

L'auscultation par capteurs à corde vibrante, 80 ans de retour d'expérience

Vibrating wire sensors monitoring, 80 years of feedback

Nathalie ROSIN-CORRE, Christine NORET
Tractebel Engineering (France) 5, rue du 19 mars 1962 - 92622 Gennevilliers Cedex
nathalie.rosin-corre@gdfsuez.com, christine.noret@gdfsuez.com

Jean-Louis BORDES
20, rue de Madrid 75008 Paris
jean-louis.bordes@wanadoo.fr

MOTS CLÉS

Capteur à corde vibrante, cellule de pression, extensomètre

RÉSUMÉ

L'année 2012 marque le 80ème anniversaire de l'installation des premiers capteurs à corde vibrante, ou témoins sonores, en France. La technologie de la corde vibrante a été appliquée dans le cadre de l'auscultation de nombreux ouvrages : mesure de pression interstitielle, pression totale, déformations et précontrainte.

L'analyse du comportement de ces capteurs montre que ces capteurs présentent une durabilité, une robustesse et une stabilité dans le temps de plus de 60 années. La présence d'une seconde bobine permet d'allonger encore leur durée de vie. Les principales causes de défaillance ne sont pas du fait du capteur lui-même, mais de son environnement : endommagement des câbles pendant la construction, endommagement par la foudre

De façon plus générale, le coût de fourniture d'un capteur ne représente qu'une petite partie du coût de mise en place de l'auscultation d'un ouvrage, lui-même ne participant que faiblement au coût total des ouvrages en construction.

ABSTRACT

2012 marks the 80th anniversary of the first installation of vibrating wire sensors in France. Vibrating wire technology has been applied for the monitoring of various infrastructures: measurement of pore pressure, total pressure, deformation (strain gauges) and prestressing (load cells).

The analysis of the behavior of these sensors shows that these sensors have a durability, robustness and reliability over time during more than 60 years. The presence of a second coil allows extending their life. The main causes of failure are not due to the sensor itself, but its environment: cable damage during construction, damage by lightning....

More generally, the cost of a sensor is minor compared to the cost of the monitoring system. The latter one itself is small compared to the total cost of the works under construction.

1. HISTORIQUE

Le brevet du capteur extensométrique à corde vibrante dit aussi « témoin sonore » a été déposé à Paris par André Coyne en 1931. Les premiers capteurs à corde vibrante (CCV) installés sur un barrage sont les 17 extensomètres qui auscultent le béton de la voûte du barrage-de la Bromme sur la Truyère (1930-1932). Ce barrage de 30 m de haut créait un réservoir de 200 000 m³ de mise en charge de l'usine de Brommat I ; il a été mis hors service en 1974. **Ceci conduit à célébrer cette année les 80 ans d'utilisation des capteurs à corde vibrante pour l'auscultation des barrages.**

La première grande auscultation d'un barrage avec CCV est celle du barrage voûte de Marèges sur la Dordogne (1932-1935, 82 m de haut, 198 m de longueur entre culées) avec 78 extensomètres installés dans le corps de l'ouvrage et 40 dans le renforcement des appuis et culées. Leur exploitation a été arrêtée dans les années soixante. Ils avaient permis au projeteur, dès la mise en charge de l'ouvrage, d'y connaître les flux et la distribution réelle des contraintes, à une époque où les calculs étaient des plus sommaires [5a].

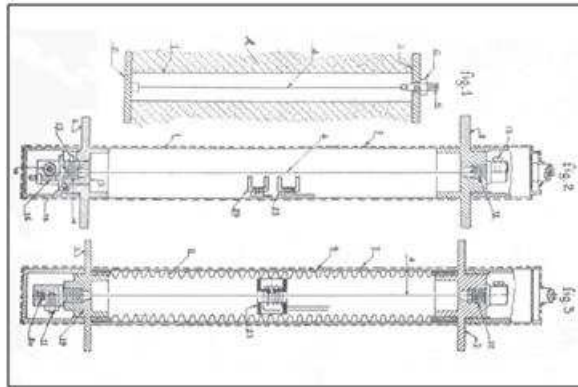


Figure 1: Principe du témoin sonore, brevet André Coyne, 1931 Archives Coyne et Bellier, brevet INPI.

Les CCV ont ensuite ausculté d'autres types d'ouvrages, entre 1934 et 1938 : le pont métallique de Port-de-Pascau, par 72 extensomètres de surface, les conduites forcées en béton précontraint de Marèges, des tirants métalliques de murs de quai en palplanches et des tirants en béton. Des essais de laboratoire sur des poutres d'essai furent aussi conduits en parallèle.

Un premier bilan en est dressé par André Coyne en 1938 [6]. André Coyne crée en 1947 la société Télémac (Télémesures Acoustiques) pour exploiter le brevet des CCV. Jean Bellier, présent dès 1931 auprès d'André Coyne, développe en 1958 au sein de cette société la cellule de mesure de pression interstitielle, dans laquelle une corde vibrante mesure la déformation d'une membrane souple soumise à la pression de l'eau. Le principe de la mesure en régime entre-tenu est adopté par Télémac vers 1960, l'idée ayant été exposée dès 1946 dans un texte de brevet, qui n'a pas été déposé.

Après Maïhak en Allemagne (1937), les fabricants se développent après la seconde guerre mondiale, en Norvège avec Géonor (1958) puis en Angleterre avec Gage Technique, après 1960. Les Américains suivent dans les années 1970 avec Irad Gage (1973) puis Géokon (1979) puis Soil Instruments (Grande-Bretagne) et RST (Canada). En 2001, Télémac externalise la fabrication des capteurs en créant la société GI2M.

L'usage des CCV dans le génie civil se généralise à la fin des années 1970 et s'étend dans le monde. La cellule de mesure de pression totale et la cale dynamométrique sont mises au point dans les années 80. Les enceintes nucléaires françaises en béton précontraint sont ainsi équipées de CCV depuis les REP900 à la fin des années 70. En France, les Ponts et Chaussées dressent le bilan des mesures extensométriques par capteurs à corde vibrante à partir de 1973. Le rapport final du LCPC de 1980 [8] rend compte d'une expérimentation in-situ pendant 5 ans sur le pont de Condren au-dessus du Canal de Saint-Quentin. Il conclut « à l'excellente fiabilité que l'on peut attendre de ces appareils ».

2. TECHNOLOGIE DES CAPTEURS A CORDE VIBRANTE (CCV)

2.1 Principe de fonctionnement des CCV

2.1.1 Principe général de la mesure

Le capteur à corde vibrante est constitué d'une corde en acier tendue entre deux points de fixation. La fréquence de vibration de la corde varie en fonction de sa tension, c'est-à-dire de la longueur entre ses deux points extrémités. La fréquence des oscillations du mode fondamental est donnée par :

$$F = \frac{1}{2L_c} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_c}{\rho_c}}$$

... avec L_c , longueur de la corde, ρ_c , masse volumique de l'acier de la corde et σ_c , contrainte exercée sur la corde, soit T_c/S_c avec T_c , traction exercée sur la corde et S_c , section de la corde.

Par ailleurs, dans le domaine élastique, la variation de la longueur de la corde est reliée à la variation de la contrainte appliquée par $\Delta L = L_c \Delta \sigma_c / E_c$, avec E_c , module d'élasticité de l'acier de la corde ($206 \cdot 10^9$ N/m²).

