

Suivi de la tension résiduelle par auscultation des tirants d’ancrage du parc hydraulique EDF

Follow-up of the residual strain by monitoring of the ground anchors of EDF’s hydropower plants

Alexis Piron

EDF/DTG, 21 Avenue de l’Europe, BP41, 38040 GRENOBLE

alexis.piron@edf.fr

Olivier Chulliat

EDF/CIH, 37 rue Diderot, BP 176, 38042 GRENOBLE, Cedex 9

olivier.chulliat@edf.fr

François Morel

EDF/CIH, Savoie Technolac – 73373 le Bourget du Lac, Cedex

francois.morel@edf.fr

MOTS CLÉS

Précontrainte, tirants, pesage, cellule de charge.

RÉSUMÉ

Assez peu d’ouvrages hydrauliques EDF sont aujourd’hui équipés de tirants d’ancrage auscultés. Dans l’hydraulique, cette technique a pour but de stabiliser et/ou renforcer une structure par des ancrages actifs. Mais avec le vieillissement des ouvrages hydrauliques, ces méthodes de confortement deviennent intéressantes voire indispensables, ainsi que le suivi métrologique de la traction appliquée. Dans ce contexte, il s’est avéré utile d’établir un premier Retour d’Expérience sur l’auscultation des tirants d’ancrage pour le parc hydraulique EDF ainsi qu’un inventaire des techniques permettant la mesure de tension résiduelle. Cela permettra d’engager des réflexions sur l’harmonisation des pratiques et ainsi mieux aborder sur le long terme les techniques d’auscultation pour ce type de confortement et les futurs projets (Chambon, Choranche).

ABSTRACT

Today, relatively few EDF’s hydropower plants are equipped with monitored anchors. In hydraulics, the purpose of this technique is to stabilize and/or reinforce a structure by active anchors. With the ageing of the hydraulic works, these methods of confortement become interesting even essential, as well as the metrological follow-up of the strain applied. In this context, it proved to be useful to establish a first feedback on the monitoring of anchors for EDF’s hydropower plants as well as an inventory of the techniques allowing the measurement of residual strain. That will allow to engage reflections on the harmonization of the practices, and to better approach on the long run the techniques of monitoring for this kind of confortement and the future projects (Chambon, Choranche).

1. PREAMBULE

1.1 La précontrainte par post-tension

Parler de « précontrainte par post-tension » est un abus de langage car la précontrainte consiste à mettre en tension des armatures en acier avant leur blocage. Elles sont ensuite relâchées et permettent alors de mettre en compression le béton par simple effet d’adhérence. Il s’agit donc dans ce cas de « pré-tension ».

La « post-tension » consiste à mettre en tension des câbles ou barres après durcissement du béton de la structure à conforter. Ces tirants, intérieurs ou extérieurs au béton, sont enfilés dans des gaines et des ancrages qui s’appuient sur l’ouvrage.

Différentes étapes permettent de réaliser cette précontrainte :

- des conduits (gaines la plupart du temps) sont positionnés à l'intérieur du coffrage ou à l'extérieur, avant bétonnage de la structure, ou encore dans des forages réalisés après la construction de l'ouvrage ;
- les tirants sont alors enfilés dans les conduits après bétonnage et scellés en partie « inférieure » (scellement en général mécanique si c'est sur l'ouvrage et chimique si c'est dans le terrain) ;
- ils sont tendus à l'aide d'un vérin et « ancrés » par un système d'ancrage en partie « supérieure » ; leur tension se transmet donc au béton de l'ouvrage et le comprime. La plupart du temps, le blocage des tirants se fait par frottement (clavetage dans une pièce conique). La tête d'ancrage permet elle de transmettre l'effort de traction de l'armature à la structure à ancrer par l'intermédiaire d'une plaque d'appui ;
- le contrôle de la tension se fait par mesure de l'allongement du tirant (pesage) qui est proportionnel à l'effort de traction, ou à l'aide d'une cellule de charge qui restera en place. Pour les tirants dont il est question (plusieurs mètres de longueur) et placés dans des gaines injectées au coulis, il n'existe pas de technologie permettant la mesure de la tension résiduelle ;
- après le blocage des tirants et le retrait des vérins, les capots protecteurs des têtes d'ancrage sont remplis de graisse ou de cire pétrolière.

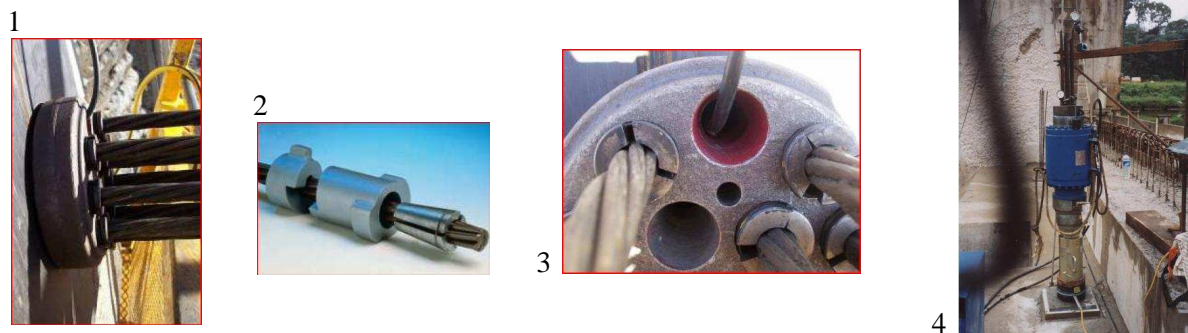


Figure 1 : 1 – tête d'ancrage pour multi-torons (DSI) ; 2,3 – clavettes (DSI) ; 4 – vérin hydraulique (EDF)

Les armatures de précontrainte sont en acier à haute résistance et leurs propriétés sont notamment définies dans la norme NF EN 1992 (Eurocode 2). On trouve généralement des barres filetées ou des multi-torons. Ces derniers sont plus couramment rencontrés sur les ouvrages hydrauliques du parc EDF même si les barres présentent d'autres avantages (remplacement de barre et/ou de cellule de charge plus aisé après détentionnement total, impact de la corrosion plus lent dans le cas d'un défaut de protection contre la corrosion, pertes de précontrainte moindres sur des tirants courts, ...).

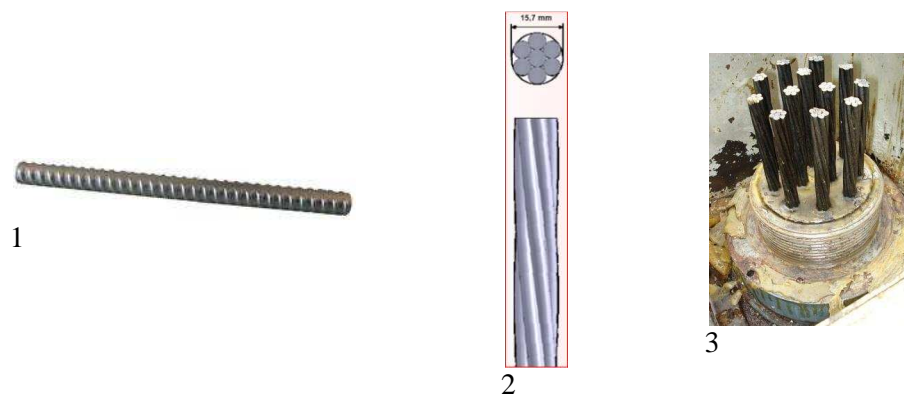


Figure 2 : armatures de précontrainte : 1 - mono-barre filetée ; 2 - mono-toron T15S ; 3 - multi-torons (EDF)

Les câbles, ou multi-torons, sont constitués de plusieurs torons (1 à 55). Leur notation est la suivante : « 12T15S » signifie que le câble comprend 12 torons de 15,7 mm de diamètre chacun.

