

Effets thermiques et maîtrise des sollicitations de voutes en vallée large, surveillances particulières

Thermal effects and loading control on arch dams in wide valleys, particular surveillance

Marc HOONAKKER, Stephan AIGOUY
BETCGB, 44 avenue Marcelin Berthelot, 38030 Grenoble Cedex 2
marc.hoonakker@developpement-durable.gouv.fr stephan.aigouy@developpement-durable.gouv.fr

Jean Paul FABRE, Gerard GEFFRAYE, Emilie PONS
EDF DTG 21 Avenue de l'Europe BP41 38040 Grenoble
jean-paul.fabre@edf.fr gerard.geffraye@edf.fr emilie.pons@edf.fr

MOTS CLÉS

Barrage, auscultation, fissure, sous pressions, comportement, modélisation, température, exploitation, Gage, Laouzas, Vouglans

RÉSUMÉ

Les voûtes de Laouzas (Tarn) et de Vouglans (Jura), surveillées attentivement depuis leur mise en eau (1965 et 1968), ont toujours manifesté une sensibilité particulière au décollement du pied amont en fond de vallée. En 2006, suite à des conditions particulières (hiver froid et niveau haut de retenue), des niveaux de déplacements et de pressions jamais observés ont été enregistrés. Des limitations d'exploitation ont alors été mises en place : l'un des objectifs forts est d'éviter le dépassement des sollicitations que les ouvrages ont connues lors des épisodes de 2006. Pour cela, une approche statistique a été mise en œuvre, fondée sur l'exploitation des données par le modèle HST Thermique utilisé par EDF/DTG ; les conditions thermiques constituent un paramètre important du raisonnement. Pour la voûte du Gage (07), une étude de son comportement thermomécanique a également conclu qu'il était souhaitable de ne pas s'écarter des conditions de chargement déjà connues par l'ouvrage, tout d'abord en été (un système d'arrosage a été mis en place en 2004 et s'avère efficace pour limiter les déformations vers l'amont qui s'accompagnaient de fissuration), puis en hiver (un chauffage de l'espace inter-voutes est utilisé depuis 2009 en hiver, pour limiter les déplacements vers l'aval). Ceci a aussi conduit à orienter l'exploitation vers une limitation de la cote en période froide.

ABSTRACT

The arch dams Laouzas (Tarn) and Vouglans (Jura), watched attentively since their impounding (1965 and 1968), always presented a particular sensitivity to the upstream heel opening in the valley bottom. In 2006, further to particular conditions (cold winter and high reservoir level), important movements and pressures were registered. Limitations of operation were organized : one of the strong objectives is to avoid the overtaking of the loads which the works knew during the episodes of 2006. For that purpose, a statistical approach was implemented, based on the monitoring data by the model HST Thermal used by EDF / DTG; the thermal conditions constitute an important parameter of the reasoning. For the Gage arch dam (07), a study of its thermomechanical behavior also concluded that it was not convenient to deviate from conditions of load already known by the work, first of all in summer (a system of watering was set up in 2004 and turns out effective to limit the deformations towards the upstream which came along with fissuring), then in winter (a heating of the space inter-arches is used since 2009 in winter, to limit the movement towards downstream). This also led to direct the operation to a limitation of the water level in cold period

INTRODUCTION

Les barrages voûtes sont, par nature, sensibles aux sollicitations thermiques. Celles-ci s'ajoutent aux actions hydrostatiques (et éventuellement aux phénomènes de vieillissement). En effet, bien que ces sollicitations thermiques soient génératrices de déformations réversibles, elles peuvent provoquer ou accélérer, lors d'épisodes thermiques exceptionnels, le vieillissement des voûtes notamment par sollicitation excessive en traction. Ainsi la surveillance mais aussi les conditions d'exploitation des ouvrages sensibles (en particulier les voûtes implantées en vallée large) peuvent être adaptées à ces

circonstances. C'est le cas des barrages de Laouzas, Vouglans et Gage, exposés à des fissurations d'origines diverses, mais où les conditions thermiques jouent un rôle important.

L'auscultation est fondamentale non seulement pour la détection et la surveillance de ces anomalies, mais aussi pour en comprendre la mécanique en séparant les facteurs influents. L'exploitation de ces éléments permet aussi de comprendre comment limiter les sollicitations de ces ouvrages aux moments les plus critiques (extrema thermiques) et il est possible de proposer un raisonnement aboutissant à la définition d'une protection adaptée à chaque ouvrage. Pour cela il faut disposer de mesures d'auscultation pertinentes, de grande qualité, et de modèles d'analyse assez précis pour modéliser et donc pouvoir prévoir le comportement des ouvrages en particulier sous les sollicitations thermiques particulières (grand froid).

1. BARRAGES DE LAOUZAS ET VOUGLANS

1.1 Contexte

1.1.1 Caractéristiques générales

	Laouzas	Vouglans
Hauteur / fondations (m)	52,6	130
Hauteur / TN (m)	48	103
Ratio largeur vallée / H TN	5,5	3 – large fond plat 80 m
Epaisseur en clé (m)	2,5 à 10,5	6 à 25
Volume béton (m³)	60 000	538 000
Capacité retenue (hm³)	45	592
Mise en service	1965	1968
Particularités de construction	Joint horizontal au pied amont sur les 4 plots centraux	Arcs en spirales logarithmiques, béton épais

Les fondations des deux barrages sont très différentes :

- à Laouzas, c'est un granite compact présentant 4 réseaux de diaclases. Les fouilles ont été approfondies en rive gauche (8 à 10 m) par rapport à la rive droite (2 à 3 m). La fondation est équipée dès la construction d'un voile d'injection amont et d'un drainage débouchant en galerie ;
- à Vouglans, la géologie, inscrite dans les séries calcaires du jurassique supérieur, est caractérisée par une structure tabulaire subhorizontale alternant des bancs massifs et plus marneux, voire oolithiques à faible cohésion. Cette configuration favorise la transmission des sous-pressions loin vers l'aval, avec de faibles débits. Une autre particularité géologique est constituée par un important remplissage fluvio-glaciaire en rive gauche, ce qui a nécessité la construction d'une enceinte Bioge circulaire dont la partie aval sert de bassin de réception de l'évacuateur de crues. Voiles d'étanchéité et de drainage sont présents dès l'origine.

Les deux barrages sont finement auscultés sur les plans mécanique et hydraulique. Initialement tournés principalement vers la vérification du comportement d'ensemble des structures, les dispositifs ont été progressivement étoffés pour mieux appréhender le comportement mécanique et hydraulique dans la zone centrale, sujette au basculement des consoles et au desserrage du pied amont. C'est ainsi que l'on trouve actuellement :

- à Laouzas : 29 repères planimétriques et 77 extensomètres sur la voûte – 3 pendules inversés et un fil vertical en pied central amont – 4 vinchons sur les joints aval des plots centraux – 2 distofors dans le rocher de pied aval – 32 piézomètres, la plupart auscultant la fondation et le contact dans la zone centrale, sous la voûte et dans le rocher aval – 11 points de mesures collectant les fuites des galeries, des rives, des joints centraux, du drainage de fondation et de contact en zone centrale ;
- à Vouglans : 25 pendules répartis sur 6 lignes et près de 300 extensomètres – 5 pots de nivellement hydraulique de précision en pied amont des plots centraux – 52 piézomètres auscultant les rives, la fondation et le contact sous les plots centraux (avec une plus forte concentration vers le pied aval) ainsi que la fondation sous le bassin d'amortissement et à l'aval au large - 16 points de mesure collectant les débits de drainage et de fuite.

1.1.2 Comportement historique jusqu'en 2006

Les comportements de ces ouvrages ont fait l'objet de plusieurs communications à la CIGB [1]. La géométrie particulière des deux voûtes (rapport longueur sur hauteur élevé) a conduit à un basculement important des consoles centrales, associé à l'ouverture d'une fissuration en pied amont et à une réorganisation du travail d'ensemble de ces voûtes. Ce fonctionnement particulier des voûtes larges est décrit notamment dans [4] [10].

Dès la mise en eau du barrage de **Laouzas**, des débits importants de fuites par les drains sont apparus s'aggravant les années suivantes (400 l/min en 1970) ainsi qu'un basculement de la voûte vers l'aval par ouverture de fissures (non pas au droit du joint préformé sur les 4 plots centraux, qui ne réagit pas, mais en partie supérieure de la fondation) conjuguée à un phénomène de retrait et de fluage du béton. Un reclavage de la voûte en 1970 induisait temporairement une baisse des fuites et un retour de l'ouvrage vers l'amont. Après la réactivation des fuites et des déplacements irréversibles, la décision fut prise en 1983 de déplacer le rideau de drainage vers l'aval, afin de limiter les débits en galerie. Le résultat corrélatif de l'opération fut une propagation vers l'aval des sous-pressions, que n'a pu enrayer la création d'un nouveau rideau de drainage aval (1991) ; l'amplification du décollement du pied amont (1 mm en ouverture) a conduit également à une faible augmentation des déplacements hydrostatiques réversibles des consoles centrales (de 1 mm en pied à quelques millimètres en crête).

