
Barrages et essais en vraie grandeur : auscultation et surveillance

Dams and large scale experiments : monitoring and control

Jean-Louis Bordes



Édition électronique

URL : <http://dht.revues.org/1739>

ISSN : 1775-4194

Éditeur :

Centre d'histoire des techniques et de
l'environnement du Cnam (CDHTE-Cnam),
Société des élèves du CDHTE-Cnam

Édition imprimée

Date de publication : 1 décembre 2011

Pagination : 97-106

ISBN : 978-2-9530779-7-1

ISSN : 0417-8726

Référence électronique

Jean-Louis Bordes, « Barrages et essais en vraie grandeur : auscultation et surveillance », *Documents pour l'histoire des techniques* [En ligne], 20 | 2e semestre 2011, mis en ligne le 17 septembre 2012, consulté le 30 septembre 2016. URL : <http://dht.revues.org/1739>

Ce document est un fac-similé de l'édition imprimée.

© Tous droits réservés

Barrages et essais en vraie grandeur : auscultation et surveillance

Jean-Louis Bordes

Centrale Histoire

RÉSUMÉ

La conception et la réalisation des barrages relèvent de la méthode expérimentale compte tenu de la difficulté à modéliser le corps de l'ouvrage et sa fondation. Le site et la structure qui y est implantée, constituent un laboratoire. La surveillance du comportement pour contrôler la sécurité et améliorer l'économie, s'appuie sur l'observation et l'auscultation par la mesure. On retrace dans cet article, l'histoire de la constitution des outils nécessaires à l'obtention d'une mesure cohérente. Les différents acteurs sont considérés ainsi que la dimension internationale des échanges et transferts technologiques.

Résumés et mots clés en anglais sont regroupés en fin de volume, accompagnés des mots clés français

L'auscultation des structures dans une démarche très proche de celle du médecin associant, l'observation des phénomènes et la mesure de grandeurs liées à ceux-ci, participe de la méthode expérimentale. Par méthode expérimentale, on entend une démarche rationnelle partant de l'observation des faits et qui s'appuyant sur des modèles théoriques ou lois physiques peu à peu élaborés au cours d'une longue histoire de l'observation des comportements des matériaux et des structures, permet d'avancer dans une connaissance de plus en plus poussée de l'état de ces structures et de leur niveau de sécurité, pour les concevoir de façon sûre et économique. C'est la méthode inductive, méthode pratique et efficace qui s'oppose à la méthode déductive qui procède de propositions ou principes posés *a priori*.

La méthode expérimentale s'exerce dans le champ d'un espace que l'on appelle le laboratoire. Le laboratoire comprend non seulement les lieux fermés où sont étudiés des échantillons ou des modèles mécaniques ou hydrauliques, mais encore l'ensemble du site de l'ouvrage avant sa réalisation lors des reconnaissances de terrains avec les essais *in situ* et l'étude géologique et géotechnique, ensuite

le chantier de construction de l'ouvrage et enfin l'ouvrage lui-même lors de sa première mise en eau et ensuite pendant son exploitation. On constate ainsi toute l'importance de la dimension temporelle. La notion de laboratoire à évolué dans le temps comme nous l'avons montré dans un article consacré à l'histoire de la géotechnique¹.

Le site du barrage constitue un laboratoire et le barrage constitue en permanence l'objet d'un essai en vraie grandeur. Dans un article récent, nous avons développé les différents aspects de la méthode expérimentale appliquée à la conception, la construction et l'exploitation des barrages². Il est important de rappeler qu'un barrage, est par nature très inséré dans l'environnement naturel. Sa conception et sa réalisation font intervenir des connaissances de la quasi-totalité des domaines techniques des sciences de la nature et de la

1 Jean-Louis Bordes, « Regard sur le passé de la géotechnique », *Revue française de Géotechnique*, n° 90, 1^{er} trimestre 2000, p 13-26.

2 Jean-Louis Bordes, « Barrage et méthode expérimentale », dans *Edifices et artifices*, actes du 1^{er} congrès francophone de l'histoire de la construction – Paris, juin 2008, Paris, Picard, 2010, p.303-311.

construction. Son impact sociétal par ailleurs requiert l'apport des sciences humaines. Plus que compliqué, c'est un ouvrage complexe à cause de l'incertitude qui demeure quant à la valeur des paramètres physiques à prendre en compte dans son étude, la géométrie de leur espace, ainsi qu'en ce qui concerne les lois qui régissent leur relation. C'est aussi un ouvrage exceptionnel non seulement dans ses dimensions mais peut-être surtout par sa durée. Il en résulte que l'observation du comportement d'un barrage est une exigence pour assurer sa sécurité

Nous nous proposons dans le présent article de partir de l'état actuel des pratiques et de retracer l'histoire des appareils de mesure utilisés pour l'auscultation des barrages et celle de leur mise en œuvre et de leur exploitation dans des procédures de plus en plus rigoureuses, dans le cadre de la surveillance des barrages³.

Auscultation, surveillance et sécurité⁴

De nos jours, la surveillance des barrages est la méthode qui permet d'assurer la sécurité des barrages en service. Elle repose sur trois concepts généraux : une conception adéquate pour éviter le pire, une réflexion préalable sur les conséquences et l'organisation des secours au cas où le pire arriverait, une surveillance constante pour le voir arriver et prendre, en temps utile, les mesures correctives qui s'imposent.

Un barrage ne permet pas d'essais de mise en charge préalable. Aussi la surveillance d'un barrage commence dès le début de la mise en eau (et même pendant la construction) qui constitue donc un essai en vraie grandeur. Celle-ci doit répondre à une procédure très stricte qui inclut une maîtrise du plan d'eau. Les statistiques de rupture montrent qu'il s'agit d'une des phases les plus critiques de la vie d'un barrage. Elle se poursuit pendant toute son exploitation.

Elle doit même être renforcée lors des phases d'exploitation exceptionnelle. En effet, il est impossible de procéder, comme on le fait sur un pont, à un essai préalable à la mise en service sous charge maximale. L'effort de dimensionnement n'est normalement atteint qu'à l'occasion de la crue millénale ou décennale, sans compter les effets des tremblements de terre ...

