

AUSCULTATION DES BARRAGES POIDS AU FIL DE L'EAU

Monitoring of Run-of-River Gravity Dams

Vincent FUCHS, Christophe PICAULT
CNR, 05 rue Chalon-sur-Saône 69007 LYON
v.fuchs@cnr.tm.fr ; c.picault@cnr.tm.fr

Jean Paul FABRE
AB FABRE Consulting, 02 chemin des Campares 31450 AYGUESVIVES
fabre.jeanpaul@laposte.net

MOTS CLEFS

Surveillance, Barrage poids, Auscultation d'ouvrage, Contrôle, Instrumentation

KEY WORDS

Monitoring, Gravity Dam, Auscultation, Controlling, Instrumentation

RÉSUMÉ

La surveillance des barrages est une activité essentielle pour garantir leur sûreté. Les pratiques de surveillance sont souvent le résultat d'approches historiques et peuvent varier d'un ouvrage à l'autre, même si les barrages partagent des caractéristiques similaires. Il s'agit là de la problématique à laquelle est confrontée CNR qui assure l'exploitation d'un parc de barrages d'âges différents mais d'architectures similaires.

Afin de standardiser la surveillance de ses ouvrages, CNR a développé une méthodologie destinée à orienter les modalités d'auscultation en se concentrant sur la détection précoce des processus de dégradation qui pourraient impacter leur sûreté et nécessiter des actions adaptées de surveillance renforcée, de gestion préventive du plan d'eau ou de travaux correctifs immédiats.

La méthodologie déployée par CNR pour atteindre cet objectif repose sur l'identification des processus de dégradation susceptibles d'affecter les composants fonctionnels de ses ouvrages : bétons, fondations, étanchéités, systèmes de drainage et dispositifs de protection. La surveillance est donc axée sur le contrôle des paramètres mesurables ou observables, représentatifs de ces processus de dégradation.

Cette approche a permis de recenser l'ensemble des paramètres pertinents, de justifier le type d'appareils d'auscultation à installer et enfin de définir une implantation représentative et stratégique. Elle est fondée sur des principes issus de l'expérience de l'entreprise en matière de surveillance. Cette expérience se base sur une connaissance approfondie des ouvrages depuis leur mise en service, une maîtrise des dispositions constructives, et une maintenance rigoureuse garantissant la fiabilité des systèmes d'auscultation. Cette démarche a permis de définir les ordres de grandeur des dérives redoutées et d'adapter la périodicité des mesures en fonction des cinétiques de dégradation observées.

ABSTRACT

Dams' monitoring is an essential activity to ensure their safety. Monitoring practices are often the result of historical approaches and can vary from one structure to another, even though the dams exhibit similar characteristics. This is the challenge faced by CNR, which operates hydroelectric facilities comprising dams of different ages but with similar designs.

In order to standardize the monitoring of its dams, CNR has developed a methodology aimed at guiding monitoring procedures by focusing on the early detection of degradation processes that could impact their safety and require adapted actions, such as enhanced monitoring, preventive water level management, or immediate corrective measures.

The methodology deployed by CNR to achieve this objective is based on the identification of degradation processes that can affect the functional components of its structures: concrete, foundations, watertightness, drainage systems, and protection works. Monitoring is therefore focused on the control of measurable or observable parameters that are representative of these deterioration processes.

This approach, based on principles derived from CNR's experience in monitoring, has enabled to identify all relevant parameters, to justify the type of monitoring devices to be installed, and to define a representative and strategic implementation of these monitoring systems. This experience is based on in-depth knowledge of the structures since their commissioning, mastery of their construction elements, and rigorous maintenance ensuring the reliability of their monitoring systems. This approach has permits to define the order of magnitudes of possible deviations in the measurements and to adjust the corresponding frequency according to the observed degradation kinetics.

1. PRESENTATION DES OUVRAGES

CNR, concessionnaire du Rhône, remplit trois missions solidaires : la production d'hydroélectricité, la navigation et l'irrigation des terres agricoles. Pour assurer ces missions, CNR a conçu et construit une série de 19 aménagements en cascade le long de la vallée du Rhône. Ces aménagements dits de "basse chute" comprennent généralement un barrage mobile situé en travers du lit historique du Rhône et qui dérive ses eaux dans un canal de dérivation jusqu'à une usine de production hydroélectrique. Une écluse est généralement située en rive de l'usine pour permettre le franchissement de la chute.

L'architecture de ces ouvrages présente une homogénéité le long de la vallée, bien que des adaptations soient imposées par les équipements mécaniques ou la nature des sols de fondations. Les ouvrages CNR sont des ouvrages poids composés de plots successifs fondés sur des sols meubles ou rocheux. La nature de ces sols a nécessité de prévoir des dispositions constructives adaptées pour assurer notamment l'étanchéité, le drainage ou l'ancrage des ouvrages sur leur fondation.