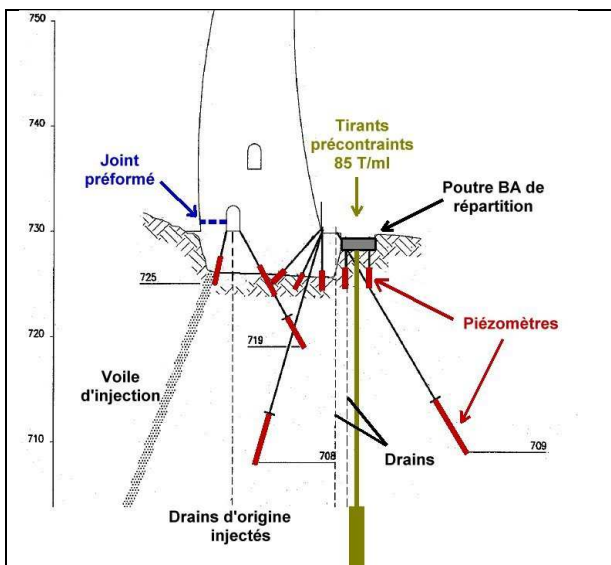


Figure 1a - Laouzas. Coupe en clef – Piézomètres, drains et poutre aval avec tirants

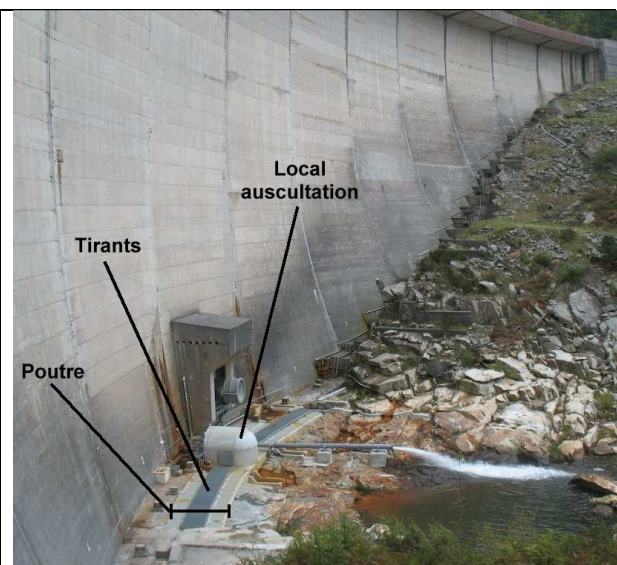


Figure 1b - Laouzas. Pied aval (photo Marc Hoonakker)

Par la suite, une atténuation progressive du basculement de la voûte vers l'aval est observée, les déplacements irréversibles en crête atteignant environ 25 mm depuis la mise en eau. Ce mouvement s'accompagne d'une série de phénomènes hydrauliques (augmentation régulière des fuites et de la piézométrie notamment en hiver, rupture de tubages de pendules ou de piézomètres, apparition de nouvelles fuites en galerie) révélateurs d'une progression des sous-pressions vers l'aval. Ce comportement était surveillé mais jugé acceptable.

A **Vouglans** (Figures 2a et 2b), la souplesse de la voûte et les phénomènes de retrait-fluage du béton et du fluage de la fondation ont entraîné dès la mise en eau un déport progressif vers l'aval des arcs supérieurs (environ 35 mm en crête en 40 ans), une ouverture du contact barrage-fondation (5 à 7 mm à la mise en eau, rapidement ralenti avec 0.4 mm en dix ans entre 1995 et 2005) et une propagation vers l'aval des sous-pressions. Le voile de drainage d'origine contrôle de manière efficace les sous-pressions dans les appuis de la voûte alors qu'au centre et sous le bassin aval il a dû être renforcé à plusieurs reprises en raison du caractère très incrustant des eaux calcaires de la retenue qui entraîne un concrétionnement lent mais difficilement évitable des drains.

Ce comportement a nécessité un suivi attentif de l'ouvrage, ainsi que des réflexions périodiques suivies de différentes campagnes de travaux. Ainsi peut-on noter les renforcements successifs du dispositif de mesure

(piézomètres) et de drainage en pied aval, et sous la dalle du bassin d'amortissement (1972, 1983, 1991, 1993, 2008, 2010) ; l'injection complète en 1991 des trous de contrôle situés en pied amont de la voûte et obturés en tête lors de la mise en eau ou équipés de piézomètres de contact, pour éviter le court-circuitage des injections d'étanchéité de contact ; les travaux de réancrage en 1996 de la dalle du fond du bassin d'amortissement, à partir d'un constat en 1991 de désolidarisation par rupture d'ancrages de cette dalle avec le banc calcaire sous-jacent.

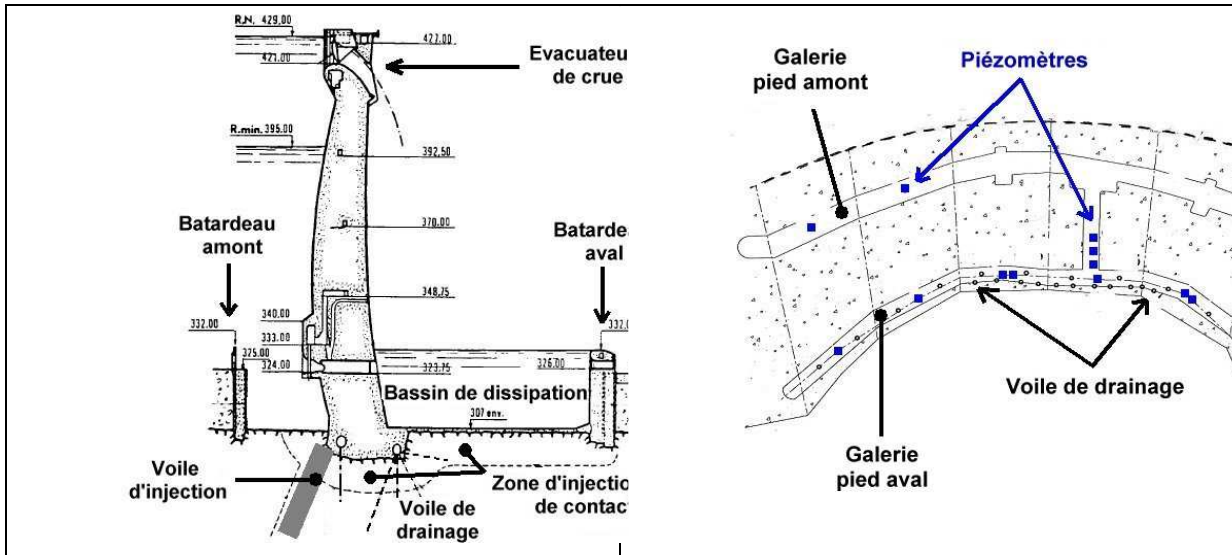


Figure 2a – Vouglans – coupe en clef
 Les injections de contact sous la voûte assurent de fait la continuité de l'étanchéité entre la voile amont et le pied aval

Figure 2b – Vouglans – galeries de pied
 Les piézomètres amont sont d'anciens forages de contrôle partiellement injectés et équipés en tête

1.1.3 Comportement particulier en 2006 – dispositifs et moyens particuliers mis en place

Durant l'hiver 2005-2006, les deux voûtes ont subi des sollicitations exceptionnelles dues à la conjonction de périodes hivernales particulièrement froides et d'un remplissage rapide à cote très haute [10] : à Laouzas, suite à un épisode de crue à peu près décennal qui a fait monter la cote de 5 m en une semaine, jusqu'à un niveau de quelques centimètres sous la RN ; à Vouglans, suite à une indisponibilité des groupes de l'usine conjuguée à des apports importants. Il s'en est suivi des niveaux de déplacements, de fuites et de piézométrie dépassant les niveaux historiques sur un certain nombre de points de mesures (Figure 3). Une ouverture supplémentaire de la fissuration de pied amont dans la zone du contact béton-rocher sous l'action des sollicitations thermiques et hydrostatiques, entraînant une propagation des sous-pressions vers l'aval, a rapidement été identifiée comme étant le phénomène physique en jeu. Le retour à des conditions extérieures normales a montré que ce phénomène était largement réversible.