La tension de la corde doit être suffisamment faible pour que l'effet de la relaxation soit négligeable.

En supposant l'allongement de la corde petit devant la longueur totale, cet allongement est relié à la variation de fréquence de vibration de la corde par $\Delta L/L_c = K_c \cdot (N_1^2 - N_2^2)$ avec N_1 , N_2 , respectivement fréquences de vibration avant et après allongement et $K_c = (4L_c^2 \rho_c / E_c)$, coefficient extensométrique.

2.1.2 Fonctionnement en régime amorti ou entretenu

En régime amorti, la corde est excitée par une bobine alimentée par un courant électrique (autour de 90V) qui l'attire puis la relâche. Après cette impulsion initiale de forte amplitude, elle retrouve sa position d'équilibre par des oscillations libres à sa fréquence propre. L'aimantation rémanente de la corde oscillante après excitation génère par induction dans la même bobine (ou une seconde bobine) un courant électrique alternatif de faible intensité. C'est la fréquence de ce courant électrique induit, dont la fréquence est directement proportionnelle à la fréquence de vibration de la corde, qui est mesurée au début de l'amortissement (après quelques millisecondes) par le poste de lecture de type fréquencemètre. L'utilisation de la même bobine (ou des mêmes en série) pour l'excitation et la mesure mélange les résidus électriques de l'excitation avec le signal de mesure et peut donc induire des erreurs de mesure.

En régime entretenu, le dispositif comporte deux bobines en parallèle. La corde est maintenue en vibration par la première bobine alimentée par une tension d'amplitude constante (autour de 160 mV) et de fréquence celle mesurée dans la seconde bobine (signal « entretien »). Par induction, la vibration entretenue de la corde génère un courant de faible intensité (8 à 24 mV) (signal « Ecoute »).

Ce dispositif présente 3 avantages majeurs : 1) la sollicitation de la corde est 500 fois inférieure à celle du mode amorti, ce qui limite sa fatigue et accroît sa durée de vie ; 2) l'utilisation de 2 bobines, l'une pour l'excitation et l'autre pour la mesure permet de recueillir uniquement le couplage magnéto-mécanique. Le signal est direct et les sources d'erreur sont minimisées; 3) la répétitivité des mesures en mode entretenu est meilleure : on a observé une variation de la fréquence mesurée en fonction de l'amplitude de l'excitation initiale et dans le cas d'une inversion de polarité de la bobine excitatrice (permutation du sens du courant), qui ne dépassait pas 1 Hertz.

Le poste de lecture de type fréquencemètre mesure la fréquence de la corde en vibration entretenue, qui diffère de la fréquence propre de la corde d'au maximum 2 Hertz (mesures expérimentales réalisées¹). Cette différence est constante pour un capteur donné et son dispositif de mesure.

Le démarrage des oscillations dans le cas d'un capteur neuf ou non utilisé pendant une longue période peut être rendu difficile par défaut d'aimantation de la corde et des électro-aimants. Dans ce cas, la corde est excitée préalablement en amorti. Si toutefois une des bobines du capteur interrogé normalement en mode entretenu était défaillante, il serait toujours possible d'effectuer une mesure en mode amorti, afin de prolonger la durée d'utilisation du capteur.

2.1.3 Appareils avec ou sans corps d'épreuve

Les appareils à corde vibrante sont des appareils simples constitués d'une corde et de ses électro-aimants (extensomètres) et éventuellement d'un corps d'épreuve (mesure de la déformation d'une membrane sous l'effet de la variation du paramètre physique à suivre).

Ils se répartissent en deux grandes familles :

1- Les **extensomètres** constitués par la corde vibrante elle-même, avec un habillage pour fixer l'appareil dans le volume ou en surface de l'ouvrage et maintenir les électroaimants. La grandeur à mesurer (variation de longueur entre deux points) est mesurée directement.

Les extensomètres n'ont pas besoin d'être étalonnés du fait du principe de la mesure : le paramètre mesuré est la variation de distance entre les points de fixation de la corde, dont les caractéristiques sont connues par ailleurs. Le principe de la mesure utilisée à l'origine, en mettant à l'unisson les sons émis par la vibration de la corde du capteur et par la corde d'un comparateur acoustique, permettait de connaître directement l'allongement relatif de la corde du capteur (par lecture de la déformation imposée à la corde du comparateur acoustique par une molette graduée en microns/mètre). De nos jours, la mesure avec un poste de lecture électronique de type fréquencemètre nécessite l'emploi du coefficient extensométrique K_c pour relier les variations de fréquences avec l'allongement de la corde du capteur, sans que ce coefficient soit un coefficient d'étalonnage.

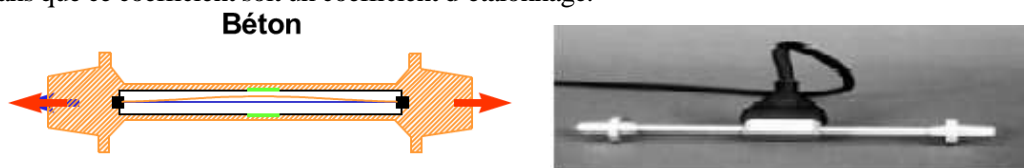


Figure 2 : Schéma et photographie d'un extensomètre

¹ Archives Coyne et Bellier

2- Les **appareils à corps d'épreuve** dans lesquels la corde vibrante mesure le déplacement d'un corps d'épreuve. Le phénomène à mesurer (pression interstitielle dans les sols et les roches, pression d'eau, pression exercée par les terres, par un tirant d'ancrage, par le poids d'une structure) déforme une membrane souple constituant le corps d'épreuve. Les capteurs de type cellule de mesure de pression interstitielle, de pression totale, cale dynamométrique, clinomètre, extensomètre en forage, ... appartiennent à cette seconde famille.

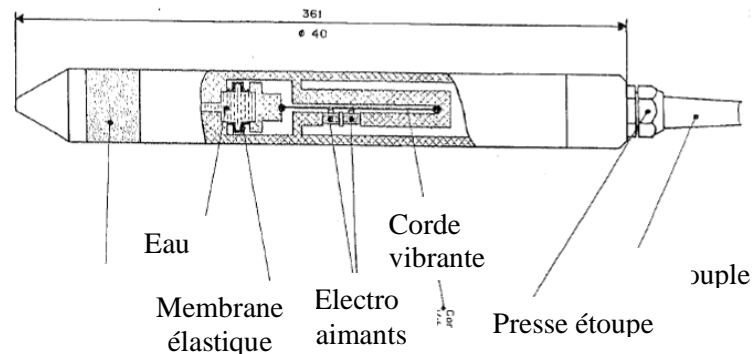


Figure 3 : Extrait de la notice de la cellule manométrique type CLI, Télémac. L'eau entre dans la chambre au travers de l'élément poreux (filtre) et déforme la membrane élastique à laquelle est attachée la corde vibrante.

Les appareils à corps d'épreuve sont étalonnés en laboratoire pour relier la déformation de la membrane aux variations de la grandeur à mesurer. La qualité de ces appareils dépend fortement de la qualité de la membrane, de son découplage avec l'enveloppe et de la qualité de cette enveloppe (étanchéité, minimisation des effets de la température).