Il existe différents types de conduits dans lesquels sont disposés les tirants : gaine métallique, tube rigide en acier, gaine nervurée en PEHD, tube en PEHD. Ils permettent ainsi :

- d’assurer un passage continu du tirant selon le tracé prévu ;
- résister aux sollicitations lors de l’installation, la mise en tension, et l’injection ;
- protéger mécaniquement le tirant et lui fournir une enveloppe pour le film de graisse qui l’entoure.

1.2 Normes et recommandations

Peu de documents normatifs traitent du suivi des tirants d’ancrage. Trois font néanmoins référence :

- la norme française NF P94-153 “Essai statique de tirant d’ancrage” qui fixe la terminologie, l’appareillage, le mode opératoire et la méthode de calcul des différents paramètres déduits des essais de tirant d’ancrage ;
- la norme européenne NF EN 1537 “Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Tirants d’ancrage” qui définit les caractéristiques particulières des matériaux et produits pouvant être utilisés. Elle précise aussi les conditions d’exécution à respecter, les points touchant à la conception à prendre en compte et les contrôles et essais à effectuer ;
- « Tirants d’ancrage - Recommandations concernant la conception, le calcul, l’exécution et le contrôle » dites « Recommandations T.A. 95 » éditées par le Comité Français de la Mécanique des Sols, et des Travaux de Fondations¹. Ces recommandations sont largement utilisées par les maîtres d’œuvre et les maîtres d’ouvrage.

Le premier contrôle de la tension des tirants est à la charge de l’entreprise installant ces dispositifs, puis cette tâche revient au maître d’ouvrage ou propriétaire de l’ouvrage. Les recommandations « T.A.95 » recommandent de contrôler la tension des tirants, chaque trimestre durant la première année, puis annuellement durant toute la durée de vie de l’ouvrage.

Dans chaque ouvrage, les tirants sont classés en catégories, en fonction du rôle qu’ils assument dans la stabilité de celui-ci (exemple : tirants verticaux assurant la stabilité du radier et tirants inclinés qui maintiennent la paroi verticale de soutènement ; ancrages réalisés dans des terrains différents...). Dans chaque catégorie donc, le nombre minimal de tirants à contrôler est fixé comme suit :

- de 1 à 50 tirants : 10% seront équipés d’un appareil de contrôle (ex : s’il y a 43 tirants, 5 sont concernés)
- de 51 à 100 tirants : 7% seront équipés d’un appareil de contrôle
- à partir de 101 tirants : 5% seront équipés d’un appareil de contrôle
- au-delà de 250 : un dispositif de contrôle supplémentaire par tranche de 20 ou par fraction de 20 tirants

Les appareils de contrôle doivent donner une évaluation de la tension à $\pm 10\%$ près. A titre indicatif, et toujours selon les recommandations T.A. 95, une variation de 20% de la tension d’un tirant dans une structure doit attirer l’attention.

Les moyens de contrôle dont il sera question par la suite (pesage / cellules de charge) sont inopérants si les tirants n’ont pas été équipés à l’origine et ont été injectés au coulis de ciment. De la longueur libre est nécessaire sur ces tirants surtout pour permettre par la suite une opération de pesage.

Selon la norme NF P94-153, « les instruments et moyens de mesure sont gérés conformément aux prescriptions établies par le Bureau National de Métrologie. Le dispositif de mesure de la force ainsi que sa chaîne de mesure, et le système de mesure de l’allongement du tirant ainsi que sa chaîne de mesure, sont étalonnés tous les ans au plus et vérifiés à chaque essai ». De plus, l’incertitude sur la mesure de déplacement (de la tête d’ancrage, dans l’axe du tirant, par rapport à un point fixe) doit être la plus grande des 2 valeurs suivantes : $\pm 1\%$ de la valeur lue ou $\pm 0,3$ mm. Et l’incertitude sur la mesure de la force doit être inférieure à 2% de l’effort de traction maximal d’essai.

¹ <http://www.geotechnique.org/index2.htm>

2. MESURE DE LA TENSION RESIDUELLE DANS LES TIRANTS D’ANCRAGE

2.1 Pesage

2.1.1 Principe

Le pesage (ou « lift-off ») est avant tout une technique d’évaluation de la tension résiduelle dans un tirant d’ancrage (cf. Figure 3). Cette technique peut aussi permettre de mettre ou remettre en tension les tirants. Elle utilise un vérin hydraulique étalonné et actionné par une pompe électrique (ou manuelle pour ajustement) qui reprend la tension du tirant pour ainsi remplacer ponctuellement la tête de serrage. La pression du vérin est alors mesurée à l’aide d’un manomètre et l’allongement du tirant avec une règle ou un comparateur (avec correction de la température). Ces appareils doivent être préalablement étalonnés. Les différentes sociétés habilitées à installer des tirants et qui ont été consultées indiquent pour cette technique une précision de 1% de la mesure directe de la tension. Aucune étude n’était ce niveau de précision de la mesure. Compte-tenu de la complexité des paramètres impliqués dans cette mesure, il est raisonnable de penser que la précision est légèrement inférieure ($\pm 2-4\%$ selon le Centre d’Ingénierie Hydraulique d’EDF).

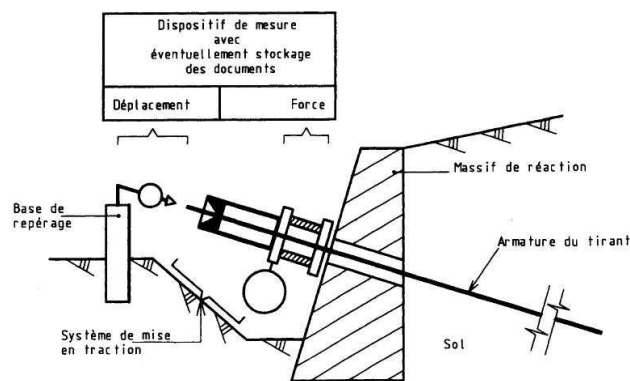


Figure 3 : principe et appareillage pour pesage

La méthode « d’essai de contrôle » définie dans la norme NF P94-153, sur un tirant en cours de réalisation, indique que l’on doit appliquer des efforts de traction jusqu’à la traction d’épreuve T_e par incréments ΔT égaux à $0,2 T_e$, en les maintenant constants pendant 1 heure, pour chaque palier. La variation d’allongement lors du dernier palier, à T_e , doit être inférieure à 1 mm durant 55 minutes.

Rien n’est spécifié concernant des tirants installés depuis plusieurs années et sur lesquels on veut réaliser ce contrôle. Cette notion de paliers ainsi que le non dépassement de T_e devraient alors servir de premières préconisations.