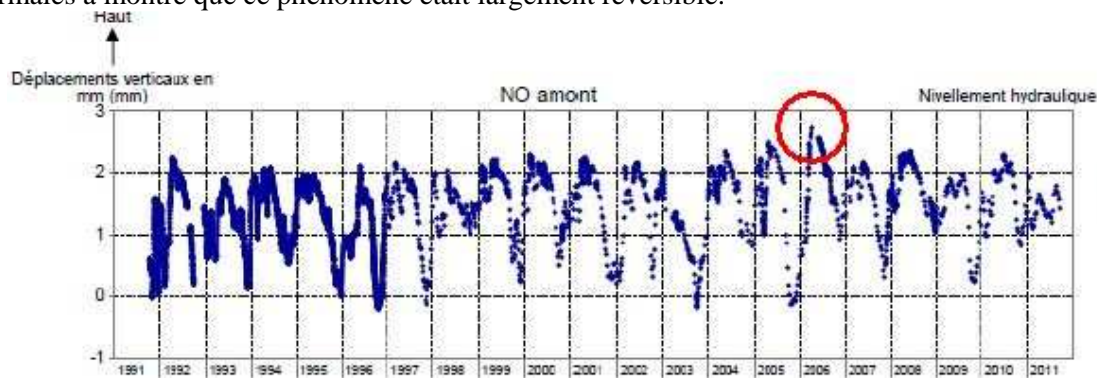


Figure 3 – Vouglans – Déplacement vertical du pied amont mesuré au nivellement hydraulique

Plusieurs types d'actions ont été engagés sur les deux ouvrages :

- un renforcement du réseau piézométrique en pied central de la voûte, avec notamment l'installation de profil(s) piézométrique(s) amont-aval à maille rapprochée, révélant la propagation de la pleine charge de la retenue à retenue haute et situation froide (à Laouzas quasiment jusqu'au droit du parement aval) ;
- l'équipement en télémesure de la plupart des appareils d'auscultation de la partie centrale de Laouzas (à Vouglans, la télémesure était déjà largement présente) ;
- un renforcement progressif du drainage au pied aval des plots centraux, avec un effet variable sur l'abaissement des sous-pressions, et parfois temporaire ;
- le lancement d'une réflexion approfondie sur la compréhension des phénomènes ; à Vouglans, ce travail est encadré par un groupe de travail associant notamment les experts du maître d'ouvrage et de l'administration de contrôle. Ont en particulier été réalisées des modélisations aux éléments finis réactualisant les travaux antérieurs menés sur les deux voûtes dans les années 80 et 90. Les calculs linéaires puis non-linéaires couplés mécanique-hydraulique ont montré, sous l'influence des sollicitations hydrostatiques et thermiques froides conjuguées aux déplacements irréversibles cumulés depuis la mise en eau :
 - l'importance des effets liés à l'ouverture du contact béton-rocher, responsables de la redistribution des efforts d'appui (et donc des déplacements observés) et de la propagation des sous-pressions vers l'aval ;
 - une modification de l'inclinaison de la résultante des efforts appliqués par la voûte à la fondation du fait de l'action des sous-pressions dans la fissure ; la résultante peut se rapprocher de l'horizontale et donc solliciter la butée aval en compression, ce qui est rarement pris en compte dans la conception des ouvrages.

Par rapport à ce dernier constat, à Vouglans la butée est constituée par les bancs calcaires subhorizontaux qui résistent largement en l'absence de propagation des sous-pressions entre les strates. A Laouzas, le rocher aval présente une fragilité liée d'une part aux impacts des déversements de l'évacuateur de surface, et d'autre part aux discontinuités subhorizontales susceptibles de s'ouvrir par la propagation des sous-pressions. Un renforcement a été réalisé, consistant d'une part à clouer le rocher affleurant dans la zone de dissipation de l'évacuateur (132 ancrages passifs de 6 m), d'autre part à construire une poutre en béton armé au droit des deux plots centraux, servant de support à une précontrainte (10 tirants actifs 27T15.7 de 27 m) permettant de garantir un serrage suffisant du rocher et une transmission des efforts de cisaillement en provenance de la voûte (Figure 1b). Un drainage serré a été couplé à la précontrainte, de manière à ne pas risquer une augmentation de la piézométrie sous la voûte consécutive à la fermeture éventuelle de certains exutoires dans le rocher. Un dispositif d'auscultation additionnel très complet a été mis en place (distofors en fondation, mesure de la précontrainte des tirants, nivellement, piézomètres, débits de fuite) ; l'ensemble du dispositif d'auscultation a permis de constater que ce renforcement n'avait pas entraîné de modifications ni des pressions en pied d'ouvrage, ni du comportement global de l'ouvrage.

Les études se poursuivent, incluant l'observation attentive du comportement des ouvrages suite aux travaux réalisés et au renforcement de l'auscultation, de manière à évaluer la nécessité de réaliser un confortement plus étendu, en particulier à Laouzas.

Dans l'attente, il a été décidé, dès la fin de l'hiver 2005-2006 et au-delà des mesures immédiates de baisse du plan d'eau, de mettre en place une gestion hivernale prudente du plan d'eau pour rester en-deçà des positions enregistrées en 2006 avec une marge de sécurité maîtrisée, à partir de critères de cote et de température. C'est l'objet des développements méthodologiques ci-dessous, qui avaient été succinctement présentés dans [6].

1.2 Gestion du plan d'eau pour la maîtrise des sollicitations hivernales

L'objectif est d'éviter aux ouvrages des sollicitations qui conduiraient à une ouverture du contact béton-rocher sous les plots centraux supérieure à celle déjà connue (mesurée en hiver 2006). Cette protection de la structure évite les sollicitations fortes et prolongées qui pourraient réactiver la fissuration en pied amont. L'idée est de compenser une sollicitation thermique (grand froid) par une diminution de la sollicitation hydrostatique (abaissement approprié de la cote de la retenue).

Cette démarche s'accompagne bien sûr d'études dont le but est d'évaluer les risques et les marges de sécurité de l'ouvrage, et de définir des renforcements adaptés si nécessaire, afin de pouvoir revenir à une exploitation normale de l'ouvrage.

On dispose d'un historique complet de mesures précises de l'ouverture du contact, qui a été maximale en hiver 2006. Les mesures sont faites à Vouglans par pots de nivellement hydrostatique (HLS Fogale) avec une précision de quelques centièmes de mm et à Laouzas par fils verticaux équipés de Deltadis (précision du dixième de mm nettement améliorée par la télémesure depuis 2008). L'analyse de ces données d'auscultation par la méthode HST classique permet de connaître les facteurs explicatifs essentiels des ouvertures observées : d'une part l'effet saisonnier du refroidissement entre l'été et l'hiver (qui provoque une ouverture d'ordre millimétrique), et d'autre part l'effet du remplissage de la retenue (le remplissage des 7 mètres supérieurs provoque une ouverture du même ordre de grandeur).

L'analyse plus fine des données (méthode HST-Thermique, réf. [5] et [7]) met en évidence l'influence des écarts de la température de l'air à la température saisonnière interannuelle moyenne (effet de la canicule très visible en été 2003, et effets des grands froids), la meilleure variable explicative étant une fonction retardée de la température de l'air correspondant au temps de réponse de la structure en pied des plots centraux (environ 4 mois pour Laouzas et un an pour Vouglans): elle correspond physiquement à un écart de la température moyenne dans l'épaisseur de la voûte, dont l'effet sur l'ouverture mesurée est de l'ordre de 0,25 mm maximum. A noter que la série chronologique de températures doit être de bonne qualité, surtout en terme d'absence de dérive, et suffisamment longue, ce qui conduit à utiliser des séries établies et critiquées par Météo France sur des stations choisies avec soin. Dans la suite, cet effet est appelé "effet thermique".

Le modèle de comportement HST-Thermique permet d'approcher le comportement mesuré ($MB(j)$ = mesure brute au jour j) comme la somme d'effets hydrostatiques, saisonniers et thermiques (Figure 4) :

$$MB(j) = \text{EffetHydrostatique}(j) + \text{EffetSaisonnier}(j) + \text{EffetThermique}(j) + Cte + \varepsilon(j)$$

Les résidus non expliqués $\varepsilon(j)$ (différence entre le modèle obtenu et la réalité des mesures) ont un écart type σ faible, de l'ordre du dixième de millimètre. Leur dispersion tient à la fois à la limite de précision intrinsèque des mesures, et aux limites de la modélisation (qui néglige, notamment, les effets thermiques sur le parement amont partiellement en contact avec l'eau de la retenue).