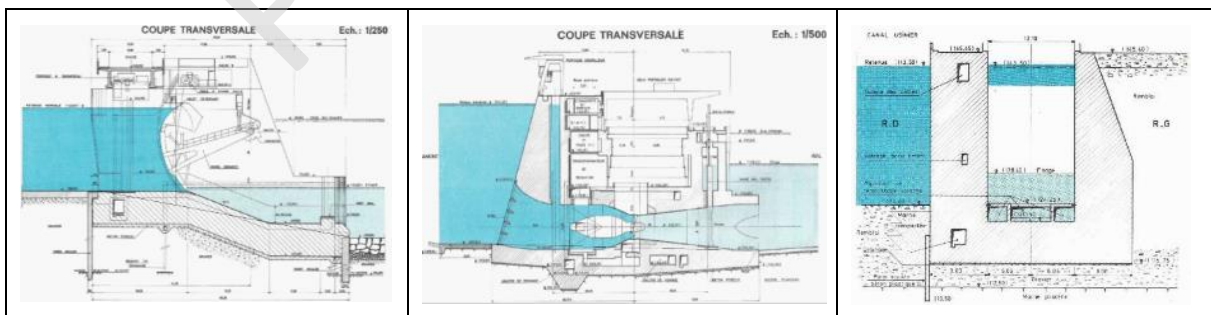


Figure 2. Coupe transversale d'un barrage mobile, d'une usine et d'une écluse CNR

Ces ouvrages au fil de l'eau, dont certains ouvrages ont plus de 70 ans, sont caractérisés par une conception, une exploitation et un environnement similaires. Ils disposent d'une quantité importante de données d'auscultation offrant une description détaillée et complète de leur comportement. Ils constituent ainsi le périmètre d'application de la méthodologie mise en œuvre par CNR pour standardiser le dispositif d'auscultation existant.

1. DEMARCHE DE SURVEILLANCE

1.1.Modalité de surveillance

La surveillance des barrages est une activité régulière destinée à vérifier l'absence de processus de dégradation susceptible d'augmenter les actions appliquées aux ouvrages ou de diminuer les paramètres intrinsèques de résistance. Il en résulterait une modification des conditions d'équilibre qui engendre une réaction favorable ou défavorable à la sûreté de l'ouvrage.

Il existe alors trois modes de surveillance utilisés pour identifier ces processus de dégradation :

- La surveillance des actions : Elle se concentre sur la mesure des charges appliquées à l'ouvrage. Les charges permanentes, comme le poids propre, sont généralement exclues, tandis que les charges variables, telles que la poussée hydrostatique ou la sous-pression, sont surveillées pour s'assurer qu'elles restent dans le domaine prévu par les hypothèses de conception ;
- La surveillance des paramètres de résistance des matériaux : Elle implique des essais sur site ou en laboratoire pour évaluer les caractéristiques mécaniques ou hydrauliques des matériaux. Cette approche nécessite un personnel spécialisé et des méthodes d'investigation souvent destructives. Elle est généralement utilisée pour diagnostiquer des pathologies spécifiques plutôt que pour une surveillance régulière ;
- La surveillance des réactions de l'ouvrage : Elle se base sur la mesure de déplacements, de déformations, de débits de fuite ou de drainage, ainsi que sur l'observation de l'état des matériaux et des conditions d'étanchéité ou de drainage. Ces mesures ou ces observations permettent d'identifier les effets irréversibles sur l'ouvrage.

Il est important de noter que la plupart des processus de dégradation sont initiés par des actions extérieures qui génèrent des pertes de résistance ou d'étanchéité, et donc des réactions au sein de l'ouvrage. Il peut s'agir de processus de vieillissement des matériaux. Pour détecter au plus tôt ces processus, il est recommandé de privilégier la surveillance des actions et de confirmer la réversibilité ou l'irréversibilité des effets par la surveillance des réactions. Cette approche permet de détecter rapidement les changements significatifs affectant la stabilité de l'ouvrage.

Un exemple spécifique est la dégradation de la fondation d'un barrage, qui peut affecter son comportement hydraulique. La surveillance peut inclure la mesure des sous-pressions ou des paramètres de perméabilité du sol de fondation. La perméabilité est un paramètre de résistance qui ne peut être déterminé que par des essais, tandis que la sous-pression est une action mesurable par des appareils d'auscultation. La surveillance vise à contrôler la répartition des sous-pressions par rapport au schéma théorique de conception, et à s'assurer de l'absence d'une évolution due à des changements dans la charge hydrostatique, qui pourraient se traduire par une réaction de l'ouvrage telle qu'un déplacement, une érosion, une sédimentation, des débits, ou d'autres facteurs.

1.2.Processus de dégradation

Un processus de dégradation est un phénomène évolutif qui modifie un ou des paramètres physiques intervenant dans les équations d'équilibre d'un état-limite. Un état limite correspond à des conditions au-delà desquelles l'ouvrage ne présente plus un comportement satisfaisant à l'égard des exigences d'exploitation ou de sûreté. Il est basé sur des critères de contraintes ou de déformations admissibles.

Les paramètres physiques sont les paramètres associés aux actions appliquées à l'ouvrage ou aux résistances intrinsèques de l'ouvrage. Les principales actions appliquées aux ouvrages poids sont les actions liées à leur poids propre, aux poussées et aux pressions sous ou sur l'ouvrage. Les principaux paramètres de résistances des ouvrages poids sont associés aux caractéristiques mécaniques ou hydrauliques des matériaux telles que la capacité portante, la perméabilité, la résistance à la traction, à la compression ou à l'érosion.