Il est donc possible, à l’aide du pesage, de mesurer la tension résiduelle dans le tirant lorsque la tête d’ancrage est décollée de la plaque d’appui. Ceci est matérialisé sur le graphe « force vs déplacement » (cf Figure 4) par un changement de pente ; l’intersection des 2 droites (point P sur la figure 2) indiquant la tension effective du tirant.

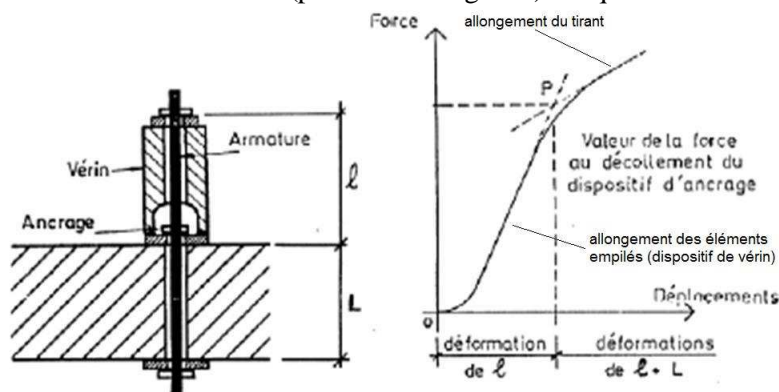


Figure 4 : détermination de la traction effective

2.1.2 Exemple de Pontabouland en 2010

Le barrage de Pontabouland est un ouvrage de type poids déversant (construction 1926). Sa stabilité a été renforcée par l’installation de 19 tirants actifs verticaux ancrés en fondation (mis en service en 1997 et selon les Recommandations T.A. 95), espacés de 1,9 m, placés sur le déversoir et en rive gauche. Ils sont ancrés de 7 m dans la fondation. Chacun est constitué de 12 torons de 15,7 mm de diamètre (12T15S). La partie libre des tirants est gainée et graissée. Les tirants A3, A6, A9 et A14 sont auscultés grâce à des cellules Glötzl à fluide hydraulique (modèle VHD) dont la mesure est ramenée, via un réseau de gaines, jusqu’à un tableau de raccordement situé dans le local technique en pied du barrage où on peut connecter une pompe de lecture M1 H16 montée sur un châssis métallique.

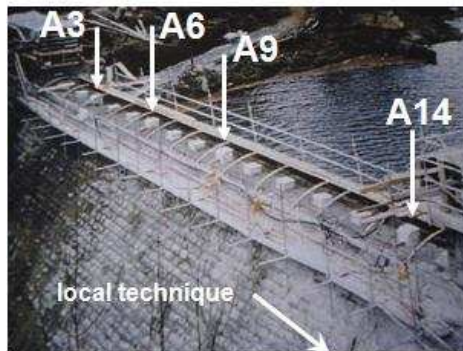


Figure 5 : coffrets de protection des têtes d’ancrage sur le déversoir du barrage de Pontabouland

A l’automne 2010, des pesages ont été réalisés afin de contrôler et préciser la tension résiduelle des tirants équipés de cellules.

Dans le cadre de la manipulation réalisée à Pontabouland, le décollement du dispositif de serrage était recherché, puis l’opération s’est poursuivie jusqu’à la traction d’épreuve T_e qui a été maintenue durant 15 minutes. Selon la procédure élaborée par la société intervenant, l’allongement devait alors être inférieur à 1,5 mm à l’issue de ce délai. Un allongement supérieur aurait été jugé « anormal » (exemple : problème de scellement...).

Cette opération indispensable est lourde à mettre en place, notamment sur les ouvrages hydrauliques (moyens humains, techniques, de sécurité...). L’accessibilité aux têtes d’ancrages, surtout quand celles-ci se situent dans des regards noyés dans le béton d’un évacuateur de crues (Fig.6), est primordiale pour permettre un suivi et une maintenance ultérieurs. La périodicité cette mise en œuvre varie généralement de 5 à 10 ans.

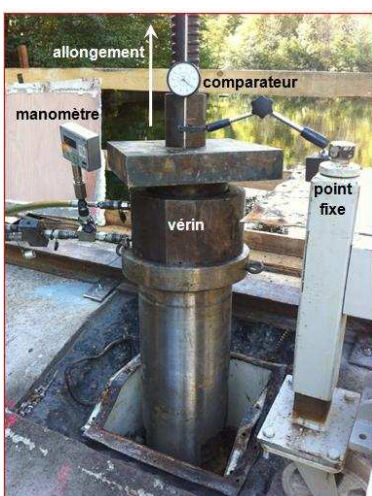


Figure 6 : chantier de pesage à Pontabouland (octobre 2010 – photos EDF)

2.2 Cellules de charge

L'effort de précontrainte appliqué par les tirants peut être mesuré de manière continue à l'aide de cellules de charge installées entre la plaque de répartition et la tête de serrage. Différentes technologies coexistent, représentant la majorité des systèmes aujourd'hui employés ; les principales sont :

- les cellules électriques (la déformation sous pression est mesurée par des jauges de déformation ou des systèmes à corde vibrante),
- les cellules hydrauliques (la force de précontrainte est mesurée par la pression d'un coussin hydraulique).

Ces cellules peuvent être installées définitivement et ainsi indiquer à tout moment la force de précontrainte.

2.2.1 Cellules électriques

Deux technologies sont le plus souvent rencontrées :

Les jauges de déformation à résistance électrique : elles sont collées sur la périphérie du cylindre en acier inox à haute résistance constituant la cellule. Ces jauges utilisent le principe de piézorésistance selon lequel une contrainte mécanique appliquée sur un matériau induit un changement de résistance électrique. Elles sont raccordées en pont complet ou de Wheatstone (selon le fabricant) pour compenser les charges inégalement distribuées sur la cellule.

Les cordes vibrantes : celles-ci sont uniformément réparties sur la circonférence des deux anneaux en acier constituant le cylindre de la cellule de charge. Elles sont parallèles à l'axe de la cellule et donc du tirant. Elles sont différemment maintenues suivant le fabricant (serrage latéral, clavettes). La mesure peut être unitaire (chaque corde vibrante prise individuellement) ou la moyenne de la réponse de l'ensemble des cordes vibrantes (cela dépend des modèles).



Figure 7 : cellule CV8 manufacturée par GéoInstrumentation et Boîtier Coffret de Raccordement (avec bouton rotatif de sélection)

2.2.2 Cellules hydrauliques

Toutes les cellules hydrauliques fonctionnent selon le même principe, seul le mode de lecture diffère.

