

MODELISATION NON-LINEAIRE D'UN BARRAGE SOUMIS A DES MOUVEMENTS GEOLOGIQUES IMPORTANTS

Numerical modeling of a dam subject to significant geological movements

Romain TAJETTI, Jean Pierre BLAIS, Sébastien DOMITILE, Patrick DIVOUX

EDF-CIH, 4 allée du lac de Tignes 73290 LA MOTTE SERVOLEX

romain.tajetti@edf.fr ; jean-pierre.blais@edf.fr ; sebastien.domitile@edf.fr ; patrick.divoux@edf.fr

MOTS CLEFS

Modélisation, barrage, loi d'endommagement, Code_Aster,

KEY WORDS

Modelling, dam, damage behaviour law, Code_Aster,

RÉSUMÉ

Cette communication présente les calculs menés sur un petit barrage en béton/maçonnerie (barrage de 24 m de hauteur sur fondation mais retenant moins de 10 m d'eau). En raison de mouvements géologiques importants de sa fondation, ce barrage subit d'importantes contraintes conduisant à la dégradation de son état. Le resserrement des passes occasionne des coincements de vannes qui empêchent l'exploitation dans de bonnes conditions de sûreté de l'ouvrage.

Au début des années 2010, les coincements de plus en plus fréquents des vannes conduisent à l'étude de solutions de reconstruction totale ou partielle de l'ouvrage. Devant les difficultés à garantir la pérennité d'un ouvrage reconstruit à neuf, les solutions de réhabilitation de l'ouvrage existant sont aujourd'hui privilégiées..

Pour cela des modèles numériques ont été réalisés avec pour objectif de comprendre le comportement du barrage, de vérifier sa stabilité, de tester des solutions de confortement, et d'estimer les resserrements futurs à prévoir au niveau des vannes.

ABSTRACT

This paper presents the calculations carried out on a small concrete / masonry dam (24 meters high on a foundation but retaining less than 10 meters of water). Due to important geological movements of its foundation, this dam undergoes important stress leading to the deterioration of its state. Constriction of the spillway causes the jam of the valves that prevent safe operation of the structure.

At the beginning of the 2010s, the more and more frequent jamming of the valves lead to consider a total or partial reconstruction solutions of the structure. Faced with the difficulties of guaranteeing the durability of a rebuilt new construction, the rehabilitation solutions of the existing structure are now preferred.

For this purpose numerical models have been realized with the aim of understanding the behavior of the dam, to check its stability, to test reinforcement solutions, and to estimate the future constriction to be envisaged near the valves.

1. DESCRIPTION DE L'AMENAGEMENT

Le barrage étudié est un barrage- prise d'eau permettant l'entonnement vers l'usine. Il est composé en rive droite d'un barrage vanné en rivière, prolongé d'un barrage poids maçonné en rive gauche.

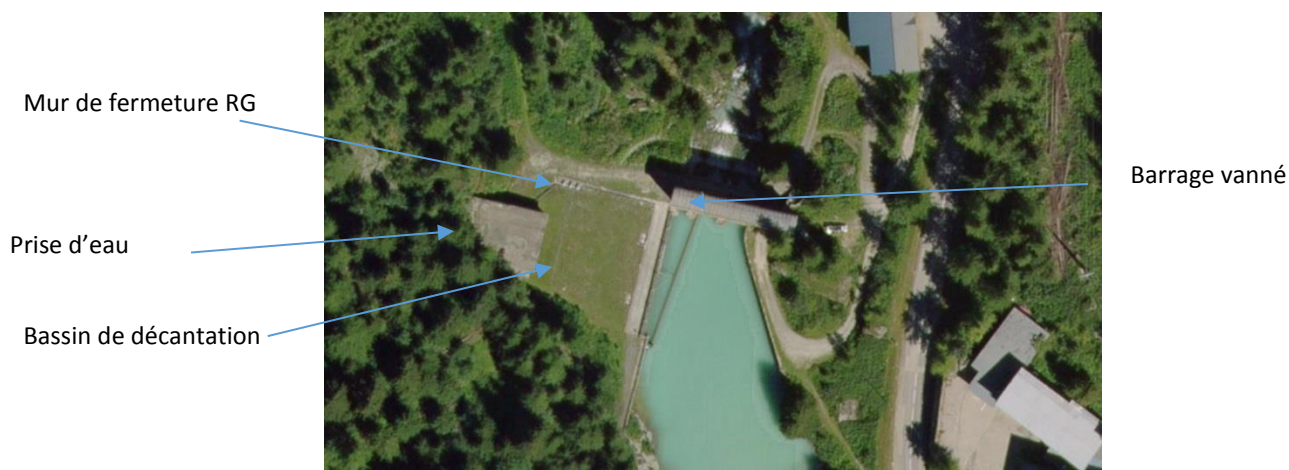


Figure 1 : Vues de l'ouvrage

1.1. Barrage vanné :

Le barrage vanné est un ouvrage en maçonnerie d'environ 24 m de hauteur sur fondation (17 m sur TN) et de 17 m de largeur. Il est composé de trois passes délimitées par quatre piles, avec deux vannes coulissantes par passe. La largeur de la passe en rive gauche est de 2 m, alors que celle des passes centrale et rive droite est de 5 m. Les vannes sont commandées par l'intermédiaire de câbles actionnés par des treuils électriques situés dans un local positionné sur les têtes de pile.



