

ANALYSE DE LA PERTINENCE DU DISPOSITIF D'AUSCULTATION LORS DES EDD : REX DE 15 ANS DE PRATIQUES A EDF ET PERSPECTIVES

*Analysis of the relevance of the auscultation device during safety
studies: backward on 15 years of practice at EDF and perspectives*

Jérôme SAUSSE

EDF-DTG, 18 av R. Poincaré 19100 BRIVE
jerome.sausse@edf.fr

Alain FELZINES

EDF-DTG, 4 rue CM. Perroud 31100 TOULOUSE
alain.felzines@edf.fr

MOTS CLEFS

Auscultation, Surveillance, Barrage, REX, Dispositif, Pertinence

KEY WORDS

Monitoring, Surveillance, Dams, Feedback, Devices, Relevance

RÉSUMÉ

Le Décret du 11/12/2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques a introduit la notion « d'efficacité du dispositif d'auscultation ». Plus récemment, l'Arrêté du 03/09/2018 définissant le plan de l'EDD, indique « Une analyse de la pertinence du dispositif d'auscultation est également menée avec des préconisations éventuelles d'évolution de ce dispositif ». Cette exigence est reprise dans l'Arrêté du 08/08/2022 précisant les obligations documentaires et la consistance des vérifications et visites techniques approfondies.

La réponse à cette question n'est pas triviale et requiert à la fois compétences dans la spécialité de l'auscultation mais aussi méthodologie, car la notion de « pertinence » reste à définir.

EDF-DTG en tant qu'organisme agréé spécialisé dans l'auscultation, répond depuis longtemps à cette question de pertinence, comme en témoigne l'évolution des dispositifs de chaque barrage au fil des décennies. Pour autant, l'analyse a été mieux structurée depuis une quinzaine d'années, notamment à l'occasion des revues de sûreté puis des EDD des barrages.

L'article dresse un état des lieux des préconisations formulées à partir d'un REX établi sur plus de 100 rapports d'auscultation rédigés entre 2009 et 2023. Ce REX illustre les principales thématiques abordées et les propositions d'évolution telles que l'ajout ou la suppression de dispositifs, la modification de fréquence de mesure, l'amélioration des dispositifs en place...

La méthodologie d'EDF-DTG a évolué peu à peu, en intégrant rapidement la notion d'adaptation de la surveillance aux risques. Ainsi, le lien avec l'analyse de risques de l'EDD devient incontournable pour traiter rigoureusement de la question. Par ailleurs, EDF-DTG travaille actuellement sur un outil opérationnel permettant de rationaliser les différents avis que peuvent avoir les experts sur la question de la pertinence des dispositifs d'auscultation des barrages, que ce soit sur le périmètre des ouvrages ou parties d'ouvrages à ausculter, la fréquence des mesures, le nombre d'appareils, leur localisation, la définition de tournées de surveillance particulières sur sollicitations exceptionnelles... Cette aide à l'analyse de la pertinence inclut ainsi des notions de surveillance au regard de modes de défaillance, de sensibilités intrinsèques associées, mais aussi de données statistiques sur l'instrumentation du parc de barrages et le REX. Les grands principes adoptés sont décrits dans l'article illustré d'exemples.

ABSTRACT

French legislation introduced in 2007 the notion of "effectiveness of the monitoring system". More recently, a decree of 2018 states "An analysis of the relevance of the monitoring system is also carried out with possible recommendations for the evolution of this system".

The answer to this question is not trivial and requires both skills and methodology, because the notion of "monitoring relevance" remains to be defined.

EDF-DTG has been answering this question of relevance for a long time, as evidenced by the evolution of the monitoring systems of each dam over the decades. However, the analysis has been better structured over the past fifteen years, particularly during dam safety reviews.

The article provides an overview of the recommendations given by an EDF feedback of more than 100 monitoring reports written between 2009 and 2023. This study illustrates the main themes addressed and the proposals for evolution such as the addition or removal of devices, the modification of the measurement frequency, the improvement of the devices in place, etc.

EDF's methodology has evolved, quickly integrating the notion of surveillance adapted to risks. Thus, the link with the risk assessment reports becomes essential in order to deal rigorously with the issue. In addition, EDF-DTG is currently working on an operational tool to streamline the various opinions that experts may have on the question of the relevance of dam monitoring devices, whether on the perimeter of the structures or parts of structures to be examined, the frequency of measurements, the number of sensors, their location, the definition of special monitoring campaign, etc. The main principles adopted are described in the article illustrated with examples.

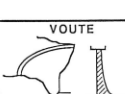
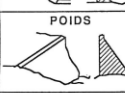
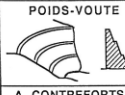
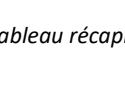
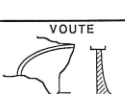
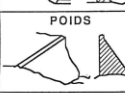
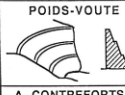
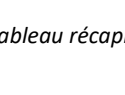
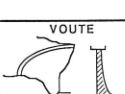
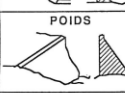
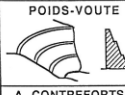
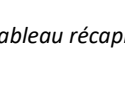
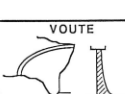
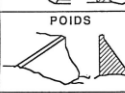
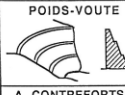
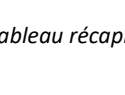
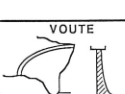
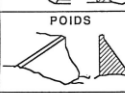
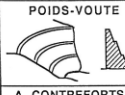
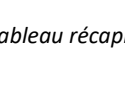
1. PROBLEMATIQUE

De même que chaque barrage est unique, il faut considérer que son dispositif de surveillance l'est aussi. Pour autant, il est admis que des systèmes d'auscultation sont plus adaptés à certains types de barrages que d'autres, du fait que leur mode de fonctionnement diffère. C'est ainsi que l'on a l'habitude de considérer certains « standards » pour ausculter des barrages poids, des voûtes ou des remblais. La figure 1 ci-dessous, extraite du référentiel 1994 d'EDF sur l'auscultation des barrages, illustre les grands principes d'instrumentation adoptés par type de barrage.

