

CONFORTEMENT PAR ANCRAGES PASSIFS : QUEL COMPORTEMENT ? QUEL DIMENSIONNEMENT ? PROPOSITION D'UNE METHODE INNOVANTE DE JUSTIFICATION

Dam strengthening with passiv anchors : Innovative approach to design

Grégory COUBARD, Frédéric LAUGIER

EDF-CIH, Savoie Technolac, 73373 Le Bourget-du-Lac
gregory.coubard@edf.fr ; frederic.laugier@edf.fr

Luc DEROO

ISL
deroo@isl.fr

Mathieu FERRIERE

CNR Ingénierie, 2 rue André Bonin, 69316 Lyon
M.Ferriere@cnr.tm.fr

MOTS CLEFS

Ancrages passifs, Confortement, Barrages-poids, Etude de stabilité

KEY WORDS

Passive anchors, Rehabilitation works, Reinforcement, Gravity dams, Stability analysis

RÉSUMÉ

Le confortement des barrages poids avec des ancrages passifs ne fait pas actuellement consensus au sein de la profession sur la façon d'introduire leur apport dans les méthodes de calcul. Or, les ancrages passifs ont été utilisés, et sont encore utilisés sur de nombreux ouvrages : à l'interface barrage-fondation, dans le corps du barrage, entre structure en béton armé d'un évacuateur et béton du barrage pour des chargements statiques ou sismiques. L'article basé sur le retour d'expérience des auteurs propose de faire un tour d'horizon de quelques structures ayant déjà été confortées par ancrages passifs. Puis sur la base de données expérimentales et d'approche issues du monde académique (et en particulier des travaux de Pellet) une méthode innovante de prise en compte de l'apport des ancrages passifs est proposée dans le cadre de la démonstration de stabilité d'un barrage de type poids. Cette méthode semble particulièrement adaptée pour le confortement des barrages poids de taille modérée. Les interrogations/questionnements relatifs à la mise en œuvre de ce type de confortement sont discutés en fin d'article, l'objectif étant d'ouvrir la discussion afin de converger à terme vers un consensus au sein de la profession.

ABSTRACT

Gravity dam rehabilitation with passive anchors is currently an open discussion. On the other hand, many hydraulics structures were actually reinforced with passive anchors at various locations and for various purposes: dam foundation interface, dam body, interface between dam body and reinforced concrete spillway for seismic or static loading. This paper presents a series of case studies of dams which were recently reinforced with passive anchors. It proposes an innovative method for the assessment of passive anchors used to improve the stability of a gravity dam. This method is based on experimental data and theoretical approaches coming from research results (especially F. Pellet's PhD works). This method appears to be especially suitable for moderate size dams. The authors believe that passive anchors could be a very important tool for future projects of gravity dams reinforcement. Still some issues and questions need further discussions so as to build a shared point of view about design and construction methods.

1. INTRODUCTION

Une des solutions les plus couramment utilisées pour conforter les barrages poids existants consiste à installer des tirants d'ancrages actifs. Cette solution est utilisée mondialement depuis plusieurs dizaines d'années (on note même des utilisations précoces en France dès les années 30 au barrage de Marèges par exemple) et les références sont innombrables. Cette solution permet de se remettre dans les conditions « standards » de stabilité, en ajoutant une « masse virtuelle » équivalente permettant de limiter les contraintes de traction en pied amont et d'améliorer la résistance au cisaillement par l'augmentation de l'effort normal. Elle se révèle en général beaucoup plus économique que des confortements massifs par recharge aval ou engraissement de profil. Néanmoins, cette solution, quoique relativement économique, reste onéreuse pour les petits barrages. Elle requiert par ailleurs une certaine technicité et maîtrise, à la fois dans sa réalisation et dans ses exigences de maintenance et de surveillance.

Une autre option, plus économique, consiste à proposer, un confortement par le recours à des ancrages passifs scellés dans le barrage et la fondation. Cette option est très répandue pour la stabilisation d'ouvrages hydrauliques annexes tels que les bassins de dissipation ou les coursiers d'évacuateurs. Elle reste pourtant très peu usitée pour le corps des grands barrages, et connaît quelques applications, peu nombreuses, pour le corps des petits barrages. En effet, il demeure des difficultés de

fond pour justifier la stabilité des barrages poids avec les méthodes standards type CFBR (basées sur un simple calcul des forces), par manque de compréhension fine des mécanismes en jeu à l'interface béton / fondation et du mode de fonctionnement réel des ancrages passifs soumis à la fois à des efforts de traction et de cisaillement. Ainsi, les recommandations CFBR de 2010 relatives à la justification de la stabilité des barrages-poids mentionnent ceci concernant les ancrages passifs : « Il n'y a pas aujourd'hui consensus au sein de la profession sur la façon d'introduire la résistance des ancrages passifs dans les outils de calculs. Plus généralement, le retour d'expérience sur la stabilisation des barrages-poids par ancrages passifs est limité. Le projeteur doit donc justifier clairement les hypothèses et la démarche qu'il adopte et garder à l'esprit que les présentes recommandations ne sont pas encore assises sur une pratique bien établie. ».

Après avoir présenté quelques exemples de confortement de barrages poids par ancrages passifs, une méthode innovante de justification de ces derniers est proposée. Elle est basée en grande partie sur des travaux expérimentaux et de recherche, datant de plus de 25 ans orientés initialement sur les ancrages utilisés en mécanique des roches pour le confortement des ouvrages géotechniques [5].

Les difficultés ou questions relatives à l'utilisation des ancrages passifs pour les barrages poids sont discutées en fin d'articles. Parmi celles-ci :

- Difficulté à mobiliser l'ancrage en traction sans déplacement vertical
- Fonctionnement de l'ancrage en cisaillement :
 - o Effet « fil à couper le beurre » de l'ancrage sollicité dans le béton
 - o Au droit de l'interface béton / rocher, flexion localisée importante
- Durabilité (corrosion) des ancrages, en particulier à l'interface.
- Situation de projet adaptée à leur utilisation. Les ancrages passifs sont-ils seulement réservés aux situations accidentelles autorisant déplacement, ouverture de fissures où seraient-ils applicables également aux situations plus restrictives exceptionnelles ?

2. RETOUR D'EXPERIENCES D'OUVRAGES CONFORTES PAR ANCRAGES PASSIFS

2.1. Tirants passifs pour la stabilité au séisme des piliers d'un barrage mobile – L'exemple du barrage de Chancy-Pougny

2.1.1. Contexte

L'analyse dynamique du barrage franco-suisse de Chancy-Pougny sur le Rhône, a mis en évidence que les contraintes de traction qui se développeraient sous sollicitations sismiques rive-à-rive (SES de 0,23g) seraient supérieures à la résistance à la traction dynamique des piliers et ce, malgré la mise en place de butons de blocage à leur tête. La raison de cette fragilité transversale est que la plus grande partie des sollicitations provient des masses d'eau situées entre les passes du barrage en amont des vannes ; les autorités suisses demandant, non seulement de considérer cette masse d'eau oscillante dans le sens longitudinal du fleuve, mais aussi, de façon très conservative, dans le sens transversal ce qui revient en quelque sorte, à considérer que les passes sont infinies.