Figure 2 : Photos du barrage vanné (2015) (à gauche vue d'aval, à droite vue d'amont)

1.2. Mur poids RG et prise d'eau :

Le mur poids se situe dans le prolongement rive gauche du barrage en rivière. Son parement aval n'est pas visible car recouvert de remblais. Il sert à la fois d'ouvrage de fermeture de la vallée et de bajoyer du bassin de décantation de la prise d'eau. Il est constitué principalement de maçonnerie mais sa base est en béton.

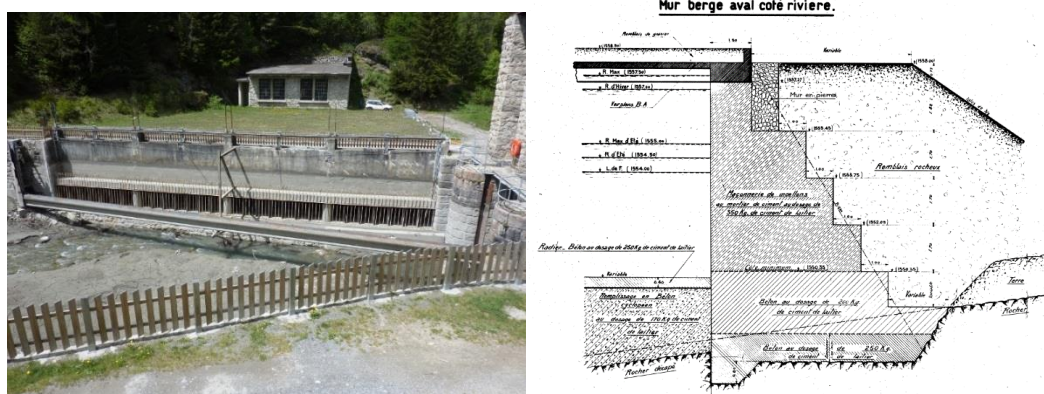


Figure 3 : photo de l'entrée du bassin de décantation et profil de plus grande hauteur du barrage poids RG

La prise d'eau est constituée de quatre chambres de dégravage orientées dans le sens rive droite – rive gauche, et d'un bâtiment dit « des vannes et des grilles ». Les pertuis sont surélevés par un seuil et obturés par des grilles

2. DESORDRES VISIBLES SUR L'OUVRAGE

Le resserement des rives a occasionné des désordres visibles sur l'ouvrage comme l'illustrent les photographies ci-après :



Figure 4 : Rupture en compression des boutons de la passe centrale



Figure 5 : Cisaillement sous la pile n°3



Figure 6 : Fissuration sur le seuil et le mur aval du bassin de décantation



Figure 7 : rupture en flexion du pont au droit de la pile n°3 et décollement au droit de la pile n°2

3. LE PHENOMENE GEOLOGIQUE

Le barrage est assis sur deux zones géologiques distinctes séparées par une brèche. Ces deux zones sont en mouvement l'une par rapport à l'autre (rapprochement) ce qui conduit au délitement des matériaux de la brèche comme l'ont mis en évidence les reconnaissances par carottage réalisées sur le site (Figure 8).

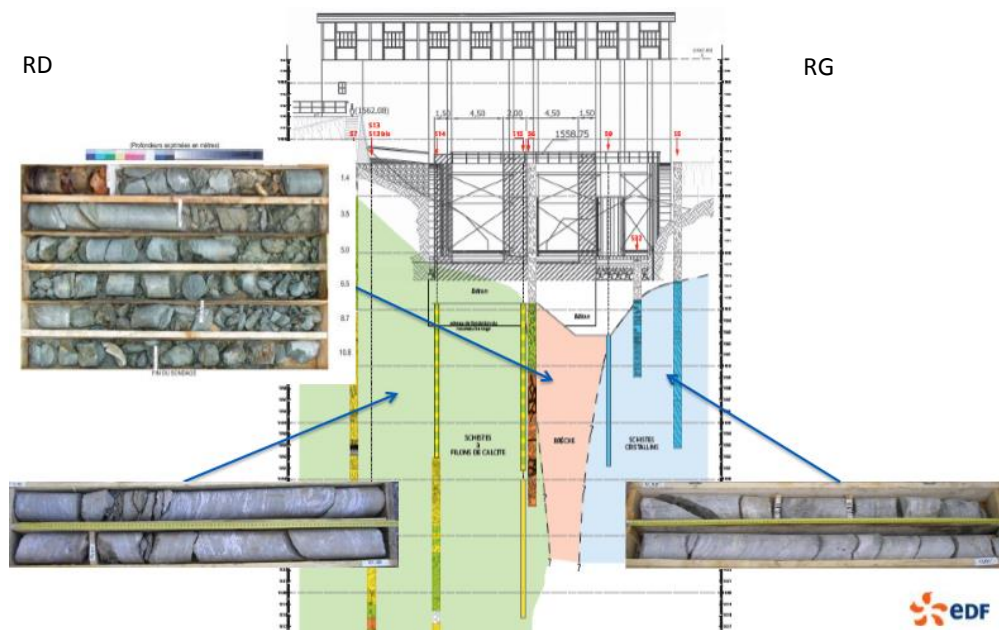


Figure 8 : Coupe géologique au droit du barrage

L'analyse des résultats de l'auscultation planimétrique de l'ouvrage (une quarantaine de repères auscultés depuis 1994) permet de caractériser ce mouvement relatif des deux rives. Il se produit dans deux directions : la direction rive-à-rive et la direction verticale. Les deux rives se resserrent d'environ 3 mm/an tandis que la RD s'élève de 3 mm/an par rapport à la RG.