La surveillance est assurée par l'exploitant du barrage. Elle prend deux formes complémentaires : d'une part, une surveillance visuelle qui se traduit par

des tournées d'inspections régulières et l'œil d'un technicien averti est un des meilleurs capteurs dont dispose l'homme ; d'autre part, une auscultation du barrage avec le relevé périodique d'appareils de mesures. L'auscultation, dont la mise en œuvre est réglementairement obligatoire pour les barrages intéressant la sécurité publique, répond elle-même à un double objectif : à la fois détecter une évolution rapide d'un paramètre qui pourrait être représentatif d'un comportement anormal, précurseur ou signe d'un défaut structurel nécessitant une action à court, voire à très court terme (une réparation, une baisse du plan d'eau, une alerte) et vérifier que le comportement du barrage est suffisamment stable dans le temps et conforme aux prévisions. L'auscultation et le traitement des données sont donc organisés de façon à détecter immédiatement les anomalies, par exemple par des seuils de vraisemblance de résultats.

Il est matériellement impossible de suivre, en tout point de la structure et de sa fondation, tous les paramètres physiques à tout instant. Le dispositif d'auscultation doit donc être conçu de manière à ne suivre que les paramètres significatifs du comportement en un nombre limité de points et selon des périodicités fixées à l'avance.

Les paramètres généralement retenus sont :

- des déplacements absolus ou relatifs
- des déformations⁵ locales, éventuellement traduites en contraintes
- des pressions (totales dans un remblai, sous-pressions ou pressions interstitielles)
- des débits de drainage ou de fuite.

On mesure parfois également des températures. Bien entendu, chaque résultat de mesure est associé à une date et un niveau de retenue (ce qui exige également un appareil de mesure de ce niveau). Les appareils de mesures doivent être simples d'emploi, suffisamment fiables, précis et aptes à fonctionner pendant des dizaines d'années dans des conditions difficiles du fait de l'humidité, de la foudre.

Tel est très sommairement l'état de l'art dans ce domaine. Celui-ci a évolué en fonction de l'histoire des techniques et du rôle de plus en plus grand de la réglementation édictée par la puissance publique pour assurer la sécurité de structures mettant en jeu les personnes et les biens. Celle-ci est élaborée à partir des retours d'expérience du comportement des structures auxquels participent les maîtres d'ouvrages ou propriétaires, les maîtres d'œuvres ou concepteurs, les entrepreneurs et les fournisseurs de matériels de mesure.

³ Nous ne traiterons pas de l'histoire des mesures et du matériel liés aux phénomènes sismiques, développés particulièrement ces quarante dernières années.

⁴ Patrick Le Delliou, Les barrages, conception et maintenance, Lyon, ENTP, 2007, chapitre 13, « Auscultation ».

⁵ Déplacement relatif entre deux points rapporté à leur distance

Quelques étapes de l'évolution des pratiques et du matériel de mesure

Dès le début de la rédaction des premiers traités concernant la réalisation des ouvrages hydrauliques, aux XVII^e et XVIII^e siècles, les auteurs comme Bélidor⁶ se sont appuyés sur l'observation visuelle du comportement des ouvrages pour établir des règles de dimensionnement plus ou moins justifiées. Cette méthode a précédé toute opération de mesure et participait à la constitution de la mémoire des bâtisseurs de barrage.

Par la suite, la mise au point d'appareils de mesure et des procédures d'emploi et d'interprétation résulta de la nécessité de répondre aux questions des concepteurs et des constructeurs pour comprendre le comportement des ouvrages et assurer leur sécurité à tout moment de leur existence. Outre quelques mesures de débit de fuite à travers les ouvrages ce sont les mesures de déplacement par des moyens topographiques qui furent les premières à être réalisées. En 1852, le barrage en maçonnerie de Grosbois en France, département de la Côte-d'Or, construit de 1830 à 1838, a été l'objet de relevés topographiques qui devaient permettre de suivre le déplacement de sa crête. Depuis son premier remplissage en 1838, cet ouvrage avait posé de nombreux problèmes⁷ et exigé plusieurs renforcements. La pratique des mesures topographiques dans le cas des barrages en maçonnerie allait dès lors être courante. Mais à l'époque en 1852, la lunette topographique, qui n'existait qu'à un unique exemplaire au laboratoire des ponts et chaussées, était envoyée spécialement de Paris pour faire les mesures.

L'importance des structures métalliques, la nécessité de comparer méthode de dimensionnement et comportement réel des ouvrages pour rechercher économie autant que sécurité, avaient conduit des ingénieurs à concevoir des appareils de mesure. Dupuy⁸ le premier eut l'idée d'un appareil à mesurer le travail du fer, qui fut ensuite perfectionné par

Charles Rabut⁹. Ce dernier mit au point un appareil qui servit à faire de nombreuses mesures sur les ponts métalliques des chemins de fer, à un moment où l'augmentation des charges dues à l'évolution du matériel roulant, condamnait la plupart des ouvrages existants. Les mesures mirent en évidence que, grâce aux liaisons hyperstatiques dont le calcul ne tenait pas compte, la plupart des ponts supportaient très bien les nouvelles sollicitations. Quelques autres ouvrages moyennant des renforcements mineurs, restèrent bons pour le service. Cette méthodologie servira pour les ouvrages de génie civil. L'invention du béton armé à partir de 1890 a conduit ses promoteurs (Hennebique, Coignet, Considère) à tester à l'extérieur, en vraie grandeur des éléments de structure pour en comprendre le comportement, avec les expériences et moyens développés jusqu'alors.

Au XX^e siècle

Des observations in situ à la conception de matériel

Le développement des barrages en terre conduisit à la mesure de l'écoulement dans les massifs, avec la conscience de plus en plus aiguë de l'importance de la pression de l'eau dans les sols sans qu'elle fut perçue formulée de façon satisfaisante¹⁰.

A la fin du XIX^e siècle, en Inde, les observations faites au moyen de piézomètres ouverts¹¹ ont permis de comprendre les écoulements sous les barrages d'irrigation fondés sur alluvions. En 1907, ce type d'instruments a été utilisé par les ingénieurs anglais dans ce même pays, pour déterminer la surface libre de la nappe d'écoulement établie dans un barrage homogène en terre. Dès 1917, des piézomètres étaient utilisés aux États-Unis dans les barrages en terre et, par la suite, des perfectionnements ont conduit à la conception des cellules de mesure de pressions interstitielles hydrauliques.