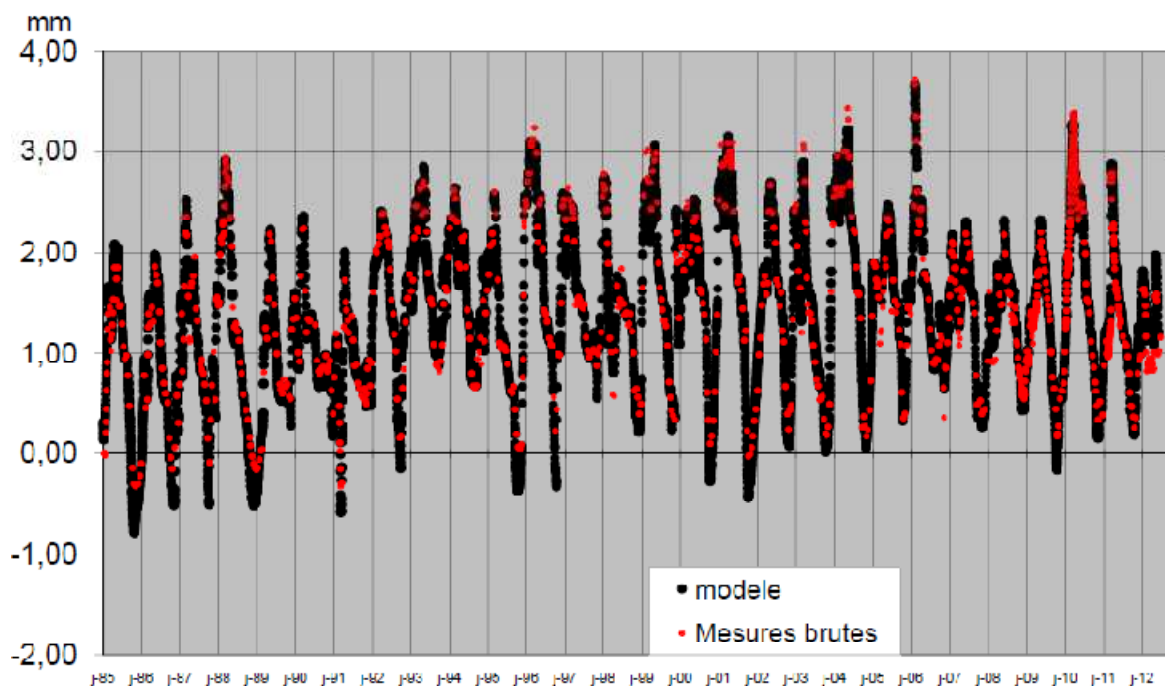


Figure 4 – Laouzas – Deltadis P 2 5 – déplacements verticaux bruts / calculés par HST-Thermique

On peut calculer des mesures ramenées à conditions identiques (RN, saison moyenne, état thermique normal) afin de mettre en évidence les faibles évolutions irréversibles de l'ouverture du contact qui se sont terminées dans les années 2000 à 2006, voir Figure 5.

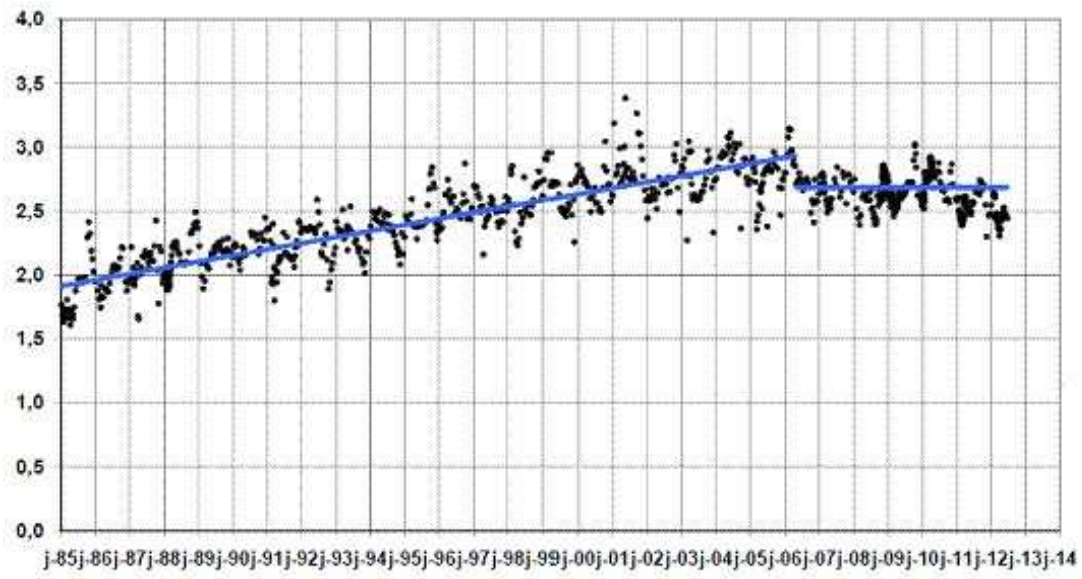


Figure 5 – Laouzas –Déplacements verticaux du pied du plot central à conditions identiques (1985 à 2012) mesurés au fil vertical Deltadis

A partir de ce modèle de comportement, il est aussi possible de reconstituer l'historique des effets des sollicitations sur l'ouvrage (à partir de la chronique de la cote de la retenue et de celle des températures de l'air).

La variable " Effet Thermique " montre des extrema, notamment lors des canicules et grands froids, dont on peut évaluer la période de retour probable (loi de Gumbel) comme pour les débits de crue extrêmes (Fig. 6).

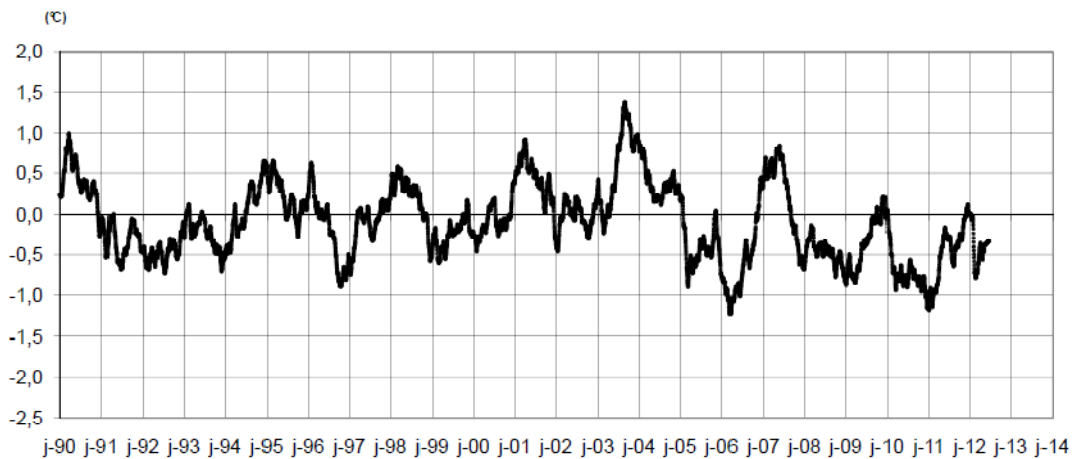


Figure 6 – Vouglans – Ecart de l'état thermique du barrage (température retardée)

L'état thermique froid décennal (de temps de retour 10 ans) a ainsi été évalué pour chaque pied de barrage, il correspond à une température de 2,3 °C et 0,80 °C sous les normales respectivement pour Laouzas, et pour Vouglans qui est plus épais. L'effet de ces épisodes décennaux est une ouverture supplémentaire du contact d'environ un dixième de millimètre, par rapport à une saison normale.

Les éléments sont alors réunis pour définir des critères (à respecter pour la cote de la retenue) pour que la mesure brute au jour j reste inférieure au maximum connu en 2006 : MB(2006), avec une marge de sécurité choisie (de l'ordre de 2 écarts type des résidus non expliqués) de manière à obtenir un risque résiduel d'ordre pluri-décennal (vérifié par étude statistique des résidus et des extrema thermiques).

$$MB(j) \leq MB(2006) \Leftrightarrow \text{EffetHydrostatique}(j) + \text{EffetSaisonnier}(j) + \text{EffetThermique}(j) + Cte + 2\sigma \leq MB(2006)$$

Pour un état thermique donné, on peut alors exprimer la cote de retenue qui répond au besoin (au travers de la connaissance de son effet hydrostatique) :

$$\text{EffetHydrostatique}(j) \leq MB(2006) - \text{EffetThermique}(\text{donné}) - Cte - 2\sigma - \text{EffetSaisonnier}(j)$$

Soit $\text{EffetHydrostatique}(j) \leq K - \text{EffetSaisonnier}(j)$

La somme des sollicitations des effets hydrostatiques et saisonniers reste inférieure à une constante K qui ne dépend que de l'état thermique du barrage : l'effet hydrostatique limité imposé suit donc une courbe saisonnière annuelle, avec un creux de la retenue en hiver.

Premier critère, saisonnier, dit "CS", valable jusqu'en conditions de froid décennal : garder la cote de la retenue en dessous d'une courbe limite saisonnière, pour garantir a priori que l'ouverture du contact béton-rocher reste en-dessous de celle de 2006 :

$$\text{EffetHydrostatique}(CS(j)) \leq K_{\text{decennal}} - \text{EffetSaisonnier}(j)$$

Cette courbe limite est calculée pour les années à venir (prévision pluriannuelle). Son non-dépassement assure le respect de l'objectif initial avec la marge de sécurité choisie (2 écarts type σ des résidus non expliqués par exemple) tant que le comportement du barrage est inchangé. Si les évolutions irréversibles sont significatives, on peut en tenir compte.