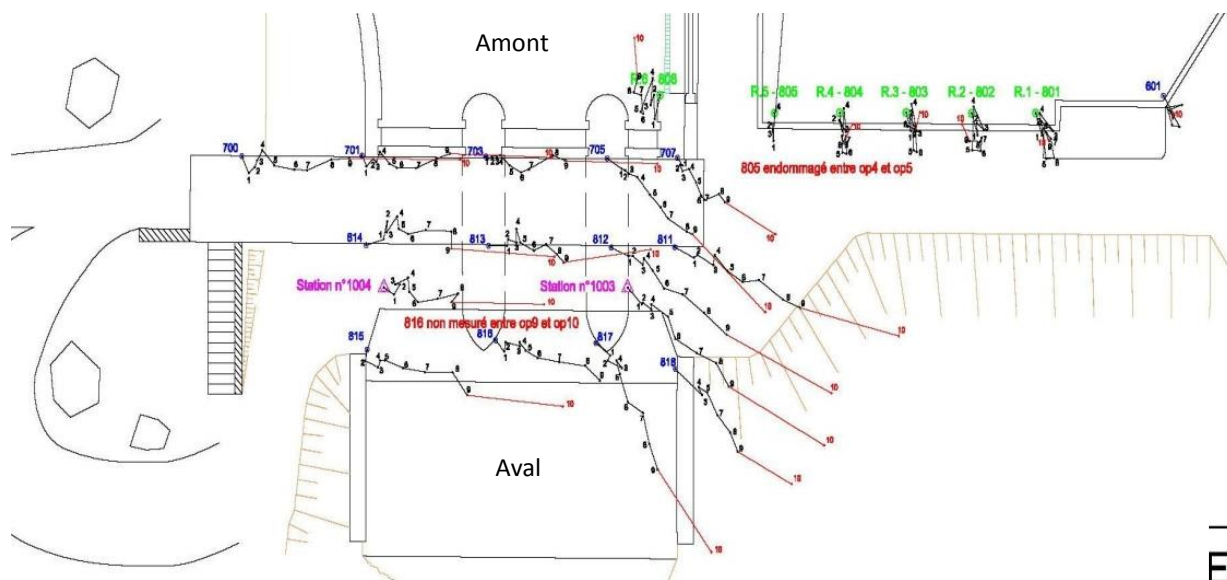


Figure 9 : Déplacements entre 2003 et 2015 des cocardes placées sur l'ouvrage – Vue en plan - Les campagnes ne sont pas faites à intervalles réguliers

4. HISTORIQUE

Construit en 1935, le barrage fonctionne quelques années sans désordres majeurs. En 1970, des fissurations et le coincement de certaines vannes, conduisent à la réalisation de butons dans chacune des passes dans le but de maintenir leur gabarit. Ces resserrements ont pour origine un mouvement géologique de grande ampleur et ces butons ne permettent de ralentir le phénomène que temporairement.

A partir des années 1990, la mise en place d'un dispositif d'auscultation par planimétrie permet de quantifier les mouvements constatés (Cf. Figure 9).

Au début des années 2010, les coincements de plus en plus fréquents des vannes conduisent à l'étude de solutions de reconstruction totale ou partielle de l'ouvrage. Devant les difficultés à garantir la pérennité d'un ouvrage reconstruit à neuf (élargissement de la brèche vers l'aval), les solutions de réhabilitation de l'ouvrage existant sont aujourd'hui privilégiées.

L'étude de ces solutions nécessitait d'abord de comprendre les mécanismes à l'œuvre dans cet ouvrage, pour déterminer quelles actions pourraient améliorer son comportement. Par ailleurs, une rénovation du vannage étant indispensable, il était nécessaire pour le dimensionnement des vannes, de pouvoir prédire les resserrements des passes attendus dans les prochaines années. Enfin il était évidemment nécessaire de pouvoir s'assurer de la stabilité de l'ouvrage. Pour répondre à ces questions, plusieurs modélisations de complexité croissante ont été réalisées.

5. LES MODELES AUX ELEMENTS FINIS

5.1. Calcul bidimensionnel

La stabilité bidimensionnelle de l'ouvrage avait déjà été vérifiée par le passé, une mise à jour de ce calcul a tout de même été réalisée pour intégrer dans le calcul les résultats des reconnaissances réalisées dans l'intervalle. Ce calcul réalisé avec le logiciel STABET a confirmé le bon dimensionnement des ouvrages au chargement hydrostatique, y compris en considérant des hypothèses de résistance des matériaux et propagation des sous-pressions très défavorables (piles cisailées, pleine sous-pression, etc...) qui seraient consécutifs aux déplacements imposés dans la direction rive-à-rive.

En revanche ce type de modèle ne permet évidemment pas de modéliser les déplacements géologiques que subit l'ouvrage et son comportement dans la direction transversale.

5.2. Calcul élastique linéaire aux éléments finis

Afin de reproduire le comportement tridimensionnel de l'ouvrage, celui-ci a été modélisé aux éléments finis. En plus des chargements usuels (pesanteur, pression hydrostatique), le mouvement géologique a été modélisé par un déplacement imposé des frontières du modèle (Cf. Figure 10).