EDF D.T.G.
A.O. BRIVE

TAB. REC. 1994

TAB. REC. 1994

Phénomènes mesurés	Phénomènes mécaniques		Phénomènes hydrauliques				
	Phénomènes mesurés	Phénomènes mesurés	Phénomènes mesurés	Phénomènes mesurés			
APPAREIL ou DISPOSITIF de MESURE	TOPOGRAPHIE (au théodolite) 10-4 gr → 1 à 5 mm	PENDULE (direct ou inversé) 0,1 mm → 0,1 mm	NIVELLEMENT (optique ou direct) 0,1 mm → 0,2 à 1 mm	CONTROLEUR DE JOINTS et FISSURES (0,1 mm → 0,1 mm)	EXTENSOMETRE (à corde vibrante) dilat → 5 µm	PIEZOMETRE ou CELLULE (0,01 bar) → 0,1 bar	DEBITMETRE ou CAPACITE 0,1 l/min → 0,1 l/min
	Precision : lect. → phéno. physique	Precision : lect. → phéno. physique	Precision : lect. → phéno. physique	Precision : lect. → phéno. physique	Precision : lect. → phéno. physique	Precision : lect. → phéno. physique	Precision : lect. → phéno. physique
VOÛTE							
	FONDAMENTAL (dès l'origine) - TRES COURANT - ADAPTE (pendant période d'évolution - mise en eau et après - ensuite, moins bon si les déplacements sont faibles)	FONDAMENTAL (dès l'origine) - ASSEZ COURANT - T.B. ADAPTE, Efficace (installation quelquefois difficile quand parements non verticaux) - BIEN ADAPTE (Mise en oeuvre facile si couronnement accessible)	EVENTUEL (si évolution verticale dans le temps) - ASSEZ COURANT (En général en crête) - BIEN ADAPTE (Mise en oeuvre facile si couronnement accessible)	EVENTUEL (si besoin) - COURANT (tant pour joints que pour fissures) - BIEN ADAPTE (efficace)	COMPLEMENTAIRE (Ligne pour mise en eau et 10-15 années suivantes. Calcul déformations-contraintes) - FREQUENT - ADAPTE. Non évolutif (noyé dans le béton)	SECONDAIRE (Ouvrage ayant peu d'empirée au sol, donc peu sensible aux sous-pressions) - TRES RARE (en général dans les fondations) - Piézocell : BIEN ADAPTE	COMPLEMENTAIRE (importance relative) - SYSTEMATIQUE - BIEN ADAPTE (si calibre adéquat)
POIDS							
	FONDAMENTAL (dès l'origine) - COURANT (déconseillé structure à faibles déplacements. Pendule préférable, avec direct + indirect) - PEU ADAPTE	FONDAMENTAL (dès l'origine) - T.B. ADAPTE (T. efficace installation à posteriori souvent possible dans puits de drainage)	EVENTUEL (id. voûte) - ASSEZ COURANT (né souvent à des phénomènes d'évolution des bétons) - MOYENNEMENT ADAPTE	COMPLEMENTAIRE (tant pour joints que pour fissures) - COURANT - BIEN ADAPTE (efficace)	ACCESSOIRE - TRES PEU COURANT	FONDAMENTAL (les sous-pressions entraînent une réduction de l'effet voûte) - COURANT (inst. contact béton-rocher et fondation) - SYSTEMATIQUE - BIEN ADAPTE (si calibre adéquat)	FONDAMENTAL (on cherche à séparer les fuites de fondation de celles propres à l'ouvrage) - SYSTEMATIQUE - BIEN ADAPTE (si calibre adéquat)
POIDS-VOÛTE							
	FONDAMENTAL (dès l'origine) - TRES COURANT (pendule préférable) - MOYENNEMENT ADAPTE	FONDAMENTAL (dès l'origine) - T.B. ADAPTE (T. efficace installation à posteriori souvent possible dans puits de drainage)	EVENTUEL (id. poids) - ASSEZ COURANT (né souvent à des phénomènes d'évolution des bétons) - MOYENNEMENT ADAPTE	COMPLEMENTAIRE (tant pour joints que pour fissures) - COURANT - BIEN ADAPTE (efficace)	ACCESSOIRE - TRES PEU COURANT	FONDAMENTAL (id. poids) - SYSTEMATIQUE - BIEN ADAPTE (si calibre adéquat)	FONDAMENTAL (id. poids) - SYSTEMATIQUE - BIEN ADAPTE (si calibre adéquat)
A CONTREFORTS (A Voûtes Multiples)							
	FONDAMENTAL (dès l'origine) - TRES COURANT (justifié sur ce type de structure. Peut être associé-remplacé par pendules sur contreforts)	ASSEZ COURANT, mais disp. souvent complémen-taire (en tie rigueur, la les contreforts sont à équiper) - ASSEZ BIEN ADAPTE (facile à installer)	COMPLEMENTAIRE (utilisé aussi bien en pied qu'en couronnement) - TRES COURANT - BIEN ADAPTE	EVENTUEL (surout sur fissures) - COURANT - BIEN ADAPTE, efficace	COMPLEMENTAIRE - ASSEZ COURANT (Dans voûte et contrefort) - ADAPTE. Non évolutif (noyé dans le béton)	SECONDAIRE (id. voûte) - SYSTEMATIQUE (en général dans fondations) - Piézocell : BIEN ADAPTE	COMPLEMENTAIRE (importance relative) - PEU COURANT - SYSTEMATIQUE - BIEN ADAPTE (si calibre adéquat)
DIGUE							
	COMPLEMENTAIRE (importance relative) - JAMAIS	FONDAMENTAL (dès l'origine) - TRES COURANT (seul possible) - MOYENNEMENT ADAPTE (déplacements souvent faibles)	FONDAMENTAL (les tassements sont très représentatifs des phénomènes mécaniques) - TRES COURANT - TRES BIEN ADAPTE	COMPLEMENTAIRE - Survant type : T : JAMAIS E : COURANT sur masque amont béton	SANS FONDAMENT - JAMAIS	FONDAMENTAL - COURANT : T : Dans le corps de digue (Cellules consolidées) E : En fondation ou dans le noyau étiage	FONDAMENTAL (problème de renard, érosion...) - SYSTEMATIQUE - BIEN ADAPTE (si calibre adéquat)

Les commentaires ci-dessus ont trait (dans l'ordre) : - au caractère de nécessité (ou intérêt) des dispositifs pour l'auscultation ; - à l'équipement en dispositifs habituellement rencontrés sur les ouvrages auscultés d'E.D.F. ; - à l'adaptation de ces dispositifs aux phénomènes mesurés.