La revue exhaustive de ces paramètres physiques permet de définir les processus de dégradation qui ont un impact sur la sûreté d'un ouvrage. Ces derniers servent de base à l'analyse des modes de défaillance d'un ouvrage poids dans les EDD :

- Processus de dégradation des bétons ;
- Processus de dégradation des fondations ;
- Processus de dégradation des étanchéités ;
- Processus de dégradation du drainage ;
- Processus de dégradation des protections.

1.3. Phénomènes mesurables ou observables

Les paramètres physiques affectés par les processus de dégradation présentent des évolutions qui se manifestent par des phénomènes mesurables ou observables.

Parmi les phénomènes mesurables, les évolutions des sous-pressions, des dépôts de sédiments ou des fosses d'érosion sont les phénomènes le plus souvent à l'origine d'une variation des actions appliquées à l'ouvrage : poussées sous l'ouvrage ou sur l'ouvrage. Les évolutions des déplacements, des déformations, des débits de fuite ou de drainage constituent quant à eux des phénomènes mesurables consécutifs aux réactions de l'ouvrage face aux processus de dégradation.

Parmi les phénomènes observables, l'évolution de l'état des bétons apporte généralement des informations intégratrices généralisables à la qualité des bétons de masse. Elle permet d'identifier les signes d'altérations physico-chimiques ou mécaniques du matériau. L'observation visuelle constitue d'ailleurs une donnée d'entrée très utile à la définition de mesures locales de déformations lorsqu'une quantification de l'évolution est nécessaire, notamment dans le cas de l'apparition d'une fissure.

Le tableau suivant présente une liste synthétique des principaux phénomènes mesurables ou observables associés à chacun des processus de dégradation précédemment identifiés :

Processus de dégradation	Phénomènes mesurables	Phénomènes observables
Processus de dégradation des bétons	Evolution des déformations	Fissuration et éclatement des bétons, formation excessive de calcite, corrosion des armatures
Processus de dégradation des fondations	Evolution des déplacements	Désalignement ou désaffleurement des structures
Processus de dégradation des étanchéités	Evolution des sous-pressions Evolution des déplacements Evolution des débits de fuite ou de drainage Evolution des dépôts de sédiments ou des fosses d'érosion	Infiltrations excessives Désalignement ou désaffleurement des structures Activité anormale des drains Dépôts de sédiments ou fosse d'affouillement
Processus de dégradation du drainage	Evolution des sous-pressions Evolution des déplacements Evolution des débits de fuite ou de drainage Evolution des dépôts de sédiments ou des fosses d'érosion	Infiltrations excessives Désalignement ou désaffleurement des structures Obstruction des drains Dépôts de sédiments ou fosse d'affouillement
Processus de dégradation des protections	Evolution des dépôts de sédiments ou des fosses d'érosion	Eclatement d'enrochements, abrasion et martellement des bétons, fosse d'affouillement

Tableau 1. Phénomènes mesurables ou observables des processus de dégradation.

Ce tableau illustre qu'un processus de dégradation est la combinaison de plusieurs phénomènes. Les études menées sur les ouvrages CNR [6] montrent qu'une fois les fondations consolidées, les phénomènes représentatifs d'un processus de dégradation peuvent être détectés "au plus tôt" par la mesure de l'évolution des sous-pressions, des dépôts, des fosses, ou de l'observation de l'état des bétons. Cependant, ces mesures ou ces observations ne suffisent pas à relier directement un phénomène à un processus de dégradation. Des données supplémentaires sont indispensables pour discriminer le processus à l'œuvre. La mesure des déplacements et des déformations fournit des informations sur le comportement mécanique de l'ouvrage en réponse aux variations d'actions appliquées. Lorsque les fondations ne sont pas consolidées, ces mesures sont essentielles pour comprendre les interactions hydromécaniques. De plus, la mesure des débits, combinée à celle des sous-pressions, est cruciale pour interpréter le comportement hydraulique des fondations.

La majorité des ouvrages CNR reposent sur des fondations naturellement drainées par des alluvions en place ou sur un tapis de béton poreux connecté au niveau aval. Elles sont isolées du niveau amont par une coupure étanche. Dans ces cas, il est impossible de mesurer directement les débits en fondation, et l'analyse du comportement hydraulique repose uniquement sur les mesures de sous-pressions. À l'inverse, certains ouvrages s'appuient sur des fondations équipées d'un voile de drainage. Les débits y sont généralement faibles (suintements ou goutte à goutte) et ils sont mesurés dès que leur débit est suffisant, ou surveillés par observation visuelle.

La bonne définition des processus de dégradation par les phénomènes mesurables ou observables permettra de mieux identifier les défaillances critiques du scénario de rupture de l'ouvrage pour l'EDD.

2. DISPOSITIF D'AUSCULTATION

2.1. Choix du dispositif d'auscultation

Le dispositif d'auscultation doit être constitué d'instruments adaptés au phénomène mesuré et dont la précision doit être suffisante pour identifier une dérive avant qu'elle n'atteigne une valeur redoutée. Cette démarche est en lien direct avec la notion d'efficacité de la barrière de sécurité « surveillance et action » identifiée dans les EDD, car la pertinence d'un dispositif d'auscultation doit permettre d'identifier la dérive suffisamment tôt pour que la barrière s'avère efficace.