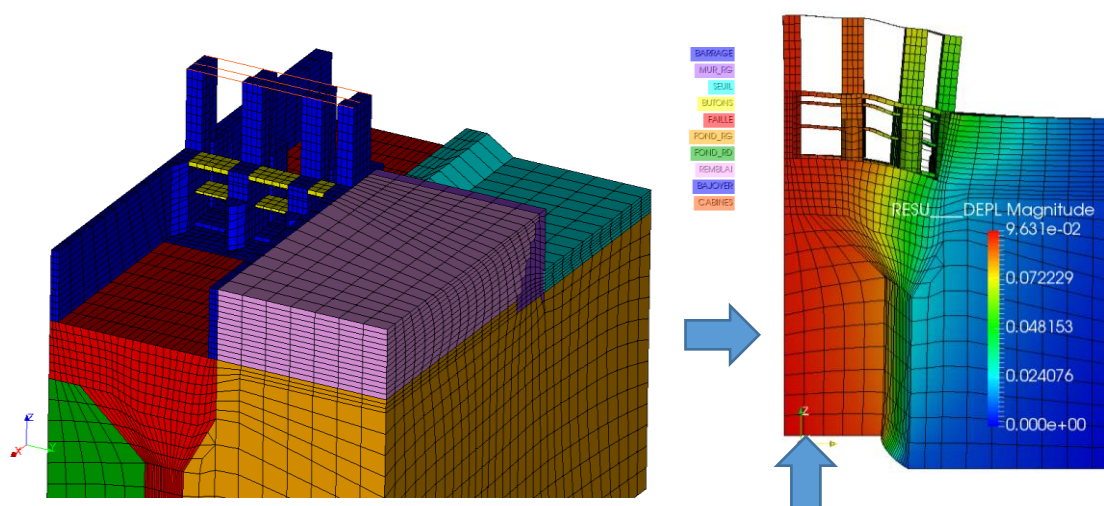


Figure 10 : Maillage utilisé et condition aux limites imposée

Les modèles élastiques demandant peu de temps de calcul, ils permettent généralement de déterminer la plupart des paramètres matériaux par ajustements des déplacements du modèle sur les déplacements auscultés (calage). Ce n'est que partiellement possible dans le cas de ce barrage car les déplacements peuvent également être ajustés en modifiant les conditions aux limites qui ne sont pas connues précisément (en particulier la date de début des déplacements).

Le calage a toutefois permis de déterminer les ratios entre les modules d'élasticité des matériaux de l'aménagement en vérifiant la cohérence des déplacements entre eux.

L'endommagement des butons a pu être reproduit par une dégradation de leur module effectuée manuellement.

Ce modèle a rapidement montré ses limites puisqu'il ne permettait pas (entre autres) de reproduire le déplacement observé vers l'aval des piles situées en rive gauche.

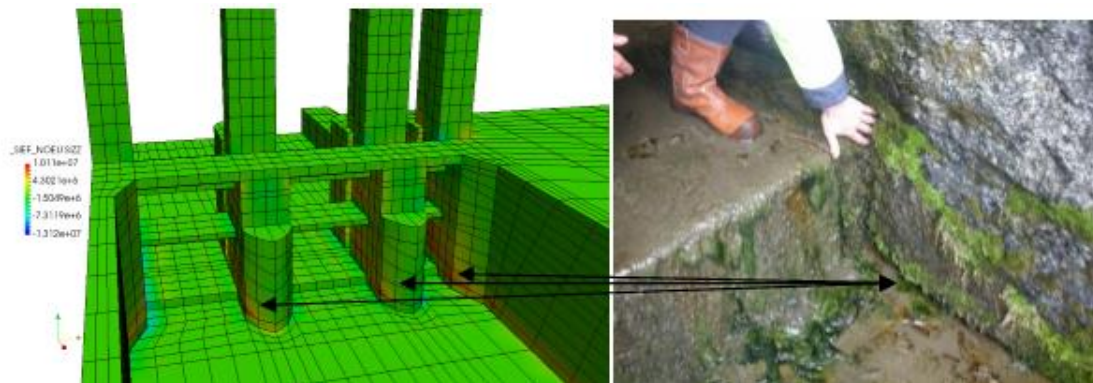


Figure 11 : Le cisaillement à la base des piles se traduit dans le modèle élastique par des tractions sans déplacements

5.3. Calcul élastique localement non-linéaire (éléments joints)

Afin de modéliser le cisaillement à la base des piles (Figure 5) qui permet le mouvement de certaines d'entre elles vers l'aval, des éléments joints ont été introduits au contact avec le radier. Les autres paramètres du modèle sont inchangés.

Les éléments joints sont des éléments volumiques, d'épaisseur nulle. Le comportement de ces éléments suit une loi élasto-plastique de Mohr Coulomb (Loi JOINT_MECA_FROT de Code_Aster). Les paramètres C (adhésion) et μ (coefficient de frottement) définissent un cône de glissement à l'intérieur duquel le comportement est élastique. L'atteinte des bords du cône de frottement entraîne l'ouverture et/ou le glissement du joint.

Ces éléments joint ont été insérés sous chacune des piles mais en pratique seules les deux piles RG présentent des glissements.