Figure 1 : Tableau récapitulatif des dispositifs d'auscultation et de leur emploi suivant les types d'ouvrages [1]

La justification de la pertinence du dispositif d'auscultation des barrages va au-delà de ces principes fondamentaux. Cela revient à requestionner au fil du temps l'adéquation du suivi « aux pathologies du patient », si l'on raisonne par analogie médicale. Comme le rappelle A. Schleiss [7] sur la pratique des ingénieurs en charge de l'auscultation des barrages « Un système d'auscultation n'est pas un système figé. En effet, il est bon d'examiner périodiquement s'il satisfait toujours aux exigences et aux besoins ; si nécessaire, il est complété, adapté ou modernisé ».

Ce n'est donc pas une pratique nouvelle, comme en témoigne l'évolution des dispositifs de chaque barrage au fil des décennies (exemples à EDF et CACG dans [3]). Il va de soi que l'instrumentation conçue pour réaliser le suivi de la première mise en eau n'est pas toujours adaptée à l'analyse du comportement d'un barrage en exploitation depuis plus de 70 ans. La question du vieillissement des appareils d'auscultation et de leur remplacement en cas de perte ou de dysfonctionnement est également un enjeu de sûreté.

Cette thématique revêt désormais un caractère réglementaire : l'arrêté du 08/08/2022 indique dans l'article 8 : « le rapport (d'auscultation) [...] indique également si le dispositif d'auscultation est pertinent et suffisant et si des modifications de celui-ci sont souhaitables ». C'est pourquoi, en l'absence de règle de l'art établie sur le sujet, EDF-DTG s'est emparé de la problématique depuis une quinzaine d'années (notamment à l'occasion des revues de sûreté et des EDD) de manière à structurer ses analyses et argumenter ses avis en s'appuyant sur une méthodologie basée sur l'adaptation de la surveillance aux risques.

2. REX EDF DES AVIS SUR LA PERTINENCE DU DISPOSITIF

Un REX vient d'être établi à partir des avis formulés sur la pertinence des dispositifs de 105 rapports d'auscultation rédigés par EDF-DTG entre 2009 et 2023. Ces rapports concernent exclusivement des barrages de classe A, de tous types (excluant canaux et BMR peu représentés) avec majoritairement des comportements satisfaisants (95 rapports sur les 105).

Globalement, il a été constaté que les raisonnements adoptés pour justifier de cette pertinence étaient assez hétérogènes d'un rapport à un autre, en lien avec la sensibilité des rédacteurs et vérificateurs du rapport. Il en résulte des avis variables dans l'argumentation, la profondeur d'analyse et même la mise en forme. Cette situation s'est toutefois estompée depuis quelques années car EDF-DTG a commencé à établir les bases d'une méthodologie d'analyse partagée, toujours en cours d'amélioration, cf. §3.

2.1. Avis et préconisations formulées

Les avis portés sur la pertinence du dispositif d'auscultation extraits des 105 rapports étudiés se répartissent ainsi :

- 12 rapports considèrent le dispositif pertinent en l'état, sans le modifier (RAS).
- 93 rapports proposent des évolutions formalisées sous **280 préconisations** :
 - 39 % des préconisations visent à *augmenter le niveau de surveillance* (ajouter des appareils, les améliorer, fréquences de mesures plus importantes)
 - 61% des préconisations visent à *alléger le niveau de surveillance* (suppression d'appareils, diminution de fréquence de mesure).

Du fait de l'échantillonnage des rapports étudiés, la grande majorité de ces 280 préconisations est issue de rapports d'auscultation concluant sur un comportement « satisfaisant ». Ainsi, la proportion de préconisations visant à *augmenter* ou *alléger* le niveau de surveillance reste quasiment inchangée si l'on considère uniquement les préconisations issues des rapports avec un comportement « satisfaisant ». En revanche, en se focalisant sur les rapports avec un comportement « pas satisfaisant » (i.e. comportement « à surveiller » ou qui « attire l'attention »), la proportion de préconisations visant à *augmenter* le niveau de surveillance devient plus important (cf. figure 2).

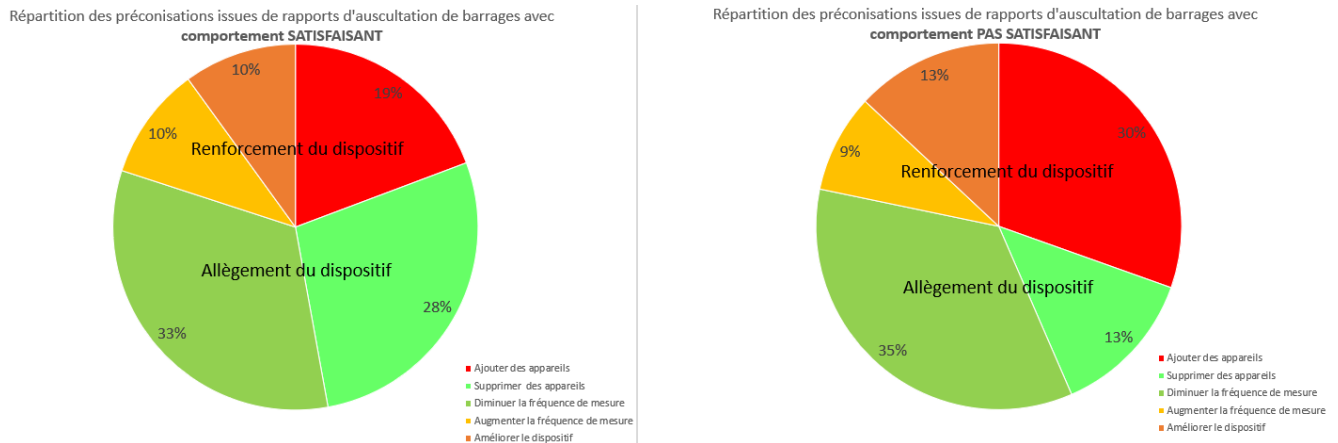


Figure 2 : Répartition des 257 préconisations issues de rapports avec comportement « satisfaisant » (à gauche) et des 23 préconisations issues de rapport avec comportement « pas satisfaisant » (à droite)