Cette courbe limite est par construction assimilable à une portion de sinusoïde. Dans le cas de Vouglans, elle est utilisable directement car les consignes d'exploitation (en crue notamment) et les dispositions pratiques (alarmes) le permettent facilement : en année normale, la contrainte la plus forte se situe fin mars : 1,50 m de creux. Dans l'autre cas (Laouzas) l'exploitant préfère adopter une courbe plus contraignante mais définie par un palier, qui est plus facile à mettre en œuvre.

Lorsque l'ouvrage se retrouve en état thermique exceptionnel, plus que "froid décennal", le **deuxième critère, thermique, dit "CT"**, prend le relais du premier. Il est calculé de la même manière mais en tenant compte de l'état thermique exceptionnel de l'ouvrage, évalué d'après les températures de l'air des mois précédents : si la cote est sous une courbe limite thermique, alors l'ouverture du contact béton-rocher restera inférieure à celle de 2006, toujours avec la même marge de sécurité choisie de l'ordre de 2σ .

$$\text{EffetHydrostatique}(CT(j)) \leq K_{\text{exceptionnel}}(j) - \text{EffetSaisonnier}(j)$$

La courbe limite "Thermique" peut être extrapolée sur quelques semaines en tenant compte des prévisions météorologiques de température de l'air. La courbe ne varie pas brutalement (l'inertie thermique étant importante) et est facile à anticiper, ainsi les consignes d'exploitation en tiennent compte (creux préventif et modalités de passage des crues).

Le troisième critère, "mesure", dit "CM", tient compte de la mesure d'ouverture réelle, dont la différence par rapport à l'ouverture maximale (de 2006) est traduite en possibilité de remplissage supplémentaire jusqu'à CM (l'effet hydrostatique est supposé conforme à celui obtenu par modélisation HST-Thermique). Dans ce cas la précision de la modélisation est meilleure (en effet elle part de la position actuelle mesurée, pour une prévision à court terme (semaine) avec de faibles variations dans les sollicitations). On prend donc, en fonction de l'inertie du pied de voûte, une marge de sécurité plus réduite, de l'ordre ici d'un écart type.

$$\text{EffetHydrostatique}(CM(j)) - \text{EffetHydrostatique}(j) \leq MB(2006) - (MB(j) + \sigma)$$

Si la mesure s'approche du maximum déjà connu, le remplissage de la retenue doit être maîtrisé. La qualité de la mesure (précision, absence de dérive) est ici encore primordiale : la dispersion de la courbe CM est liée à la précision de la mesure et à la différence entre le comportement mesuré et le modèle statistique.

Ces 3 critères sont utilisés à Vouglans, ce qui permet un pilotage sûr de la retenue : chaque semaine en période hivernale l'exploitant dispose d'une vision complète des contraintes et peut gérer la retenue de façon optimale, avec les conseils de l'ingénierie.

On voit ci-dessous (Fig. 7a) que lors de l'épisode de froid exceptionnel de 2006, cette pratique aurait conduit à adopter pour objectif une cote d'exploitation plus basse en avril (jusqu'à 75 cm sous la cote réellement atteinte : ceci correspond à la marge de sécurité prise sur CM). Cette cote aurait limité les sollicitations en traction sur le contact béton-rocher.

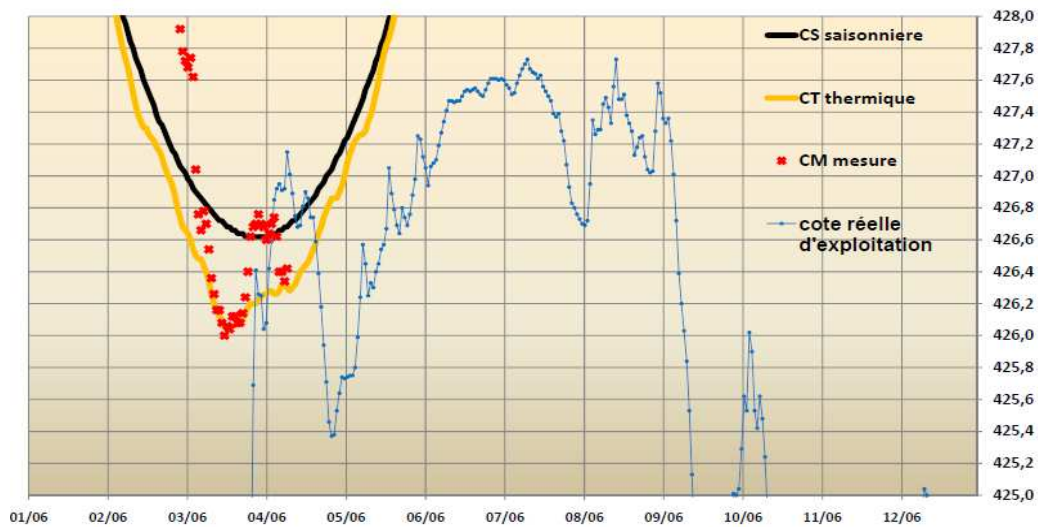


Figure 7a – Vouglans - cote d'exploitation et courbes CS, CT et CM reconstituées pour 2006

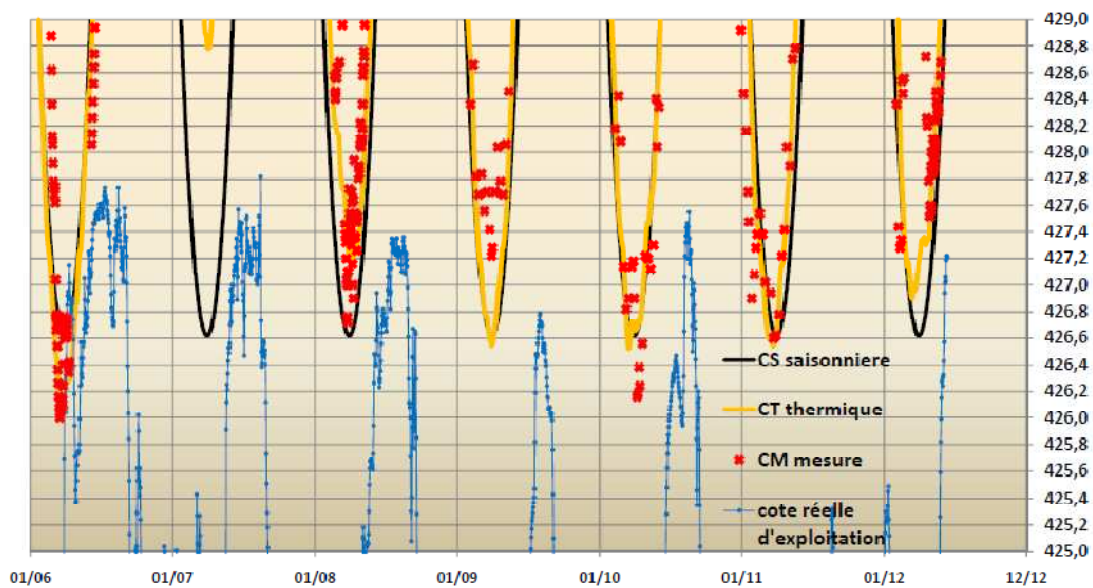


Figure 7b – Vouglans – Historique de la cote d'exploitation et des courbes CS, CT et CM de 2006 à 2012

Les années suivantes (Figure 7b) sont plus chaudes (surtout 2007) et les courbes CT et CM sont très au-dessus de CS, voire au dessus de RN. Avec le retour des années froides (2009 à 2011) le critère CT se rapproche ensuite de CS, et ponctuellement certaines mesures conduisent à des valeurs de CM sous CS.

A Laouzias les deux premiers critères sont remplacés par un abaissement de la cote de la retenue de 1m 80 entre mi-janvier et fin avril. Le calcul détaillé du critère CM est également fait régulièrement en hiver, il a d'ailleurs servi à piloter une montée du plan d'eau en période hivernale en 2010, dont le but était de préciser le comportement de la poutre ancrée au rocher aval, et l'efficacité des nouveaux drainages (Figures 8a et 8b). Cet essai a permis d'atteindre la sollicitation souhaitée, quasiment identique à celle de 2006, montrant un comportement inchangé de la voûte, l'absence de soulèvement de la poutre, et une zone de rocher aval où le drainage était insuffisant et a été ensuite amélioré.

