permet de prendre en compte l'hétérogénéité des matériaux. Ainsi, pour le barrage de La Lauch, un zonage suivant la qualité de compactage de la recharge aval tel que prévu dans le projet a été pris en compte.

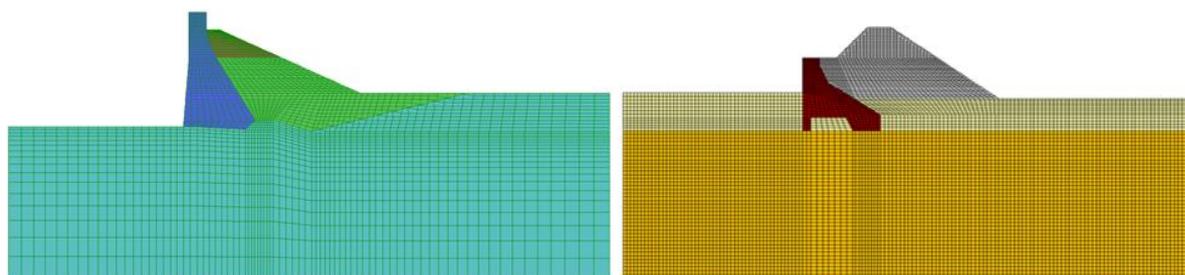


Figure 3 : Géométrie des modèles numériques des barrages de La Lauch (g.) et de Bouzey (d.)

Les contacts entre les matériaux se font par l'intermédiaire d'interfaces non-linéaires permettant le glissement, le décollement et la refermeture de ces contacts. Ils suivent une loi de comportement de type frottement de Coulomb avec une possibilité d'ouverture en traction.

Du fait de l'ensemble de ces non-linéarités, l'état de contraintes dépend de l'ordre dans lequel les chargements sont appliqués. L'histoire du barrage est donc reproduite étape par étape dans le modèle numérique : construction de la maçonnerie, construction de la recharge aval, mise en eau et enfin chargement sismique.

Pour le calcul en situation sismique, le rocher est considéré pesant et les bords de la fondation sont munis de frontières radiatives [4][5]. L'interaction fluide/structure en situation sismique est prise en compte par l'utilisation de masses ajoutées sur le parement amont du barrage en maçonnerie selon l'approche de Westergaard.

3.3. Caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques mécaniques des matériaux peuvent être issues des résultats d'une campagne d'investigation, ou bien, à défaut, de données de la littérature. La bonne pratique consiste à adopter des valeurs prudentes vis-à-vis de la maçonnerie. En effet, dans le cas d'investigations in-situ, les essais sont systématiquement réalisés sur des échantillons sains. Il convient donc de modérer les valeurs obtenues afin de tenir compte des défauts locaux qui gouvernent le comportement de la maçonnerie.

Par ailleurs, les valeurs de la littérature correspondent le plus souvent à des caractéristiques de maçonneries contemporaines qui ne sont pas nécessairement compatibles avec l'état de la maçonnerie des barrages du parc français.

A titre d'exemple, la maçonnerie du barrage de la Lauch est d'assez bonne qualité d'une manière générale, mais des zones d'altération géographiquement disparates dans plusieurs sondages carottés ne permettent pas de garantir une résistance à la traction élevée. Des valeurs prudentes de 250 kPa en situation statique et de 400 kPa en situation dynamique ont donc été prises en compte dans les calculs comme résistances à la traction de la maçonnerie. Par ailleurs, à défaut de données permettant de garantir les propriétés mécaniques de ce barrage, une étude de sensibilité sur le module d'Young a été réalisée.

Le tableau suivant montre les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisées dans les modèles numériques. Les matériaux suivent une loi de comportement élasto-plastique de type Mohr-Coulomb, à l'exception de la fondation du barrage de la Lauch qui suit une loi de comportement élastique.

Propriété	La Lauch			Bouzey		
	Maçonnerie	Recharge	Fondation	Maçonnerie.	Recharge	Fondation
Masse volumique	2400 kg/m ³	2100 / 1900 kg/m ³	2700 kg/m ³	2200 kg/m ³	1700 kg/m ³	2050 kg/m ³
Module d'Young	10 GPa	0.3 / 0.1 GPa	10 GPa	7 GPa	0.09 GPa	8 GPa
Coefficient de Poisson	0.3	0.3	0.2	0.28	0.30	0.25
Angle de frottement	45°	40° / 36°		43	42	37
Cohésion	2.3 MPa	0 kPa		300 kPa	0 kPa	400 kPa

A titre indicatif, il existe un rapport de raideurs dynamiques supérieur ou égal à 15 entre la maçonnerie et la recharge pour les deux barrages.