Ce modèle a permis de reproduire de façon plutôt satisfaisante le comportement de la partie supérieure du barrage. Il a permis de mieux comprendre le comportement de l'ouvrage et d'en améliorer la compréhension (Cf. Figure 12):

- Le radier du barrage se déplace vers la RG et enfonce la fondation du mur RG
- Les deux piles RD restent liées au radier et se déplacent vers la RG à la même vitesse que celui-ci.
- Les deux piles RG se déplacent également vers la RG mais moins vite que le radier en raison de la résistance du mur RG, ce qui occasionne le cisaillement de leur base, et le resserement plus fort dans la passe centrale (qui a conduit à la rupture des butons de cette passe)
- Le contact du mur en partie amont de la pile RG entraîne la rotation de celle-ci qu'elle transmet à la pile n°3 par l'intermédiaire des butons, ce qui explique le déplacement important vers l'aval de cette pile.

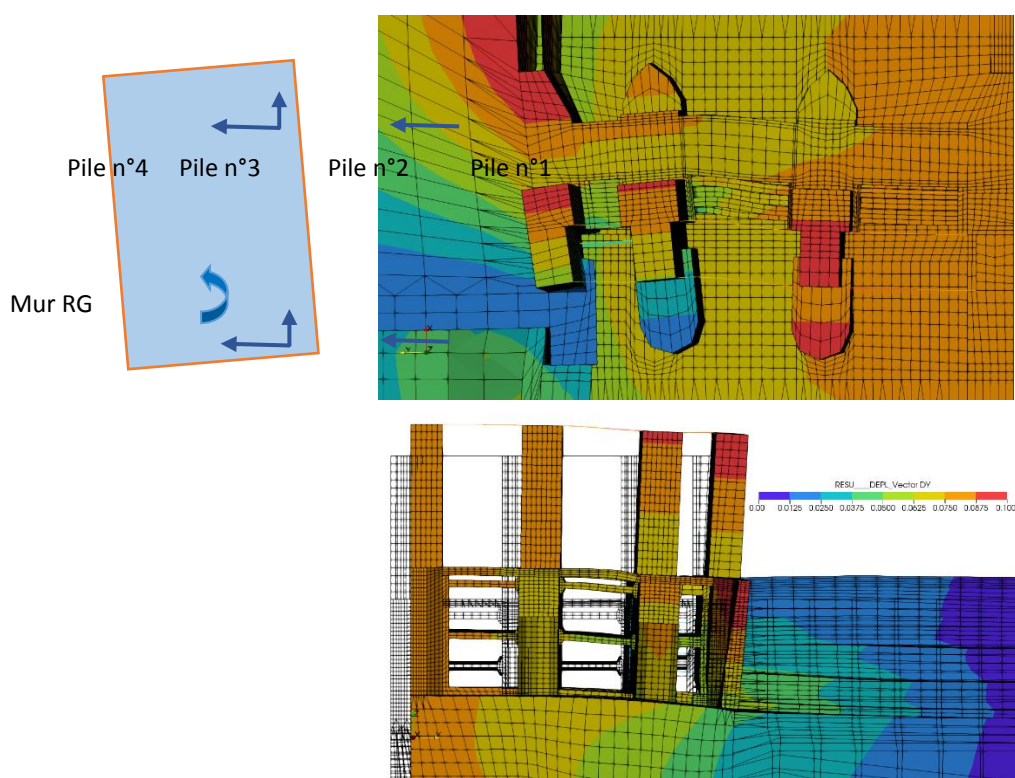


Figure 12 : Déformée du barrage modélisé vu de dessus et vu d'aval – Les flèches bleues représentent la vitesse de déplacement des piles

Bien que certains mécanismes d'endommagement aient pu être pris en compte localement dans ce modèle par une dégradation du module d'élasticité (cf. §5.2), l'analyse des contraintes montrait une large zone du radier sollicitée au-delà des résistances du béton. La prise en compte de l'endommagement de cette zone pouvant potentiellement modifier les résultats calculés au niveau des vannes, un modèle d'endommagement a été mis en œuvre.

5.4. Calcul avec loi d'endommagement et élément joints

Le modèle d'endommagement consiste à introduire une loi de comportement qui dégrade les propriétés des matériaux lorsque les limites élastiques des matériaux sont dépassées.

La loi de comportement utilisée est une loi non-linéaire plastique endommageable de Code_Aster, elle a été développée conjointement par EDF CIH, EDF R&D, et le LMDC de Toulouse. Elle contient un endommagement anisotrope en traction (critère de Rankine) et un endommagement de compression-cisaillement prenant en compte le confinement multi-axial (critère de Drucker-Prager). Elle fait partie d'un modèle poro-mécanique initialement développé pour la réaction alcali-granulat qui tient également compte d'un ensemble de phénomènes affectant le béton (fluage, retrait, effets thermiques, endommagement...).