Les premières solutions de confortement envisagèrent l'introduction de précontrainte afin d'empêcher la fissuration. Mais ces solutions s'avèrent à la limite de la faisabilité technique en raison du fort élancement des piliers (grande hauteur / faible épaisseur) et de la médiocre qualité des bétons en place (résistance moyenne à la compression de l'ordre de 12 MPa).

Des solutions alternatives avec tirants passifs furent développées et mises en œuvre avec succès. Les tirants passifs sont utilisés pour augmenter la résistance au cisaillement des plans horizontaux de reprise de bétonnage et reprendre les efforts de traction le long des parements.

2.1.2. Avantages des tirants passifs

Les tirants passifs présentaient les avantages suivants :

- plus nombreux que ne l'auraient été des câbles de précontraintes, ils sont mieux répartis dans les sections à renforcer,
- ils ne sollicitent pas la structure en situation normale mais reprennent la traction et le cisaillement en cas de sollicitation extrême de séisme ;
- leur mise en œuvre, qui s'apparente à celle des micropieux où les barres sont introduites dans un forage puis scellées dans le béton du pilier par des injections gravitaire de coulis, reste somme toute assez classique.

2.1.3. Justification

Les tirants mis en place sont des barres d'acier de « ductilité élevée » avec les caractéristiques suivantes :

- o Classe d'acier : 1 230 MPa
- o Contrainte à la rupture minimale garantie : $\sigma_{p,k} = 1200$ MPa
- o Contrainte élastique minimale : $\sigma_{p0,2k} = 1050$ MPa
- o Allongement à la rupture minimum : A% = 10

Sur la base des efforts intérieurs maximaux dans les piliers découlant d'un modèle aux éléments finis 3D et d'un calcul selon la méthode du spectre de réponse, une vérification en section homogène de la résistance des piliers fut effectuée de manière classique (contrôle à la flexion et à l'effort tranchant) à l'aide d'un logiciel destiné à l'étude des sections transversales (Fagus de la société CUBUS SA.). On prit soin toutefois de ne considérer la maçonnerie que lorsqu'elle était comprimée (les massifs sont bien en béton, seuls les parements sont en maçonnerie).

Pour les efforts de dimensionnement, il fut tenu compte des combinaisons de l'Eurocode 8, soit :

- Séisme rive-rive avec 30% séisme amont-aval et séisme vertical,
- Séisme amont-aval avec 30% séisme rive-rive et séisme vertical.

Le contrôle en flexion rive-rive consista à déterminer le coefficient de sécurité Effort résistant / Effort sollicitant (le plus petit fut de 2,33) et la contrainte maximale dans les barres avec $\sigma_{normale} = 441,2 \text{ N/mm}^2 < 1050 \text{ MPa}$.

Le contrôle à l'effort tranchant sur la base d'une résultante $V_{max} = (F_{rive-rive}^2 + F_{amont-aval}^2)^{1/2} = 5131 \text{ kN}$ fut effectué comme suit :

- Armature prévue : 6 barres $\varnothing 41$ et 7 barres $\varnothing 66$ de type Freyssinet $\rightarrow A_s = 31\,853 \text{ mm}^2$
- Effort tranchant maximum : $V_{max} = 5131 \text{ kN}$
- Cet effort fut considéré repris par les armatures. Contrôle de la contrainte :
 - $\tau_{moyen} = (5131 \times 10^3 \text{ N}) / (31\,853 \text{ mm}^2) = 161 \text{ N/mm}^2$
 - $\tau_{max} = 1.5 \times \tau_{moyen} = 242 \text{ N/mm}^2$
- Contrainte de comparaison :
 - $\sigma_{global} = (\sigma_{normale}^2 + 3 \tau_{max}^2)^{1/2} = (441.2^2 + 3 \times 242^2)^{1/2} = 609 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{p0,2k} = 1050 \text{ N/mm}^2$

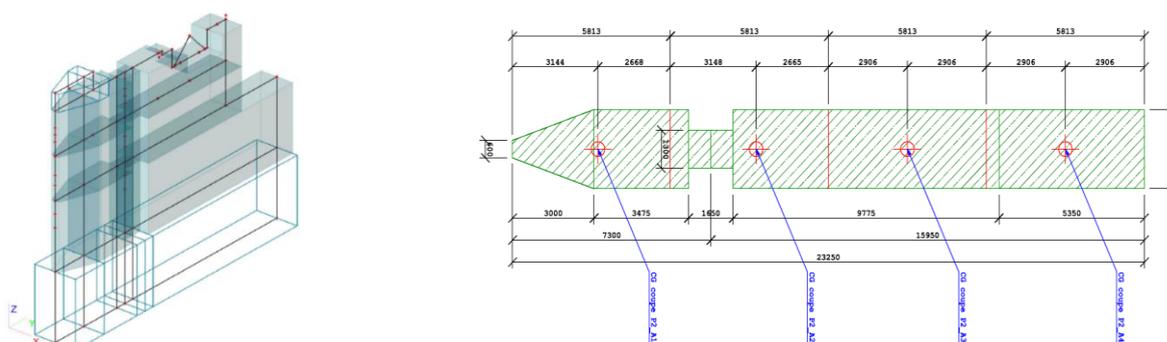


Figure 1 : modèles d'analyse des piliers du barrage pour le calcul des efforts intérieurs : (a) extrait du modèle 3D d'analyse dynamique et (b) plan coupe horizontale à l'encastrement pilier / radier [Logiciel Nemetschek-Scia]

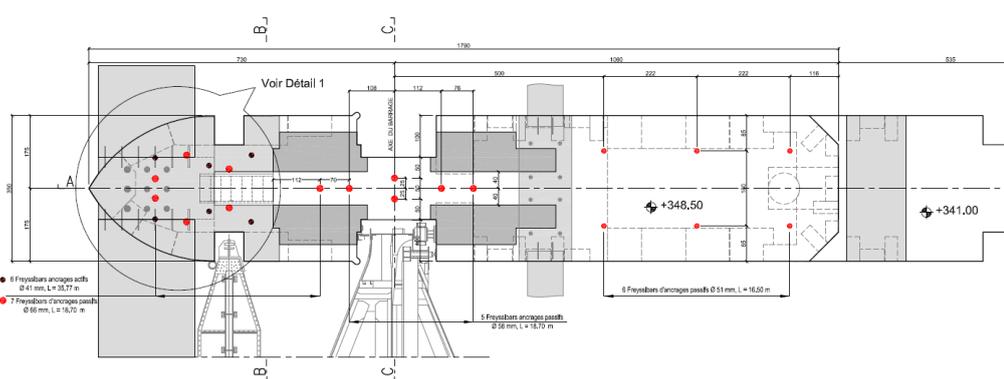


Figure 2 : plan coupe au sommet des piliers du barrage – implantations des tirants passifs (points rouges)

In fine, 24 tirants passifs de 19,00 m de longueur, ont été répartis sur le pourtour de chaque pilier, dont 6 actifs et 18 passifs :

- 6 barres de diamètre 41 mm et 7 barres de 66 mm réparties sur le pourtour du premier tiers amont,
- 5 barres de diamètre 58 mm réparties sur le pourtour du tiers central,
- 6 barres de diamètre 51 mm réparties sur le pourtour du troisième tiers aval.