3.4. Séisme et signaux de calcul

L'analyse du comportement sismique des ouvrages est réalisée pour le Séisme d'Evaluation de la Sécurité (SES). Pour ce type de séisme, le barrage peut être endommagé mais le relâchement incontrôlé de la retenue n'est pas toléré [3]. Conformément à la pratique, cinq accélérogrammes naturels ajustés au spectre du séisme SES ont été utilisés pour le calcul des barrages de La Lauch et Bouzey.

3.5. Analyse modale préliminaire

Dans le cas des modèles non-linéaires, les fréquences propres ne sont pas uniques et dépendent de l'intensité du signal sismique.

Une analyse modale est néanmoins réalisée de manière préliminaire sur un modèle élastique linéaire, i.e. sans aucun joint. Cette analyse a pour but de faciliter la compréhension du comportement de l'ouvrage mixte et l'exploitation des résultats issus du modèle temporel non-linéaire à travers la détermination des premiers modes propres et fréquences associées.

Afin d'évaluer l'influence du confortement sur le barrage initial en situation dynamique, cette analyse modale est conduite par détermination des fréquences propres des systèmes suivants (l'eau étant alors modélisée sous la forme de masses ajoutées de Westergaard attachées au parement amont du barrage en maçonnerie) :

- Barrage en maçonnerie + fondation + eau ;
- Barrage en maçonnerie + recharge aval + fondation + eau.

L'étude du barrage de la Lauch montre que deux modes propres cumulent près de 90% de la masse modale du système dans la direction amont-aval. La présence de la recharge décale les modes propres vers les basses fréquences, mettant en évidence un apport de masse prépondérant par rapport au gain de rigidité :

- 5.7 Hz sans recharge contre 4.9 Hz avec recharge pour le 1^{er} mode ;
- 13.5 Hz sans recharge contre 8.0 Hz avec recharge pour le 2^{ème} mode.

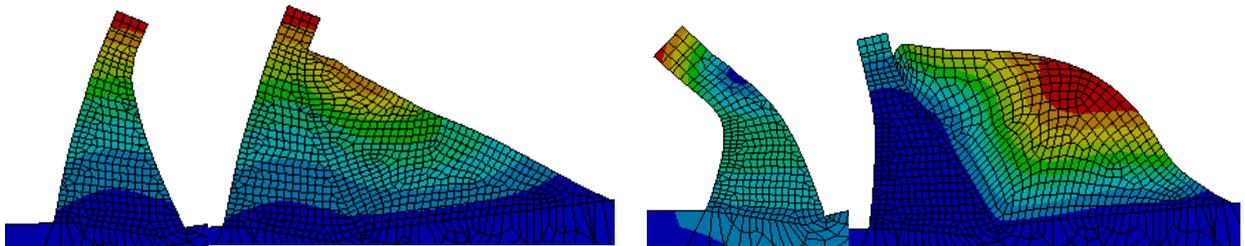


Figure 4 : La Lauch - Déformées modales avec et sans recharge pour le 1^{er} mode (à g.) et le 2^{ème} mode (à dr.)

L'efficacité de la recharge pour atténuer le décollement en pied amont et le glissement semble assurée (1^{er} mode). En revanche, son effet sur l'atténuation des contraintes de traction subverticale en partie supérieure du barrage existant est remis en question (2^{ème} mode). En effet, il peut y avoir potentiellement opposition de phase qui annulerait la butée qu'apporte la recharge.

Dans le cas du barrage de Bouzey, une analyse des masses modales mobilisées montre que le comportement dynamique de la recharge gouverne le comportement du système. En revanche, les fréquences propres mobilisant les masses modales de la maçonnerie sont assez peu sensibles à la présence de la recharge, compte tenu de la faible raideur de celle-ci :

- 9 Hz sans recharge contre 9.35 Hz avec recharge pour le 1^{er} mode de la maçonnerie ;
- 18.6 Hz sans recharge contre 17.6 Hz avec recharge pour le 2^{ème} mode de la maçonnerie.

La recharge du barrage de Bouzey a des proportions très importantes par rapport à la partie en maçonnerie en comparaison des confortements par recharge aval habituels. En effet, son rôle est en réalité de retrouver la cote initiale du réservoir après la deuxième rupture du barrage qui a écrêté la maçonnerie. Malgré ses dimensions, la recharge a donc peu d'influence sur le comportement dynamique de la partie en maçonnerie.