En 1922, un important programme d'instrumentation des barrages-voûtes fut lancé aux États-Unis, qui possédaient un très important parc de ces ouvrages. Ce programme avait pour but la compréhension du comportement mécanique des barrages voûtes, pour en réduire les coûts et accroître leur sécurité. Dans le cadre de cette initiative, des fissuromètres et

6 Jean-Louis Bordes, *Les barrages réservoirs en France, du milieu du XVIII^e au début du XX^e siècle*, Paris, Presses des ponts et chaussées, 2005, forme et conception des barrages, pp 287-323.

7 *Ibid.*, pp 164-170. Les mesures faites sur le barrage de Grosbois entre 1852 et 1862 puis de 1895 à 1905 ont fait l'objet d'une analyse dans le rapport suivant : André Coyne, « Influence de la température interne et déformations des barrages poids », 1^{er} congrès international des Grands Barrages, 1933, Stockholm, question 1b, rapport n° 9, 40 p. et 6 pl. Voir l'analyse des déformations de Grosbois pp. 5-9.

8 Dupuy, « Appareil destiné à mesurer le travail du fer », *Annales des Ponts et Chaussées*, 5^e série, 2^e semestre 1877, pp. 381-410.

9 Charles Rabut, « Renseignements pratiques pour l'étude expérimentale des ponts métalliques », *Annales des Ponts et Chaussées*, 6^e série, 2^e semestre 1896, pp. 374-480.

10 Jean-Louis Bordes, « Aperçu historique sur la notion de la pression de l'eau dans les sols et les milieux fissurés du XVIII^e au début du XX^e siècles, en France », *Revue Française de Géotechnique*, n° 87, 2^{ème} trimestre 1999, pp 3-15.

11 Simples tubes crépinés sur la hauteur de la chambre de mesure dont on mesure niveau de l'eau à l'intérieur à l'aide d'une sonde..

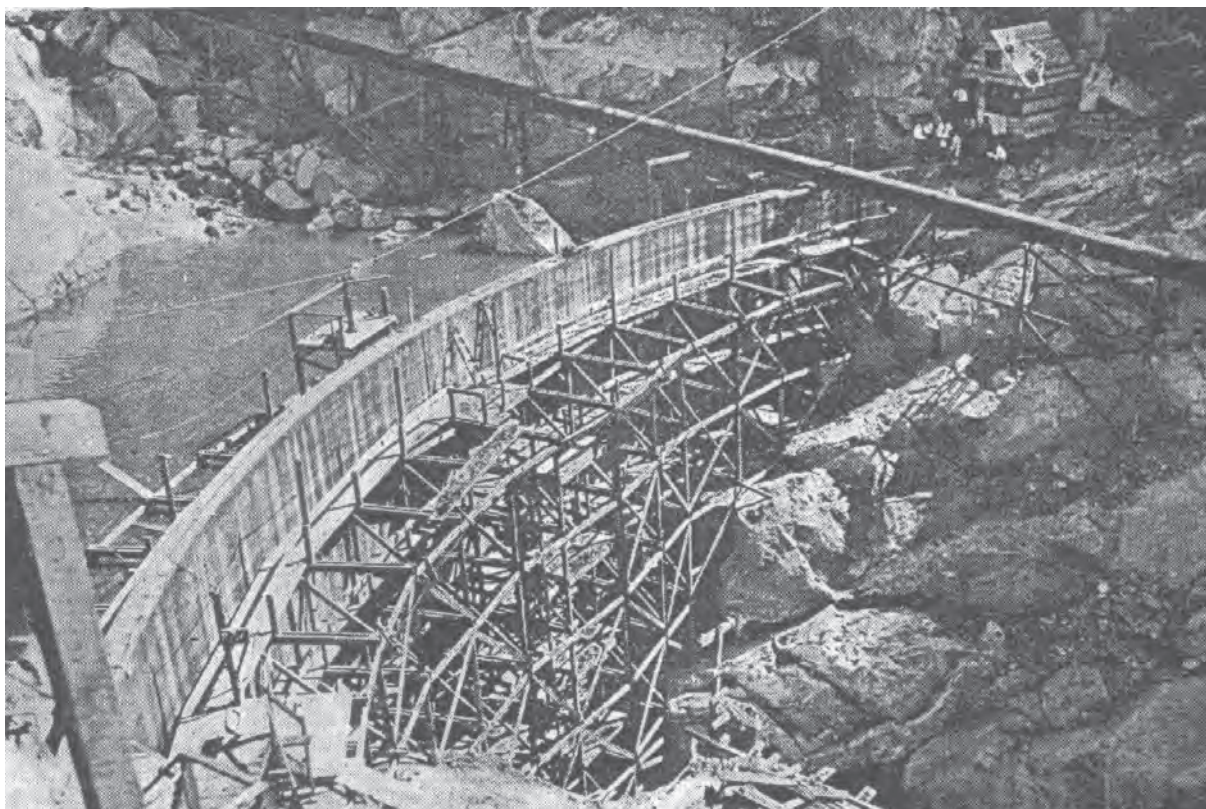


fig. 1. Barrage d'essai de Stevenson creek, 1926. Archives Coynes et Bellier, Wegmann, 1928.

des inclinomètres posés sur les parements des ouvrages, ont été utilisés. En outre, on a mesuré les déformations internes du béton à l'aide d'instruments constitués de capteurs à variation de résistance (notamment l'empilage de disques de carbone). C'est ce qui fut fait avec la réalisation en 1926 du barrage expérimental de Stevenson Creek en Californie (figure 1), truffé de plusieurs centaines d'appareils de mesure de déformations internes, qui marque le début des essais en vraie grandeur¹². Ce barrage situé sur un thalweg sans bassin versant significatif, pour être maître du plan d'eau avait une hauteur de dix-huit m une longueur en crête de cinquante-deux m. Le parement amont était vertical avec un rayon de 30,50 m et une épaisseur de 2,28 m en pied et de 0,61 m en crête. La modicité du bassin versant¹³ n'empêcha pas une crue de survenir et fournir ainsi aux ingénieurs un cas de chargement exceptionnel.