Afin d'assurer leur durabilité, un système renforcé de protection contre la corrosion fut réalisé en mettant des gaines plastiques injectées au coulis de ciment autour des barres et en plaçant ces dernières dans des forages suffisamment larges afin de disposer d'un espace annulaire (enrobage) entre le tirant et la paroi du forage d'au moins 6 cm pour un bon ancrage et une bonne protection des barres.



Figure 3 : (a) barres pré-encastées dans leur gaine et (b) vue de dessus d'un avant-bec de pilier équipé de tirants

2.2. Confortement du barrage de Record

Le barrage de Record sur l'Agout (Tarn) est un petit barrage de classe C de 12,4 m de haut sur TN. Barrage vanné initialement équipé de 4 passes segments, il a fait récemment l'objet en 2015 et 2016 d'une réhabilitation complète dans le cadre d'un projet de passage des crues. Ainsi les 4 vannes segments ont été remplacées par 4 passes déversantes de type PKW et le reste du barrage a été rendu déversant [6].

Pour ce projet, la PHE d'origine a été surélevée de 3,35 m. La stabilité du barrage n'a pas été remise en cause au contact barrage-fondation du fait de sa nouvelle configuration (associée à une hausse de la PHE). En revanche, à l'interface barrage existant / nouvelle structure PKW, un renforcement par ancrages passifs a été nécessaire.



Figure 4 : Barrage de Record a) Avant, b) Après

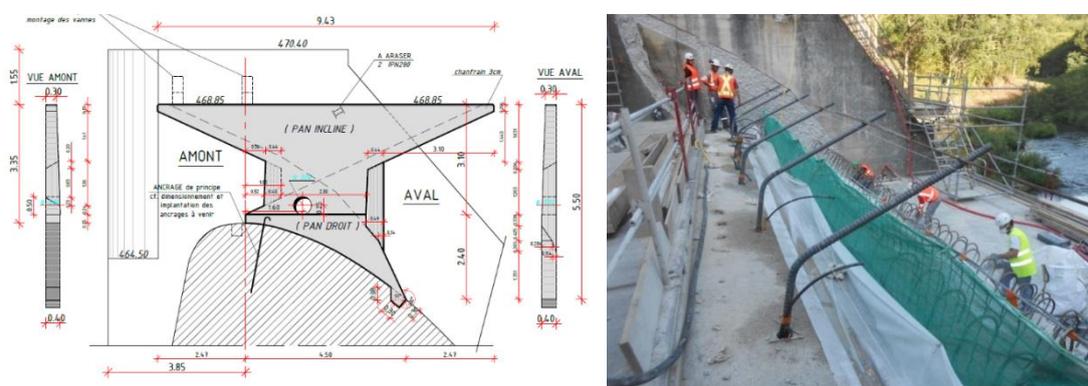


Figure 5 : Barrage de Record a) Coupe ancrage PKW sur seuil, b) Réalisation des ancrages

La stabilité du PKW est renforcée par la mise en place de deux catégories d'ancrages. Les ancrages principaux sont chargés de reprendre les efforts de traction à l'amont (moment de renversement du PKW) tandis que les ancrages secondaires reprennent des efforts de cisaillement (épinglage de 4 rangées de HA20). Les principales caractéristiques des barres principales sont :

- o Barres acier (ADC – SAS500) $\varnothing=50\text{mm}$ et $L=7\text{ml}$ implantées dans chaque inlet et outlet soit 7 unités par passe. Longueur totale mise en œuvre = 200ml. Orientation de 10° vers l'aval par rapport à l'axe vertical.

- o Elles ont été ancrées sur 5ml au travers environ 3.5ml de béton cyclopéen et 1,5ml de béton armé. Le forage a été réalisé par carottage $\varnothing 102\text{mm}$ pour traverser l'enveloppe béton armé et pouvoir apprécier la qualité du béton cyclopéen par analyse des carottes extraites. Le scellement s'est fait au mortier PCI Seltex.

Le calcul de stabilité du PKW est réalisée en le considérant comme un structure poids, mais avec l'hypothèse d'abattement quasi-totale des sous-pressions. Les éléments d'appréciation pour justifier cette position sont :

- Le PKW, d'une hauteur de 3,35 m n'est pas à considérer comme un barrage usuel même si la structure retient de l'eau.
- Le PKW de Record a été conçu avec un système d'étanchéité à barrières multiples (Waterstop, tube d'injection ultérieur si besoin, membrane amont accessible et réparable) et un système de drainage correctement dimensionné (un drain de collecte sur la largeur et drains d'évacuation à l'aval de chaque inlet). Ce système de drainage est nettement plus efficace qu'un drainage en fondation de barrage, ce qui explique l'écart avec les préconisations du CFBR.

Par ailleurs les calculs ont été menés dans les conditions suivantes :

- Hypothèse conservatrice de niveau aval
- Cas de charge accidentel à PHE avec défaut d'étanchéité. Ce cas correspond à un défaut d'étanchéité localisé en cours de crue (il ne peut donc pas être réparé). L'abattement de 50% encore supposé est lié au fait que le défaut est supposé localisé (et non généralisé) et que le réseau de drainage est dimensionné pour évacuer un débit de fuite relativement conséquent. C'est une hypothèse optimiste dans le cadre d'un défaut d'étanchéité puisque selon les recommandations CFBR pour le calcul des barrages poids, il s'agit de l'hypothèse à retenir en cas d'étanchéité et de drainage fonctionnel. Néanmoins, contrairement à un barrage où l'on draine une masse rocheuse fissurée par des forages ponctuels, le dispositif de drainage du PKW permet de drainer toute une ligne à l'aval du joint waterstop.
- Dimensionnement *des ancrages* réalisé en situation de service compte tenu des déplacements engendrés. Ces derniers doivent en effet rester compatibles avec le type d'étanchéité retenu. Le Waterstop et la membrane amont acceptent des déplacements pluri-millimétriques (déplacements max estimés par le bureau de structure de 2 mm).

2.3. Confortement de l'ouvrage de fermeture RD du barrage de la Palisse

Le barrage voûte de la Palisse (Loire), fait actuellement l'objet de travaux de réhabilitation dans le cadre d'un projet de passage des crues suite à la révision des études hydrologiques. Barrage voûte mince de 55 m de haut, il est équipé de deux culées en rive. Ces culées sont dites en « L » avec des ouvrages de fermeture poids reprenant les efforts hydrostatiques de la retenue, les culées ne reprenant que les efforts de la voûte. Le projet de réhabilitation prévoit une réhausse des PHE de 1,90 m qui permet de faire transiter la nouvelle crue de projet par le seuil déversoir existant au centre de la voûte. Les ouvrages de réception aval sont légèrement modifiés pour s'adapter à l'augmentation de débitance. Les parties non déversantes de la voûte sont surelevées d'environ 2 m.