2.2. Focus sur quelques thématiques du REX

2.2.1. Préconisations d'ajout de nouveaux appareils

- Concernant les barrages en remblai, il a généralement été proposé d'ajouter des points de nivellement lorsque le risque de surverse par perte de revanche était redouté ou indirectement en cas de risque d'érosion interne. Sur ce dernier point, il a été proposé l'installation d'alarmes sur des points de fuites avec risque de cinétique rapide.



Figure 3 : Installation d'un dispositif d'alarme sur dépassement de débit de fuite suite analyse de la pertinence du dispositif et préconisations dans le rapport d'auscultation de Gréoux [7]

La problématique de perte de cellules de pression interstitielles noyées a pu conduire à préconiser leur remplacement où l'ajout de piézomètres (exemple à Serre-Ponçon [1], à Soulcem [3] ou Montézic, ci-dessous) lorsque le nombre d'appareils fonctionnels était considéré insuffisant.



Figure 4 : Installation de nouvelles cellules piézométriques en vidange sous le masque amont d'un remblai (Montézic)

- *Au niveau des barrages en béton*, la majorité des compléments d'instrumentation concerne les ouvrages pathologiques atteints de gonflement. Dans ce cas, l'ajout de mesures de déplacement vertical (nivellement, pendule zénithal) permet de confirmer une suspicion de gonflement mais aussi de mieux le caractériser (estimation des taux de gonflements). Cela peut aussi conduire à instrumenter localement des fissures, joints, zones de déformations ou écartement de passes d'évacuateurs vannés (risque de blocage induit par le gonflement). Le cas très particulier des voûtes gonflantes à culées a généralement encouragé l'instrumentation de celles-ci (piézométrie + déplacement), voir les exemples ci-dessous et à Choranche [1].

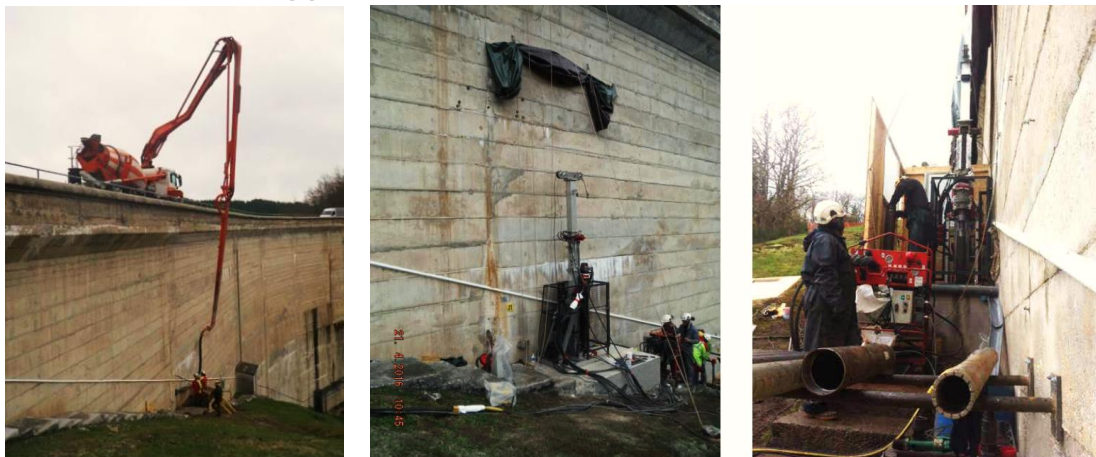


Figure 5 : Réalisation d'un nouveau pendule au niveau de la culée RD d'un barrage voûte (Monceaux)

- Le recalcul quasi systématique des voûtes à l'occasion des EDD de nouvelle génération (justification de l'ATB) a mis en évidence de nombreuses suspicions de tractions en pied amont (sur les ouvrages en vallée larges mais pas uniquement). L'usage de modèles non-linéaires avec des éléments joints au contact béton-rocher fait partie des règles de l'art à appliquer. Il convient alors de considérer dans le modèle de possibles sous-pressions, associées à une ouverture du contact, qui méritent d'être validées par des mesures piézométriques. Lorsque celles-ci n'étaient pas disponibles, elles ont fréquemment été préconisées, voir exemple ci-dessous et dans [1].

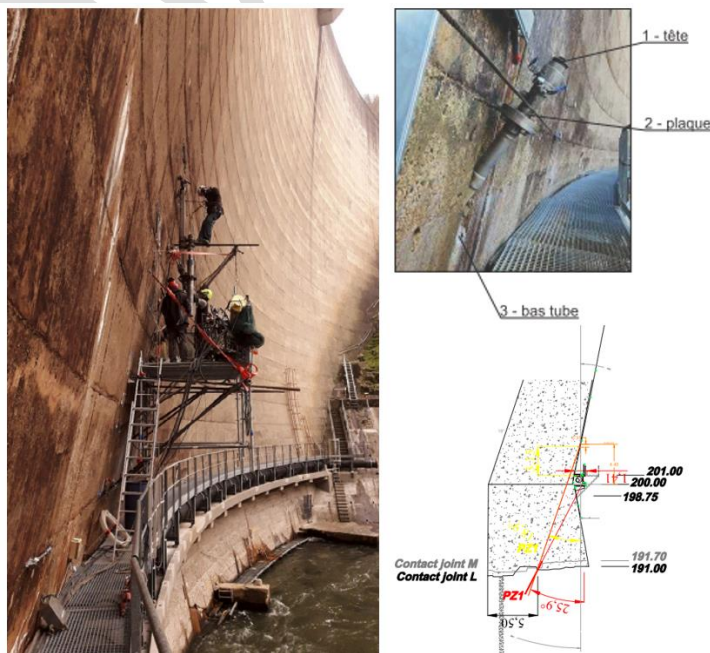


Figure 6 : Création nouveau piézomètre au contact béton-rocher d'un barrage voûte (Hautefage)

2.2.2. Préconisations d'allègements (suppression ou diminution de la fréquence des mesures)

La figure suivante détaille (en bleu) les 78 préconisations (parmi les 280 du REX) qui concernent l'arrêt de mesure, par type d'appareils et en nombre d'appareils concernés (en orange).