12 Paul Caufourier, « Barrage d'essai de Stevenson Creek » *Le Génie civil*, 2 janvier 1926, p. 9-11, 15 octobre 1927, pp. 382-386.

13 Bassin versant : surface rapportée à un point de mesure sur un court d'eau, délimitée par une ligne de crête, telle que toute goutte d'eau tombée sur cette surface passe par le point considéré sur le cours d'eau.

En France, dès 1924, les ingénieurs utilisèrent le petit barrage voûte de Savenay près de Nantes, barrage de 17m de hauteur. Celui-ci terminé en 1918 avait été construit en béton par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine.

Outre une meilleure compréhension du comportement des ouvrages, les enseignements tirés des mesures permirent d'améliorer les appareils. Ce fut ainsi en même temps le début d'une période d'innovation d'appareils de mesure dont nous allons dérouler brièvement l'histoire en lui associant celles de l'auscultation et de la surveillance des barrages.

Aux États-Unis en 1925, Roy Carlson (1900-1990) conçut un appareil pour mesurer les pressions dans le béton et la terre¹⁴. Il s'agissait d'un capteur constitué d'un fil tendu dont on mesurait la variation de résistance électrique en fonction du déplacement relatif de deux points de fixation, à l'aide d'un pont de Wheatstone. Le corps d'épreuve était constitué d'un vérin de faible épaisseur rempli de mercure, dont on mesurait la déflexion de l'une des membranes. Par la suite un corps d'épreuve cylindrique avec une résistance tendue dans son axe et noyé dans le béton a été¹⁵ réalisé. De nombreux barrages américains en furent équipés¹⁶.

14 Roy W. Carlson, « Five years' improvement of the elastic-wire strainmeter », *Engineering News Record*, 16 may 1935.

15 E.C. Eaton, « Electric resistance strain gauge measures stresses in concrete », *Engineering News Record*, 1931, p 615.

16 Jérôme R. Raphael, « Determination of stress from meas-

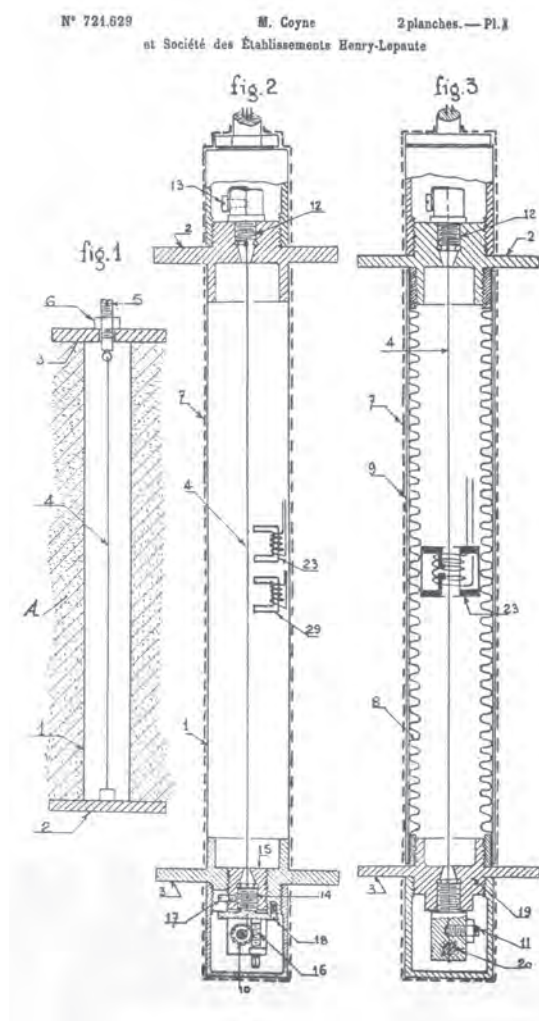


fig. 2. Principe du témoin sonore, brevet André Coyne 1931. Archives Coyne et Bellier, brevet INPI.

Le témoin sonore ou corde vibrante

Un progrès important a été réalisé en France, en 1931, lorsque André Coyne (1891-1960), fondateur du bureau d'ingénieurs-conseils Coyne et Bellier et concepteur de plus de cinquante-cinq barrages-voûtes au cours de sa vie, a obtenu un brevet pour son capteur à corde vibrante, alors appelé témoin sonore¹⁷ (figure 2). Par la suite, dix-sept extensomètres à corde vibrante ont été posés dans le barrage-voûte de la Bromme (1930-1932), construit sur la Truyère. Toutefois, la première grande auscultation est celle du barrage de Marèges (1932-1935), sur la Haute Dordogne, où soixante dix-huit extensomètres ont été placés dans le corps de la voûte et quarante autres dans le renforcement des appuis et culées (figures 3 et 4). Elles répondaient au besoin

urements in concrete dams », 3^e Congrès des grands Barrages, Stockholm, 1948, Q9, R 34, pp 1-24.

¹⁷ Brevet français déposé le 19 août 1931, n° 721 629.



fig. 3. Barrage de Marèges en construction, 1931-1935. Archives Coyne et Bellier, photo Imbault (Mauriac).

de pallier l'insuffisance des méthodes de calculs par l'observation directe par la mesure de la réponse des structures aux sollicitations appliquées.

Le barrage de Marèges conçu par André Coyne, était un barrage à double courbure de 90 m de hauteur, le plus haut de ce type en Europe. Il comportait plusieurs innovations majeures, outre l'emploi de témoins sonores, un batardeau déversant à murs à échelle, un déversoir en saut de ski, la mise œuvre de câbles d'ancrage de 500 tonnes. On notera que le concepteur du barrage est aussi celui de l'appareil de mesure. C'est pratiquement une règle dans ce métier comme cela se passe dans un laboratoire. C'est l'ingénieur qui imagine le dispositif de mesure dont il a besoin, le marché étant incapable de les lui fournir.

D'autres opérations de mesures et auscultation dans un pont, un mur de quai, une conduite forcée en béton précontraint, permettaient à André Coyne dans un article de synthèse en 1938, de montrer les capacités du matériel et la richesse de la méthode¹⁸. Depuis, l'expérience a montré que ce type de

¹⁸ André Coyne, « Quelques résultats d'auscultation sonore sur les ouvrages en béton, béton armé ou métal. », *Annales de l'institut du bâtiment et des travaux publics*, 1938, juillet-août, pp 33-56.