Figure 6 : a) Barrage de la Palisse, vue aval, b) Vue de dessus

Les justifications des ouvrages modifiés (voûte, culées et ouvrages de fermeture RG) ont été menées. Elles n'ont pas conduit à des confortements particuliers, en dehors de l'ajout naturel des masses liées à la surélévation des ouvrages.

La structure de fermeture à l'extrême rive gauche a posé plus de difficultés. Il s'agit d'une structure en béton de faible hauteur (environ 8,5 m), mais très élancée pour laquelle les coefficients de stabilité en situation exceptionnelle ne sont pas satisfaisants. Le confortement retenu est réalisé à l'aide de barres d'ancrages passifs. Le dimensionnement des ancrages est conduit en considérant, de manière conservatrice la pleine sous-pression sous toute la section.

La justification a été conduite en considérant que le mode de rupture préférentiel de cette structure très élancée se fait par renversement. Cette configuration permet la mise en traction effective des ancrages avec peu de reprise de cisaillement. Une vérification détaillée a été réalisée par une modélisation 3D du comportement de la structure et des ancrages. Le prédimensionnement du confortement a conduit à retenir, en phase APD, la mise en place de 8 ancrages (espacement 1 m) constitués de barres GEWI 43 mm. La longueur unitaire de scellement dans le rocher est estimée à 6,50 m. Pour limiter le développement de la corrosion, les barres GEWI ont été munies d'une protection P2 au sens du TA95.

L'ouverture du contact en pied amont entraîne une augmentation des compressions en pied aval visible sur la cartographie des contraintes principales majeures (Cf. Figure 7). Ces compressions restent cependant limitées (~5-6 MPa) et très inférieures à la résistance à la compression du béton et du rocher.

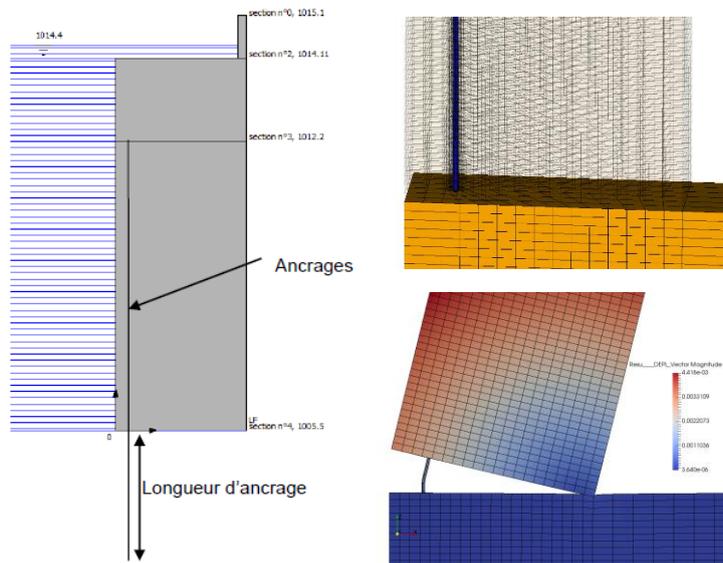


Figure 7 : a) Modelisation 2D de l'ouvrage de fermeture, b) Modelisation 3D du comportement des ancrages

3. PROPOSITION D'UNE METHODE DE PRISE EN COMPTE DES ANCRAGES PASSIFS

3.1 Fonctionnement des ancrages passifs

Par essence, les ancrages passifs ne sont mobilisés que par une déformation ou un déplacement de la structure qu'ils renforcent. Lorsque les déformations sont faibles et restent dans le domaine élastique linéaire, l'apport des ancrages est minime. En revanche, lorsque des déplacements plus importants ont lieu (ouverture ou glissement), cet apport peut devenir très significatif.

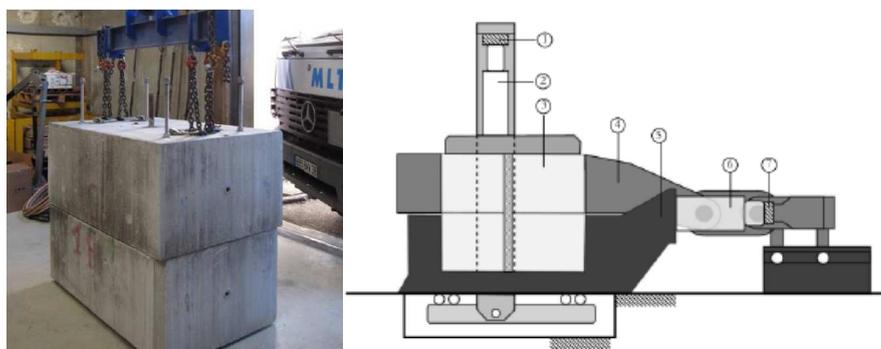


Figure 8 : Extraints de [3] et [2] – Blocs de béton avec ancrage vertical avant essai & Schéma de la boite de cisaillement

Les essais menés en 1997 au CEREMA de Bron illustrent bien le fonctionnement des ancrages passifs pour le renforcement d'une interface cisailée. Ces essais de grande dimension ont fait l'objet de plusieurs publications ([2] & [3]) : Deux blocs de béton de dimension 150x100x62,5 cm³ et de résistance à la compression 50 MPa ont été renforcés par des ancrages passifs de différents diamètres (compris entre 20 et 40 mm) et avec différentes inclinaisons (90° ou vertical à 45°).

Ces essais ont mis en évidence la forte contribution des ancrages passifs à la résistance au cisaillement de l'interface béton-béton. Il est intéressant de noter que la rupture de l'ancrage a toujours eu lieu dans le plan de cisaillement.

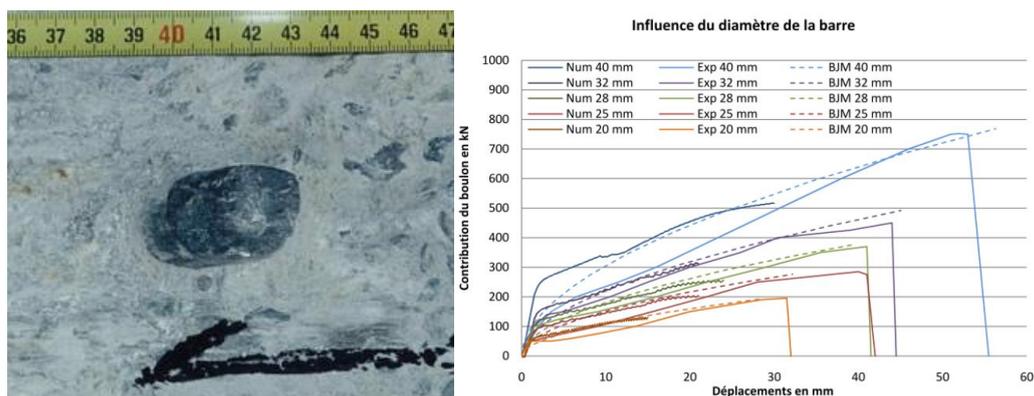


Figure 9 : Extraints de [3] et [2] – Barre cisailée à l'interface & Résultats des essais avec ancrages verticaux (courbes « Exp »)