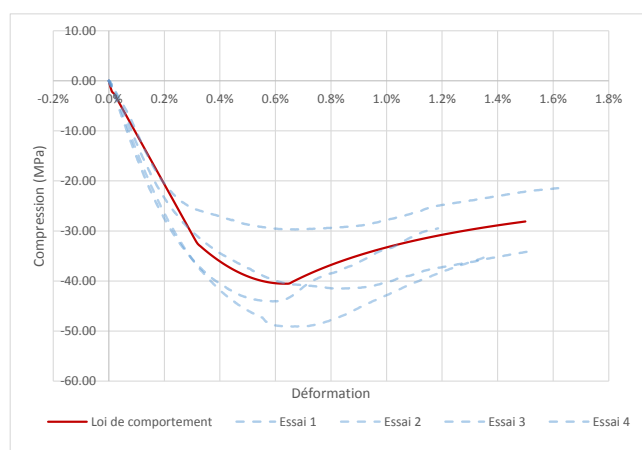


Figure 13 : Loi de comportement du modèle calée sur les résultats d'essais triaxiaux réalisés sur des éprouvettes prélevées in-situ

Les paramètres de la loi de comportement ont pu être recalés sur les résultats d'essais triaxiaux de laboratoire réalisés par le CEMETE/Polytech Lille sur des carottes extraites de l'ouvrage. Ces essais ont en particulier permis de préciser le comportement post-rupture des bétons et les effets triaxiaux du confinement.

Les éléments joints à la base des piles ont tout de même été conservés dans ce modèle car ils permettent de mieux localiser la rupture.

Les autres paramètres et conditions aux limites sont inchangés.

Comme évoqué au §5.2, une des principales difficultés de ce type de calcul en déplacements imposés, est d'identifier la date de départ du phénomène, l'auscultation ne donnant que le comportement récent de l'ouvrage. Pour cette étude, trois éléments ont permis d'estimer cette date :

- *la comparaison des non-linéarités sur les déplacements du modèle et de l'auscultation* : la rupture de certains éléments modifie les vitesses de déplacements de l'ouvrage. C'est le cas de la rupture des butons de la passe centrale qui a entraîné un ralentissement du mouvement vers la RG des piles n°3 et 4. Il est donc possible d'ajuster le modèle pour que ces cassures se produisent aux mêmes dates. Ce changement de vitesse est cependant très récent et demande à être confirmé par les prochains relevés d'auscultation, cette méthode a donc été peu utilisée.
- *La réalisation d'essais de sur-carottage dans le radier pour estimer les contraintes in-situ* : il est en effet possible de caler le modèle sur les contraintes plutôt que sur les déplacements. Malheureusement cette donnée est difficile à acquérir, une des rares méthodes permettant de d'obtenir les contraintes en profondeur dans un ouvrage est l'essai de sur-carottage. En pratique la réalisation de ses essais s'est avérée délicate en raison de l'état dégradé des bétons rendant difficile les mesures de déformation, sur les 6 essais réalisés en profondeur seuls 2 ont été fructueux et ont donné une contrainte voisine de 10-12 MPa tandis que la valeur prédite par le modèle dans cette zone est d'environ 15 MPa.
- *Par la comparaison des endommagements visibles et prédits par le modèle à différentes dates*. C'est la méthode qui a été privilégiée. Contrairement à beaucoup d'ouvrages la plupart des zones endommagées du barrage sont visibles et la date d'apparition des désordres est connue de façon plus ou moins précise via les Visites Techniques Approfondies (VTA) ou anciennes photos du barrage. Il est donc possible de comparer les dates d'apparition des endommagements du modèle et du barrage (Figure 14). Cette comparaison permet également de tester la représentativité du modèle.