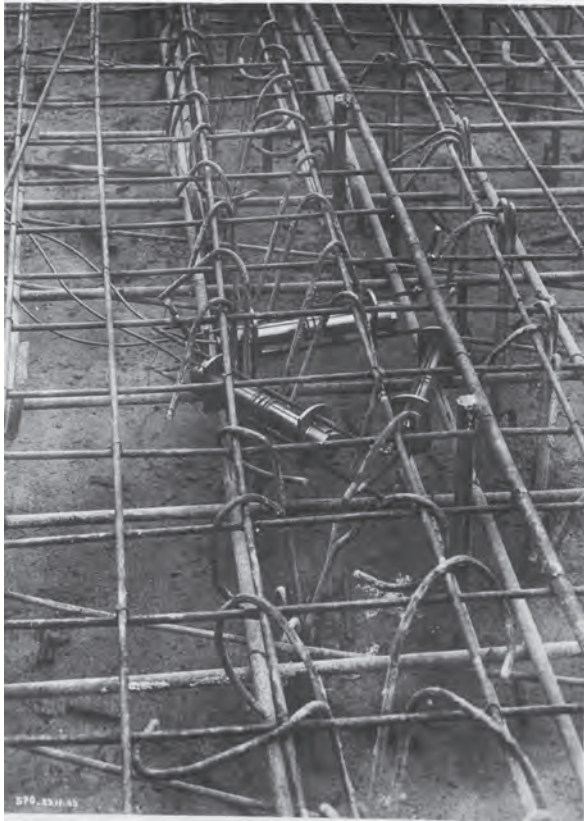


fig. 4. Témoins sonores en place, barrage de l'Aigle 1943. Archives Coyne et Bellier, photo Baranger.

capteurs qui permet de concevoir toute une gamme d'appareils était particulièrement bien adapté aux environnements extrêmement difficiles propres au génie civil. Des cellules de pression interstitielles avec une corde vibrante mesurant la déformation d'une membrane soumise à la pression, étaient conçues en 1958. Les mesures de pression de l'eau dans les barrages en terre, essentielles pour apprécier leur comportement et leur sécurité, étaient devenues courantes. Limitées dans les barrages en béton au contact béton-rocher, elles allaient être étendues à la mesure des pressions dans le massif de fondation, en particulier à la suite des leçons tirées de la catastrophe de Malpasset survenue en 1959.

Les capteurs à corde vibrante possèdent une longévité, une stabilité et une précision tout à fait remarquables, et leur signal de sortie en fréquence les rend insensibles aux défauts de ligne¹⁹,

19 Jean-Louis Bordes, Pierre-Jean Debreuille, « Some facts about long-term reliability of vibrating wire instruments », *Transportation research record 1004*, Transportation research Board, National research Council, Washington DC 1985. Par défauts de ligne on entend les variations de caractéristiques électriques en particulier de résistance qui affectent la valeur du signal en intensité ou voltage, ce qui n'est pas le cas

contrairement aux instruments d'autres types. Après la Deuxième guerre mondiale, plusieurs fabricants ont développé des appareils à corde vibrante, incluant Télémac fondé en 1947 par André Coyne et aux Etats-Unis Irad Gage fondé en 1973 par Ivor Hawke (1931-1979), reconnu pour ses contributions à la mécanique des roches et l'instrumentation géotechnique. Irad Gage a été le premier concepteur et manufacturier nord-américain de capteurs à corde vibrante, dans une communauté qui se méfiait des appareils de mesure à signaux de sortie électrique.

Les constructeurs de barrages ont utilisé de nombreuses occasions pour réaliser des essais comme par exemple avec les batardeaux provisoires. En parallèle à ces essais en vraie grandeur, tant aux Etats-Unis qu'en France ou qu'ailleurs en Europe, des essais sur des modèles réduits en plâtre chargés au mercure étaient réalisés. Les méthodes de calculs étaient affinées de leur côté.

Appareils intégrateurs sur grande base

Toutefois les capteurs noyés dans le béton présentaient l'inconvénient de ne faire des mesures qu'en un seul point qu'il fallait multiplier. Par ailleurs, on oublie toujours que ces capteurs mesurent des déformations et non des contraintes. La connaissance de ces dernières exige de distinguer dans la déformation mesurée, l'influence de la température du fluage²⁰, de l'hyperstaticité. Le dépouillement des mesures est délicat.

Les ingénieurs cherchaient donc un moyen intégrateur qui donne tout ou partie du déplacement. Les mesures topographiques présentaient l'inconvénient d'être lourdes, trop espacées et coûteuses. A partir des années 1950, on eut recours au pendule. Ce n'est rien d'autre qu'un fil à plomb, logé dans un puits dans la structure du barrage, accroché en un point à l'intérieur de la structure auscultée tendu par un lest dans une cuve à eau pour amortir les oscillations. Sa longueur atteint plusieurs dizaines de mètre en fonction des points de mesures implantés sur la hauteur de la structure. Le déplacement du fil, donc de celle du point d'accroche est lue avec une table de détection (à visée optique, à capteur inductif, etc.). On obtenait ainsi la possibilité de mesurer la déformation totale de la structure, mais non celle de la fondation. On imagina dans les années 1960, le pendule inverse dont l'extrémité inférieure était scellée au fond d'un puits foré dans la fondation, et tendu par un

du signal en fréquence.