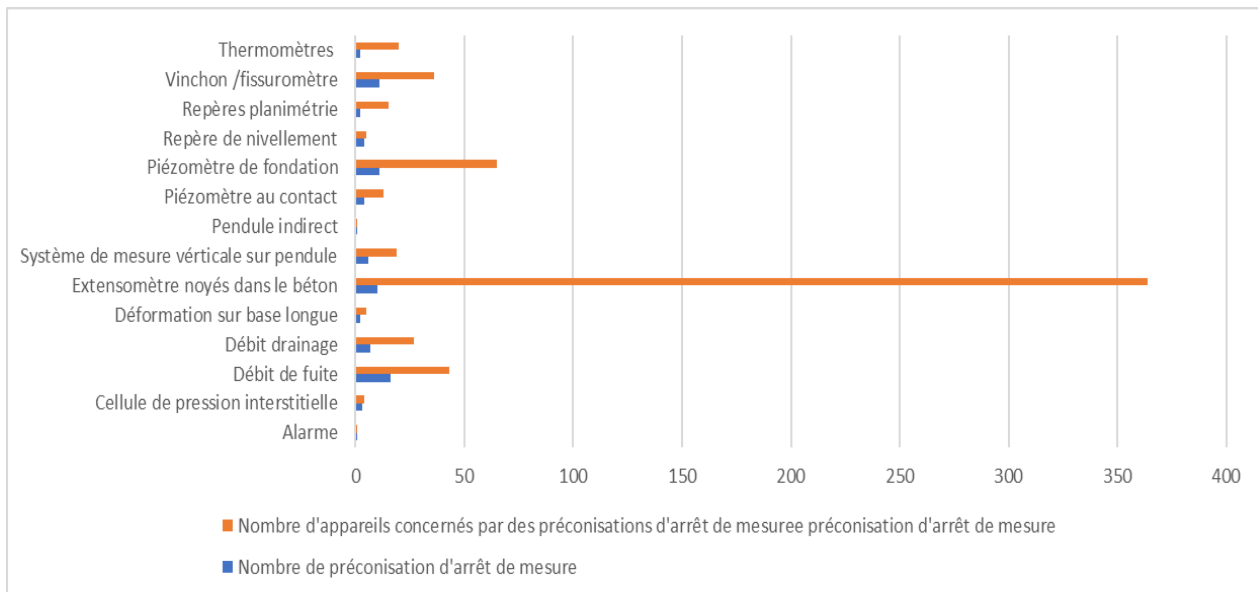


Figure 7 : REX sur les préconisations d'arrêt de mesure de certains appareils d'auscultation

- De manière générale, les *mesures aux extensomètres (témoins sonores)* noyés dans le béton des barrages voûtes a quasi systématiquement fait l'objet de proposition d'allègement. Il s'agissait soit de réduction de la fréquence de mesure ou de l'arrêt des mesures (10 préconisations recensées dans des rapports qui concernaient plus de 350 appareils, cf. ci-dessus).
En effet, il est admis depuis longtemps que ces capteurs noyés, très localisés, non-contrôlables ni remplaçables présentent un intérêt limité. Ces mesures étaient surtout utiles lors de la mise en eau des voûtes pour le contrôle des rosettes de déformation sous chargement hydrostatique. Désormais, les mesures de déplacements (topographie, pendule) associées à des déformations locales sur bases longues (extensomètres de forage, fil INVAR, distancemètre laser, voire inclinomètres) sont beaucoup plus adaptées à la compréhension du comportement mécanique des voûtes.
- Dans une moindre proportion il fut proposé l'allègement ou l'arrêt des mesures de :
 - Contrôleurs de fissures (vinchons) ne montrant pas d'évolution significative sur de longues années
 - Pendules zénithaux (essentiellement lorsque leur fonctionnement est douteux et qu'ils sont redondés par du nivellement par exemple),
 - Piézomètres surtout s'ils sont redondés, a fortiori s'ils ne fonctionnent plus correctement,
 - Débit de fuites locales ou de drainage lorsqu'ils sont devenus durablement nuls ou non captables et suivis en examens visuels.
- Concernant les *mesures topographiques* (planimétrie et nivellement), une campagne d'harmonisation des fréquences fut mise en œuvre en 2020 sur tous les barrages EDF concernés. L'opération faisait suite à une analyse globale du parc, tenant compte du type de barrage, de son comportement, sa classe et les redondances éventuelles avec d'autres moyens de mesure. Cela a conduit à certaines évolutions de périodicité de relevés topographiques.

2.2.3. Préconisations visant à améliorer ou fiabiliser le dispositif

L'analyse de la pertinence du dispositif est l'occasion de **considérer les éventuelles défaillances d'appareils** (pannes, dysfonctionnements...) et les mettre en regard d'un niveau de surveillance optimum adapté au comportement connu du barrage et aux risques identifiés.

Le REX met en exergue plusieurs sortes de préconisations visant à fiabiliser le dispositif : il s'agit de contrôler, expertiser des appareils et le cas échéant les réparer ou les remplacer.

Il ressort principalement des actions de type :

- *Réfection de captage de drains ou de fuites* contournées ou création de points totalisateurs de fuites,
- *Modifications de piézomètres* mal conçu (longueur de crépine inappropriée) ou défaillants (défaut d'étanchéité du tubage) conduisant à refaire des piézomètres ou mettre en place des capteurs (manomètres, cellules de pressions) ou des obturateurs...
- *Investigation sur des capteurs à fonctionnement douteux* (essais d'eau de piézomètres, passage caméras dans tubages de pendules ou piézomètres, test d'ancrage de pendules inversés...),
- *Critique du réseau topographique* en cas de doute sur les mesures et les hypothèses de fixités.