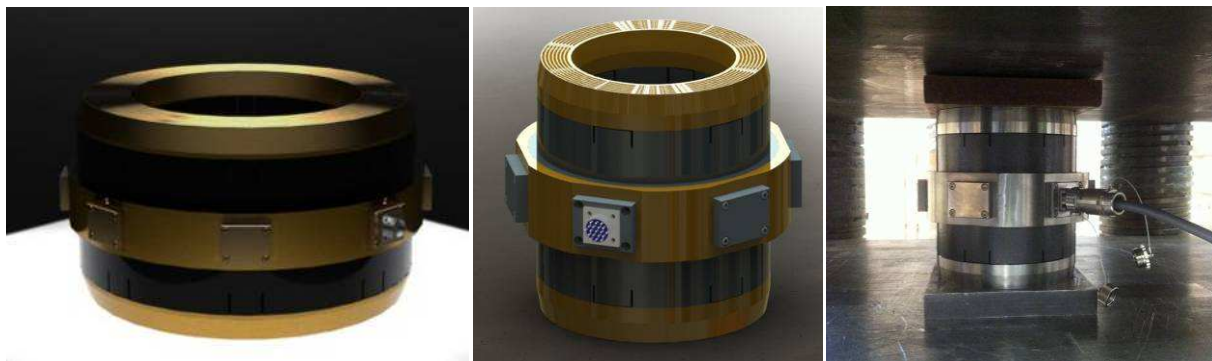


Figure 4 : Cales dynamométriques (Géo-instrumentation)

Le mode de fabrication diffère d'un fabricant à un autre : La corde peut être simplement sertie ou fixée par une liaison cône/cône ; la membrane peut être simplement encastrée ou usinée à soufflet ; le câble peut être plus ou moins solidement armé et blindé, et étanche. Toutes les méthodes de fabrication et de montage ne se valent pas. Seule l'expérience permet de trancher.

2.1.4 Mise en place des CCV

Les capteurs peuvent être noyés dans le béton (extensomètres), placés dans une chambre de mesure en forage (mesure de pression interstitielle), foncés dans des matériaux fins (mesure de pression interstitielle) ou entre béton/maçonnerie et une recharge aval (mesure de pression totale) ; ils sont donc rarement accessibles une fois installés. Les CCV sont des appareils ponctuels, par opposition à des appareils dits « intégrateurs » tels que, par exemple, les extensomètres à longue base ou les pendules. Ils donnent en effet des informations locales sur les déformations, les pressions, ... là où ils sont installés.

2.1.5 Prise en compte des effets thermiques

Les mesures extensométriques dans un ouvrage en béton reposent sur deux hypothèses : l'intégralité des déformations est transmise à la corde vibrante et la corde est en équilibre thermique avec le milieu.

Il est à noter que, dans la plage des températures de fonctionnement classique, la mesure brute, calculée à partir de la fréquence mesurée, n'est pas affectée par la température (les caractéristiques de la corde, et donc son comportement vibratoire, restent identiques).

La déformation brute est en fait une déformation apparente, qui intègre l'effet de la température sur la corde. La déformation réelle du béton de l'ouvrage, qui englobe les effets mécaniques, thermiques et hygrométriques, est donc calculée par la formule suivante :

$$\varepsilon_{\text{réel}} = \varepsilon_{\text{brut}} - \varepsilon_{\text{brut } 0} + \alpha_a (\theta - \theta_0)$$

avec α_a coefficient de dilatation de la corde $11,5 \times 10^{-6} \text{ m/}^\circ\text{C}$, $\varepsilon_{\text{brut}}$ la déformation brute au point considéré et θ la température associée au point de mesure. Les valeurs indicées 0 sont les valeurs initiales (début de la série de mesure). Il importe donc d'avoir une mesure de température associée au capteur. Cette correction thermique est propre à l'utilisation des CCV. La correction qui peut s'appliquer ensuite pour dissocier l'effet thermique des autres effets nécessite de faire des hypothèses relatives à l'effet de la température sur les déformations du béton et n'est pas propre à l'utilisation des CCV.

2.1.6 Ordres de grandeur

La corde est en acier à très haute limite élastique, communément de 0,25 mm de diamètre (250 μm) avec les caractéristiques suivantes : ρ_c , masse volumique 7850 kg/m^3 , E_c , module d'élasticité 206.10^9 N/m^2 et E_{ct} , résistance à la traction $2,85.10^9 \text{ N/m}^2$.

La résolution² est meilleure à basse fréquence, ce qui explique pourquoi les premiers capteurs avaient des longueurs comprises entre 150 et 250 mm avec des fréquences de mesure entre 400 et 800 Hertz mesurées à l'Hertz près. Typiquement, les cordes des extensomètres implantées dans la voûte de Kariba ont une longueur de 200 mm (Télémac M200), dans un béton dont les agrégats vont jusqu'à 150 mm.

Les fréquences sont d'autant plus élevées que la longueur de la corde est courte : fréquence de l'ordre de 1200 Hertz pour une longueur de corde de 110 mm et de l'ordre de 1500 Hertz pour 60 mm. La fréquence maximale est limitée par la traction maximale admissible par la corde, elle-même limitée par les constructeurs à environ 20% de la limite de la rupture à la traction. Plus la fréquence est élevée, plus la plage de variation de cette fréquence est faible.

Les gammes de mesure des principales familles de capteurs sont les suivantes :

Type d'appareil	Grandeur mesurée	Gamme	Résolution*
Extensomètres	Déformations	1000 à 4000 $\mu\text{m/m}$	10^{-7}
Appareils à corps d'épreuve			
Cellule de mesure de pression interstitielle	Pression interstitielle	0-0,5, 0-1, 0-2, 0-5 MPa (type CL1/EP1)	10^{-4}
Cellule de mesure de pression totale	Pression totale	0-7 MPa (type TPC)	10^{-4}
Cale dynamométrique	Traction dans les tirants d'ancrage	0-3,5, 0-5, 0-10, 0-15MN (type CV8 VW6-VW8).	10^{-4}

Tableau 1 : Gamme de mesure des principales familles de capteurs

* : Résolution sur l'étendue de mesure pour une mesure au $1/10^{\text{ème}}$ de Hertz près avec des écarts de linéarité de 0,1% de l'étendue de mesure (pour tenir compte de l'allongement de la corde dans la formule reliant l'allongement de la corde et la variation de fréquence). La précision³ varie entre 5 à 10 fois la résolution.

2.1.7 Points sensibles/pathologies

Les pathologies suivantes ont été observées :

- Pertes de capteurs dues à l'endommagement de câbles : le plus souvent à l'installation ou lors de travaux ultérieurs, quelquefois aussi lorsque les tassements différentiels dans la structure auscultée sont importants (au contact ouvrage en terre/ouvrage béton), Ces pertes n'ont rien de fatidiques.
- Pertes de capteurs dues à un défaut d'étanchéité (ou corrosion) au droit des connexions, en particulier connexion avec les boîtiers de jonction ou carte multiplexeurs (possibilité de récupération de la mesure en amont de cette connexion),

² Résolution : Plus petite valeur absolue pouvant être distinguée par le dispositif de mesure

³ Précision : La précision du capteur se définit par sa justesse (aptitude à donner des résultats non entachés d'erreur) et sa fidélité (aptitude à donner des résultats non entachés d'erreurs accidentelles, caractérisée par une faible dispersion des résultats), c'est l'aptitude à donner des mesures proches de la mesure réelle.