Le tableau ci-dessous présente les appareils de mesure adaptés au phénomène mesuré et à la dérive redoutée. Il s'agit des appareils de mesure les plus couramment employés à CNR.

Phénomène mesuré	Dérive redoutée	Appareils de mesure adapté
Evolution des sous-pressions	de l'ordre du m	Mesures piézométriques
Evolution des dépôts de sédiments ou des fosses d'érosion	de l'ordre du m	Mesures bathymétriques
Evolution des déformations	de l'ordre de quelques mm sur les déformations	Mesures par pendules ou vinchons sur fissures
Evolution des déplacements	de l'ordre de quelques mm sur les déplacements relatifs	Mesures par vinchons sur joints interplots
	de l'ordre de quelques mm sur les déplacements absolus	Mesures par nivellement topographique
Evolution des débits de fuite ou de drainage	de l'ordre de plusieurs dizaines de L/min	Mesures au capacimètre ou avec un seuil calibré

Tableau 2. Choix du dispositif d'auscultation en fonction du phénomène mesuré et de la dérive redoutée.

A CNR, on définit la dérive redoutée comme la limite d'acceptabilité de l'évolution du paramètre physique mesuré par un instrument dans un temps de référence donné. Elle signale un changement de comportement de l'ouvrage pouvant indiquer qu'un processus de dégradation est à l'œuvre. L'atteinte de cette limite n'est pas préjudiciable à la sûreté de l'ouvrage. En revanche, la progression de la dérive au-delà de cette limite nécessite une vigilance particulière, car elle pourrait entraîner l'initiation d'autres processus de dégradation. La succession de ces processus forme des scénarios ou des « arbres de défaillance », faisant l'objet d'analyses de risques notamment dans les études de dangers. Elles permettent notamment d'identifier au sein de ces scénarios l'existence de processus de dégradation rapides que la surveillance ne pourrait pas anticiper à temps.

2.2. Position des points de mesures

Les points de mesures du dispositif d'auscultation nécessitent une implantation judicieuse pour garantir une évaluation fiable des paramètres physiques représentatif des processus de dégradation. Ces points de mesures doivent être représentatifs du comportement de l'ouvrage et stratégiquement positionnés pour valider les hypothèses de conception.

La représentativité des points de mesure implique une couverture complète de l'ouvrage, une densité suffisante des points de mesure et une redondance des appareils pour assurer la continuité des données. Dans le cas général, pour les ouvrages poids CNR, composé de plots indépendants qui peuvent être clavés tout en conservant un certain degré de liberté, chaque plot doit comporter un point de mesure de chaque type pour refléter fidèlement le comportement de l'ensemble.

L'implantation des points de mesures doit permettre de vérifier la validité des hypothèses de conception. Sur les ouvrages CNR, l'implantation peut se faire selon le schéma général suivant :

Appareils de mesure	Implantation stratégique
Mesures piézométriques	Selon les hypothèses de sous-pressions : • Dans la zone aval pour contrôler le drainage naturel de la fondation ; • Dans la zone drainée pour contrôler l'efficacité des dispositifs de drainage ; • Dans la zone étanchée pour contrôler l'efficacité des dispositifs d'étanchéité. Nota : éviter une implantation à proximité des rideaux de drainage, qui nécessiterait une interprétation plus délicate.
Mesures bathymétriques	Sur le périmètre amont pour contrôler l'absence de dépôts majeurs et sur le périmètre aval pour contrôler l'intégrité des protections et l'absence de fosses d'érosion.
Mesures par pendules	Sur toute la hauteur de l'ouvrage et en fondation (dans le cas des pendules inversés) pour contrôler l'intégralité des plans de rupture potentiels.
Mesures par vinchons	Au plus près de la fondation pour contrôler l'évolution des joints représentative des déplacements relatifs de l'ouvrage et des fissures évolutives provoquée par les déformations de l'ouvrage.
Mesures par nivellement topographique	Au plus près de la fondation pour contrôler l'évolution des déplacements absolus de la fondation.
Mesures au capacimètre ou avec un seuil calibré	Au plus près des points de drainage ou de fuite pour contrôler l'activité des résurgences.

Tableau 3. Implantation stratégique par appareils de mesure.

Les mesures par vinchons permettent de vérifier l'homogénéité du comportement mécanique mesuré entre les plots. Lorsque ce comportement est homogène entre des plots présentant des caractéristiques géométriques, des conditions de fondation et des charges similaires, il est possible de simplifier l'installation des pendules. De même, les mesures des débits de fuite ou de drainage permettent de contrôler l'homogénéité du comportement hydraulique mesuré entre les plots. Si le comportement hydraulique est homogène entre les plots dont la géologie de fondation est similaire, l'installation de piézomètres peut être réduite. Une géologie de fondation favorable et uniforme, offrant une grande capacité de drainage, peut également justifier une réduction de l'instrumentation. La simplification consiste alors à équiper un plot sur deux ou trois, et, dans certains cas, à limiter l'instrumentation aux "grands ensembles" de plots identifiés dans les notes de calcul (plots courants, plots de rive, plots de tête), définis comme ayant des géométries, des conditions d'assise et des charges homogènes.