Analyse :

Dans le cas de sollicitations simultanées du tirant par une force de traction F_d , une force de cisaillement V_d et un moment fléchissant M_d , la résistance ultime interne d'une barre d'ancrage est vérifiée dans la norme suisse SIA 191/1 par la formule suivante :

$$\left(\frac{F_d}{F_{yk}/\gamma_B} \right)^2 + \left(\frac{V_d}{V_{yk}/\gamma_B} \right)^2 + \frac{M_d}{M_{yk}/\gamma_B} \leq 1$$

$V_{yk} = F_{yk}/\sqrt{3}$ valeur caractéristique de la force de cisaillement à la limite d'écoulement de l'armature
 M_{yk} valeur caractéristique du moment fléchissant à la limite d'écoulement de l'armature

Figure 10 : Extrait de [4] – Critère de résistance ultime interne d'une barre

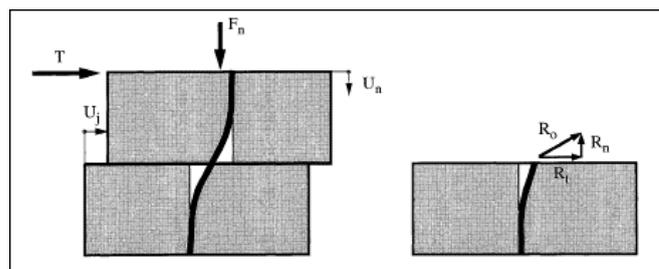
La rupture de la barre ayant lieu à l'interface et les efforts étant symétriques, le moment est nul dans la zone de rupture. Seule la résistance ultime au cisaillement peut être considérée. Le critère devient alors similaire au critère de Von Mises. Pour les différents diamètres de barres et pour une résistance à la traction de la barre de 550 MPa, les résistances ultimes au cisaillement sont les suivantes :

Diamètre de la barre	Contribution de la barre au cisaillement (essais CEREMA)	Résistance ultime de la barre au cisaillement (SIA ou critères de Von Mises)
20 mm	~200 kN	100 kN
25 mm	~290 kN	156 kN
28 mm	~370 kN	196 kN
32 mm	~450 kN	255 kN
40 mm	~750 kN	399 kN

Figure 11 : Comparaison entre contribution expérimentale de la barre et résistance ultime au cisaillement de la barre

Le tableau précédent met en évidence que la contribution de la barre à la résistance au cisaillement de l'interface est près de deux fois supérieure à la simple résistance ultime de la barre au cisaillement. Cela est dû à l'effet de confinement de la barre cisailée : sous l'action du cisaillement, la barre tend à s'allonger et se met en traction ; l'adhérence entre la barre et le béton s'oppose à cet allongement : un effort normal égal à la traction dans la barre est généré au sein du béton, et vient comprimer l'interface ; cela ajoute ainsi de la résistance au cisaillement par frottement.

Ce mécanisme est important dans le fonctionnement des ancrages passifs et a été analysé et reproduit par l'approche de Pellet [5] décrite dans le paragraphe suivant.

Figure 12 : Extrait de [5] – Apport de l'ancrage cisailé avec un effort tangentiel R_t et un effort normal R_n **Remarque importante :**

Un premier dimensionnement des ancrages passifs peut consister à simplement s'assurer que le déficit d'effort (notamment en cisaillement) dans le bilan de stabilité de la structure est inférieur à la résistance ultime des ancrages mis en place moyennant quelques marges de sécurité (coefficients de sécurité sur les résistances et hypothèses conservatives telles que la pleine sous-pression sous la structure par exemple).

Ce premier dimensionnement sera conservatif puisqu'il ne prendra pas en compte l'effet de confinement. En revanche, ce premier dimensionnement ne permettra pas d'estimer l'importance des déplacements de la structure.

Une méthode permettant de mieux décrire le fonctionnement de la structure confortée et les déplacements associés est donc proposée dans la suite de l'article.

3.2 L'approche de Pellet issue du domaine souterrain

L'approche est basée sur un modèle analytique rendant compte à la fois du comportement de la barre (avec deux parties : domaine élastique et domaine plastique) et du milieu encaissant (coulis & béton du barrage ou coulis & rocher de la fondation) supposé parfaitement plastique. Les hypothèses et la construction du modèle analytique sont détaillées dans la thèse [5]. Le développement du modèle s'est appuyé sur une campagne expérimentale réalisée sur une presse triaxiale de grande dimension (éprouvettes de 60x30x30 cm³) et sur deux matériaux différents : un calcaire dur de résistance à la compression 150 MPa et un matériau plastique représentant une roche tendre de résistance à la compression 7 MPa.

Le modèle analytique permet d'évaluer l'évolution de l'effort tangentiel R_t et de l'effort normal R_n apportés par l'ancrage en fonction du déplacement tangentiel U_j au niveau de l'interface (cf. Figure 12). A titre d'exemple, la Figure 13 donne les courbes $R_t(U_j)$ et $R_n(U_j)$ pour les caractéristiques d'ancrage et de milieu encaissant suivantes :

- Ancrage vertical de diamètre 50 mm, de résistance 500 MPa, de module 210 GPa et de déformation à la rupture de 10%.
- Matériau encaissant de résistance à la compression 15 MPa.

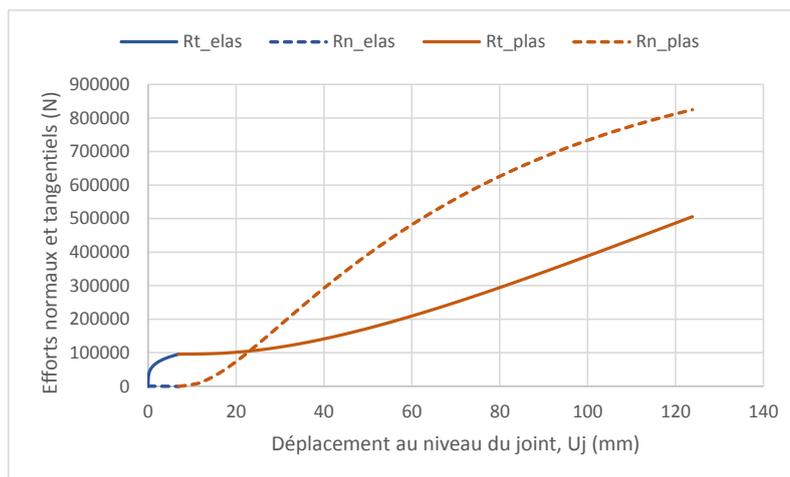


Figure 13 : Apport de l'ancrage : effort tangentiel R_t et effort normal R_n en fonction du déplacement au niveau du joint U_j [5]