Enfin, il ressort toujours des remarques visant à maintenir un bon niveau d'entretien des appareils, l'intérêt des méthodes de surveillance autre que l'auscultation (examens visuels, bathymétrie, endoscopie de drains...) et des tournées de surveillance particulières, cf. §3.2.3.

3. ACTUALITES ET PERSPECTIVES

La généralisation de l'analyse de la pertinence du dispositif dans les rapports d'auscultation a nécessité pour EDF de se doter d'une méthodologie pour traiter le sujet. Les principes fondamentaux d'adaptation des moyens de surveillance aux risques ont fait l'objet de nombreuses réflexions, publications [1][2][4] et sont désormais communément admis. Par ailleurs, la trame type des rapports d'auscultation d'EDF a été retravaillée pour être mieux structurée et gagner en cohérence.

Le fond méthodologique est ciblé pour répondre aux démonstrations de niveau de sûreté portés par la surveillance, dans le cadre des EDD principalement. Il a été développé en s'appuyant sur l'expertise de DTG, sa base de données d'auscultation et la prise en compte de publications de la profession.

Les chapitres suivants évoquent les grandes lignes de la méthode encore en cours de développement.

3.1. Pourquoi et comment démontrer la pertinence du dispositif d'auscultation ?

L'analyse de la **pertinence du dispositif de surveillance du barrage s'intègre logiquement dans l'EDD** à travers la barrière de prévention générique « abaissement du plan d'eau », cf. figure 8 ci-après. En effet, le niveau de confiance (NC) de cette barrière et sa capacité à décoder les probabilités des Événements Initiateurs auxquels elle est associée, dépend de :

- L'efficacité de la surveillance (et donc sa pertinence) pour alerter de situations non-sûres,
- Et la capacité à abaisser le plan d'eau via une organisation des organes de sécurité adaptés.

La démonstration de la pertinence du dispositif faite dans le rapport d'auscultation et les éventuelles préconisations d'évolution, servent ainsi à démontrer une partie de l'efficacité de la barrière « abaissement du plan d'eau ».

La démonstration de la pertinence du dispositif repose ainsi sur le traitement des items suivants :

- Adéquation des **phénomènes surveillés aux modes de défaillances** du barrage étudié (cf. §3.2.1),
- Cohérence du **nombre d'appareils** avec la géométrie et le comportement connu de l'ouvrage étudié, en considérant les capteurs opérationnels et ceux en panne ou défaillants (cf. §3.2.2),
- Cohérence de la **fréquence de mesure** avec les modes de défaillance et leurs cinétiques,

- Cohérence entre la **localisation des appareils** et l'analyse fonctionnelle du barrage étudié, les informations des examens visuels et études de comportement (modélisation, note de calcul...).

3.2. Focus sur quelques points méthodologiques

Sans être exhaustif ni les détailler, il est précisé ci-après quelques notions sur la méthodologie adoptée.

3.2.1. Adéquation des phénomènes surveillés aux modes de défaillances

Cet item se base sur la connaissance des modes de défaillance génériques propres à chaque type de barrage et aux phénomènes communément auscultés. Des tableaux de « pertinence », tels que celui présenté ci-dessous, peuvent être établis en cohérence avec l'évaluation des risques de l'EDD et en s'appuyant au besoin sur des avis d'experts :

Modes de défaillance / Phénomènes à surveiller	Déplacements absolus Horizontaux	Déplacements absolus Verticaux	Déplacements relatifs sur base courte	Déplacements relatifs sur base longue	Niveaux piézométriques dans la fondation	Niveaux piézométriques (corps ou contact)	Débit de fuite	Débit de drainage d'élévation (corps/contact)	Débit de drainage de fondation	Examen Visuel ou autre dispositif de surveillance
Cisaillement Fondation										
Cisaillement Barrage	X							X	X	
Cisaillement Contact barrage/fondation	X					X				X
Basculement/Fissuration amont/Compression pied aval	X					X				X
Erosion fondation ou pied aval (affouillement)										X

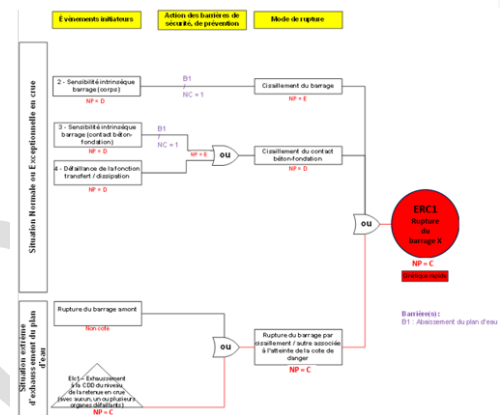


Figure 8 : Exemple de tableau de pertinence de phénomènes à surveiller d'un barrage poids (à gauche) élaboré en cohérence avec l'analyse de risque rupture barrage de l'EDD (à droite)

Inspiré de publications internationales récentes [5][6], ce tableau « de pertinence » permet de coller à l'analyse de risque de l'EDD en associant modes de défaillance et conséquences observables, en termes de phénomènes physiques à surveiller. Ces tableaux peuvent être établis de façon générique pour les principaux types de barrages (poids, voûtes, remblais, contreforts, BMR) et complétés, au cas par cas, en fonction du comportement connu du barrage étudié et sa sensibilité aux différents modes de défaillance définis via les cotations de l'EDD.

Dans l'exemple de la figure précédente, on considérerait également pertinent de surveiller les déplacements absolus verticaux et des déplacements relatifs (fissuromètre...) si le barrage poids étudié était en moins bon état, fissuré et affecté de gonflement, donc avec des sensibilités accrues vis-à-vis de certains modes de défaillance, en cohérence avec des cotations plus critiques de l'ADR de l'EDD.