20 Déformation réversible ou non à charge constante en fonction du temps.

Nature du matériel ou des méthodes	Dates	Auteurs ou promoteurs
Relevé topographique	Structures, début XIX° ? Barrages, Grosbois 1852	- -
Auscultation des structures métalliques	1877 1890	Dupuy Charles Rabut et Manet
Relevé de niveau de nappe Dans un barrage en terre	Début XIX° ? Belle Fourche 1911 1933	- USBR* USBR (WLI)
Cellule à contre pression	1916 1938 1958	Goldbeck USBR (HPI) Franz Glötzl
Extensomètre à résistance tendue Cellule Carlson	1925 1930 1952	- Roy W. Carlson Roy W. Carlson
Extensomètre à corde vibrante	1930	André Coyne
Piézomètre ouvert	1949	Arthur Casagrande
Cellule à jauges	1955	W.E.S**
Piézomètre hydraulique	1939 1960	USBR Alan Willfred Bishop
Piézomètre à corde vibrante	1958	Télemac Jean Bellier
Pendule direct	Autour de 1940	-
Pendule inverse	Dans les années 1960	-
Forage pour pendule inverse	1973	EDF/FTM

tabl. 1. Chronologie de quelques matériels et méthodes d'auscultation

flotteur dans une cuve dans la chambre de mesure. Pour arriver à obtenir un puits de diamètre réduit et le plus vertical possible, de nombreux essais furent nécessaires. EDF avec une entreprise spécialisée déposa un brevet en 1973 qui permit la réalisation en nombre croissant très sensiblement de pendules inverses, en particulier dans des barrages déjà construits. L'importance et le développement de ce type d'appareils est de plus en plus souligné par les spécialistes de ces techniques²¹.

L'extensomètre en forage est un autre appareil à caractère intégrateur. La connaissance des massifs de fondation des barrages au delà de l'utilisation du pendule inverse a poussé les ingénieurs à imaginer des extensomètres en forages fixes ou mobile à plusieurs points de mesures par des procédés mécaniques ou électriques. Dans les années 1970, ils bénéficièrent des recherches faites pour les tunnels. L'excavation des tunnels intégrait la mesure dans la conduite des travaux. Il a été ainsi possible d'équiper des forages jusqu'à cent mètres de longueur avec huit à dix points de mesure.

* United States Bureau of Reclamation

**Waterways experiment station (United States Corps of engineers)
21 *Introduction à la surveillance des barrages*, Bulletin 138, Paris, Commission internationale des Grands Barrages, 2008.

La topographie

On terminera avec quelques mots sur la topographie qui était au commencement de cette histoire, avec le barrage de Grosbois. D'énormes progrès ont été réalisés. La géométrie absolue du barrage peut être suivie par topographie de haute précision. Des cibles sont fixées sur le parement aval et, parfois, en partie supérieure du parement amont. Leur position dans l'espace est relevée par topographie directe et triangulation depuis des plots de visée situés suffisamment loin du barrage pour ne pas être influencés par celui-ci. Le dépouillement exige de vérifier la fixité de certains plots de référence (par des méthodes de dépouillements statistiques). Ces mesures sont longues et coûteuses. Elles ne sont réalisées qu'une à deux fois par an. Elles ne sont donc pas utilisables pour la détection de phénomènes rapidement évolutifs.

Le traitement de la mesure et son évolution, les acteurs du monde de la mesure

L'essai en vraie grandeur fut permanent. Le suivi des lectures se fit par report des grandeurs mesurées en fonction du temps et par report en fonction de une ou plusieurs autres grandeurs mesurées. Au cours des dernières décennies, la pratique de l'auscultation a été fortement modifiée par les progrès en micro-informatique. Les développements dans ce

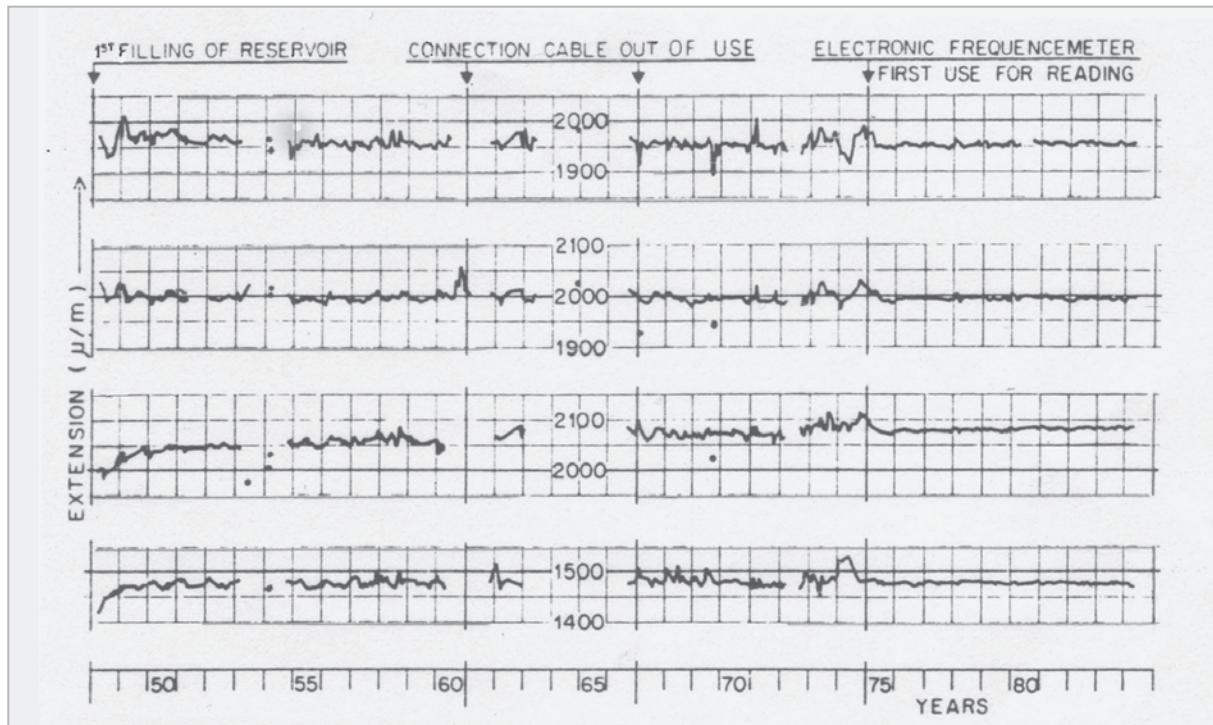


fig. 5. Traitement des mesures, Castillon 1948-1982. Archives Coyne et Bellier, J.L. Bordes.

domaine facilitent l'acquisition et le traitement de données qui changent la nature même des résultats de l'instrumentation. Le traitement statistique permet de séparer les différents paramètres (charge hydrostatique, température, fluage, etc.) qui commandent la réponse de la structure²². On peut alors vérifier la stationnarité de la réponse de la structure après avoir recherché tous les paramètres qui gouvernent l'évolution du capteur. A titre d'exemple, la figure 5 montre un dépouillement de cette nature sur plusieurs dizaines d'années sur des extensomètres du barrage de Castillon de 1948 à 1982, soit trente-quatre ans.