- Pertes de capteurs dues à la foudre : les CCV ne sont en eux-mêmes pas particulièrement sensibles à la foudre. Par contre, le dispositif de mesure des capteurs est alimenté par un courant électrique. A ce titre, et parce que les barrages qu'ils équipent sont situés dans des zones qui peuvent être frappées par la foudre, ils doivent être protégés contre ce phénomène, et les éviter par un tracé adéquat des câbles, en évitant des couplages dangereux, et par des parafoudres, qui doivent être régulièrement testés et remplacés si nécessaire,
- Pertes de capteurs par démagnétisation de(s) bobine(s) après un arrêt prolongé des mesures (possibilité de récupération en envoyant un choc électrique).

Pour éviter des pertes dont beaucoup ne sont que temporaires, on insistera sur l'importance d'une bonne conception du système d'auscultation - qui doit être pensé dans le cadre du projet de la structure à ausculter - et sur la qualité de la pose. On peut ainsi viser des taux de survie du matériel au-delà de 90% au bout de plusieurs dizaines d'années.

2.2 Performance des CCV

Les capteurs à corde vibrante sont des appareils robustes, à la technologie éprouvée, et qui bénéficie d'un retour d'expérience sur les barrages dépassant aujourd'hui les 50 ans. Leur haute résolution et leur excellente précision sont liées aux bonnes propriétés du principe de la mesure. Ils ne nécessitent pas de réétalonnage régulier. Ils ne nécessitent pas d'entretien/maintenance, contrairement par exemple aux appareils pneumatiques ou hydrauliques. Le signal de sortie en fréquence peut aisément être transmis par câble sur des longueurs importantes – à l'échelle des barrages – sans modification ou perturbation (ce qui n'est pas le cas des signaux en intensité).

Du fait que le capteur est mécanique, sans électronique associée, les facteurs pouvant entraîner une dérive de la mesure sont nettement réduits. Pour s'affranchir d'une possible dérive en début de vie, un cycle de vieillissement accéléré est effectué par certains fabricants en atelier qui stabilise le capteur et évite sa dérive. La quasi-absence de dérive du zéro résulte de l'observation de très nombreuses mesures in situ.

3. RETOURS D'EXPERIENCE

3.1 Champ d'application

Les missions d'assistance technique à la surveillance d'une cinquantaine de barrages de tous types, en France et à l'étranger, et d'ouvrages d'infrastructure (enceintes nucléaires, ponts) équipés de capteurs à corde vibrante nous permettent de tirer des enseignements en matière d'apport à l'auscultation des ouvrages, de durée de vie et vieillissement des capteurs, de dérive des capteurs, de redémarrage de capteurs ne répondant plus et d'intégration de capteurs anciens dans des dispositifs nouveaux.

Les caractéristiques principales de quelques barrages représentatifs sont présentées dans le tableau ci-avant. Ces barrages sont également équipés d'appareils d'auscultation autres que les CCV : pendules directs et inversés, repères topographiques, piézomètres, extensomètres en forage, ... qui n'ont pas été mentionnés ici. Les ouvrages ont été instrumentés par des CCV à différents moments de leur histoire : auscultation installée à la construction (Kariba, Michelbach, Puy Terrier, Touche Poupard), renforcement du dispositif d'auscultation insuffisant (Kariba, Gouffre d'Enfer, Bois Noirs, Arras), complément d'auscultation pour apprécier l'efficacité de travaux de confortement (Kariba, Joux, Esch-sur-Sûre, Gouffre d'Enfer, La Gimond).

RETOUR D'EXPERIENCE AUSCULTATION A CORDE VIBRANTE - Tractebel Engineering (France)-Coyne et Bellier

Nom du barrage	Lieu	type	hauteur (m)	année construction	CCV		année installation	% capteurs en service	Apport à l'auscultation	Retour d'expérience
					nbre	type				
Arras	Drôme	poids béton entrochement		1971 (mise en service)	5	EXT C60 Télémac	2006	100%		
Bois Noirs	Loire		42	1959-1962	7	CPI	1992	0%	Suivi de sous pressions dans le remblai et en fondation	CPI à bobine unique. Arrêt progressif entre 1992 et 2006. Foudre
Bollène (Usine)	Vaucluse	poids béton	52	1947-1952	9	CPI	2000	100%	Suivi des sous pressions sous le bloc usine/déchargeur	Installateur : SMC Terastic
Bollène (Ecluse)	Vaucluse			1947-1952	8	CLI Télémac	2002	100%		
Cotatay	Loire	maçonnerie	45	1899-1905	6	CPI	2004	100%	Suivi des sous-pression au contact maçonnerie/fondation	
Gimond	Loire	poids maçonnerie + remblai aval	19	1923-1925	6	CPI	2008	100%		Coût installation : 50 000€ (6 forages, 6 CPI, 2CPT) - 2008 CPT : pressions inférieures à celles attendues (pb de mise en place de la cellule ? mauvais contact maçonnerie/remblai?)
Gouffre d'Enfer	Loire	poids maçonnerie	56	1862-1866	18	CPI PW Rocctest CPI CLI Télémac	2010 1988	100% 100%	Renforcement du dispositif de suivi des sous pressions dans les profils centraux	
Joux	Rhône	poids maçonnerie + remblai aval	30	1901-1906 réhausse béton armé 1951-1954 recharge aval 1983	12	CPI CLI Télémac	1980	100%		- Absence de signal sur 2 CPT - Echec de récupération en 2002 d'une CPT - Lecture en mode amorti seulement sur les clinomètres 17 CCV installés sur les tirants en 1952/1953 + 3 en 1966 ont bien fonctionné pendant 30 ans.
Michelbach	Haut-Rhin	terre	29	mise en eau 1982	54	CPI CLI Télémac	1980	89%		10 cellules récupérées en 2001 Inversion de câblage entre deux cellules/multiplexeur
Pas de la Mule	Haut-Vienne	poids maçonnerie	8	1906	10	CPI EP1 Géoinstrumentation	2010	100%	Suivi des sous pressions dans la maçonnerie et au contact maçonnerie/fondation	Coût installation : 57 000€ - 2010 Installateur Géotec sous supervision Géoinstrumentation
Puy-Terrier	Deux-Sèvres	terre	31	1982	14	CPI CLI Télémac	1982	100%	Suivi des sous pressions dans l'ouvrage et sa fondation	
Touche Poupard	Deux-Sèvres	BCR	36	1994	12	CPI CLI Télémac	1994	100%	Suivi des sous-pressions en fondation	
Esch-sur-Sûre	Luxembourg	voûte	50	1956-1958	6	CPI CLI Télémac cales dyn. DTA Télémac	1985 1992-1993	85% 85%		- piézométrie sous la voûte - contrôle de la tension des tirants actifs dans la pyramide de confortement et dans la culée
					24	cales dyn. CV8 Télémac	1992-1993	65%		
					263 voûte	EXT M200 Télémac	1958-59	80%	Suivi des contraintes dans le béton à la mise en eau	
					62 butons	EXT	1962	25%	Suivi des déformations du béton des butons de l'appui sud	Défaillance expliquée par corrosion derrière boîte jonction. (ICOLD 1985)
Kariba	Zambie/ Zimbabwe	voûte	128	1958-1959	10	CPI CLI Télémac	1994	100%	Suivi de la piézométrie en fond de vallée	
					18	EXT M200 Télémac	1958	83%	Pesage direct des contraintes mesurées indirectement par les déformations	"Special Test Laboratory"

Tableau 2 : Retour d'expérience sur l'auscultation à corde vibrante

Abréviations : EXT : extensomètre ; CPI : cellule de mesure de pression interstitielle ; CPT : cellule de mesure de pression totale ; cale dyn. : Cale dynamométrique ; BCR : béton compacté au rouleau ; ICOLD : International Commission on Large Dams.