2.3.Périodicité de mesure

La périodicité des mesures doit être adaptée à la cinétique du processus de dégradation et à la dispersion des mesures.

- **Cinétique des processus de dégradation**

La périodicité des mesures doit être adaptée à la cinétique du processus de dégradation de manière à pouvoir identifier la dérive et caractériser sa cinétique (lente ou rapide). On définit le temps de référence comme étant le temps nécessaire pour atteindre la valeur de la dérive redoutée.

La figure ci-dessous présente l'exemple de deux dérives décrivant un processus de dégradation, l'un à cinétique rapide (A) et l'autre à cinétique lente (B).

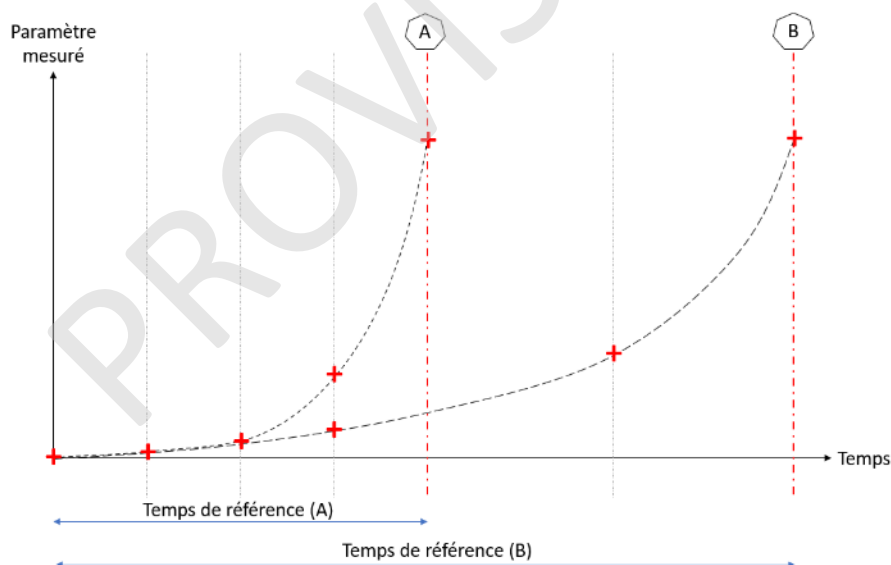


Figure 3. Temps de référence d'une dérive.

On constate que pour identifier la dérive et caractériser sa cinétique, il est nécessaire de fractionner le temps de référence. L'expérience CNR indique qu'en fractionnant le temps de référence par 4, la dérive peut être :

- Identifiée sur le temps de référence, si la dérive redoutée est de l'ordre de la largeur de la bande d'incertitude des mesures soit ± 2 écart-type des mesures ;
- Caractérisée à partir de $3/4$ du temps de référence, si la dérive redoutée est supérieure à ± 3 écart-type des mesures.

En tenant compte du fait que la loi de probabilité de la pente de l'évolution suit une loi de Student à $n - 2$ degrés de liberté, on peut montrer qu'au risque $\alpha = 5 \%$, il suffit de $n = 5$ mesures durant le temps de référence pour déceler une dérive linéaire, avec un écart type ($s_{dérive}$) de l'ordre de 4 fois l'écart type des mesures sans dérive ($s_{sans dérive}$) :

$$s_{dérive} = t_{1-\frac{\alpha}{2}}^{n-2} \sqrt{12 \frac{n-1}{n(n+1)}} \times s_{sans dérive}$$

Les processus de dégradation redoutés sur les ouvrages poids CNR peuvent engendrer des variations lentes des paramètres mesurables. Ils sont principalement liés à des mécanismes d'altération (colmatage, corrosion, dissolution, érosion, etc.) associés à un temps de référence supérieur à 10 ans. Les processus de dégradation rapides sont engendrés par des sollicitations dynamiques ou instantanées en lien avec des événements particuliers (séismes, chocs, chasses, travaux lourds). En marge de la démarche présentée ici, lors de ces événements, il existe des procédures qui déclenchent alors une surveillance particulière. Les dispositifs nécessaires doivent donc être disponibles, avec un historique de mesures permettant de déceler par comparaison l'apparition d'une anomalie. Cet historique doit être représentatif de la plupart des conditions physiques (saisons, température, hydrostatique) auxquelles est soumis l'ouvrage, de façon que les conditions dans lesquelles on réalise la mesure soient comparables à celles de l'historique.

- **Dispersion des mesures**

La périodicité des mesures doit être adaptée à la dispersion des mesures. Cette dispersion provient d'une part de l'incertitude propre à la méthode de mesure, et d'autre part des facteurs perturbateurs qui peuvent être cycliques ou aléatoires. Il peut s'agir respectivement des conditions cycliques de température (été/hiver) ou encore des conditions d'exploitation (variations des plans d'eau) : on les appelle effets réversibles, saisonniers et hydrostatiques.