La contribution de l'ancrage à la résistance au cisaillement de l'interface confortée (T_b) peut ensuite être évaluée, en connaissant l'angle de frottement de l'interface (ϕ_j), par la formule suivante :

$$T_b = R_t + R_n \cdot \tan(\phi_j)$$

Sur la Figure 9, cette contribution $T_b(U_j)$ calculée par cette approche (notée « BJM » en légende) a été comparée aux résultats expérimentaux (notés « Exp »). Il en ressort que l'approche permet reproduire avec une très bonne fidélité les données expérimentales du CEREMA sur un béton de résistance à la compression 50 MPa. Cette approche a également permis de reproduire les essais réalisés dans le cadre de la thèse de Pellet sur des matériaux de résistance à la compression 7 MPa (plastique) et 150 MPa (calcaire) mais également sur d'autres essais avec des résistances à la compression du milieu encaissant allant de 10 MPa (grès) à 105 MPa (granite). L'ensemble de ces éléments sont disponibles dans la thèse [5].

L'approche de Pellet a donc été validée par un grand nombre de données expérimentales.

3.3 De la théorie aux cas pratiques : sollicitations composées et effets de groupe

L'approche décrite ci-dessus vaut pour un ancrage isolé, soumis à une sollicitation de cisaillement pur. Dans la pratique, une série d'ancrages est mise en œuvre, et l'interaction entre eux modifie le comportement. Par ailleurs, la sollicitation n'est pas toujours un cisaillement pur : il peut également y avoir de la traction.

Cela ne modifie pas fondamentalement l'analyse, mais nécessite quelques précautions.

Lorsque les ancrages sont sollicités de manière composée (cisaillement + traction), par exemple au pied amont d'un barrage poids s'il y a amorce de fissuration, alors les abaques de Pellet doivent être un peu modulés. En effet, il faut d'abord que le déplacement de cisaillement viennent refermer la fissure, avant de générer une contrainte de compression. En approche conservatrice, on peut considérer ceci : on distingue, dans l'ancrage : la composante de traction provenant des efforts externes (R_{n-ext}); la composante de traction provenant des efforts internes (R_{n-int}). La valeur numérique de l'effet de Pellet ne s'applique que sur la résultante $R_{n-int} - R_{n-ext}$. En revanche, la vérification de stabilité interne (par ex : résistance de l'ancrage) se fait bien sur $R_{n-int} + R_{n-ext}$.

Il convient cependant de préciser les éléments d'appréciation suivants quant à la prise en compte de l'ouverture normale δ_n de l'interface sur le comportement du joint selon les auteurs du présent article :

- Ce point ne devrait avoir aucune incidence lorsque l'interface est fermée (pas de fissuration au niveau de l'emplacement des ancrages),
- L'incidence devrait être faible si la fissuration est limitée (dans l'exemple ci-après, on constate que la fissuration, i.e. la zone en traction, dépasse à peine la zone d'implantation de l'ancrage, cf. figure 15),
- L'incidence serait potentiellement plus importante si la fissuration se propage bien au-delà de l'ancrage (typiquement pour les structures plus élancées).

Cette question, ainsi que la manière de prendre en compte les barres inclinées, constituent des sujets qui mériteront un développement plus large au-delà du présent article.

Par ailleurs, la localisation des ancrages dans la structure fait qu'ils ne seront pas tous également sollicités. C'est par exemple le cas lorsque le déplacement de la structure sous l'effort tranchant n'est pas une simple translation, mais la

B1.04 – Confortement par ancrages passifs : quel comportement? quel dimensionnement? Proposition d'une méthode innovante de justification
page 8

combinaison d'une translation et d'une rotation. Dans ce cas, le déplacement au niveau du joint considéré n'est pas uniforme et il faut distinguer la contribution de chacune des barres.

L'effet d'une série d'ancrages est en théorie additif. Par exemple, lorsque les ancrages sont proches les uns des autres, et alignés sur l'axe du barrage, leurs effets s'ajoutent, même s'ils sont proches les uns des autres. Il faut cependant s'assurer de la capacité du rocher de fondation et/ou du corps du barrage à reprendre l'effort de traction correspondant.

3.4 Principe de la méthode de prise en compte des ancrages passifs

La méthode de prise en compte des ancrages passifs exposée dans cet article s'applique aux structures soumises à des efforts de cisaillement. Il s'agit typiquement du renforcement des barrages-poids, avec une ligne d'ancrages parallèle à l'axe du barrage. Elle consiste à :

- Choisir un dimensionnement : nombre de barres, diamètre, caractéristiques mécaniques, inclinaison.
- Calculer par l'approche de Pellet l'apport des ancrages en fonction du glissement au niveau de l'interface : $R_t(U_j)$ et $R_n(U_j)$,
- Estimer le déplacement U_j nécessaire à l'obtention d'une situation d'équilibre, c'est-à-dire d'un coefficient de stabilité au glissement de 1 ($F_g = 1$) sans prise en compte des coefficients partiels de sécurité,
- Quantifier le glissement (U_j) et le taux de sollicitation des barres ($\sqrt{(R_n^2 + R_t^2)} / \sqrt{(R_{n_max}^2 + R_{t_max}^2)}$) – auquel il faut éventuellement ajouter le taux de sollicitation par traction
- Vérifier les autres paramètres de résistance interne : résistance au glissement à l'interface forage / milieu encaissant ; résistance à la traction des cones de rocher et de corps de barrage sollicités en traction.
- Vérifier le fonctionnement statique global (équilibres en moment, fissuration) avec l'effort R_t et R_n ajouté.

La démarche est alors itérative, en fonction des résultats et suivant l'objectif à atteindre en termes de déplacement et de taux de sollicitation, le dimensionnement peut être revu.

La méthode n'est encore qu'au stade de la proposition. Aucun critère n'est fixé dans cet article. Cependant, étant donné que les résultats de la méthode sont un déplacement/glissement à l'interface et un taux de sollicitation des barres, les critères naturels semblent devoir être :

- Un critère de glissement admissible : Pour chaque type de situation et éventuellement en fonction de la classe de l'ouvrage, une valeur de glissement « acceptable » ou « admissible » pourrait être définie.
- Un critère sur le taux de sollicitation des ancrages : Ce critère pourrait faire office de coefficient de sécurité et couvrirait les incertitudes sur les différents paramètres mécaniques ainsi que le processus potentiel de corrosion des ancrages. De la même manière que pour le critère de déplacement, il pourrait dépendre de la situation et de la classe de l'ouvrage.

Ces valeurs pourraient faire l'objet d'une concertation, d'un consensus au sein d'un groupe de travail du CFBR. De même, la question de la vérification de l'ouvrage pour un retour à une situation normale pourra être discutée.