Les barrages de l'échantillon sont de taille et de types divers, et leur équipement en CCV est plus ou moins fourni. Le barrage voûte de Kariba (Zambie/Zimbabwe), avec 128 m de hauteur et plus de 250 extensomètres, est le plus grand et le plus instrumenté. Les deux barrages en terre (Puy-Terrier, Michelbach) d'une trentaine de mètres de hauteur comportent entre une quinzaine et une cinquantaine de capteurs. Les barrages poids, de 8 à 56 m de hauteur, comportent entre 6 et 30 CCV. Les deux barrages poids en maçonnerie (Joux et La Gimond) de 20 à 30 m de hauteur qui ont été confortés par une recharge aval comportent de 10 à 20 CCV.

Les types des capteurs installés sont divers : extensomètres, cellules de mesure de pression interstitielle, cellules de mesure de pression totale, mesure de la traction dans les tirants précontraints, clinomètres. Les capteurs sont majoritairement de fabrication GI2M. Les installateurs sont divers : Geo-instrumentation, Geotec, ME2I, SAM, SNC Terastic, Télémac, ...

3.2 Apport des capteurs à corde vibrante dans quelques cas d'application

3.2.1 Barrage de Kariba (Zambie-Zimbabwe)

Le barrage de Kariba est une voûte construite en 1958-59 sur le Zambèze, de 128 m de haut et de 617 m de longueur en crête. Il crée le plus grand lac artificiel du monde, d'une capacité de 181 km³, mis en eau entre 1958 et 1963. Le barrage est aujourd'hui exploité par la Zambezi River Authority, organisme binational créé en 1987. Deux usines hydroélectriques d'une capacité totale de 750 + 720 MW sont gérées respectivement par ZPC (Zimbabwe) en rive droite (sud) et ZESCO (Zambie) en rive gauche (nord).

263 extensomètres Télémac M200 ont été noyés dans le béton de la voûte, entre mai 1958 et juin 1959. Ils sont généralement disposés par groupes de 5 en 3 positions dans l'épaisseur de la voûte, à un mètre du parement amont, à un mètre du parement aval et à mi-épaisseur. Chaque groupe comporte 5 extensomètres à corde vibrante : un horizontal (tangential), deux inclinés (à 45° et 135°), un vertical, et un extensomètre témoin.

Les extensomètres témoins, ou « correcteurs » (no-stress strainmeters en anglais) sont mis en place dans un bloc de béton mécaniquement dissocié de leur environnement. Ils sont donc placés dans des conditions de température et d'hygrométrie identiques à celles des autres capteurs du groupe tout en étant isolés du champ de contraintes et de déformations de la voûte. Ils permettent de corriger les mesures des autres capteurs des effets de la température et de l'hygrométrie.

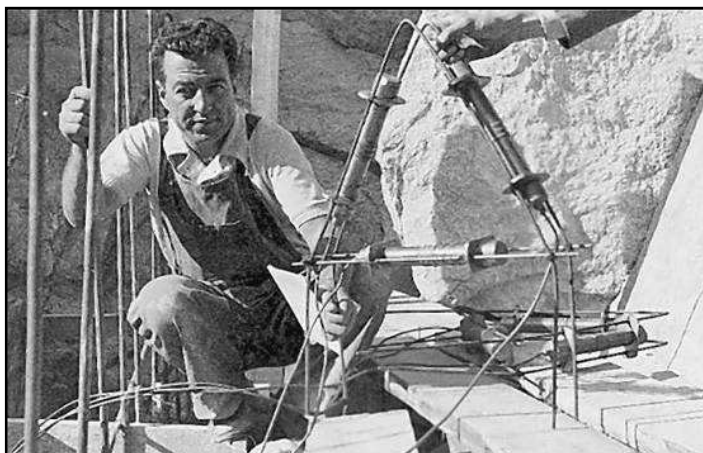


Figure 5 : Extensomètres sur leur bâti d'installation

En outre, une série de 12 blocs témoins équipés de capteurs homologues de 6 capteurs choisis dans le barrage et de leurs correcteurs, ainsi que de capteurs perpendiculaires à la direction principale de chargement, ont été confectionnés avec le même béton, pour être suivis en laboratoire ; dont 6 poutres de 1,80 m x 0,6 m x 0,6 m chargées par vérins plats pour remonter des déformations aux contraintes. C'est le « Special Test ».

Ce dispositif a notamment permis de vérifier à la première mise en eau non seulement la distribution des contraintes dans la voûte (formes des isostatiques), mais aussi leurs niveaux absolus. Les mesures ont assez vite mis en évidence des dérives dans le temps, plus marquées sur les extensomètres libres (correcteurs et

appareils placés verticalement) que sur les appareils chargés : phénomène de gonflement du béton, qu'il a fallu des années pour élucider (alcali-réaction) et qui reste encore aujourd'hui un point d'attention majeur.



Figure 6 : Photographies du laboratoire du Special Test

Les extensomètres de Kariba, toujours régulièrement exploités (sur la base de 2 séries de mesures par an, désormais), ont permis d'apprécier l'influence du niveau de contrainte sur le taux de gonflement du béton. En effet, ce taux est le plus élevé pour les extensomètres témoins, dans le béton sans contraintes ; il est moindre pour les extensomètres verticaux, et même négatif (témoignant d'un certain fluage) pour les extensomètres horizontaux dans la direction des plus fortes compressions. Le phénomène de gonflement est inhibé pour des contraintes supérieures à 3-4 MPa et accentué dans les zones en traction [13]. La modélisation par éléments finis, avec une loi rhéologique ajustée aux observations, aide à y voir clair [10].

Le programme ambitieux du *Special Test* s'est heurté à moult difficultés de maintenance du Laboratoire (resté en rive gauche alors que l'exploitation du barrage était conduite depuis la rive droite), et à l'arrêt de son humidification contrôlée. Malgré de gros efforts de remise en ordre, un déménagement vers un site souterrain en rive droite et la rénovation des appareillages, l'expérimentation a été interrompue et le *Special Test* se visite aujourd'hui comme un musée.

En 1962, à l'occasion des travaux de reprise en sous-œuvre en rive droite, des câbles ont été endommagés par des forages, réduisant le nombre d'extenso dans la voûte à 253 ; 214 sont encore pleinement opérationnels aujourd'hui, soit 80 % des appareils d'origine. Cette même année, 62 autres extensomètres répartis en 18 groupes ont été installés dans les butons souterrains de la rive droite. Seuls 15 d'entre eux fonctionnent encore aujourd'hui. Ce taux élevé de défaillance (75%) a pu être attribué [2] à la corrosion à l'arrière des boîtes de jonction ; les conditions difficiles du chantier de reprise en sous-œuvre ont dû jouer également. Une dizaine d'autres CCV ont été installés à Kariba, en 1994 : dix piézomètres de fondation (cellules CL1).