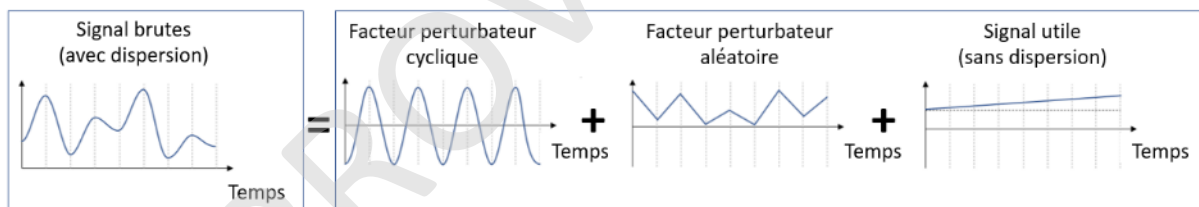


Figure 4. Contribution des facteurs perturbateurs dans la dispersion des mesures.

Lorsqu'un facteur perturbateur impacte la mesure, plusieurs cas se présentent :

- Lorsque la dispersion des mesures (F) est faible par rapport à la dérive redoutée (D_r), alors le paramètre peut être mesuré à tout moment sans que la dispersion ne risque de masquer la dérive redoutée ;

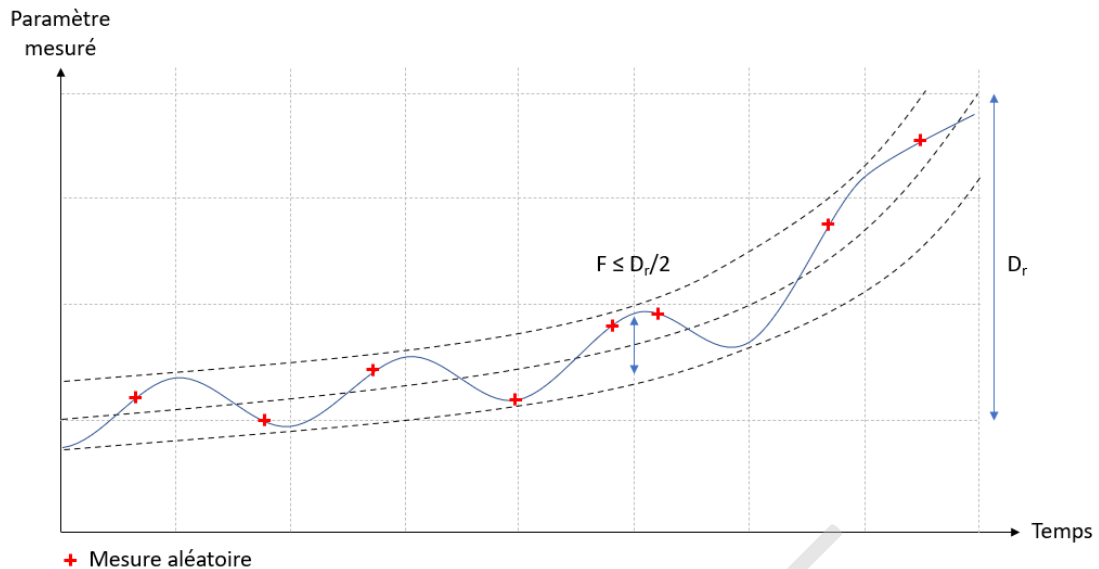


Figure 5. Amplitude de la dispersion induite par les facteurs perturbateurs – Cas n°1.

- Lorsque la dispersion des mesures (F) est grande ou du même ordre de grandeur que la dérive redoutée (D_r) mais que la dispersion présente une amplitude constante et un caractère cyclique (assimilable à une sinusoïde typique des effets réversibles), alors le paramètre peut être mesuré en un même point du cycle pour s'affranchir de la dispersion. Il faut cependant s'assurer que la période et l'amplitude sont constantes et connues (une période d'apprentissage est donc nécessaire, ce qui permet de déterminer les effets réversibles et de s'en affranchir). A noter que cette façon de procéder revient à faire une analyse HST pour détecter un changement de comportement, et que des mesures variées sont nécessaires pour servir de référence de comparaison.