3.2.2. Avis sur le nombre d'appareils d'auscultation

« Il n'y a pas de règle pour définir le nombre d'appareils de mesure nécessaires pour assurer un suivi satisfaisant du comportement » [7]. Pour autant, en exploitant la base de données d'auscultation d'EDF, il est possible de confirmer statistiquement une certaine corrélation entre la géométrie des barrages et le nombre d'appareil d'auscultation. L'autre facteur d'influence étant le comportement de l'ouvrage : il va de soi qu'un ouvrage sain sera généralement suivi avec moins d'instruments qu'un ouvrage pathologique, à géométries similaires.

Cette approche ne convient qu'aux appareils génériques « classiques » tels que nombre de points topographiques, pendules, piézomètres, mesure d'écartement de joints. Elle ne se vérifie pas sur le nombre de points de fuites ou de fissures instrumentées (dépendant des matériaux et du comportement intrinsèque de l'ouvrage). De même il ne peut pas être fait de statistiques sur certains capteurs moins courants. Mais le cas échéant, il peut être utile de critiquer le nombre d'appareils en service sur l'ouvrage que l'on étudie, surtout en cas de pertes ou de dysfonctionnement d'appareils. Les besoins de redondance peuvent être alors objectivés par ces données statistiques.

Dans l'exemple suivant, le barrage voûte étudié, d'une longueur en crête de 280 m est ausculté avec 5 pendules. Ce nombre peut être considéré comme faible, au vu des statistiques du parc EDF. Pour autant, cette situation pourra être considérée comme acceptable si l'ouvrage étudié ne présente pas de problème de comportement mécanique et si par ailleurs d'autres appareils de mesure de déplacement/déformations peuvent redonner les mesures aux pendules.

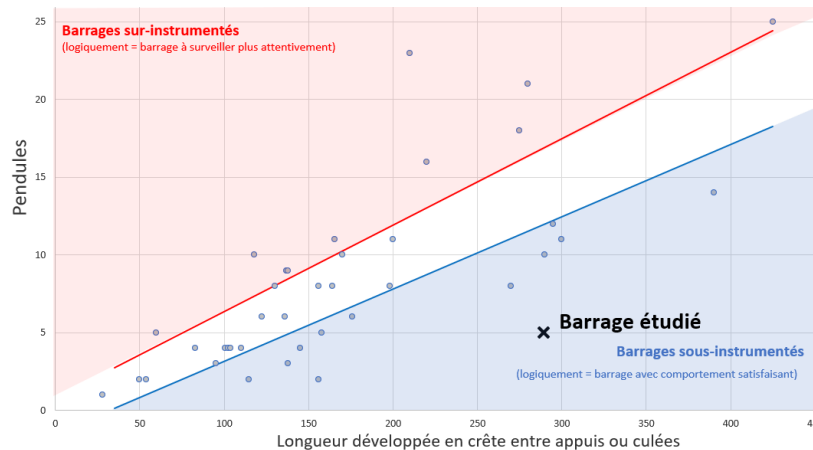


Figure 9 : Répartition du nombre de pendules des voûtes EDF en fonction de la longueur en crête de ces dernières (m)

3.3. Pertinence de la surveillance globale du barrage et son environnement

Au-delà de l'analyse de la pertinence du dispositif d'auscultation, il paraît logique d'élargir la réflexion à la surveillance globale du barrage et son environnement en incluant notamment :

- Les **actions ou moyens complémentaires de surveillance** tels que les visites techniques approfondies, relevés de fissuration, bathymétries, contrôle de profondeur de drains, alarmes dès lors qu'elles sont mises en œuvre dans le cadre de la maîtrise de risques identifiés,
- Les situations donnant lieu à des **tournées de surveillance particulières**, en fonction de la sensibilité des ouvrages et des risques identifiés lors de l'EDD. L'objectif est de compléter la surveillance réglementaire définie en exploitation normale par des actions conditionnées lors de situations exceptionnelles potentiellement pénalisantes :
 - De façon générique, les surveillances *post-séisme* sont très bien définies à EDF et seront d'autant plus pertinentes que l'ouvrage étudié présente un risque sismique avéré.
 - Certains ouvrages sensibles thermiquement (voutes minces) peuvent bénéficier de *tournées de surveillance accrues lors d'épisodes climatiques exceptionnels*.
 - Des *chargements hydrostatiques exceptionnels* : gradients d'abaissements, pluviométrie, vidange, travaux, exploitations particulières... sont autant de situations qui peuvent amener à introduire des suivis particuliers.
- La **surveillance des ouvrages de Génie Civil « annexes »** (bouchon béton, seuil EVC...) dès lors qu'ils sont identifiés dans l'EDD comme ouvrage retenant l'eau pouvant libérer dangereusement de l'eau de façon incontrôlée. Le travail de démonstration de la pertinence est ici moins poussé que pour le cas du barrage, et la surveillance de ces ouvrages annexes n'est pas toujours valorisée comme une barrière de prévention.

Comme précédemment sur la pertinence de l'auscultation, l'élargissement de la réflexion sur ces trois thématiques **nécessite une analyse croisée entre les différents experts de l'ingénierie du domaine génie-civil** (auscultation, géologie, spécialiste calcul...) qui, au regard de leur connaissance de l'ouvrage pourra critiquer les mesures en place (ex. analyse des mesures d'auscultation réalisée suite épisode pluvieux au barrage de Gréoux n'indiquant pas de changement de comportement avéré dans ces circonstances et conduisant à arrêter cette pratique) ou en préconiser de nouvelles.

3.4. Perspectives dans le domaine de l'auscultation

L'auscultation fait usage d'appareils de mesures qui permettent **de surveiller précisément les ouvrages** (et avoir la capacité d'alerter et mettre en sécurité, au sens de la barrière « abaissement du plan d'eau » citée précédemment). Cette surveillance pouvant être *pérenne* (vieillessement long terme) ou *temporaire* (durant une période sensible en vidange par exemple). Ces mesures servent également à **analyser a posteriori le comportement** (lors des rapports d'auscultation) des ouvrages, alimentent des modèles de comportement et de prévision de comportement. Elles servent aussi à mieux comprendre certains mécanismes complexes et il peut être utile ici aussi de mettre en place une *instrumentation temporaire* permettant de valider des hypothèses ou rechercher des explications à des comportements particuliers.