Le poste d'interrogation des capteurs a évolué au cours du temps : poste d'écoute de 1958 à 1983, puis fréquencemètre (poste PC6/PFC10 à fréquence entretenue).

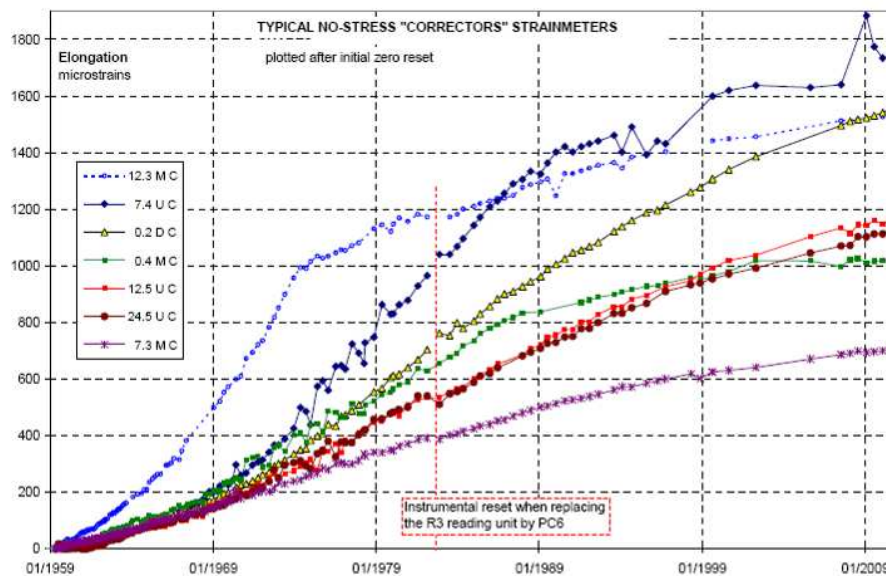


Figure 7 : Evolution de quelques extensomètres témoins (correcteurs) typiques

3.2.2 Barrage d'Esch sur-Sûre (Luxembourg)

C'est une voûte mince construite de 1956 à 1958, et mise en eau en 1960, dans une vallée large à fond plat des Ardennes. Le barrage de 50 m de haut et de 168 m de longueur en crête entre culées crée une retenue de 60 hm³. Il est à buts multiples : réserve d'eau potable, production d'énergie électrique (usine au pied aval de 10 MW), régulation des crues et tourisme nautique.

Le contraste est grand avec le dispositif d'auscultation prévu et installé à la construction à Kariba : à Esch, le dispositif d'origine comportait essentiellement des visées topographiques, et la surveillance détaillée des fuites en pied, sans aucun extensomètre dans le béton. Il a été renforcé dans les années quatre-vingt pour compléter la connaissance de la piézométrie en fondation (piézomètres à chambre équipés de CCV de type CL1), et surveiller les déformations du bas de la voûte ainsi que la stabilité des deux culées (clinomètre en clé à mi-hauteur du bâtiment de l'usine, pendules directs et inversés en console de clé et en haut des rives), et complété par des thermomètres dans le béton.

Le dispositif a ensuite évolué avec les travaux de confortement engagés en 1991 (visant à traiter des fuites récurrentes en pied), et poursuivis les années suivantes pour renforcer l'appui rive droite [11].

En 1991, le pied amont du barrage a été muni d'un dispositif d'étanchéité retourné vers l'amont (via un joint souple) sur une plinthe en béton de fibre ancrée au rocher, pour étancher la zone charnière critique. Trois extensomètres en forage mesurent les déplacements entre la plinthe et le pied amont de la voûte (type Distofor de Télémac, à induction). Ces travaux ont révélé l'insuffisance de la fondation vers le haut de la rive droite et ont été suivis en 1992-1993 par des travaux de renforcement de cet appui : couverture par une dalle de béton armé construite en marches d'escalier (la « pyramide ») largement drainée, ancrée par tirants actifs visibles ; avec une série de plus gros tirants, cachés sous la route de crête, pour lester la culée.

Trois des 15 tirants de 400 t subverticaux (45 m) sous la route ont été équipés par des cales dynamométriques de type CV8. Ces cales sont constituées de 8 cordes vibrantes en parallèle à 45° dans l'anneau. Six des 67 tirants de 90 t d'ancrage des emmarchements (de type 7T15 gainés graissés) ont été équipés et sont auscultés de façon continue par des cales dynamométriques de type DTA de Télémac. Deux des 5 tirants d'essai (surnuméraires par rapport aux besoins estimés de confinement du massif rocheux) sont équipés et 4 des 62 tirants courants. Le coussinet hydraulique est rempli d'huile. La pression d'huile est mesurée par corde vibrante, la température est mesurée à partir de la mesure de la résistance du bobinage de l'électro-aimant.



*Figure 8 : Barrage d'Esch-sur-Sûre (Luxembourg). Reinforcement de la rive droite (1992-1993)
Repérage des 6 tirants auscultés (cercles jaunes)*

Sur les vingt ans de mesures accumulées depuis l'achèvement des travaux de confortement, les mesures des cales auscultant 3 des 15 tirants subverticaux dans la culée ne détectent aucune perte brutale ou progressive de tension. Les compressions mesurées suivent des variations saisonnières (d'origine thermique) avec 10 à 15 tonnes d'amplitude. Les forces totales moyennes sont en accord avec la tension des câbles. Les constats sont identiques pour les mesures des cales des tirants d'épinglage et de confinement du rocher sous la « pyramide ». L'analyse des mesures des cales dynamométriques permet donc de conclure à la stabilité de la charge des tirants.

Les capteurs DTA ont été remagnétisés et la centrale d'acquisition remplacée par Télémac en 2003.

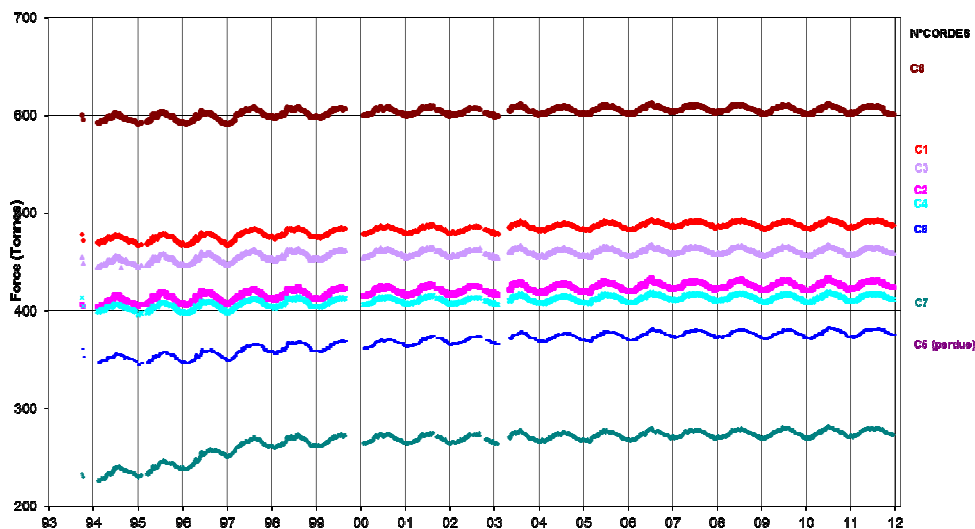


Figure 9 : Evolution des charges élémentaires des cales CV8. Noter la reprise des mesures en 2003.