Pour ces deux barrages, les fréquences propres de la maçonnerie se situent dans le plateau du spectre de site. Une amplification importante des accélérations correspondantes est donc attendue.

3.6. Contraintes dans la maçonnerie

L'analyse dynamique temporelle permet de calculer l'histoire des contraintes de traction, dans l'optique d'évaluer le risque d'une ouverture de fissure dans la maçonnerie pendant la sollicitation sismique. Cette histoire des contraintes est calculée sur les zones d'intérêt préalablement identifiées lors de l'analyse modale préliminaire.

Dans le cas du barrage de la Lauch, cette zone se situe autour du point d'inflexion du 2^{ème} mode de la maçonnerie, au tiers supérieur du barrage aussi bien sur le parement amont que sur le parement aval.

L'alternance des tractions sur les deux parements, liées aux mouvements cycliques de la crête, est évidente. En particulier, sur le parement amont, la résistance est dépassée 7 fois pendant le signal. Sur le parement aval, un seul dépassement est relevé mais la contrainte représente pratiquement le double de la résistance dynamique de la maçonnerie. Ce comportement est pratiquement inchangé avec ou sans recharge. Cela était attendu puisque dans tous les cas, les fréquences propres prédominantes de la maçonnerie se situent dans le plateau du spectre et l'effet de la recharge pour le 2^{ème} mode de la maçonnerie est remis en cause par l'analyse modale préliminaire.

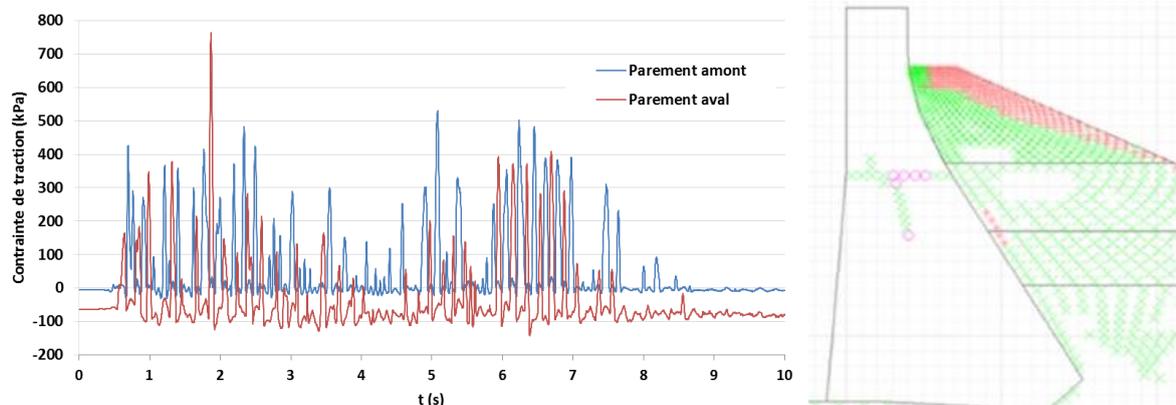


Figure 5 : Histoire des contraintes effectives de traction subverticale sur le tiers supérieur des parements amont et aval (g.) Etat de plasticité de la maçonnerie à $t = 2s$ (dr.)

A des fins de vérification pour le barrage de la Lauch, une loi de comportement Mohr-Coulomb avec une limite à la traction correspondant à la résistance dynamique est appliquée à la maçonnerie dans un deuxième temps. L'état de plasticité est analysé pour les premières secondes du signal puisque cette loi de comportement n'est pas appropriée pour les sollicitations cycliques en traction. Néanmoins, à l'issue des deux premières secondes, la fissuration est potentiellement traversante par cohérence avec les calculs linéaires précédents. Le barrage ne respecte donc pas les critères de calculs malgré l'utilisation d'une série d'accélérogrammes naturels ajustés au spectre qui est une méthode réputée moins pessimiste. Dans le remblai, un cercle de glissement sur la partie supérieure se déclenche également.

Dans le cas du barrage de Bouzey, les contraintes calculées sont faibles et n'appellent pas de commentaires en particulier dans la mesure où la zone sensible de la maçonnerie a déjà été écrêtée.

3.7. Evaluation des déplacements irréversibles

Pendant le séisme, l'historique des déplacements est calculé en tout point du barrage. Les déplacements irréversibles post-sismiques sont les déplacements non-nuls qui subsistent en fin de calcul.