Ces cellules sont constituées de deux plaques rigides annulaires en acier, soudées le long de leurs rebords extérieur et intérieur. De l'huile désaérée est introduite, sous vide, entre les deux plaques. La charge appliquée sur la cellule induit une variation de pression du liquide. Cette dernière peut être mesurée par :

- un manomètre,
- un capteur de pression à corde vibrante,
- un capteur de pression piézoélectrique,
- une soupape de compensation (disposition proposée par la société Glötzl)

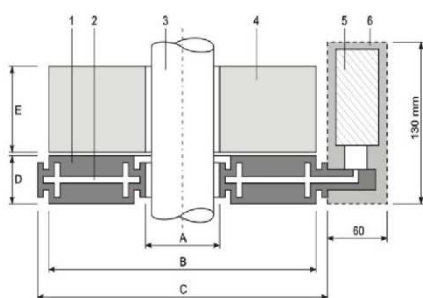


Figure 8 : cellule hydraulique manufacturée par la société Glötzl - 1 cellule de charge - 2 enceinte hydraulique - 3 tirant - 4 plaque de répartition - 5 manomètre - 6 capot

2.2.3 Installation

Une plaque d’appui peut être nécessaire si la surface d’appui n’est pas lisse et non perpendiculaire à l’axe du câble. Certaines cellules peuvent déjà pallier la rugosité du support ; c’est le cas des cellules Glötzl TK pour lesquelles la base du cylindre est renforcée à l’usinage. De même, des plaques de répartition, situées au-dessus des cellules, peuvent être nécessaires pour uniformiser la charge si la technologie ne le permet déjà pas (ex : jauges de déformation). Ces plaques ne sont pas utiles si le cylindre a été usiné en conséquence ; c’est le cas des cellules Glötzl KK pour lesquelles la partie supérieure a été renforcée. La plupart du temps, les fabricants proposent en option des plaques (appui ou répartition) prêtes à l’emploi.

2.2.4 Unités de mesure

La grandeur physique mesurée par ces cellules de charge n’est pas une force. En effet cette mesure est généralement indirecte, comme c’est par exemple le cas des cordes vibrantes pour lesquelles on enregistre une fréquence, ou pour les cellules hydrauliques dans lesquelles on mesure la pression d’un liquide. La courbe d’étalonnage du capteur doit alors permettre la conversion de l’unité mesurée en force.

2.3 Magnétostriction inverse

2.3.1 TensioMag

Sous l’effet d’un champ magnétique, les matériaux ferromagnétiques (ex : câbles de précontrainte, fils d’acier, armatures béton armé...) se déforment ; ce phénomène est appelé magnétostriction. Inversement, en présence de contraintes mécaniques dans un matériau, celui-ci voit sa susceptibilité magnétique changer. Ce phénomène est dénommé « effet magnétostrictif inverse » ou « effet magnéto-mécanique ».

La société Advitam a exploité cette propriété pour développer des cellules d’effort électromagnétiques : les capteurs « TensioMag Pulse ». Ces capteurs, de forme cylindrique et dans lesquels on « enfile » les tirants (barre, câble ou simple toron) n’ont pas besoin d’être en contact avec ces derniers. Ils ne sont pas affectés de risque de surcharge et ne sont pas limités en capacité nominale. Ils peuvent être installés en tout point du tirant et non plus uniquement au niveau de la tête d’ancrage. Ils peuvent même être coulés dans le béton.

A partir d’une calibration initiale, ces cellules fournissent une information sur de longues périodes (recalibration non nécessaire) : déduction de la contrainte par la mesure de la perméabilité magnétique, en référence aux courbes d’étalonnage. Une centrale d’acquisition avec une surveillance continue est aussi proposée. La structure des tirants (ferromagnétisme) est importante afin de pouvoir générer une réponse : l’identification préalable du matériau est requise.



Figure 9 : capteurs TensioMag Pulse manufacturés par la société Advitam

2.3.2 Rondelle BoltSafe

Le principe de fonctionnement de la rondelle BoltSafe est basé sur la propriété qu’ont les matériaux (par rapport à leur qualité structurale) de faire varier un champ magnétique presque linéairement en fonction de la contrainte appliquée à l’intérieur du matériau. Il s’agit donc ici de mettre dans la rondelle une bobine de fil électrique que l’on alimente avec un courant pour générer un champ magnétique. La déformation de la rondelle, engendrée par le serrage de l’écrou, va modifier ce champ magnétique. Une puce électronique intégrée traite la mesure.

Ce type de cellule est développé par la société BoltSafe et distribué en France par la société SKF. Il équipe actuellement les centrales nucléaires de Paluel, Civaux, Blayais....

Même si aujourd’hui ce capteur est essentiellement installé sur les tirants mécaniques du parc nucléaire (tirants des cuves de réacteur, par exemple, de type « longs boulons »), il peut également être installé sur les tirants des ouvrages hydrauliques dotés d’un écrou de serrage à une extrémité. Ces capteurs ne sont cependant efficaces qu’à partir de 15 % de leur pleine échelle.

2.4 UPUS

Les sociétés Advitam et Freyssinet ont développé une nouvelle technique de pesage par ultrasons : UPUS (Unité de Pesage par Ultrason). Il s’agit ici de mesurer le temps de propagation d’ultrasons le long du tirant monobarre (aller – retour) pour ensuite en déterminer la tension. En effet, la variation de ce temps de propagation est proportionnelle à la longueur du tirant monobarre et donc à la variation de l’effort s’exerçant sur lui. Cela implique qu’il faille connaître le temps de propagation pour un effort nul (première mise en tension) ainsi que le facteur de proportionnalité. Si le tirant monobarre est préexistant, le système UPUS peut permettre de déterminer ces paramètres, via la réalisation d’un pesage, et ainsi évaluer la tension. Par la suite, il suffit de mesurer le temps de propagation et la température (pour correction).

Cette mesure peut être réalisée en continu. Cette technique a été testée pour des tirants monobarre de moins de 12 m de long. Au-delà, des essais sont nécessaires pour vérifier s’il est possible de récupérer un écho de l’onde envoyée et de l’identifier. Cette technique n’est pas applicable aux câbles pour la mesure de tension résiduelle.

2.5 Autres

2.5.1 Capteurs de déplacement LVDT

Un système de mesure LVDT (Linear Variable Differential Transformer) a été mis en place par la société Centralp à Grangent en 1999. Il consiste en une mesure indirecte : les capteurs LVDT mesurent les variations d’écartement des étriers de fixation des tirants et permettent ainsi de déterminer d’éventuelles pertes de tension. Toutefois, le principe de la mesure (indirecte) et la forte influence de la température conduisent à des incertitudes de mesure importantes et rendent difficiles la détermination de la perte de tension effective.

2.5.2 Fibre optique

La fibre optique peut aussi être utilisée pour mesurer, de façon indirecte, la tension dans les tirants. Pour cela, la fibre doit être « collée » sur le tirant. La déformation du tirant se répercute sur la fibre (déformation du réseau optique) et modifie ainsi la longueur d’onde de référence servant aux mesures.

3. Ouvrages hydrauliques équipés de tirants auscultés

Quelques barrages du parc hydraulique d’EDF (ou suivis par EDF) sont aujourd’hui équipés de tirants d’ancrage auscultés ou le seront prochainement.

Les 2 tableaux ci-après en font un inventaire. Ne sont donc pas listés les ouvrages équipés de tirants d’ancrage non auscultés, souvent installés lors de la construction du barrage (St Michel, Castillon,...).

La majorité des ouvrages EDF, auscultés, sont équipés de câbles plutôt que de barres. Lorsqu’ils sont instrumentés, c’est quasiment exclusivement avec des cellules Glötzl équipées de capteurs hydrauliques ou à corde vibrante.