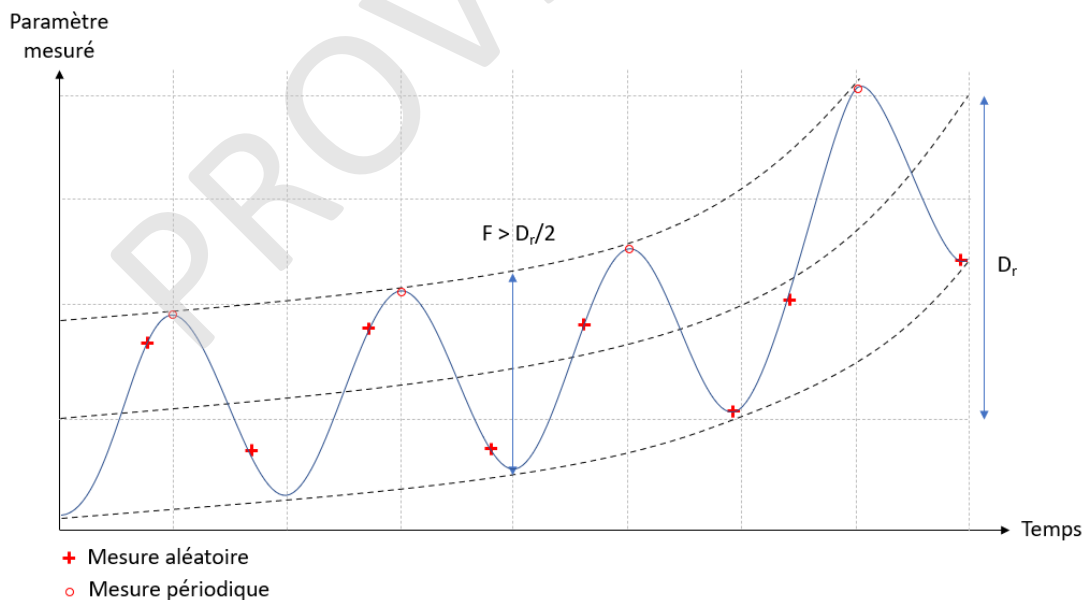
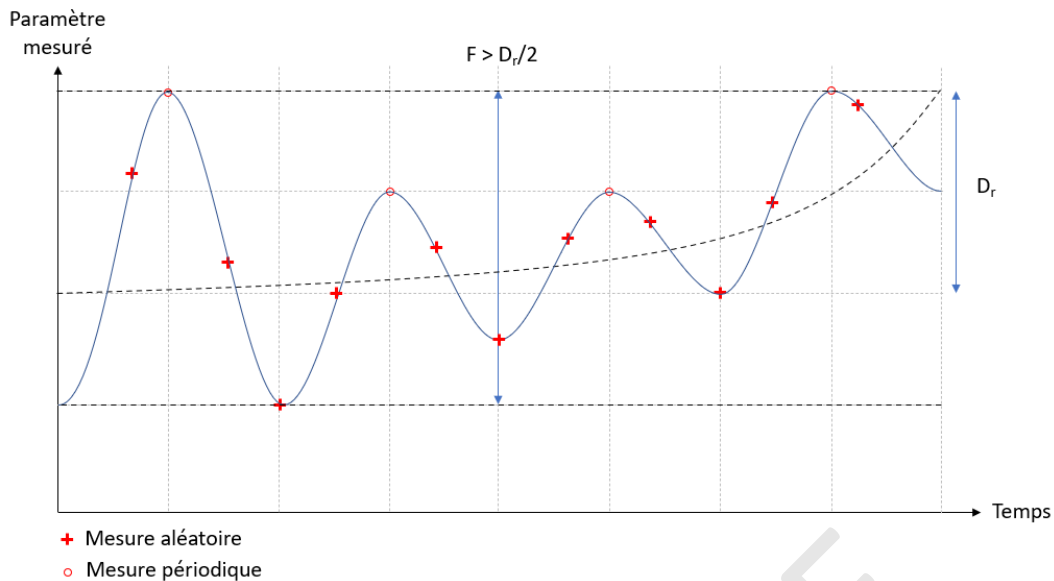


Figure 6. Amplitude de la dispersion induite par les facteurs perturbateurs – Cas n°2.

- Lorsque la dispersion des mesures (F) est grande ou du même ordre de grandeur par rapport à la dérive redoutée (D_r) et que la dispersion présente une amplitude loin d'être constante, alors il est nécessaire de réaliser des mesures fréquentes pour identifier et analyser le phénomène cyclique pseudo-réversible et le dissocier de la dérive. Une analyse statistique de ce type d'évolution nécessiterait l'emploi d'une méthode HST temporellement pondérée.



L'application de cette démarche, combinée à une quantité importante de mesures d'auscultation sur des ouvrages dont certains ont plus de 70 ans et à l'homogénéité du parc d'ouvrages en termes de géométrie et d'environnement, permet d'établir des périodicités de mesure standardisées présentées dans le tableau ci-dessous.

Dispositif de mesure	Dispersion / Dérive redoutée	Temps de référence	Cycle de variation	Périodicité de mesure
Mesures piézométriques	du même ordre de grandeur	10 ans	1 an (cycle de variation hydrostatique saisonnière à amplitude non constante)	Trimestrielle
Mesures bathymétriques	du même ordre de grandeur	10 ans	10 ans (cycle d'engrèvement et de dégravement post crues d'importance moyenne à amplitude non constante)	Triennale
Mesures par pendules ou vinchons	du même ordre de grandeur	10 ans	1 an (cycle de variation thermique saisonnière à amplitude non constante)	Trimestrielle
Mesures par nivellement topographiques	Faible	3 à 10 ans (selon l'état de consolidation du sol)	Sans objet	Annuelle à triennale
Mesures au capacimètre ou avec un seuil calibré	du même ordre de grandeur	1 an à 10 ans	1 an (cycle de variation thermique saisonnière à amplitude non constante)	Trimestrielle

Tableau 4. Périodicité de mesure des dispositifs de mesures.