La première vérification consiste à examiner la localisation des déplacements irréversibles en regard des cercles de glissement issus de l'analyse pseudo-statique analytique. Cette vérification permet de valider le modèle numérique : avec une loi de comportement de type Mohr-Coulomb, la géométrie du cercle de glissement est très similaire d'un modèle à l'autre (figure ci-dessous). Les valeurs numériques sont ensuite comparées aux critères de déplacement et de tassement recommandés [3]. On s'assure ainsi qu'aucun glissement global de l'ouvrage n'apparaît.

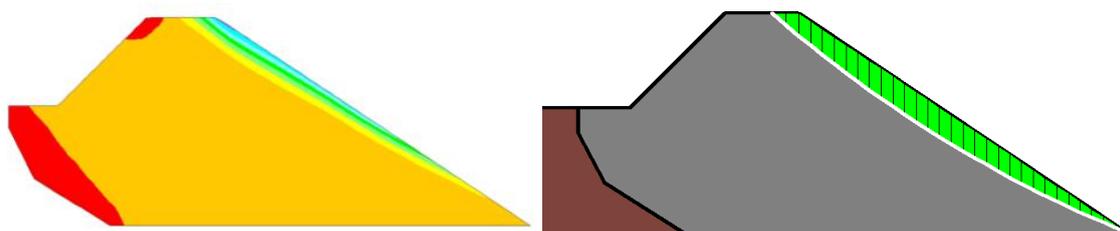


Figure 6 : Illustration des déplacements horizontaux irréversibles post-sismiques (à g.) et de cercle de rupture pour une analyse pseudo-statique (à dr.) dans la recharge en enrochements du barrage de Bouzey

A titre indicatif, la figure suivante montre l'évolution des tassements en crête de la recharge en enrochements.

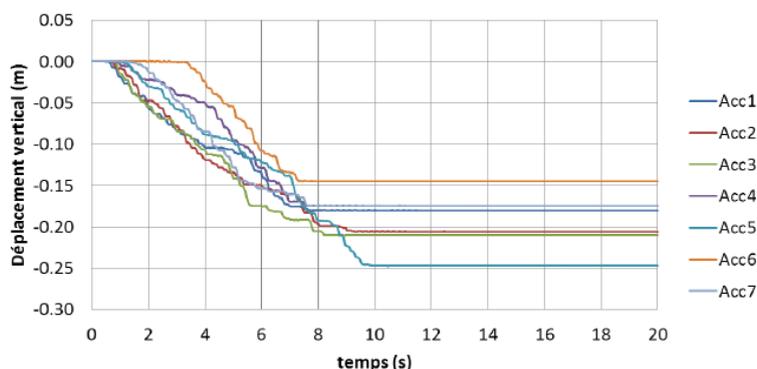


Figure 7 : Déplacements verticaux en crête de la recharge au cours des sept accélérogrammes de calcul

3.8. Analyse du contact maçonnerie / recharge

Le contact entre la maçonnerie et la recharge aval peut être le lieu d'ajustements importants, dus aux déplacements différentiels entre les deux matériaux. Il convient de s'assurer que ces déplacements ne puissent pas être à l'origine de dégradations pouvant remettre en cause l'intégrité de l'ouvrage. En particulier, on vérifiera la valeur de l'éventuel décollement et l'extension de l'ouverture.

Dans le cas du barrage de Bouzey, cette vérification est nécessaire puisqu'un masque d'étanchéité en béton armé assure la transition entre la maçonnerie et la digue en enrochements. Un déplacement relatif important au contact risquerait d'entraîner la rupture du masque. Les calculs ont cependant montré que les mouvements relatifs au contact étaient limités (écartement cumulé d'environ 1 mm en fin de séisme) et que le risque de rupture du système d'étanchéité pouvait être écarté.