Ouvrage	Maître d'ouvrage	Tirants	Longueur libre (m) / scellement (m)	Auscultation	Périodicité des mesures	T _s (kN) / tirant
La Beaume	EDF	20 tirants	?	2 cellules GLÖTZL hydrauliques	2 par an	510
Chambon	EDF	409 tirants (3T15 à 7T15)	5-25 m / scellement mécanique	62 cellules à corde vibrante, 4 Tensiomag, 4 Glötzl	actuellement, 1 par semaine (automate)	527 à 1109
Choranche	EDF	8 tirants 17T15 8 tirants 12T15	-	16 cellules à corde vibrante Pesage tous les 10 ans	1 par mois (1an) puis trimestrielle	1753, 2477
Fontbonne	Syndicat des Eaux du Carmausin	51 tirants multi-toron (6T12)	?	Pesage sur 3 tirants	1972, 1992, 2010	490, 736, 981
Grangent	EDF	48 tirants actifs (barres Macalloy 50)	16,6 / 5	16 cellules GLÖTZL à capteur corde vibrante	1 par mois	768
Kinguele	Société d'Eau et d'Énergie du Gabon	21 multi-torons (7T15)	14 / 4 à 6	4 cellules GLÖTZL non relevées	mesures non relevées	1000
Lac Basto	EDF	7 multi-torons (xT15)	9/5, 12/5, 10/6, 15/8	Pesage + nivellement	5 ans	294, 589, 1373
Lac Noir	EDF	15 multi-torons (xT15)	9/6, 10/6, 10/7, 15/9	Pesage + nivellement	5 ans	589, 883, 1717
Laouzas	EDF	10 tirants multi-torons (27T15)	15 / 12	10 cellules GLÖTZL à capteur corde vibrante	1 par mois	3000
Malarce	EDF	sur nouvel évacuateur de crue (12 tirants 12T15S)	-	12 cellules GLÖTZL à capteur corde vibrante	à définir	1162
Maury	EDF	4 tirants multi-torons (45T15)	25 / 15	4 cellules GLÖTZL hydrauliques	6 par an	3190
Pontabouland	EDF	19 tirants multi-torons (12T15)	14 à 19 / 7	4 cellules GLÖTZL hydrauliques	2 par an depuis 2005	1672

Tableau 1 : barrages EDF ou suivis par EDF équipés de tirants d’ancrage auscultés.

Ouvrage	Type	Hauteur sur fondation (m)	Longueur (m)	Années de construction	Année de mise en œuvre des tirants auscultés	Objet
La Beaume	Poids déversant	8,5	Crête 55 / Dévers. 37	1929-1930	1983	Stabilisation de l'ouvrage
Chambon	Poids	137	294	1929-1934	Plot d'essai : 2011 Confortement : 2012-2014	Confortement de la partie sommitale de l'ouvrage
Choranche	Voûte cylindrique à crête déversante	30	118	1948-1949	2013....	Stabilisation des culées
Fontbonne	Poids	21	150	1904	1972	Stabilisation de l'ouvrage
Grangent	Voûte cylindrique	55,6	203	1955-1957	1996	Post-tension supplémentaire des piles des évacuateurs de crues
Kinguele	Poids	10	119	1969-19736	2002	Stabilisation suite à une surélévation de l'ouvrage
Lac Basto	Poids	12,97	33,8	1915-1918	1998	Stabilisation de l'ouvrage
Lac Noir	Poids	10,5	57,3	1915-1917	1998	Stabilisation de l'ouvrage
Laouzas	Voûte à double courbure	52,1	295	1962-1965	2009	Confortement par une poutre de répartition des efforts à l'aval
Malarce	Poids	31,4	111	1967-1968	2012	Stabilisation de l'ouvrage suite à construction nouvel évac. de crues
Maury	Voûte à double courbure	72	193	1940-1947	2000	Confortement de la culée RD
Pontabouland	Poids déversant	15	34	1926	1997	Stabilisation de l'ouvrage

Tableau 2 : caractéristiques des barrages suivis par EDF équipés de tirants d’ancrage auscultés

4. EXEMPLES D’OUVRAGES EQUIPES DE TIRANTS ACTIFS AUSCULTES

4.1 Laouzas

Le barrage du Laouzas est une voûte à double courbure en vallée large affecté d’une fissure au contact béton-rocher qui présente une certaine ouverture en période hivernale alors que le niveau d’eau dans la retenue est haut. En 2009, afin de renforcer la butée aval constituée par la fondation, en pied aval de l’ouvrage, dans la zone centrale, une poutre en béton armé a été plaquée sur cette même fondation par 10 tirants d’ancrage actifs de 27 m de longueur (15 m de partie libre, et 12 m de scellement). Chaque tirant est constitué de 27 torons T15.7, dont la tension de service est égale à 400 t (3924 kN). Chaque tirant est équipé d’une cellule Glötzl de type KK 4000 A200 VW7,5 (capteur à corde vibrante) à lecture déportée. Les tirants ont été tendus à 300 t (= 2943 kN) afin de disposer d’une marge permettant d’ajuster la tension en fonction du comportement observé du barrage.

Durant un an après la mise en tension, le prestataire a réalisé le relevé des cellules dynamométriques.

Dorénavant, c’est l’exploitant EDF qui prend en charge ces mesures, manuellement.

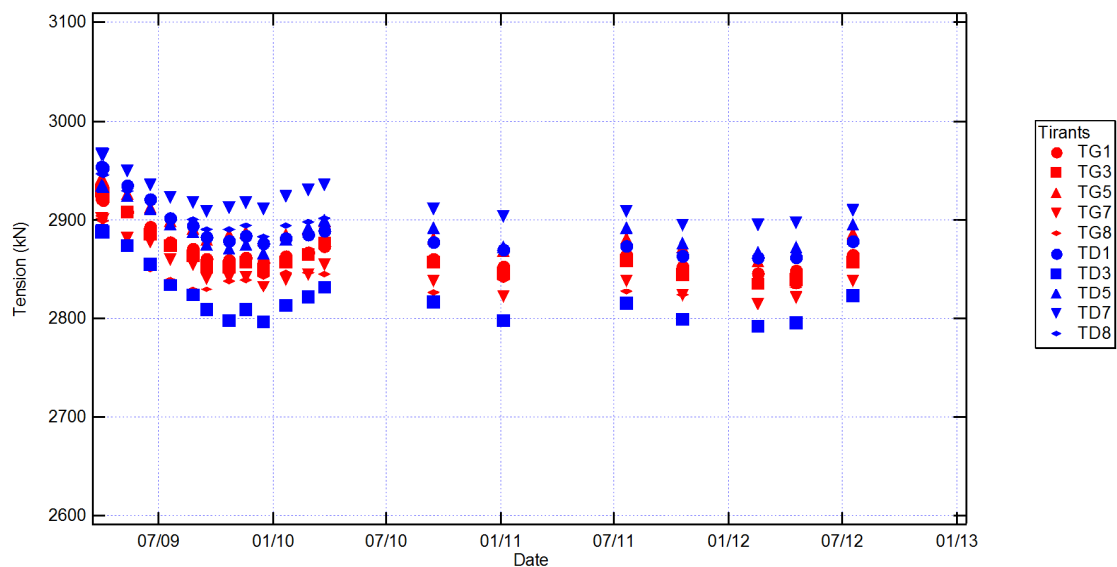


Figure 10 : Evolution de la tension des tirants de Laouzas

Comme attendu, on observe dans les premières semaines (printemps/été 2009) une baisse de la tension imputable aux pertes différées (retrait/fluage du béton, relaxation de l’acier), inférieure à 100 kN. Ensuite et malgré une périodicité variable dans le relevé des mesures, de faibles effets saisonniers semblent apparaître et pourraient traduire une faible évolution de la tension avec la température, cohérents avec le comportement mécanique-hydraulique de l’ouvrage. Des effets saisonniers sont en effet notés à proximité de la poutre de confortement [4]:

- un raccourcissement de 0,2 mm entre l’hiver et l’été à l’aval du plot 2 ;
- un allongement sous l’effet de la charge hydraulique de l’ordre de 0,1mm pour le remplissage des 12 derniers mètres de retenue.