3.5 Application de la méthode à un ouvrage

Afin de mieux appréhender le principe de la méthode proposée pour la prise en compte des ancrages passifs, un exemple d'application est développé dans ce paragraphe. Le confortement par ancrages passifs semble particulièrement adapté aux ouvrages de petite taille fortement chargés en crue. C'est typiquement le cas des barrages de type seuil déversant. L'ouvrage étudié a les caractéristiques suivantes :

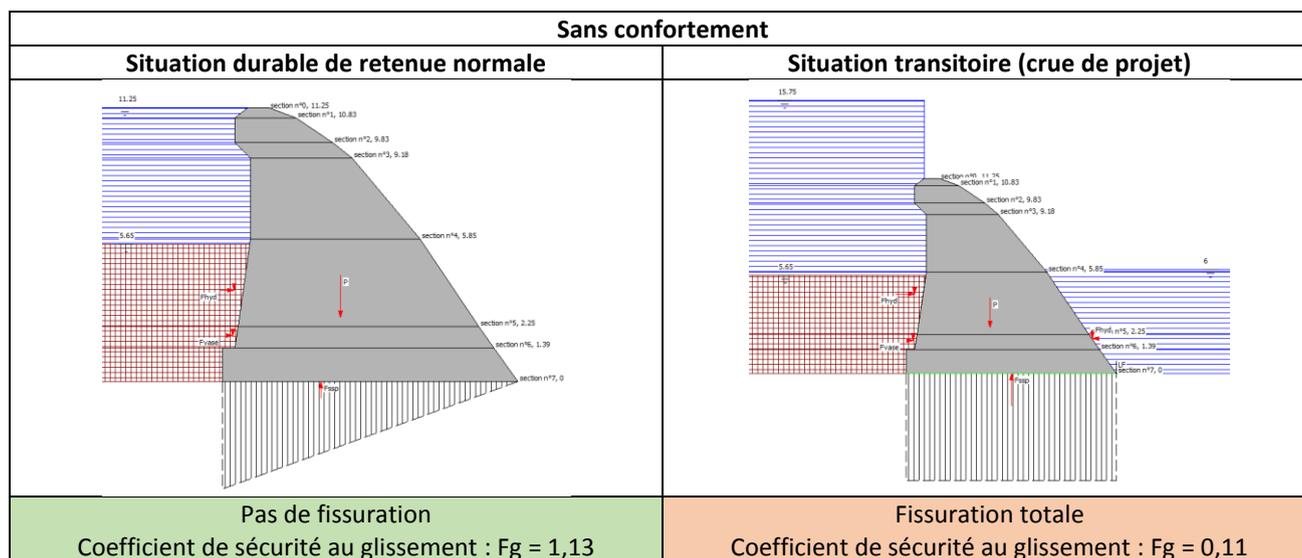


Figure 14 : Résultats de l'étude de stabilité de l'ouvrage sans confortement

- Seuil (profil Creager) de 11 m environ de hauteur.
- Masse volumique moyenne du béton : 2200 kg/m³.
- Caractéristiques à l'interface béton-rocher : Cohésion C = Résistance traction $R_t = 0$ / Angle de frottement $\phi = 45^\circ$.
- Chargement à la cote de la crête à retenue normale et déversement de 4,5 m de hauteur en crue de projet.

Sans confortement, la stabilité de l'ouvrage est justifiée selon les recommandations CFBR [1] à retenue normale. En revanche, elle ne l'est pas pour la crue de projet.

Un confortement par ancrages passifs est proposé avec les caractéristiques suivantes :

- 1 ancrage vertical par mètre linéaire de 50 mm de diamètre.
- Caractéristiques de l'ancrage : résistance de 500 MPa, module de 210 GPa, déformation à la rupture de 10%.
- Caractéristique du matériau encaissant : résistance à la compression de 15 MPa.

Le fonctionnement de l'ancrage passif est décrit dans le §. 3.1. La Figure 12 illustre la déformée de la barre et les efforts tangentiel (R_t) et normal (R_n) se développant en fonction du déplacement (U_j). La Figure 13 donne les courbes $R_t(U_j)$ et $R_n(U_j)$ pour les caractéristiques de dimensionnement du confortement décrites ci-dessus, auquel il faut ajouter le taux de sollicitation par traction (très faible dans le présent exemple dans la mesure où l'extension maximale de la fissure atteint à peine la ligne d'ancrage et une ouverture attendue très faible à cet endroit).

Les ancrages passifs permettent d'éviter une rupture fragile de l'ouvrage par l'apport de la ductilité propre aux barres d'acier et leur capacité de déformation. L'application de l'approche de Pellet montre que pour le dimensionnement choisi, le glissement est de 42 mm et le taux de sollicitation des barres est de 34%.

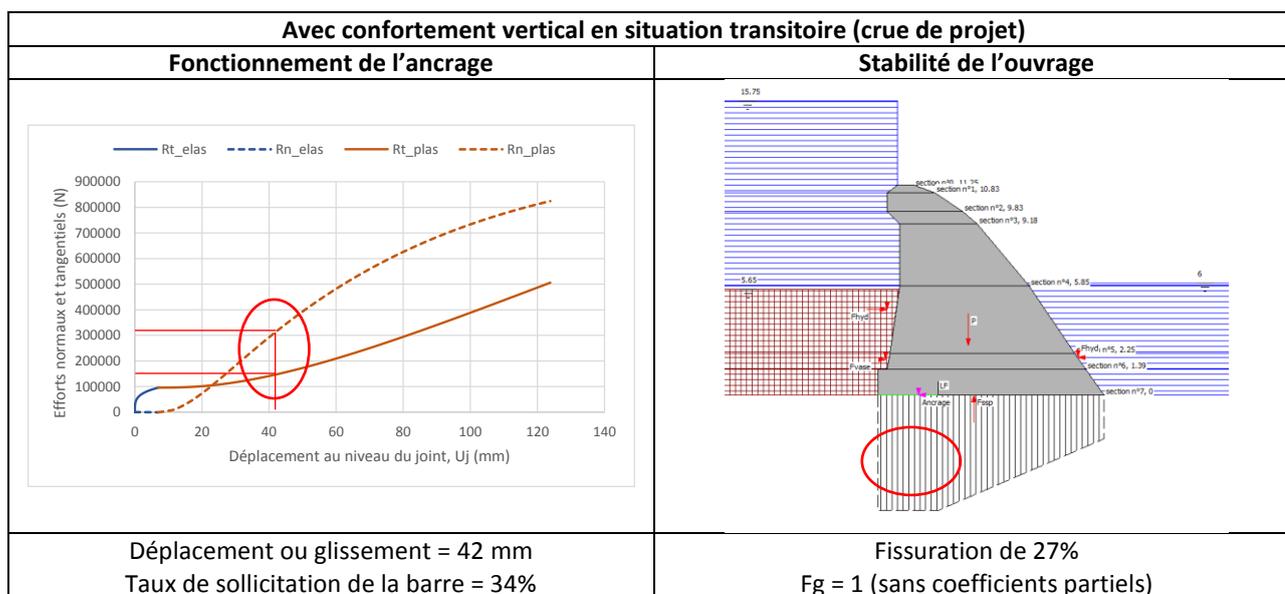


Figure 15 : Résultats de l'étude de stabilité avec confortement par ancrages passifs verticaux

4. QUESTIONNEMENTS RELATIFS AU CONFORTEMENT PAR ANCRAGES PASSIFS

La proposition de méthode décrite dans le paragraphe précédent est encore à un stade préliminaire. Des questions peuvent donc légitimement se poser tant sur la pertinence de la méthode elle-même que sur les principes de dimensionnement associés. Quelques réponses sont proposées dans ce chapitre. Elles pourront être complétées à la faveur d'un travail commun au sein du CFBR.