3.3 Retour d'expérience

Au-delà des exemples présentés ci-avant, le retour d'expérience que l'on peut tirer à partir de l'échantillon des barrages ou ouvrages surveillés par Tractebel Engineering – Coyne et Bellier, est le suivant :

3.3.1 Durabilité

Les CCV les plus anciens de l'échantillon ont été implantés dans la voûte de Kariba en 1958. 55 ans après leur installation, 80% sont encore opérationnels.

90 à 100% des CCV installés il y a plus de 30 ans à Puy-Terrier, Joux et Michelbach sont opérationnels.

47% des CCV de 20-30 ans d'âge sont opérationnels (Gouffre d'Enfer, Joux, Puy-Terrier, butons 0 Kariba).

67% des CCV de 10 à 20 ans d'âge sont opérationnels (Bois Noirs, Touche Poupard, Esch).

La totalité des CCV de moins de 10 ans sont opérationnels (Arras, Bollène, Gimond, Gouffre d'Enfer, Pas de la Mule).

3.3.2 Classement des causes de défaillance

Les causes de défaillance les plus fréquentes, classées par ordre d'importance décroissante, sont les suivantes : foudre (Bois Noirs), endommagement de câbles pendant des travaux (Kariba, Esch), endommagement des connections (Kariba, butons de l'appui sud).

3.3.3 Récupération / prolongement de la durée de vie

Certains capteurs à corde vibrante, qui ne répondaient plus ou donnaient des valeurs aberrantes, ont pu être récupérés par : remagnétisation des bobines, passage en mode amorti après échec mode entretenu, changement de la centrale d'acquisition.

Par ailleurs, des extensomètres ont pu être considérés comme perdus car les déformations différées du béton mesurées sortaient de la gamme de mesure du capteur : la corde était détendue. A l'occasion d'un test périodique de mise en charge, les déformations ont été ramenées dans la plage mesurable (corde retendue) et ont pu être à nouveau mesurées pendant le test.

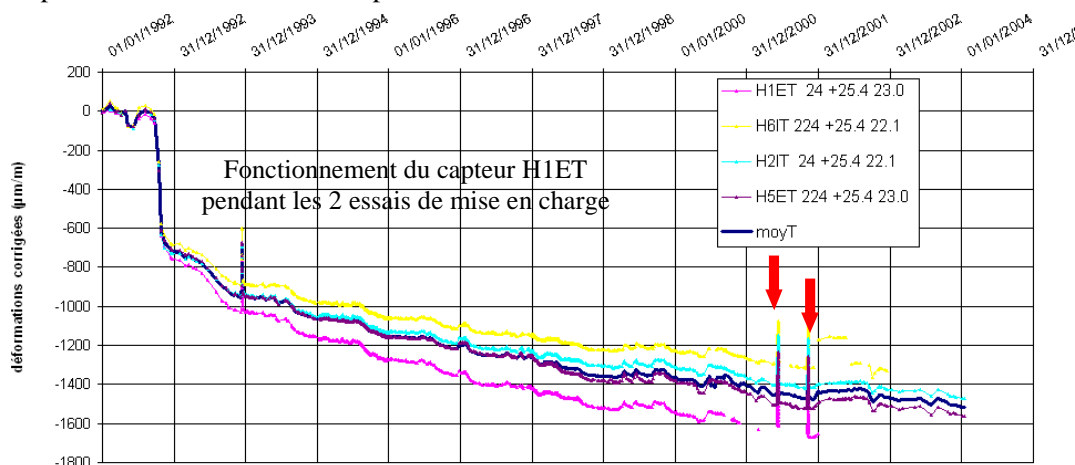


Figure 10 : Déformations tangentielles (mesures extensométriques)

3.3.4 Détection de phénomènes micrométriques

L'extrême sensibilité des capteurs et leur très haute résolution leur peuvent permettre de détecter des phénomènes micrométriques tels que l'apparition de fissures. Ceci est effectué par une analyse détaillée des signaux, même de très faible amplitude.

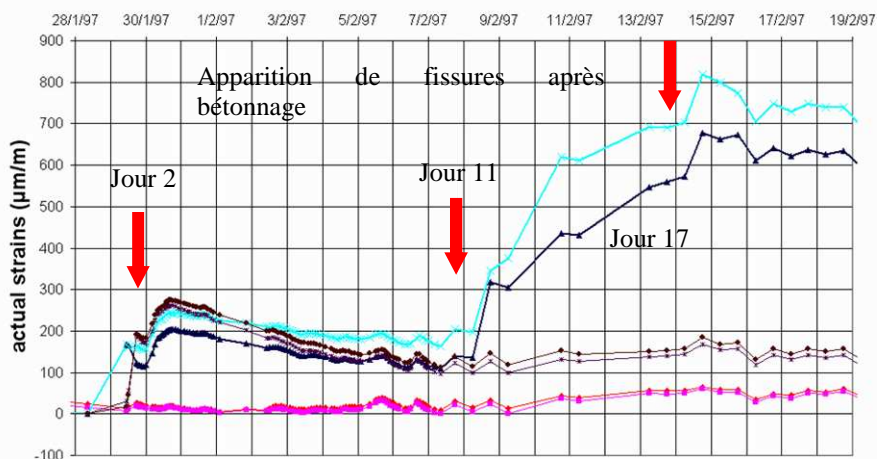


Figure 11 : Déformations tangentielles (mesures extensométriques) – détection de l'apparition de fissures

3.3.5 Détection de phénomènes évolutifs à long terme

La robustesse des capteurs et leur stabilité dans le temps les rend particulièrement aptes à détecter des phénomènes évolutifs sur le long terme: gonflement du béton, augmentation lente de la pression interstitielle dans les digues en terre, déformations différées du béton des enceintes de confinement des centrales nucléaires. Ceci est primordial pour l'auscultation de barrages et plus généralement d'ouvrages dont la durée de vie dépasse largement 50 ans. Dans le cas de Kariba, la grande richesse du dispositif a permis d'accumuler pendant des dizaines d'années des mesures (extensomètres témoins de la voûte et du laboratoire d'essai) qui ont été exploitées ensuite pour analyser le phénomène de gonflement du béton de la voûte. Ceci plaide absolument pour la maintenance des dispositifs d'auscultation sur le long terme, qui permet de mieux exploiter les signaux faibles, avec les méthodes adéquates de traitement.

3.3.6 Evolutivité du dispositif

Les dispositifs d'auscultation à capteurs à corde vibrante équipant les barrages de l'échantillon ont été tout à fait aptes à intégrer les évolutions techniques du matériel. Lorsque le barrage était déjà équipé de capteurs à corde vibrante et d'un dispositif d'acquisition automatique des mesures, les nouveaux capteurs à corde vibrante, de même type ou de types plus récents, ont été raccordés à l'installation existante. Les postes de lecture d'origine, ou les centrales d'acquisition automatique des données, ont été remplacés par des modèles plus récents (Kariba, Esch-sur-Sûre) sans incidence sur l'exploitation des données.