Si la présence de phénomènes saisonniers sur les tirants se confirmait, une analyse HST (corrections des données brutes par rapport à l’Hydraulique (cote), Saisonnier et Temporel pour ramener ces mêmes données à conditions identiques) pourrait permettre de mieux affiner le suivi de ces tirants, mais aussi les modélisations du Centre d’Ingénierie Hydraulique – EDF, relatives aux études de confortement.

4.2 Maury

Le barrage de Maury est une voûte à double courbure construite entre 1940 et 1947, avec un remplissage de la retenue, à RN, effectué au début de l’année 1951. Elle s’appuie sur des culées dont la stabilité est renforcée par 3 tirants ‘Coyne’ installés en 1948 et dont les puits ont totalement été injectés en 1951 : un en rive droite et deux en rive gauche. En 2000, la culée RD, affectée par un phénomène de gonflement conduisant à solliciter le tirant d’origine, a été confortée par 4 tirants verticaux (45T15) dont la tension de service unitaire est égale à 3190 kN. La mesure de tension résiduelle figure actuellement dans le dispositif principal d’auscultation. Chaque tirant est dimensionné pour une tension de service maximale égale à 6380 kN. La tension dans les nouveaux tirants a été retenue afin d’éviter de rigidifier excessivement la culée RD. La marge disponible permet d’ajuster ultérieurement la tension, en fonction du comportement observé de l’ouvrage.

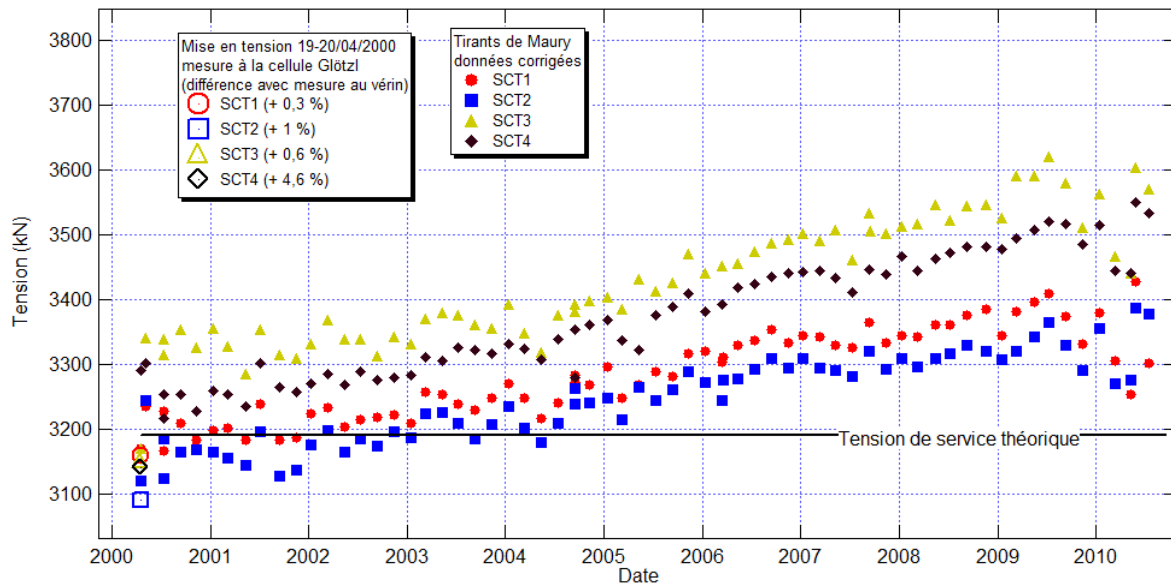


Figure 11 : séries chronologiques de la tension des tirants de Maury

Des cellules hydrauliques Glötzl (référence KN 750 A 75 M 4) de type VHD, dont la mesure est déportée, servent à contrôler la tension.

L’augmentation des mesures effectuées sur les 4 tirants (+ 6 à 8 % depuis 2000) s’explique par le gonflement de la culée, encore faudrait-il éliminer toute suspicion de dérive des capteurs (ce qui n’est possible qu’en réalisant régulièrement un pesage avec des moyens de mesure étalonnés). Une certaine stabilité des mesures apparaît les 3 premières années : on peut raisonnablement supposer que l’augmentation due au gonflement et les « pertes différées » s’équilibreraient.

Les mesures faites lors de la mise en tension (19 et 20/04/2000) indiquent un écart entre les cellules Glötzl et le système de pesage alors employé entre 0,3 et 4,6 %. A chaque fois, la cellule donne une valeur plus importante.

Les mesures très dispersées enregistrées en 2010 seraient dues à un mauvais fonctionnement de la valise de lecture (pompe portative).

Si on considère la période 2003-2009 (fin des pertes différées jusqu’aux problèmes de lecture de la donnée survenus en 2010), il est possible de calculer l’allongement vertical des tirants et par conséquent de la culée. Rappelons qu’ici il s’agit de tirants du type 45T15 avec une surface de 6750 mm², une longueur libre de 15 m et un module d’élasticité (E) de 204170 N/mm².

Tirant	SCT1	SCT2	SCT3	SCT4
Allongement (mm/an)	0,28	0,24	0,4	0,39
Moyenne (mm/an)	0,33			

Tableau 3 : vitesse d’allongement des tirants de Maury de 2003 à 2009

La vitesse moyenne d'allongement des tirants est de 0,33 mm/an. Dans le rapport d'auscultation biennal de 2006, il est indiqué que « l'exhaussement de la culée sous l'effet du mécanisme de gonflement se poursuit aux environs de 0,35 mm/an ». Ce résultat corrobore donc les mesures faites sur la tension des tirants.

5. EXEMPLES DE PROJETS D'INSTALLATION DE TIRANTS

5.1 Confortement du barrage du Chambon

Le barrage du Chambon, de type poids en béton (année de fin de construction : 1934), est affecté par un phénomène d'alcali-réaction entraînant le gonflement du béton. Cette pathologie est à l'origine de désordres, et notamment du développement de fissures dans le plan du réseau de drainage d'élévation. Nota : par plan du réseau de drainage d'élévation, on entend, par souci de simplification, le plan vertical de drainage de la partie rectiligne de l'ouvrage, ainsi que les éléments de cylindres verticaux (2 rayons différents) matérialisant le drainage d'élévation de la zone courbe côté rive gauche.

Si la présence d'une fissuration continue dans ce plan a été écartée à l'échelle du barrage, l'instabilité de blocs en partie supérieure sous sollicitation sismique ne peut cependant pas être exclue.