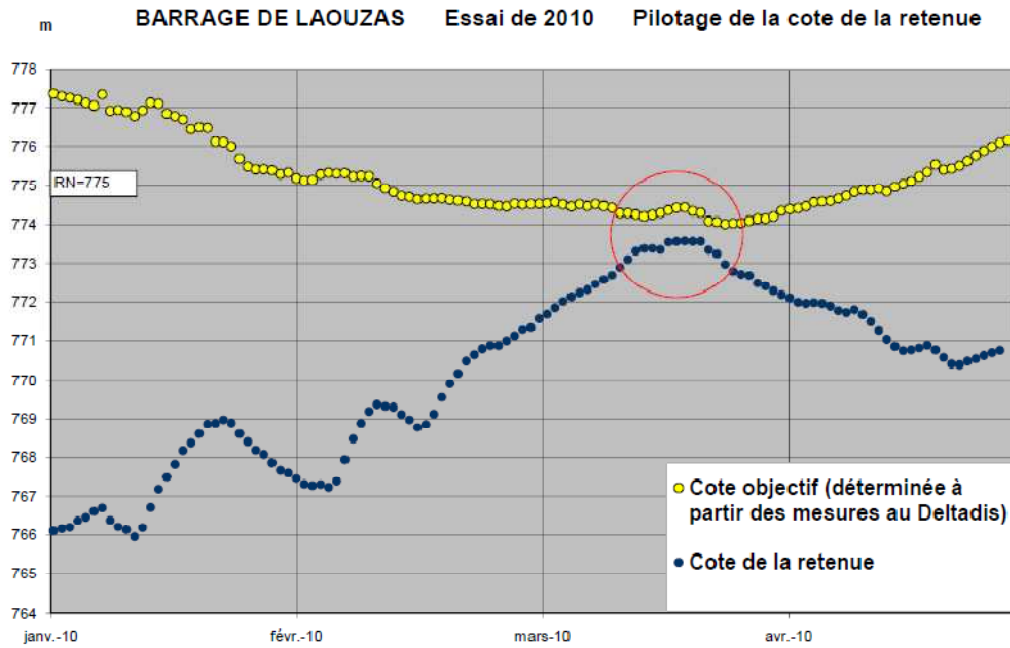


Figure 8a – Laouzas – Essai de sollicitation haute

BARRAGE DE LAOUZAS DELTADIS P 2 5					Sensibilité		<table border="1"> <tr> <td>mesure du</td> <td>Objectif pour</td> </tr> <tr> <td>04-févr-08</td> <td>mesure brute</td> </tr> <tr> <td>3,627</td> <td>3,58</td> </tr> <tr> <td>mm</td> <td>mm</td> </tr> </table>		mesure du	Objectif pour	04-févr-08	mesure brute	3,627	3,58	mm	mm
					mesure du	Objectif pour										
					04-févr-08	mesure brute										
3,627	3,58															
mm	mm															
Hydrostatique		T90	Thermique													
0,232	mm/m		111	-0,0522	mm/°C											
date	cote (m)	Saison	T air (°C)	T air (°C) Ecart à la norme	mesure brute (mm)	T beton (°C) Ecart à la norme	mesure corrigée (mm)	Prevision mesure brute à RN (mm)	Cote objectif (m)							
15-mars-10	773,31	1,29	2,2	-2,58	3,34	-2,10	2,82	3,76	774,27							
16-mars-10	773,38	1,30	5,1	0,24	3,37	-2,05	2,84	3,78	774,22							
17-mars-10	773,38	1,32	5,25	0,31	3,36	-2,00	2,83	3,77	774,26							
18-mars-10	773,35	1,34	4,5	-0,53	3,34	-1,97	2,82	3,75	774,31							
19-mars-10	773,54	1,36	8,05	2,94	3,37	-1,87	2,81	3,74	774,37							
20-mars-10	773,56	1,37	9,95	4,76	3,36	-1,74	2,81	3,72	774,43							
21-mars-10	773,57	1,39	10,4	5,12	3,36	-1,60	2,82	3,72	774,44							
22-mars-10	773,56	1,41	9,5	4,13	3,36	-1,48	2,85	3,74	774,35							
23-mars-10	773,56	1,42	9,5	4,05	3,39	-1,36	2,87	3,75	774,31							
24-mars-10	773,34	1,44	8,9	3,36	3,39	-1,27	2,93	3,81	774,10							
25-mars-10	773,24	1,46	7,95	2,32	3,37	-1,19	2,94	3,81	774,08							
26-mars-10	772,97	1,48	9,2	3,48	3,32	-1,10	2,96	3,83	774,02							
27-mars-10	772,79	1,49	3,9	-1,92	3,27	-1,11	2,96	3,82	774,05							
28-mars-10	772,71	1,51	8,7	2,79	3,25	-1,03	2,97	3,82	774,05							
29-mars-10	772,68	1,53	10,65	4,65	3,23	-0,92	2,96	3,80	774,11							
30-mars-10	772,48	1,55	5,85	-0,25	3,17	-0,90	2,96	3,79	774,16							
31-mars-10	772,4	1,56	6,35	0,00	3,15	-0,89	2,96	3,79	774,16							
1-avr-10	772,28	1,58	3,85	0,05	3,11	-0,87	2,96	3,78	774,21							

Figure 8b – Laouzas – Essai de sollicitation haute, avec pilotage de l'exploitation par les critères CT et CM .
L'objectif d'ouverture a été approché à 0,2 mm le 23 mars 2010.

En période de fortes crues, il n'est pas toujours possible de respecter scrupuleusement les critères limites décrits ci-dessus. En effet, la débitance des évacuateurs peut (selon leur géométrie) diminuer nettement avec le creux. Ces scénarios ont été étudiés et probabilisés, un creux préventif adapté peut s'avérer nécessaire,

pour que le risque résiduel de non respect de l'objectif de protection de la structure soit minimisé (d'ordre pluri-centennal).

Au barrage du Gage (cf. § 2), beaucoup plus mince, c'est le troisième critère qui est le plus pertinent, il est régulièrement utilisé en hiver pour vérifier si le chauffage est suffisant pour compenser les effets du froid.

Depuis l'instauration sur ces ouvrages de ces pratiques d'exploitation prudente (après 2006), les sollicitations sont restées maîtrisées, aucune fissuration ni incrément irréversible vers l'aval n'ont été générés, et la stabilisation des déformations des ouvrages s'est confirmée. Ce mode d'exploitation avec contraintes hivernales se prolongera jusqu'au résultat des études de stabilité et à la réalisation de renforcements structurels le cas échéant.

2. BARRAGE DU GAGE

L'environnement du barrage du GAGE II, voûte mince à double courbure, est singulier en raison de la présence de la voûte initiale de GAGE I située à environ 3 mètres à l'aval (graphique 9). La première voûte, à parements verticaux, construite entre 1951 et 1954 avait été conçue volontairement " le plus mince possible ", à titre expérimental. A la suite de l'apparition d'importants phénomènes de fissuration, elle a été mise hors d'eau et son exploitation a été abandonnée en 1964. Le barrage Gage II a été construit entre 1965 et 1966, et mis en service en 1967. Les 2 voûtes sont structurellement indépendantes et reliées par une casquette en béton armé qui constitue le seuil de l'évacuateur de crue.

La voûte Gage II a une hauteur de 42 m sur fondation granitique. Le ratio "largeur vallée / hauteur au dessus du terrain naturel" est de l'ordre de 4,5. L'épaisseur en clé varie de 1,5 à 4,5 m. Le volume de béton représente 30 000 m³. Le volume de la retenue est de 3,4 hm³.

Après les fortes évolutions vers l'aval des plots centraux, suivies d'un amortissement, la stabilisation des déformations est observée à partir de 1978, puis, une lente dérive vers l'amont a gagné peu à peu l'ensemble de la partie haute de la voûte, associée à une fissuration du parement aval qui était rapprochée des conditions d'exploitation de la retenue (échauffement à cote basse l'été). A partir de 1988, un nouveau mode d'exploitation conduisait à avoir une retenue pleine au début de l'été pour garantir le soutien d'étiage (Fig. 10). Très vite, ce nouveau mode d'exploitation s'était révélé favorable pour limiter la fissuration du parement aval.

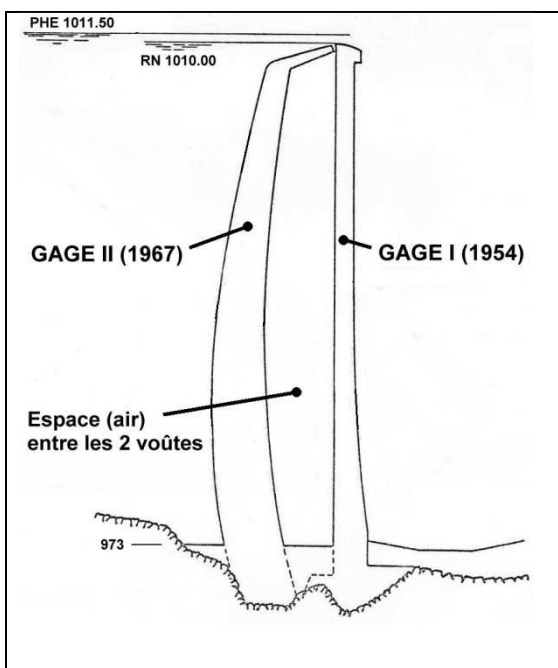


Figure 9 - Barrages Gage I et II. Le pendule mesure le déplacement de la crête par rapport au rocher profond (-15m)