Dans les 2 cas d'application **les nouvelles technologies permettent de mettre rapidement en place des instrumentations de surveillance « temporaires » ou « particulières »**, qui complètent le dispositif d'auscultation « réglementaire et pérenne ».

On pense notamment à toutes les applications de suivi de comportement des canaux par capteurs à fibre optique, mais cela peut être étendu à de très nombreux cas d'applications qui ont été mis en œuvre ces dernières années. De même, les moyens particuliers mis en œuvre lors des Examens Préalables aux Diagnostics Exhaustifs (EPDE) sont également à considérer comme des dispositifs de surveillance « particuliers » à adapter aux risques, au même titre que le dispositif d'auscultation.

Ces instrumentations particulières sont désormais facilitées par la démocratisation de technologies permettant l'automatisation des mesures d'auscultation. Centrales d'acquisitions et capteurs de type IoT (intelligence of things = sans fil et autonomes en énergie) offrent des solutions rapides pour un suivi renforcé durant une période d'exploitation particulière (vidange par exemple). De même, la topographie sur prismes qui se généralise à EDF (programme national de modernisation) peut être désormais télémessurée ce qui permet d'accroître considérablement les fréquences de mesures. Pour autant, il convient de valoriser ces systèmes à bon escient et toujours en lien avec un besoin validé par l'analyse de la pertinence de cette surveillance particulière. La surabondance d'appareils et de mesures n'est d'ailleurs pas toujours souhaitable « il est préférable de disposer d'un nombre restreint d'instruments fiables, ce qui facilite aussi l'interprétation des mesures » [8] : l'analyse pouvant être dans ce cas très chronophage.

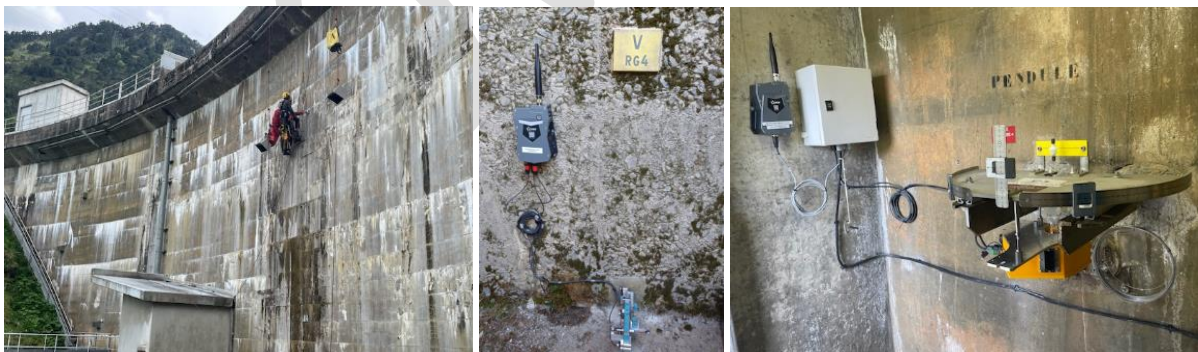


Figure 10 : Instrumentation temporaire avec capteurs IoT, pour suivi d'une période de travaux

4. CONCLUSION

Le dispositif d'auscultation et l'organisation des mesures de surveillance sont fondamentalement en lien avec les enjeux de sécurité des barrages. C'est en cela que la pertinence des dispositifs doit être vérifiée régulièrement à l'aune des évolutions comportementales des ouvrages et de l'actualisation des analyses de risques.

La justification réglementaire de cette pertinence permet à la fois de corriger d'éventuels manquements du dispositif de surveillance mais aussi d'optimiser et rationaliser les appareils d'auscultation en veillant à ce qu'ils

soient suffisants en nombre opérationnel, toujours bien répartis en lien avec la connaissance de l'ouvrage et son analyse fonctionnelle. La notion de surveillance particulière prend aussi tout son sens pour répondre à certaines sensibilités particulières d'ouvrages mises en lumière par les différentes études de sûreté (analyse de risque, étude de comportement...) et le REX. La mise en œuvre de surveillances particulières est désormais facilitée par l'essor de technologies permettant des instrumentations temporaires agiles et performantes qu'il convient toutefois d'utiliser à bon escient.

La démarche de justification de la pertinence d'un dispositif de surveillance reste relativement nouvelle si l'on souhaite la mener avec rigueur et méthode ; elle n'en demeure pas moins essentielle car elle s'intègre dans la démonstration du niveau de sûreté, via les barrières de préventions de l'analyse de risque de l'EDD.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Francklin ASSI, élève ingénieur à l'ESTP Paris qui a contribué, dans le cadre de son stage de TFE 2024, à la réalisation du REX sur la pertinence du dispositif et à l'amélioration de la méthodologie d'EDF DTG sur le sujet.

Nous tenons également à remercier MM. Anton Schleiss et Henri Pougatsch pour leur travaux qui sont source d'inspiration.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] SAUSSE J. FABRE J.P., BOUDON R., HOONNAKKER M. Évolutions récentes du concept et des moyens d'auscultation des barrages. CIGB 25ème Congrès des Grands Barrages Q99, Stavanger - Norway 2015
- [2] BOURGEY Ph., SAUSSE J. La surveillance adaptée aux risques. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues - Pratiques et perspectives », Chambéry - France, 2012.
- [3] BOUBEE D., WEISS P., SAUSSE J. Adaptation continue du dispositif d'auscultation d'un barrage régulièrement suivi. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues - Pratiques et perspectives », Chambéry - France, 2012.
- [4] SAUSSE J., PEREZ M., BOURGEY Ph. Surveillance of dams adapted to risks. 3rd International Week on Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security, and Critical Infrastructure Management. Valencia - Spain, 2011.
- [5] PIMENTA DE ÁVILA J., LOPES TEIXEIRA G. Risk based monitoring planning. CIGB 27ème Congrès des Grands Barrages Q106, Marseille – France 2022
- [6] British Dam Society – Projet SC080048/R1 – Modes of dam failure and monitoring and measuring techniques – 2011
- [7] SCHLEISS A., POUGATSCH H. Les barrages – Du projet à la mise en service volume 17 – Presses Polytechniques et Universitaires Romandes – édition 2011