Les procédures de mesure ont subi au cours des années des améliorations régulières. La période de la première mise en eau, particulièrement délicate, car c'est la première mise à l'épreuve du barrage, a fait l'objet de précautions et procédures particulières, il y a déjà longtemps²³, au fur et à mesure de l'enseignement de l'expérience.

22 G. Willm, N. Beaujoint, « Les méthodes de surveillance des barrages au sein de la production hydraulique d'Electricité de France. Problèmes anciens, solutions nouvelles, 9^{ème} Congrès des grands Barrages, Istanbul, 1967, Q 34, R 30, pp. 529-550.

23 « Auscultation des barrages d'Electricité de France lors de leur première mise en eau », Groupe de travail du Comité français des grands barrages, 10^e Congrès des grands Barrages, Montréal, 1970, Q 38, R 34, pp. 601-637.

Ainsi depuis plus d'un demi-siècle, l'auscultation des ouvrages de génie civil s'est peu à peu constituée en une approche systématique du comportement des ouvrages. Elle est à l'origine de progrès importants dans la connaissance de phénomènes physiques qui se développent dans les structures, en particulier en fonction du temps (déformation de fluage). C'est, rappelle-t-on une démarche très analogue à celle du médecin qui associe l'observation visuelle, sur l'importance de laquelle les spécialistes insistent sans relâche, la mesure périodique de grandeurs physiques au moyen d'appareils (on parlera alors d'instrumentation), l'analyse des résultats, leur traitement et l'analyse en retour avec l'emploi de calculs directs de l'ouvrage au moyen d'un modèle mathématique recalé grâce aux mesures. Les progrès considérables dans les méthodes de calcul comme celle des éléments finis ont valorisé d'autant la collecte de mesures. Le système d'auscultation fait partie intégrante du projet d'un ouvrage.

Les acteurs du monde de la mesure sont multiples : fabricants issus du monde des bureaux d'études et ingénieurs conseils, entrepreneurs responsables de la mise place du matériel, de leur emploi en phase provisoire, maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage, ces derniers en charge de la surveillance des ouvrages sur des décennies, ingénieurs des services de l'Etat qui élaborent et fixent les procédures de contrôle. L'échange du retour d'expérience dans des structures ad hoc est la règle comme le montre le paragraphe suivant traitant des échanges internationaux.

L'importance des échanges internationaux

L'échange entre ingénieurs a toujours été la règle. Voyages, correspondances en témoignent depuis plusieurs siècles. Mais les expositions universelles du XIX^e siècle et leurs congrès associés, ont accéléré ces mises en commun et conduit à des structures internationales d'échanges. La Commission internationale des grands barrages qui a fêté ses quatre-vingts ans en 2008²⁴, et regroupe quatre-vingt huit pays a ses racines dans les congrès internationaux de navigation intérieur dont le premier fut organisé en 1884. De plus, l'importance conférée à la sécurité publique a conduit les autorités de nombreux pays à légiférer dans le domaine des procédures de contrôle et de surveillance des barrages lors des études, de la construction et enfin pendant la période d'exploitation. La mise en place des systèmes d'auscultation fait partie des procédures de surveillance et de contrôle.

Les sociétés savantes et notamment la Commission internationale des grands barrages (CIGB) avec ses comités nationaux, ont toujours accordé la plus grande importance au recueil des données d'expériences sur les ouvrages. Le nombre considérable de rapports de la CIGB consacrés à ce sujet ainsi que les publications spéciales suivantes montrent l'intérêt que revêt l'ensemble des techniques d'auscultation²⁵. Le nombre de questions débattues lors des congrès internationaux des grands barrages 1933-2006 s'élève à quatre-vingt sept, douze d'entre elles furent explicitement consacrées à l'auscultation dont une dès le premier congrès²⁶ à Stockholm en 1933. D'innombrables autres dont celles en particulier relevant des procédures de constructions (vingt-cinq) contiennent de très nombreux rapports dont la trame s'articule autour des données résultant de l'observation et de la mesure. La symbiose des pratiques des constructeurs de barrages avec une démarche permanente de nature expérimentale, s'impose avec évidence.

²⁴ *Les barrages et l'eau dans le Monde*, CIGB, Paris, 2008, 65p.

²⁵ Dans le cadre de l'activité de ses groupes de travail, entre 1969 et 1989, la CIGB a publié pas moins de 5 bulletins relatifs à la synthèse de l'expérience accumulée dans le domaine de l'auscultation des barrages, sans compter douze questions sur quatre-vingt sept consacrées à l'auscultation lors des congrès (1933-2006). *Auscultation des barrages, considérations générales*, bulletin 60 (1988), réédition revue et corrigée des bulletins 21 (1969) et 23 (1972) fondus en un seul bulletin. *Auscultation des barrages et de leurs fondations, la technique actuelle*, bulletin 68 (1989). *Amélioration de l'auscultation des barrages*, bulletin 87 (1992). *Automated dam monitoring system*, bulletin 118 (2000).

²⁶ Les mesures faites sur le barrage de Grosbois entre 1852 et 1862 puis de 1895 à 1905 ont fait l'objet d'une analyse dans le rapport suivant déjà cité plus haut, note 6, signé par André Coyne en 1933.

Un matériel bien particulier

Il est assez remarquable, après ce bref historique, de constater que les ingénieurs de génie civil ont été amenés à concevoir la plupart du temps eux-mêmes et construire du matériel spécifique et à n'utiliser que relativement peu la vaste panoplie que représentait l'instrumentation industrielle. En général, ils n'ont utilisé de cette dernière que les appareils mobiles ou facilement accessibles, parmi lesquels le servo-accéléromètre et le LVDT ont été intégrés.