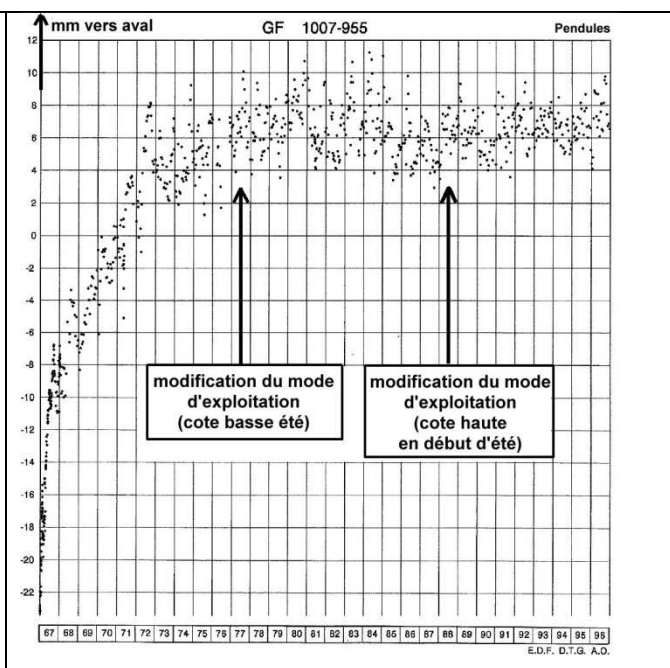


Figure 10 - Gage – Déplacement de la crête du plot central entre 1967 (mise en eau) et 1996.

Dans le cadre de la réévaluation de la crue de projet, la modélisation aux éléments finis du comportement mécanique de la voûte réalisée en 2007 a permis d'aborder les cas de charge enveloppe auxquels l'ouvrage peut être soumis, en considérant les effets thermiques et hydrostatiques. Le cas de charge le plus défavorable (retenue au niveau de PHE en hiver) provoque le développement de l'ouverture par l'amont du contact barrage-fondation qui peut atteindre les 3/4 de la section des plots centraux. Dans ces conditions de chargement, il est possible que cette ouverture en pied amont se rapproche des fissures développées à partir de la face aval. Ce phénomène peut expliquer l'apparition de suintements au niveau des fissures en pied des plots centraux. L'étude conclut que, dans l'état des connaissances sur l'ouvrage, il est peu souhaitable de s'écarter des conditions de charge déjà observées.

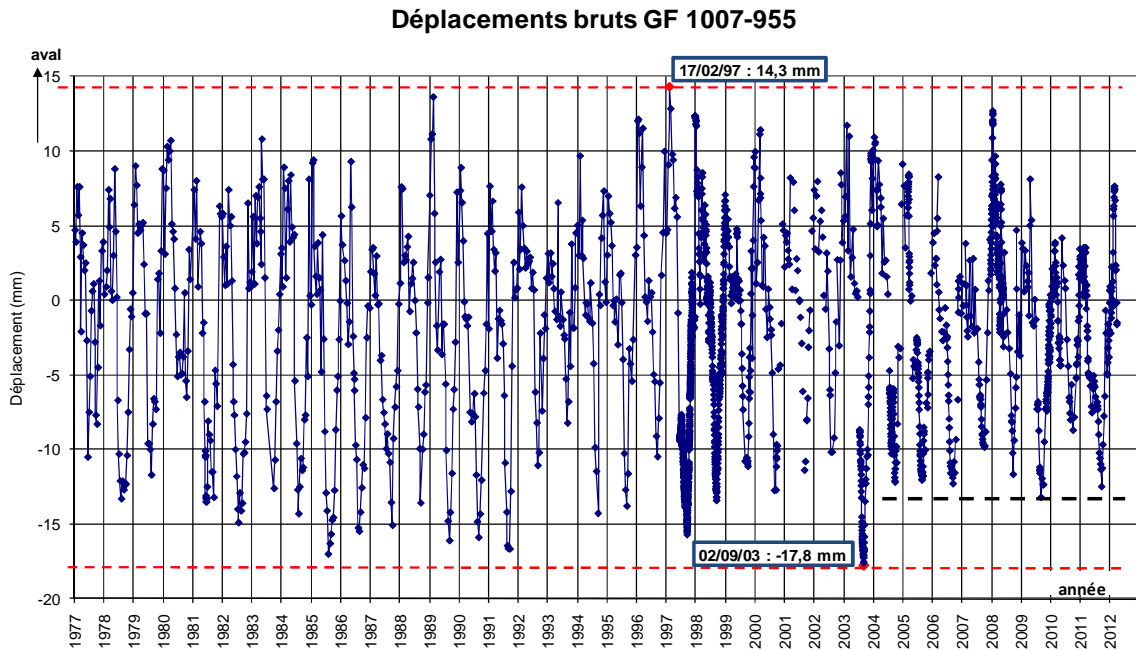


Figure 11 – Gage - Déplacements bruts du pendule de clé GF 1007-955 de 1977 à mars 2012

En se reportant aux 33 dernières années, les déplacements de **14,3** mm vers l'aval et **17,8** mm vers l'amont, au pendule de clé, correspondent aux extrêmes connus en exploitation normale de la retenue.

En 2003, suite à la longue période de canicule, malgré un abaissement limité de la retenue en période estivale l'ouvrage a pris une position extrême à l'amont provoquant inévitablement une propagation de la fissuration en pied aval en rives.

Pour limiter les déplacements vers l'amont et l'expansion de cette fissuration aval, un système de refroidissement par aspersion du parement amont a été mis en place en 2004 (Fig. 12). Depuis, l'ouvrage n'a pas dépassé la position " -13.2 mm ", éloignée du critère " -17,8 mm " (Fig. 11).



Figure 12 - Gage - Refroidissement par aspersion de la crête en été .
(Photo Elisabeth Vergez)

A partir de l'hiver 2008, un chauffage par aérothermes, dans l'espace inter-voûtes, a été mis en place pour limiter les déplacements vers l'aval. Pour apprécier l'apport du chauffage sur la position de l'ouvrage, on a utilisé le modèle HST-Thermique qui permet de mieux réduire la dispersion résiduelle par la prise en compte des écarts de température de l'air à la moyenne interannuelle. Les écarts au modèle non expliqués par la température sont alors imputables aux dispositifs d'arrosage et de chauffage qui ne sont pas pris en compte dans le modèle. Le gain de l'apport du chauffage est estimé à 2 mm (Fig. 13).

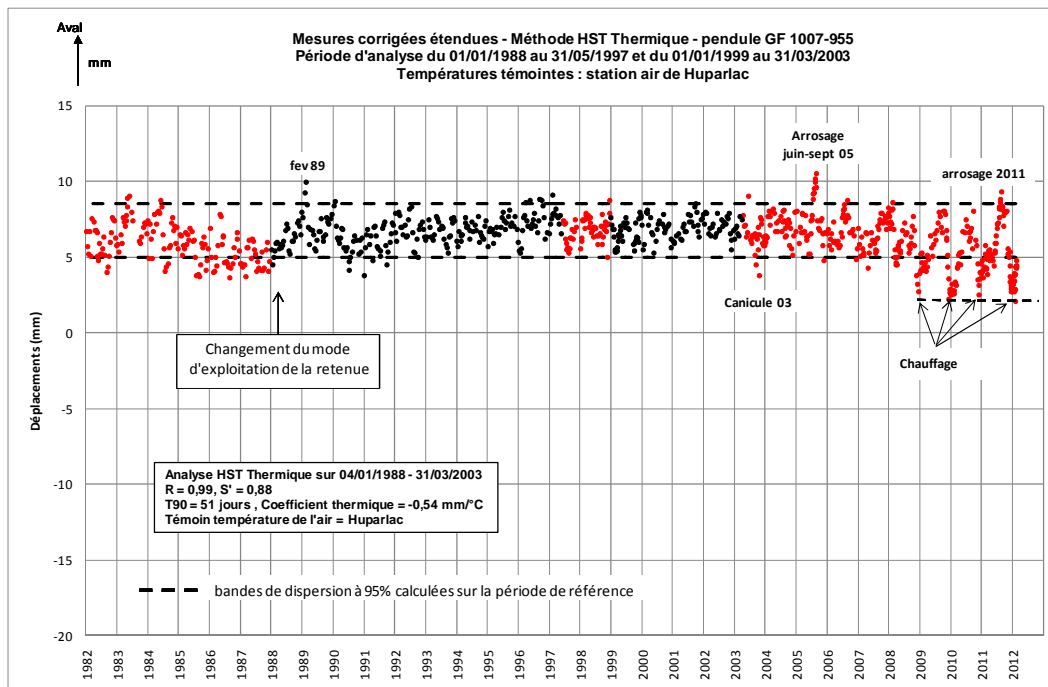


Figure 13 - Gage - Mesures du pendule de clé GF 1007-955 corrigées par HST-Thermique

Une autre manière d'apprécier l'efficacité du chauffage consiste à partir des positions brutes vers l'aval mesurées depuis 1980 et à simuler un remplissage à RN, en utilisant seulement la loi hydrostatique du modèle HST. Ceci revient à formuler : " Quel aurait été le plus fort déplacement vers l'aval de l'ouvrage en cas d'un remplissage soudain, en faisant l'hypothèse que l'état thermique de l'ouvrage est conservé ?". Sur la

figure 14, la position extrême, simulée à RN chaque année, provient de l'état thermique le plus froid principalement observé aux mois de janvier et février.