Ce risque a motivé la décision de réaliser le confortement de la partie sommitale de l'ouvrage par tirants précontraints horizontaux (amont-aval) traversants. Ces tirants sont destinés à restaurer le monolithisme de la structure. Au nombre de 409, ils sont répartis selon une maille moyenne de 15 m². Leur distribution est matérialisée sur la vue ci-après :

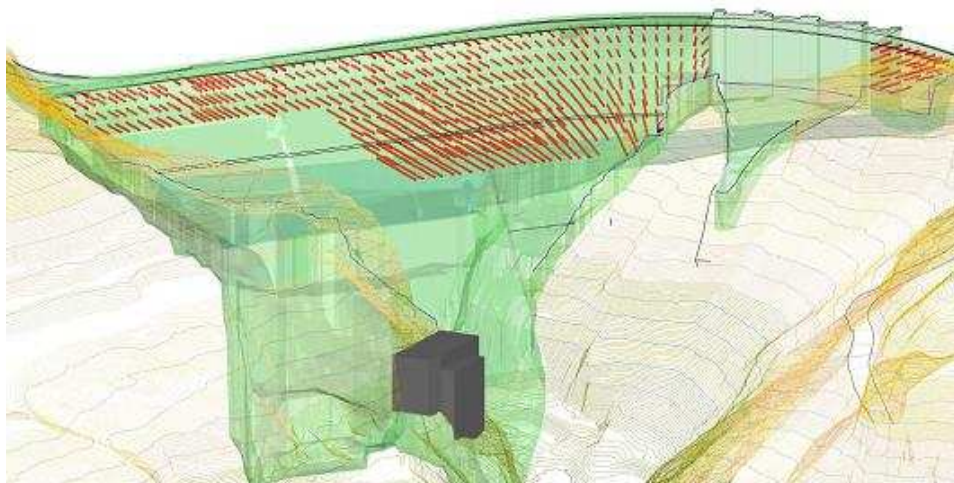


Figure 12 - Barrage du Chambon : vue aval 3D des tirants

La tension dans les tirants sera influencée par deux phénomènes spécifiques à ce projet :

- la possible fermeture de fissures dans une zone donnée du plan de drainage, lors de la mise en tension progressive de l'ensemble des tirants de cette zone, et une potentielle perte de tension induite pour les premiers tirants y ayant été installés. Une remise en tension de certains tirants est donc à envisager lors des travaux de confortement,
- la sollicitation des tirants sous l'effet du gonflement du béton, conduisant à une augmentation progressive de tension. La tension dans les tirants devra en conséquence être ajustée dès qu'elle s'approchera de la valeur limite à ne pas dépasser. Le projet est dimensionné pour une durée de vie égale à 50 ans, et un pas de temps théorique entre chaque ajustement de tension égal à 20 ans.

La tension des tirants devra, par ailleurs, être comprise en permanence entre 2 valeurs :

- une limite inférieure égale à l'effort d'arrachement dû au séisme, de façon à éviter une mise en mouvement des blocs,
- une limite supérieure incluant notamment les efforts imputables au séisme, au gonflement et au pesage, égale à 80% de l'effort de rupture garanti (dépendant du matériel en place).

Les têtes aval des tirants ont été conçues pour permettre un réglage à la demande de la tension de chaque tirant.

Le suivi de la tension résiduelle dans les tirants revêt une importance particulière et sera réalisé selon trois axes :

- un pesage systématique de la totalité des tirants d'une zone donnée, 4 semaines après la mise en tension initiale du dernier tirant de la zone,
- un pesage à la demande de certains tirants,
- l'instrumentation d'un certain nombre de tirants, représentatifs des différentes zones de la structure.

Au total, 66 tirants seront instrumentés par des capteurs (soit 16% du total). Ils seront télémesurables et raccordés à l'automate d'acquisition des mesures déjà en place (de type Saftel Pad 2008).

Les capteurs seront basés sur la technologie de la corde vibrante (3 cordes par capteur, 2 bobines par corde), avec un signal de sortie en fréquence. Quatre d'entre eux seront également équipés de capteurs basés sur le principe de l'effet magnétostrictif inverse (type TensioMag® manufacturés par la société Advitam). Les quatre tirants mis en place lors d'un plot d'essai en 2011 ont été, quant à eux, équipés de cellules Glötzl de type hydraulique, avec un signal de sortie de type 4-20 mA.

A la suite d'un retour d'expérience interne à EDF sur les parcs hydrauliques et nucléaires, intervenu après l'instrumentation du plot d'essai, la technologie à corde vibrante a été préférée car jugée plus robuste dans le temps. Néanmoins, une étude plus poussée portant sur la qualification métrologique de tous ces matériels sera prochainement engagée à EDF. Ces différentes installations sur les confortements en cours et à venir alimenteront cette étude.

Chaque capteur sera protégé par un Module de Protection Contre la Foudre (MPCF2) inséré dans la niche de la tête aval du tirant.

Le principe du câblage repose sur la mise en place de chemins de câbles verticaux au niveau des zones exposées du parement, entre les coffrets MPCF2 et un total de 6 coffrets de regroupement disposés sous l'encorbellement de la chaussée. Les coffrets de regroupement sont, eux-mêmes, reliés à une armoire à proximité de l'automate d'acquisition, tel que représenté sur la vue aval ci-après :

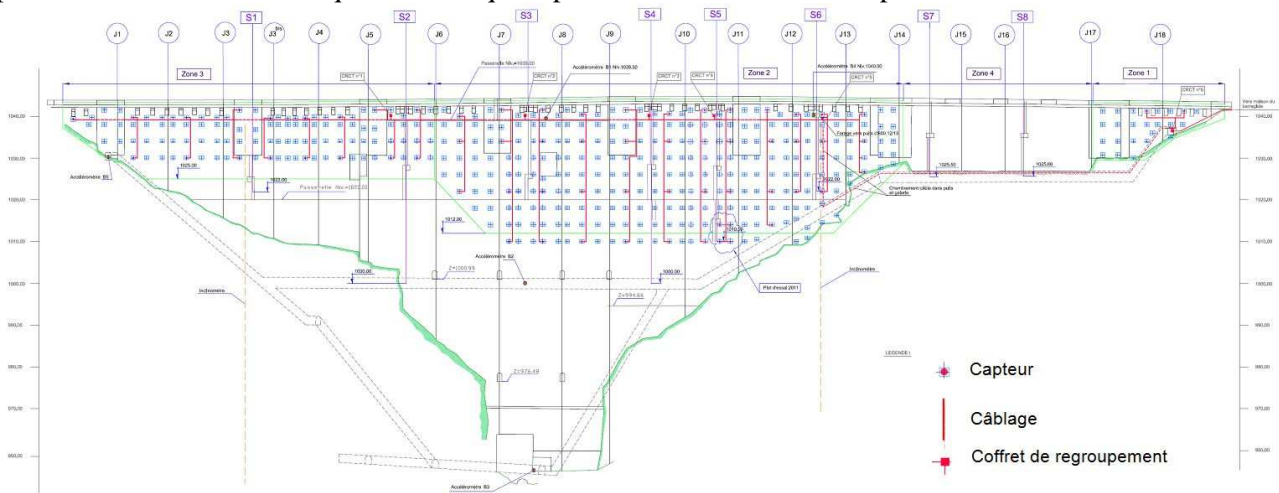


Figure 13 : Barrage du Chambon - Instrumentation et câblage des tirants

5.2 Confortement du barrage de Choranche

Le barrage de Choranche est affecté d'un léger phénomène de gonflement du béton (taux de gonflement inférieur à 3 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{an}$ déduit de la déformation de l'arc de crête). Au fil des 60 années de la vie de l'ouvrage, l'effort induit sur les culées par le gonflement de la voûte s'est surimposé aux poussées hydrostatique et thermique prises en compte dans le dimensionnement initial. A ce jour, un complément d'effort stabilisateur est devenu nécessaire au niveau des culées pour garantir une poursuite de l'exploitation de l'ouvrage dans des conditions de sûreté pleinement satisfaisantes.