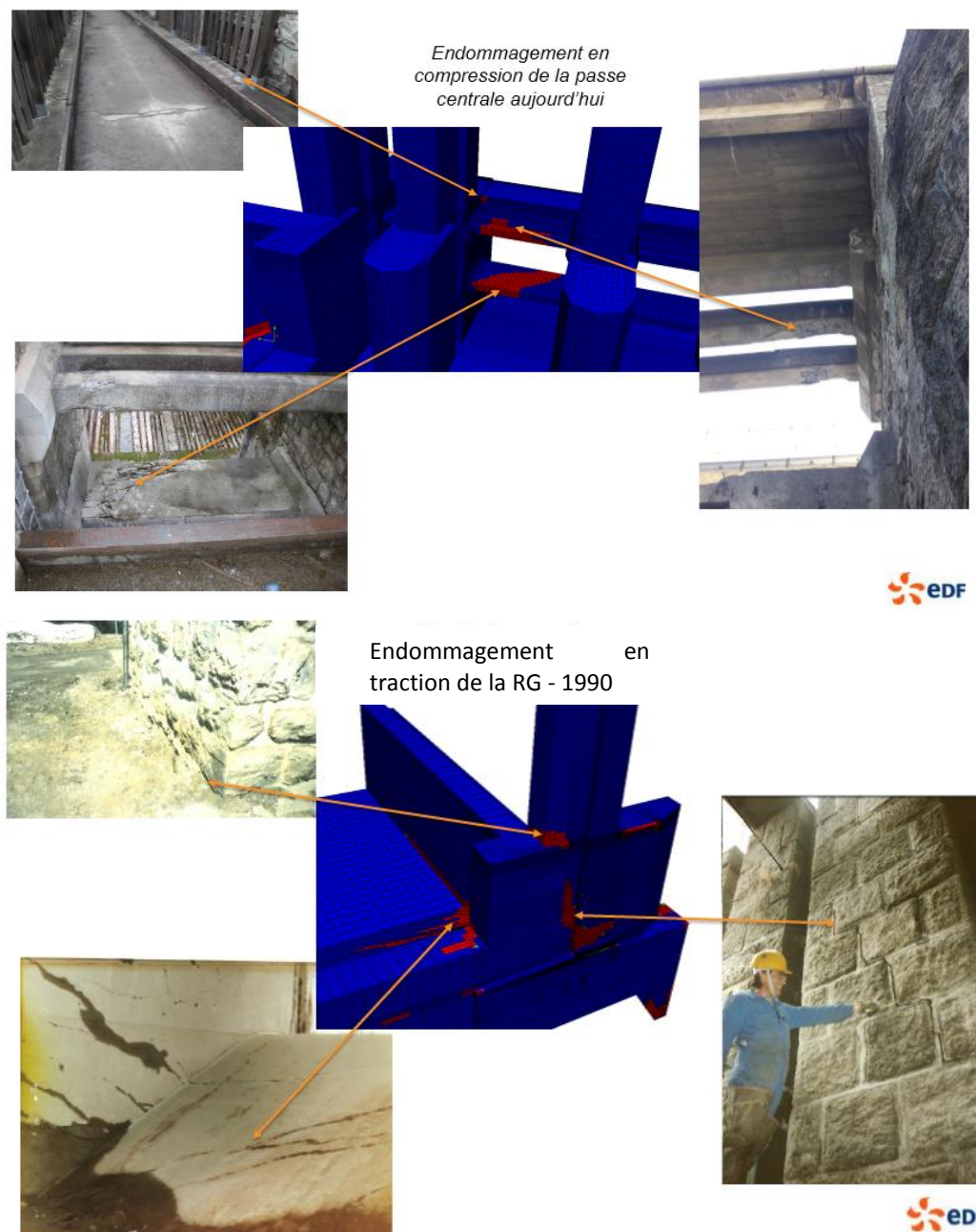


Figure 14 : Comparaison des endommagements calculés et constatés

L'intérêt de ce modèle est de pouvoir extrapoler les résultats du calcul pour prédire le comportement futur du barrage. Des simulations ont été menées et continuent de l'être pour évaluer différentes solutions de confortement (réalisation d'une rainure dans le radier, suppression/fragilisation de certains butons, mise sur appuis glissants du pont...).

La solution choisie, est un confortement des butons des passes n°1 et 2 (Figure 15), L'idée étant de sacrifier la passe n°3 (la plus petite) pour garantir la manœuvrabilité des vannes des deux autres.

Les simulations effectuées ont montré que la conception du confortement envisagé permet bien de relocaliser les endommagements par compression dans la passe n°3 (Figure 16).

NB : Les efforts en jeu sont très importants par rapport à la résistance des butons du barrage. Pour preuve, la plastification progressive et déjà avancée des butons de la passe centrale n'a jamais conduit à une accélération du mouvement de resserment de l'ouvrage. Les modifications apportées ne généreront, de fait, pas d'accélération du mouvement et ce d'autant plus que la solution mise en œuvre ne va pas supprimer le butonnage de rive à rive mais simplement déplacer les zones de plastification vers une autre passe.

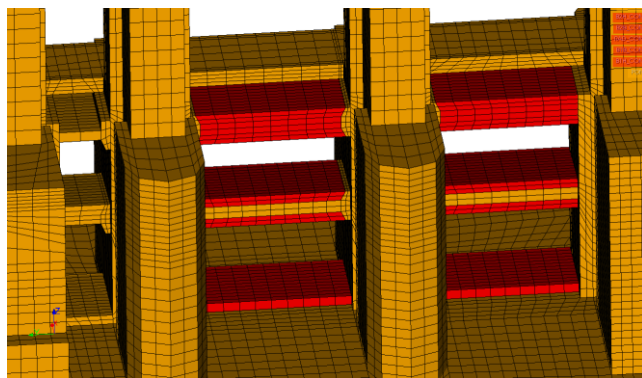
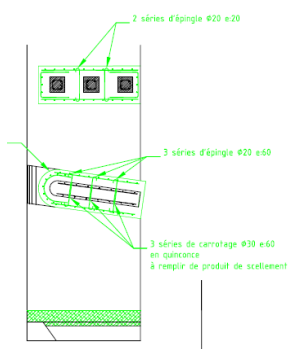


Figure 15 : Confortement des butonnages envisagés (en rouge)

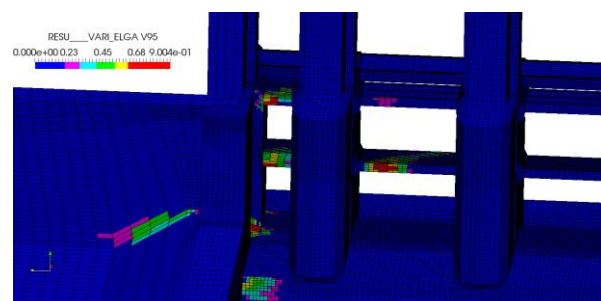
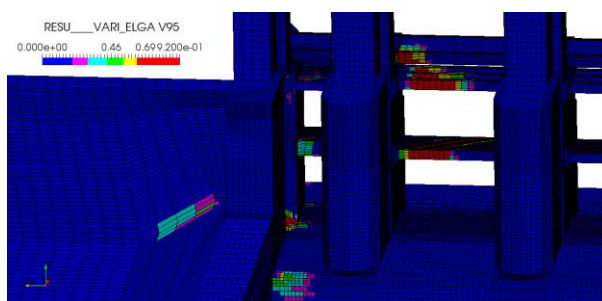


Figure 16 : Endommagements par excès de compression en 2038 calculés par le modèle – avec (droite) et sans (gauche) confortement – Les confortements ne sont pas représentés.