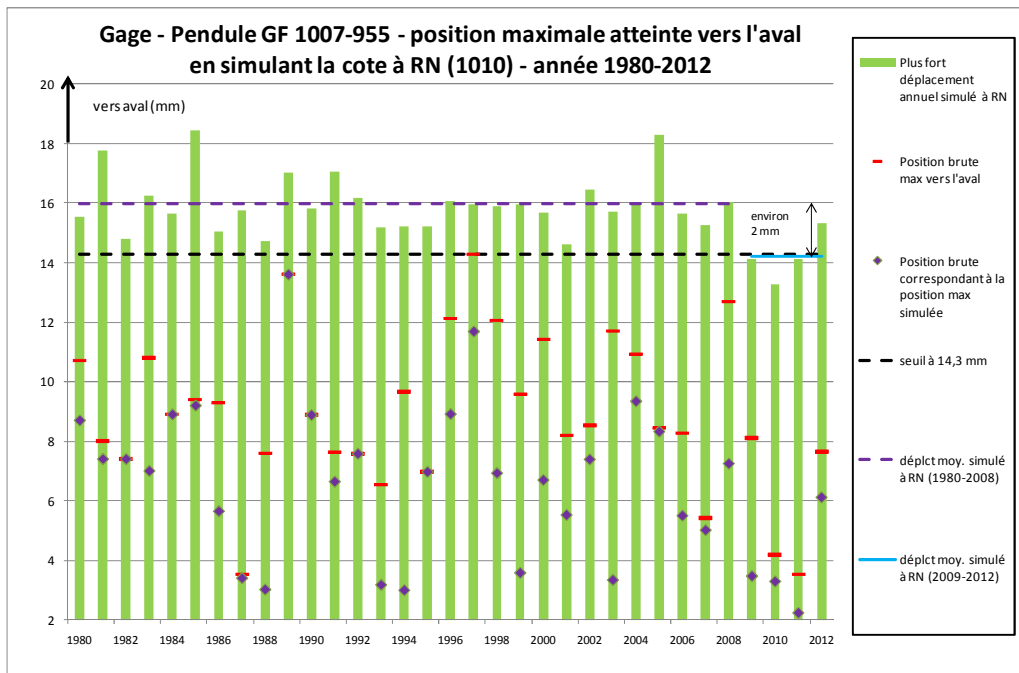


Figure 14 - Gage- Les plus forts déplacements hivernaux simulés à RN.

On peut alors voir, sur la figure 14, que si l'on avait été à " retenue pleine " en hiver, tous les ans on aurait dépassé la limite " 14,3 mm " excepté pour les hivers 2009, 2010 et 2011, pour lesquels le chauffage était en service. Pour ce dernier hiver 2012, avec un mois de février très froid, si la retenue avait été pleine, on aurait dépassé le seuil d'un millimètre. L'écart moyen (calculé à RN en hiver) entre la position avec chauffage (2009-2012) et la position sans chauffage (1980-2008) est de l'ordre de 2 mm, confirmant l'estimation de l'effet du chauffage faite en se basant sur les écarts au modèle HST-Thermique.

Si on reportait le gain apporté par le chauffage sur la période 1980-2008 (période sans chauffage), en enlevant aux maximaux simulés à RN les 2 mm estimés, l'ouvrage n'aurait alors dépassé la limite préconisée de non dépassement qu'en 1981, 1985, 1989, 1991, 2002, 2005 et 2012, ce qui représente un gain intéressant, passant d'un risque de dépassement de 100% à 20% seulement, tout en conservant bien à l'esprit qu'il s'agit de déplacements simulés à RN, cote très rarement atteinte durant les mois d'hiver.

L'exploitant, deux fois par semaine en période hivernale, vérifie la position de l'ouvrage atteinte en simulant le plein remplissage (critère CM). En cas d'approche ou de dépassement du seuil, il demande au service météorologique d'EDF la situation hydro-climatologique à venir et peut, avec acceptation de la DREAL, ouvrir les vannes de fond, pour abaisser la cote de retenue, comme réalisé en janvier 2008.

L'évacuateur de crues devant être redimensionné, un choix judicieux peut permettre de faciliter la maîtrise des cotes de retenue et de limiter les risques de sollicitation forte de l'ouvrage aussi bien en été qu'en hiver. Les réflexions en cours conduisent à proposer un évacuateur en rive équipé d'un clapet abaissé en hiver (assurant un déversement quelques mètres sous la RN et permettant de ne pas dépasser la RN avec la crue de projet d'hiver). Le clapet serait par contre fermé en période estivale, pour conserver le remplissage de la retenue favorable à la fois à l'exploitation, au bon comportement de l'ouvrage et au soutien d'étiage, tout en passant la nouvelle crue de projet à la cote des PHE non modifiée.

CONCLUSIONS

Le dispositif d'auscultation est un élément indispensable à la compréhension et à la maîtrise du comportement de certaines voûtes en vallée large, qui sont sensibles aux effets thermiques. Il convient de trouver des solutions, chaque fois spécifiques, afin de limiter les sollicitations extrêmes. L'auscultation montre ici tout son intérêt, puisqu'elle permet à partir des mesures de déplacement tout d'abord de détecter puis d'analyser et de comprendre le mécanisme de ces phénomènes (évaluation des effets des sollicitations), et enfin elle fournit des données d'entrée pertinentes pour caler les calculs et modélisations nécessaires à la compréhension et à la justification des ouvrages. En se basant sur l'analyse des données d'auscultation, il est possible de proposer différentes dispositions concrètes de protection (critères de limitation des sollicitations), dont la pertinence est ensuite vérifiée sur le terrain à chaque mesure. L'utilisation de modèles statistiques assure une bonne représentativité de la réalité, et les incertitudes de ces modélisations sont connues. Ces méthodes ne sont utilisables que si on dispose d'un historique de mesures d'auscultation de très bonne qualité (précision, continuité, métrologie contrôlée). L'amélioration de ces modèles permettra à l'avenir de prendre en compte des effets plus subtils (effets thermiques sur le parement amont). Ceci devrait permettre d'affiner encore la pertinence des analyses de comportement et d'améliorer la maîtrise des sollicitations sur les voûtes.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] CIGB ICOLD : Q71-R26, Q68-R44, Q65-R23, Q65-R7, Q58-R77, Q56-R72, Q52-R13, Q49-R45, Q45-R20, Q38-R44, Q38-R33, Q32-R49 – Bulletin N° 87 (1992) Annexe A
- [2] Monfort L., Millet J.C., Fabre J.P., Bordes J.L., Euvrard D., Ricard C., Royet P., (1991) *Éléments de méthodologie pour la détection et l'analyse du vieillissement illustrés par des exemples*. CIGB ICOLD Vienne Q.65 R.23
- [3] Bourdarot E., Fabre J.P., (2003) *Analyse du comportement mécanique à long terme des barrages voûtes* . CIGB ICOLD Montréal Q82-R43
- [4] Bourdarot E., Crepon O., Goguel B., Hoonakker M., Lignier P., Yziquel A., (2003) *Comportement de voûtes en vallées larges, 4 voûtes minces des années 50*. CIGB ICOLD Montréal Q82-R44
- [5] Penot I., Fabre J.P., Daumas B (Decembre 2005) *Monitoring behaviour : The methods used by EDF to monitor the behaviour of the company's dams : HST Thermal model*. Water Power Magazine
- [6] JP Fabre, E. Bourdarot, F. Laigle, R. Mourey, Ph. Pauty, St. Aigouy, (2009) *Adaptation de l'exploitation des barrages pour maîtriser leur sollicitation : exemples de Laouzas, Gage et Grandes Patures*. CIGB ICOLD Brasilia Q91-R41
- [7] Penot I., Fabre J.P., Daumas B., (2009) *Analyse et modélisation du comportement des ouvrages de génie civil par prise en compte des températures de l'air : Méthode HST Thermique*. CIGB ICOLD Brasilia C3
- [8] Fabre J.P., Huber R.,(2009) *Exploitation of monitoring results to adapt the operation of dams to their behaviour*; International Symposium on Long Term Behavior of Dams. Graz
- [9] Fabre J.P., Geffraye G., (2011) *Lessons learned from monitoring the behavior of Arch dams*. International Symposium on Modern Technologies and Long-term Behavior of Dams. Zhengzhou.
- [10] Bourdarot E., Hoonakker M., (2012) *Le comportement des barrages voûtes en vallée large : expérience tirée des barrages de Laouzas et Vouglans* . CIGB ICOLD Kyoto Q95-R11