Vieillessement/Corrosion

Le vieillissement des ancrages par corrosion devra être intégré dans la phase de dimensionnement. Un principe simple pourrait être de considérer une épaisseur sacrificielle et de prendre en compte un rayon des barres d'ancrage diminué de cette valeur.

Des protections (gaines plastiques) des barres existent. Dans le cadre strict de l'utilisation de la méthode exposée dans le paragraphe précédent, aucune étude expérimentale n'a permis de statuer sur l'influence de ces gaines sur le comportement de l'ancrage.

Autres vérifications

D'autres vérifications devront être effectuées : il s'agit notamment de s'assurer de la stabilité externe de l'ensemble ouvrage conforté et ancrage (vérification de l'arrachement d'un coin rocheux, du cisaillement du coulis). Ces vérifications n'ont pas été traitées dans la proposition de méthode décrite plus haut mais seront bien entendu à effectuer.

L'atout de la ductilité

Un des intérêts des ancrages passifs est la ductilité. Sur l'exemple de la figure 13 et du cas traité au §3.5, la rupture intervient pour un déplacement de 120 mm, avec un effort tangentiel plus de deux fois supérieur à l'effort tangentiel qui provoque les 46 mm de déplacement calculé.

Ainsi, une éventuelle rupture « prévient » longtemps à l'avance. Cela peut permettre de mettre en évidence un dimensionnement insuffisant ou une perte de résistance par vieillissement. Lors du premier accident du barrage d'Austin, les ancrages ont probablement empêché la rupture totale, malgré un déplacement total de près de 50 cm (selon un rapport de l'USBR : « The anchor bars were perhaps the only thing holding the dam in place »).

Confiance apportée à la méthode

La méthode est basée sur l'approche de Pellet. La confiance apportée à la méthode repose sur les études expérimentales avec une grande variété de matériaux dont les résistances à la compression varient entre 7 et 150 MPa.

Des effets imaginés tels que la barre devenant « un fil à couper le beurre » n'ont pas été observés expérimentalement sur des matériaux de faible résistance (R_c de 7 et 10 MPa). Lors des essais, les barres testées ont visiblement bénéficié d'un enrobage suffisant pour éviter cette problématique. Cependant, si la méthode suscite un intérêt suffisant et qu'un consensus de la communauté pousse à la réalisation de nouvelles campagnes expérimentales afin de tester l'influence de l'enrobage (enrobage minimum ?) ou des matériaux (par exemple de la maçonnerie), celles-ci ne seraient pas exclues.

Admissibilité des déplacements

L'apport d'un ancrage passif est directement lié au déplacement de la structure qu'il conforte. L'admissibilité de ce déplacement doit être discuté et faire l'objet d'un consensus. La méthode proposée dans le paragraphe précédent ébauche deux critères dont l'un est cette valeur de déplacement. Des valeurs limites pourraient être choisies.

Au-delà de la quantification du déplacement lors de la sollicitation de l'ancrage, des questions peuvent se poser sur l'admissibilité des effets de ce déplacement. En effet, il est possible que des fuites apparaissent au contact barrage-fondation renforcé. Ce phénomène n'est pas certain compte-tenu de l'effort normal apporté par un ancrage sollicité en cisaillement.

Comportement cyclique ou enchaînement de sollicitations

Les ancrages passifs peuvent tout à fait être sollicités une première fois, rentrer dans la phase de comportement plastique (avec déplacement au niveau de l'interface renforcée), être déchargés avec un retour élastique et donc des déplacements irréversibles résiduels, puis être à nouveau sollicités et revenir sur la courbe effort-déplacement initiale. Un ouvrage conforté pourrait donc tout à fait être sollicité une première fois (par une crue par exemple) puis à nouveau sollicité (par un second pic de crue plus important). Les calculs doivent alors tenir compte de la perte d'une partie de la cohésion ou de la dilataance le long du plan de glissement.

5. CONCLUSION

Le confortement de structures et notamment de structures de type poids par ancrages passifs apparaît être une solution intéressante : plus économique qu'une recharge aval ou que l'installation de tirants actifs, robuste, simple à mettre en œuvre, ne nécessitant pas une surveillance onéreuse, limitant les effets sur la structure en fonctionnement normal (pas de contraintes additionnelles contrairement aux tirants actifs).

Cependant, ce confortement par ancrages passifs se heurte à la difficulté de dimensionnement et de compréhension du comportement de la structure confortée. Il n'existe ainsi pas de consensus au sein de la profession sur la manière de prendre en compte ces ancrages passifs.

La méthode appliquée au barrage de Chancy-Pougny a consisté à considérer les tirants comme des barres d'armatures classiques capables de résister dans le domaine élastique aux efforts simultanés de traction-cisaillement grâce à leur résistance intrinsèque à très haute limite d'élasticité (1230 MPa).

L'approche innovante de Pellet proposée dans cet article (elle-même développée sur des campagnes expérimentales) pourrait permettre de pallier cette difficulté de dimensionnement. La méthode permet en effet de relier le déplacement à l'effort apporté par l'ancrage passif puis de l'intégrer facilement dans un calcul de stabilité classique de barrage-poids.

Une discussion pourrait s'ouvrir au sein de la communauté CFBR afin de discuter de cette méthode et de manière générale du confortement par ancrages passifs, et à terme de proposer des critères communs de dimensionnement.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] CFBR – Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids- octobre 2012
- [2] Jean-Paul DEVEAUD, Siegfried MAIOLINO (CETE de Lyon) – Modélisation des essais de cisaillement de barres d'ancrage en vraie grandeur – Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2012.
- [3] Siegfried MAIOLINO, Frédéric PELLET – Full scale lab testing for the determination of rock bolt contribution to reinforced joint shear strength – International Symposium on Rock Mechanics ISRM Congress 2015.
- [4] Norme Suisse SN – SIA 191/1:2001 – Tirants d'ancrages passifs (clous) à adhérence totale – 2001.
- [5] Frédéric Pellet – EPFL - Doctoral Thesis – Strength and deformability of jointed rock masses reinforced by rock bolts – 1994
- [6] Fabien DABERTRAND, Julien VERMEULEN - Prise en compte du risque crue dans la préparation d'un chantier – cas des travaux du barrage de Record – Colloque CFBR-SHF 2017, Chambéry
- [7] Ferrière M., Person J.-P. (2013). "Confortement parasismique du barrage de chancy-Pougny". Colloque du CFBR « Modernisation des barrages » de décembre 2013.