Le principe du confortement projeté repose sur la réalisation de dalles en béton armé de 3 mètres d'épaisseur sur l'emprise des culées et sur la mise en place de tirants géotechniques précontraints ancrés en fondation profonde.

Les dalles assureront les deux fonctions suivantes :

- assurer un chargement par leur poids propre (respectivement 1280 et 940 tonnes pour les culées rive gauche et rive droite),
- faire office de dalles de répartition pour la diffusion des efforts de précontrainte (respectivement 2020 et 1430 tonnes pour les culées rive gauche et rive droite).

Les tirants se présenteront sous la forme de câbles, composés eux-mêmes de torons gainés graissés. Il est proposé de réaliser 16 tirants auscultés avec des réservations pour un complément éventuel sur chaque rive. Le dossier est soumis à l'approbation de l'administration.

La répartition des tirants proposés est donnée sur les schémas suivants :

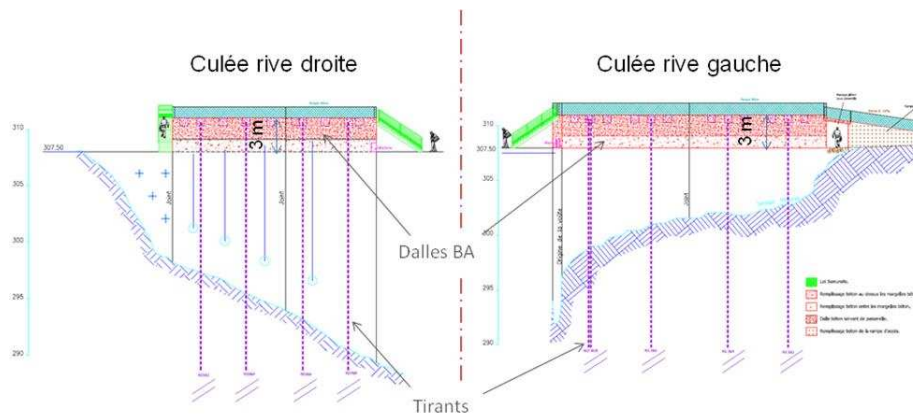


Figure 14 : Barrage de Choranche - Vue aval des culées avec tirants

Nota : les longueurs d'ancrage des tirants seront définies selon les valeurs de frottement latéral unitaire déduites des essais d'arrachement des tirants d'essai

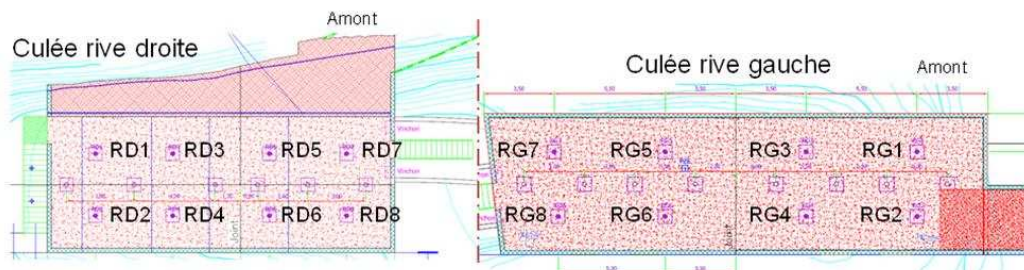


Figure 15 : Barrage de Choranche - Vue en plan des culées avec tirants et réservations

L'ensemble des 16 tirants d'origine seront instrumentés par des capteurs, raccordés au système de télémesure en place (automate d'acquisition de type Saftel Pad 2008). Les capteurs seront basés sur la technologie de la corde vibrante (3 cordes par capteur, 2 bobines par corde), avec un signal de sortie en fréquence. Les cartes de mesure de l'automate EDF autorisent, pour cette technologie, la gamme de fréquence d'interrogation 300-1600 Hz.

Le suivi de la tension des tirants est actuellement prévu comme suit :

- mesure régulière de la tension par télémesure des capteurs (une mesure par mois la première année, une mesure trimestrielle par la suite),
- un pesage systématique des tirants tous les dix ans.

6. CONCLUSION

Aucune qualification métrologique de cellule de force pour tirants d’ancrage n’a été entreprise à EDF jusqu’alors. Il n’a pas été trouvé non plus dans la littérature d’étude spécifique pour ce type de capteur dans le cadre d’une utilisation à long terme. Afin de pallier ce manque, DTG (Division Technique Générale d’EDF) a décidé de tester différents types de capteurs dans le cadre de projets en cours (capteur Tensiomag au Chambon, comparaison des technologies hydrauliques et à corde vibrante à Choranche et sur la maquette MAEVA (Civaux)). DTG poursuit également le REX sur les tirants instrumentés du parc EDF. Afin de conduire d’éventuels tests en laboratoire, des moyens d’essais (enceintes thermiques pour le vieillissement, presses étalonnées de plusieurs dizaines de tonnes...) en interne EDF ont été visités.

Compte tenu de la difficulté de réaliser une mesure exacte de la tension dans les tirants (nombreux paramètres environnementaux), la précision du capteur ne sera a priori pas l’une des principales priorités. On s’attachera notamment à tester la dérive du capteur dans le temps et sa durée de vie dans des environnements difficiles. En effet, la configuration actuelle des tirants (surtout pour les câbles) complique et rend parfois impossible la maintenance sur ce type de capteur (et a fortiori leur remplacement). De plus, la vérification métrologique des capteurs ne sera, dans la plupart des cas, possible qu’à travers une campagne de pesage.

Concernant la périodicité de la mesure de tension résiduelle dans les tirants d’ancrage, elle doit permettre de mieux suivre l’évolution de cette tension dans le temps. Elle est généralement de quelques mois, voire semaines. A minima, on fera une mesure en été et une en hiver pour prendre en compte d’éventuels effets saisonniers. Une meilleure connaissance de ces effets saisonniers et de leur correction par la méthode HST peut permettre à l’ingénierie de génie civil d’améliorer, si nécessaire, la connaissance des pertes de charge. La fréquence des mesures pourra aussi être adaptée selon l’évolution de la post-tension. L’utilisation d’un automate permettra d’augmenter cette périodicité.

Enfin, au sujet de la périodicité des pesages, la plupart du temps ils sont effectués tous les 5 ans, voire 10 ans. Cela doit être évalué en fonction de l’ouvrage, de son histoire, et “à dire d’experts”.

REFERENCES

- [1] NF P94-153 « Essai statique de tirant d’ancrage »
- [2] NF EN 1537 « Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Tirants d’ancrage »
- [3] « Tirants d’ancrage - Recommandations concernant la conception, le calcul, l’exécution et le contrôle – Recommandations T.A. 95», Comité Français de la Mécanique des Sols, et des Travaux de Fondations, Ed. Eyrolles
- [4] Gongra, Y. « Barrage du Laouzas - Auscultation – Rapport n°19 », D4179/RAP/2010-10204-A, EDF/DTG/CRACP