4. ASPECTS ECONOMIQUES

4.1 Décomposition type des coûts

Les coûts d'un dispositif d'auscultation à corde vibrante peuvent se décomposer comme suit :

- Coût de la fourniture et de la pose du matériel : capteurs, câbles, boîtes de jonction, parafoudre, poste de lecture, centrale d'acquisition automatisée des mesures, ...
- Coûts d'exploitation : test et remplacement des parafoudres (propre aux CCV), entretien/maintenance du poste de lecture ou de la centrale d'acquisition (non propre aux CCV).

On constate de manière générale, sans que ces constats soient propres aux CCV, que:

- les coûts de la fourniture des capteurs sont inférieurs au coût des travaux nécessaires à leur installation, et ne représentent qu'une part faible de la fourniture d'ensemble du matériel. Or c'est l'outil de recueil de l'information. Economiser sur le capteur, impossible à remplacer la plupart du temps, va à l'encontre de la finalité de l'auscultation
- le coût d'exploitation du dispositif et d'interprétation des mesures d'auscultation est inférieur au coût de surveillance de l'ouvrage.

Le coût de l'auscultation (installation, exploitation, interprétation, maintenance) représente une très faible part (quelques pourcents) du coût du barrage.

4.2 Ordre de grandeur de prix

L'ordre de grandeur des prix constatés pour les installations récentes est le suivant :

- cellule de mesure de pression interstitielle à CCV : 2000 euros (type EP1/Pas de la Mule 2010)
3800 euros (type EP1 / Gimond 2008)
- cellule de mesure de pression totale à CCV : 3200 euros (type EPC/Gimond)
- extensomètre à CCV : 5500 euros (type M200)
- cales dynamométriques à CCV : 5500 euros (type CV8, VW6 350t)
- clinomètre à corde vibrante : 10 000 euros (type MP100)
- multiplexeur : 4000/7000 euros (Pas de la Mule, Gimond)
- câbles : 5 euros/ml
- poste de lecture : 4500/5200 euros (Pas de la Mule, Gimond)

Pour des capteurs installés dans la masse des ouvrages ou en fondation, le coût de la pose du matériel peut comprendre des coûts de forages, plus ou moins élevés en fonction des conditions de réalisation et du linéaire. Ainsi, le coût des capteurs à corde vibrante ne représente classiquement qu'une part minoritaire du coût total d'installation du dispositif. Par exemple, sur une installation récente, la fourniture et la pose des capteurs représentent moins de 30% du coût total de l'installation.

Les capteurs fonctionnant en régime entretenu présentent un coût de fabrication 2 à 3 fois supérieur à celui de capteurs simple fonctionnant uniquement en mode amorti. Les coûts de maintenance des CCV sont faibles.

5. CONCLUSION

Les coûts des capteurs CCV sont à examiner dans leur globalité et sur le long terme. Etant le plus souvent non aisément remplaçables sinon irremplaçables (leur remplacement nécessite par exemple de nouveaux forages), le prix de la défaillance d'un capteur est largement supérieur au seul coût du capteur de remplacement. Le capteur est en bout de chaîne l'outil qui recueille l'information, laquelle va permettre, après traitement de juger de l'évolution de la santé de la structure et donc de sa sécurité. La notion des économies que l'on peut faire est à juger dans cette perspective.

Compte tenu de la part relativement faible du prix des capteurs dans le coût total de l'installation et des coûts et du coût de la défaillance, il importe donc de choisir parmi les capteurs du marché celui qui présente les meilleures garanties de durabilité, même si son coût est plus élevé. Dans ces conditions, il n'est pas de pratique courante d'installer des capteurs surnuméraires en prenant en compte un taux de défaillance.

Au moment du choix des capteurs à corde vibrante, il importe particulièrement de demander les références des capteurs : nombre de capteurs installés, années d'installation, taux de défaillance associés et causes de défaillance.

Au-delà du soin à apporter au câblage et au repérage des capteurs à l'installation, ce qui n'est pas propre aux capteurs à corde vibrante, le personnel qui met en place les CCV doit être qualifié/agréé par le fournisseur et suivre strictement les procédures de pose dictées par le fournisseur, notamment en ce qui concerne la saturation des filtres des cellules de pression interstitielle et la mesure initiale in situ.

L'arrêt des mesures n'est dans la plus grande majorité des cas pas liée à une défaillance du capteur, mais à un déficit de maintenance du maître d'ouvrage. Les contrôles réguliers par les fournisseurs/installateurs compétents est un gage de longévité.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Thomas Bourgoïn, Odile Clave, Gaëtan Dautois, Géraldine Milesi (Tractebel Engineering (France)-Coyné et Bellier) et Isabelle Lamarque.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Bellier J. (1956). *Applications de l'extensométrie acoustique aux travaux publics*, Annales ITBTP, Essais et Mesures 36.
- [2] Bordes J.L., Debreuille P.J. (1985). *Some facts about long term reliability of vibrating wire instruments*. National Research Council, Transportation Research Board, Symposium on Reliability of Geotechnical Instrumentation, Washington.
- [3] Bordes J.L. (1990). *Les aspects économiques de l'instrumentation*. Surveillance et auscultation des sites naturels et des ouvrages, journées de formation continue, E.N.P.C.
- [4] Bordes J.L. (2011). *Barrages et essais en vraie grandeur : auscultation et surveillance*. Documents pour l'histoire des techniques, n°20, 2, pp. 97-106.
- [5] Coyne A. (1937). *On the construction of water dams*, The Structural Engineer.
- [6] Coyne A. (1938). Quelques résultats d'auscultation sonore sur les ouvrages en béton, béton armé ou métal, Annales ITBTP, juillet et août 1938.
- [7] Davidenkoff N. (1934) *The vibrating wire method of measuring deformations*, Proceedings ASTM, vol. 34, Part II.
- [8] Diruy M., (1980). *Les Témoins sonores, bilan de 5 années de mesure sur le pont de Condren*. F.A.E.R. 1.65.51. Rapport du Département des structures et ouvrages d'art, Etude générale des procédés de mesure utilisés dans les laboratoires, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [9] Dunicliff J., (1988). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*, Mc Graw Hill, New York, 1988.
- [10] Goguel B., Mpala A.S., (1992). *Monitoring and maintenance at Kariba dam*, Water Power & Dam Construction
- [11] Goguel B., (2003). Rénovations à Esch-sur-Sûre, compléments au rapport Q.82 R.44, CIGB, Montréal, discussion thème 3.
- [12] Goguel B., Gurukumba K., (2007). Kariba Dam case history, Workshop on Chemical Expansion of Concrete in Dams and HEPP, ICOLD-SPANCOLD-HP&D, Granada, Spain.
- [13] Ozanam O., Goguel B., Gurukumba K., (1997). Effet du niveau d'exploitation de la retenue sur le taux de gonflement du béton : modélisation dans le cas de Kariba, CIGB, Florence, Q.74-9.
- [14] Santa Clara J.M.A., Izzett, I.P., (1985). *The Dam and foundation monitoring system at Kariba*, CIGB, Quinzième Congrès des Grands Barrages, Lausanne, Q.56 R.54.
- [15] Télémac, Catalogues des appareils, manuel d'utilisation de la cellule manométrique de type CL1.