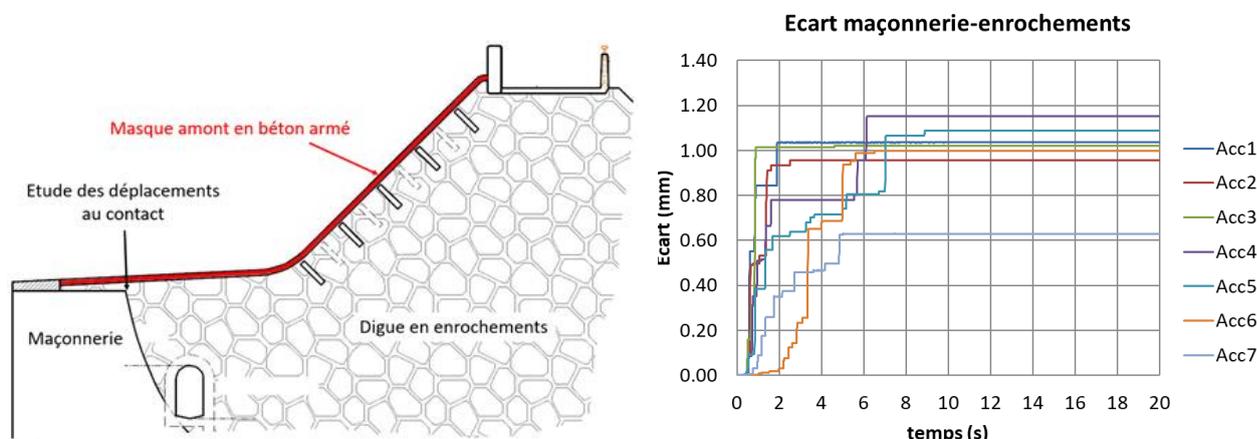


Figure 8 : Analyse du contact maçonnerie / recharge au barrage de Bouzey

4. CONCLUSION

De nombreux barrages en maçonnerie ont été confortés par l'ajout d'une recharge aval apportant une poussée stabilisatrice. TRACTEBEL propose une méthode basée sur la théorie du coin de Coulomb afin d'estimer la réaction stabilisatrice apportée par la recharge. Celle-ci est simple à mettre en œuvre, applicable pour tout type de géométrie et va dans le sens de la sécurité (poussée stabilisatrice minimale). Cette méthode permet également de calculer l'extension d'une fissure (conditions de Lévy et d'Hoffman) et d'étudier les conditions d'états-limites ultimes le long de surfaces prédéfinies. La fiabilité de cette méthode a été démontrée pour le cas du barrage de Dardennes par comparaison avec les résultats obtenus par l'application des formules géomécaniques et d'une modélisation aux éléments finis. L'écart avec la modélisation aux éléments finis est très faible montrant que la poussée minimale calculée par la méthode du coin de Coulomb est proche de celle réellement appliquée sur le barrage.

Dès lors que le chargement sismique devient prépondérant, la mise en œuvre d'un calcul numérique s'avère nécessaire. Les études des barrages de Bouzey et de La Lauch montrent qu'une recharge en remblai peut être efficace pour améliorer la stabilité globale. La mise en œuvre d'une analyse modale préliminaire pour vérifier les résultats finaux et appréhender au préalable le comportement du système semble préférable avant un calcul dynamique temporel. La problématique des contraintes de traction subverticale sur les parements en partie supérieure est confirmée par ce calcul plus complexe. En effet, même une géométrie de remblai bien plus importante que ce qui serait économiquement viable dans un projet de confortement ne semble pas suffisante pour atténuer les contraintes de traction en partie supérieure de la maçonnerie (ce que permet d'obtenir la méthode concurrente des tirants verticaux). Les calculs temporels présentent en plus l'avantage d'étudier dans le détail l'histoire du comportement de l'ouvrage. Il est par exemple possible de vérifier l'effet de l'apparition de fissures dans la maçonnerie ou de déplacements irréversibles dans les joints sur la capacité du barrage à empêcher un relâchement incontrôlé de la retenue.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les acteurs ayant participé au développement et à la validation de la méthode analytique du coin de Coulomb présentée ci-avant (C. Berkani, H. Gally, G. Dautois, X. Molin et C. Antoine - TRACTEBEL), ainsi que la métropole de Toulon pour son autorisation de communiquer sur le barrage de Dardennes.

Les auteurs remercient également F. Andrian. et T. Vincent (ARTELIA) pour leur participation significative aux études sismiques des barrages en maçonnerie confortés par une recharge aval.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] P. Royet, «Le parc des barrages français en maçonnerie - techniques de reconnaissance et de confortement,» Colloque "Modernisation des barrages" du CFBR, Chambéry, 2013 ;
- [2] L. Deroo et B. Jimenez, «Notes sur l'accidentologie des barrages-poids,» Colloque CFBR-AFEID "Etudes de danger", Novembre 2011 ;
- [3] Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, «Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques,» Octobre 2014 ;
- [4] A. K. Chopra, «Earthquake analysis of arch dams : factors to be considered,» 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, Chine, Octobre 2008;
- [5] F. Andrian. et P. Agresti, «JCOLD CFBR Collaboration, Analyses of seismic records on concrete dams in Japan, Tagokura dam, Back-analysis by means of a progressive modelling,» Chambéry, Octobre 2014.