Ce modèle permet également d'estimer en fonction de la solution choisie, le resserrement futur à prévoir dans chacune des passes. L'estimation de ces resserrements a permis aux équipes du service électromécanique de guider la conception des nouvelles vannes.

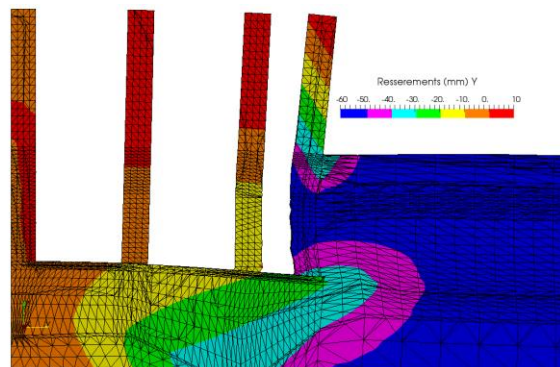
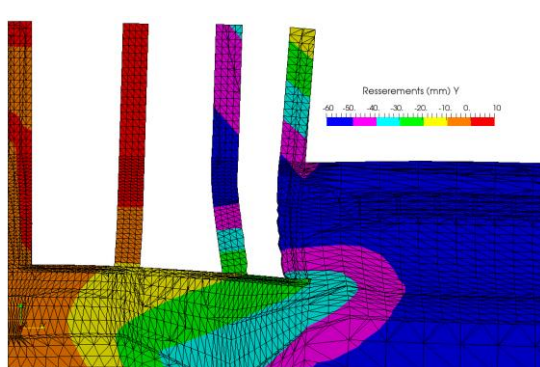


Figure 17 : Resserrements rive-à-rive des piles au droit des rainures de vanne, sur la période 2018-2038, avec (droite) et sans (gauche) confortement

6. TRAVAUX DE REHABILITATION

Au stade actuel des études, la solution retenue pour assurer le bon état de marche et d'entretien de la prise d'eau sur les 2 prochaines décennie consistera donc au final à :

- conforter les entretoises par mise en place de sarcophages en béton armé et couler des sur-radiers B.A. au niveau des passes centrale et de rive droite (Figure 15) ;
- affaiblir le radier et les entretoises de la passe rive gauche et surveiller le bajoyer de rive gauche. Si, comme le modèle numérique l'indique, des signes de dégradation apparaissent dans la décennie à venir, le conforter par liernes et tirants ;
- placer un Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane (DEG) en face amont du mur poids aval du décanteur ;
- Remplacer la passerelle aval monolithique par un ouvrage à trois travées sur appuis glissants avec des jeux inter-travées pour pouvoir la rendre compatible avec les mouvements futurs de l'ouvrage et assurer le passage d'engins de terrassement utilisés pour dégager les embâcles devant les pré-grilles de rive gauche en cas d'avalanche ;
- remplacer les deux vannes principales (centrale et rive droite) dont les assemblages sont très corrodés par des vannes de conception nouvelle au niveau des étanchéités (les étanchéités latérales sujettes à coincement sont remplacées par des étanchéités frontales pouvant coulisser) et des pièces de guidage et approfondir les rainures pour s'adapter aux déplacements futurs de l'ouvrage ;

- mettre en place un élément fixe avec jeu à la place de la vanne rive gauche. Les deux passes principales de l'ouvrage en rivière étant suffisantes pour assurer le passage de la crue centennale même après épaissement des entretoises ;
- remplacer les treuils (engrenages sous-dimensionnés, report des efforts mal conçus, ...) ;
- mettre en place dans le local des treuils une structure métallique de report des efforts des treuils vers les piles de l'ouvrage en rivière et/ou décompresser le châssis support actuel du local des treuils (un modèle ASTER du châssis a aussi été réalisé) ;
- enrichir l'auscultation existante à l'aide d'extensomètres et de plots pour mesures Invar, poursuivre l'auscultation topographique de l'ouvrage et mettre en place d'une surveillance des fuites du mur RG.

Le retour d'expérience de ces travaux et du suivi rapproché de l'ouvrage constitueront des éléments précieux et indispensables pour garantir la sûreté de cet ouvrage.

7. CONCLUSION

Contrairement à la plupart des calculs habituellement menés, les résultats peuvent dans le cas de ce barrage être directement comparés aux désordres observables. Ce qui a permis d'être relativement confiant sur la robustesse de ce modèle d'endommagement.

Mais surtout, les modèles ont permis :

- de comprendre les dysfonctionnements de l'ouvrage ;
- de s'assurer de sa stabilité ;
- de définir et de dimensionner les confortements nécessaires pour assurer son bon état de marche et d'entretien futur de l'ouvrage ;

il apparaît aujourd'hui que la réalisation des modèles 3D de l'ouvrage était indispensable au projet. Pourtant les actions à mener sur cet ouvrage ou même la direction à prendre pour les études étaient loin d'être évidentes à la reprise du projet en 2015, alors que le dépouillement des sondages géologiques venaient de remettre en cause la solution de reconstruction d'un ouvrage neuf à l'aval.