Le matériel qui entre dans les systèmes d'auscultation des barrages doit satisfaire à deux conditions très restrictives. En effet, il doit posséder une durée de vie de l'ordre de celle des barrages, c'est-à-dire d'au moins cinquante ans et bien plus, et une dérive du zéro quasi nulle, exigence qui résulte de son inaccessibilité une fois mis en place. Par ailleurs, le marché de l'auscultation est très modeste à l'échelle mondiale. Il est donc difficile de trouver du matériel de qualité qui réponde à ces exigences. C'est plus qu'un marché de niche.

En outre, la valeur du matériel résulte de la qualité de l'information obtenue et des bénéfices ou plutôt des économies escomptés résultant de son traitement. La difficulté est d'autant plus grande qu'il n'est pas facile par un calcul économique, de justifier des investissements par des économies toujours difficiles à estimer et qui ne pourront être constatées que longtemps après la dépense.

Conclusions

Dans le cadre de la prévention des risques (donc imaginables) que peuvent entraîner la détérioration des grands ouvrages de génie civil et de celle de prévoir l'inimaginable (précaution), les pratiques et techniques mises en œuvre par l'auscultation et la surveillance au terme d'une évolution continue, constituent un outil indispensable.

Si l'auscultation des ouvrages de génie civil, s'est développée d'abord dans les barrages, c'est bien parce que plus que d'autres, ces ouvrages présentaient des risques qu'il fallait absolument maîtriser. L'histoire est d'ailleurs malheureusement là pour le prouver. On peut dater le début des grandes catastrophes d'origine anthropique à la survenance de la rupture du barrage de Puentes à Lorca en Espagne en 1802²⁷. L'accident est un essai en grand qui a mal tourné, mais qui apporte de nombreux enseignements et ouvre de nouvelles

²⁷ Jean-Pierre Chabal, Jean-Louis Bordes « Puentes, 1802, la rupture du plus grand barrage du monde, ou le double échec d'Antonio de Robles, le rapport Betancourt », *Quaderns d'Historia de l'Enginyria*, Barcelone, Escola tecnica superior d'Enginyria industrial de Barcelona, 2009, pp 151-167.

voies de recherche et de progrès²⁸. Toutefois dans le cas de Puente, il a fallu attendre près d'un siècle pour comprendre le phénomène à l'origine de la catastrophe : ce sont les lois de Darcy (1856) les travaux de Forchheimer (1913) et des mesures in situ aux alentours de 1900, sur les écoulements de l'eau dans les sols qui fournirent les clés de l'explication de la rupture. La mécanique des roches est née plus rapidement pour l'essentiel de la catastrophe de Malpasset²⁹. On ne peut s'en satisfaire. Aussi pour éviter ces extrémités, les ingénieurs cherchent à comprendre toujours mieux le comportement des ouvrages dont ils ont la responsabilité, afin de prévenir le danger à partir des moindres frémissements, symptômes annonciateurs d'une pathologie. Les pouvoirs publics ont mis en place la législation qui permet la constitution et la transmission de la mémoire de ces ouvrages.

Mais l'auscultation est bien plus qu'une technique au service de la seule sécurité. Dans la mesure où il faut suivre des ouvrages pendant des décennies (En 2006 EDF disposait par exemple de mesures continues sur le barrage de Castillon depuis environ 1947 soit sur 56 ans, et stockait quelques dix-neuf millions de lectures sur 53.000 points de mesure dans quelques 200 ouvrages), l'auscultation permet de suivre « la santé » de l'ouvrage au mieux et ainsi gérer dans les meilleures conditions, entretien, réparation, et à la fin la date de mise hors service. L'auscultation et la surveillance associée, devient ainsi un outil de gestion du patrimoine de l'infrastructure du pays. C'est ainsi que sont instrumentés et surveillés les enceintes de sécurité des réacteurs nucléaires, les grands ponts,

les tunnels, les bâtiments qui relèvent de la catégorie des ouvrages d'art. Ce qui vient d'être dit, s'applique aussi aux sites difficiles, à surveiller, ou à éviter. Dans ce dernier cas, l'auscultation peut servir à étayer un jugement qui conduit à éloigner de l'endroit, toute construction et activité (exemple du glissement de Séchillienne dans la vallée de la Romanche).

On dispose actuellement d'un arsenal d'appareils, de méthodes, procédures, d'expériences qui bien que bénéfiques doivent néanmoins éviter aux ingénieurs d'avoir des certitudes et un excès de confiance qui conduisent aux catastrophes. Car trop de progrès sont encore à faire dans l'exploitation des connaissances ainsi accumulées, et en particulier dans la transmission des conclusions afin de faire école. L'auscultation des ouvrages est par bien des côtés une activité qui requiert beaucoup d'abnégation de la part de ceux qui s'y livrent. C'est un travail de moines qui consiste à accumuler pendant des années des informations, à les traiter afin d'entretenir les ouvrages afin qu'aucune pathologie n'affecte ceux-ci ou de traiter celle-ci aussitôt apparue. Il faut rester aux aguets en permanence pour que rien n'arrive alors que rien ne se passe. Il demande des ingénieurs très qualifiés, qui vont devenir dans un pays comme le notre, où on ne construit plus de barrages, les dépositaires du savoir sur les barrages. Cette activité lorsqu'elle est bien menée, coûte cher, moins en investissement initial qu'en exploitation des données au fil des ans. Les maîtres d'ouvrage s'y résignent difficilement. Enfin, comme on l'a déjà souligné, cette activité ne génère que des économies difficilement chiffrables, et souvent à long terme. *A priori*, il est très difficile de financer des investissements sur des économies à venir. Ce savoir-faire est l'aboutissement d'une démarche commencée il y a près de deux siècles, et qui pour rester féconde, doit être considérée comme étant toujours en devenir.

28 *Leçons tirées des accidents de barrage*, Commission internationale des Grands Barrages, Paris, 1974, 1 vol, 1069 p, réédité et mis à jour en 2001. *Ruptures de barrages, analyse statistique*, bulletin 99, Commission internationale des Grands Barrages, Paris, 1995, 73 p.

29 Le 2 décembre 1959, dans le département du Var, le barrage voûte mince de Malpasset de soixante-cinq mètres de hauteur et de cinquante millions de mètres cubes de capacité se rompaît, entraînant la mort de plus de 400 personnes et de très importants dégâts.