Si une dérive est détectée et que son suivi à haute fréquence est nécessaire, la réalisation des mesures peut être facilitée par la mise en place de télémesure des grandeurs à mesurer à périodicité courte. Dans ce cas les mesures manuelles doivent être maintenues à une fréquence espacée pour s'assurer du maintien des compétences techniques et du fonctionnement des appareils.

3. CONCLUSIONS

La démarche de surveillance adoptée par CNR vise à standardiser la surveillance pour orienter les modalités d'auscultation sur la détection précoce des processus de dégradation qui pourraient impacter leur sûreté et nécessiter des actions adaptées de surveillance renforcée, de gestion préventive du plan d'eau ou de travaux correctifs immédiats. Cette démarche s'appuie sur des comportements généralement observés ou mesurés, et en particulier sur les cinétiques de dégradation déjà vécues sur le parc d'ouvrages, ou sur des ouvrages du même type. Cette standardisation est rendue possible par une quantité importante de mesures d'auscultation sur des ouvrages dont certains ont plus de 70 ans et le caractère homogène des ouvrages implantés dans la vallée du Rhône (conception, dimensions, exploitation et environnement similaires). Elle présente cependant des limites lorsque les barrages manifestent des comportements ou des vieillissements différents en raison de certains écarts de conception, de réalisation, ou d'exploitation.

Aussi, la démarche exposée doit être adaptée en intégrant les résultats des analyses de risques antérieures, notamment celles issues des études de dangers (EDD). Ces analyses, basées sur les données d'auscultation et les inspections visuelles périodiques mises en regard de la conception, permettent d'identifier la vulnérabilité d'un ouvrage face à un processus de dégradation particulier afin de mieux identifier les défaillances critiques du scénario de rupture de l'ouvrage pour l'EDD. En considérant ces processus de dégradation, il devient possible de renforcer la densité des points de mesure ou de diminuer la périodicité de mesure pour les dispositifs d'auscultation qui assurent le contrôle des paramètres physiques qui interviennent dans les processus de dégradation auxquels l'ouvrage peut être particulièrement sensible. La sensibilité à un processus de dégradation permet également d'aider le groupe de travail de l'analyse de risques à coter la probabilité de défaillance associée, notamment lorsque celle-ci révèle un comportement significativement à la marge par rapport au standard observé dans le parc d'ouvrage.

La déclinaison de cette démarche sur les ouvrages CNR conduirait, selon les ouvrages, à une surveillance différente de celle menée historiquement, modifiant parfois significativement le dispositif d'auscultation (type d'appareils, nombre de points de mesure, et fréquences de mesure). A l'issue de cette démarche, le dispositif d'auscultation théorique à mettre en place sur chaque ouvrage doit être modulé lors de sa déclinaison opérationnelle en fonction du dispositif d'auscultation préexistant sur l'ouvrage. Cette évolution globale de la manière d'ausculter nos ouvrages pose aussi la question des compétences spécialisées (bathymétrie, topographie, ...) à maintenir ou à faire évoluer au sein des équipes en charge de la mesure dans la vallée du Rhône.

Rappelons enfin que la surveillance des barrages doit rester un processus dynamique et évolutif, capable de s'adapter aux nouvelles connaissances et aux résultats des analyses de risques. Les dispositifs de mesure doivent être régulièrement évalués et ajustés pour refléter les besoins actuels. Cette démarche d'amélioration continue, d'analyse, de retour d'expérience et d'adaptation des processus de mesures d'auscultation est au cœur de l'analyse de risques de l'EDD car elle permet :

- Grâce à une auscultation périodique, adaptée et historique de l'ouvrage de produire le bilan de comportement qui permet de mieux juger via le bilan d'état les écarts et dégradations éventuelles : cette analyse fine est ensuite utilisée par le groupe de travail de l'EDD afin de caractériser de manière semi-quantitative les probabilités de défaillances d'un ouvrage poids.
- Grâce à une analyse critique du dispositif d'auscultation, au regard des besoins propres de l'ouvrage et des standards attendus pour ce type d'ouvrages dans le parc CNR, de juger de la pertinence du dispositif : cette démarche est en lien direct avec la notion d'efficacité de la barrière de sécurité « surveillance et action » identifiée dans les EDD, car la pertinence d'un

dispositif d'auscultation doit permettre d'identifier la dérive suffisamment tôt pour que la barrière s'avère efficace et permette d'intervenir sur l'ouvrage avant sa dégradation éventuelle, voire sa rupture.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] ICOLD 2018. Dam Surveillance Guide. Vol. 158. CRC Press.
- [2] Poupart, M. & Royet, P. 2001. La surveillance des barrages. In Colloque technique sur la sécurité des barrages coorganisé par le CFGB et l'ENGREF, Aix-en-Provence, 10-11 mai 2001.
- [3] Peyras, L., Royet, P., Boissier, D. & Vergne, A. 2004. Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages - Développement de méthodes d'aide à l'expertise. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, 38: 3-12.
- [4] Arrêté du 3 septembre 2018 modifiant l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu. *JO n°204 du 5 septembre 2018*.
<https://aida.ineris.fr/reglementation/arrete-030918-modifiant-larrete-12-juin-2008-definissant-plan-etude-dangers>
- [5] CFBR 2012. Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids. *Comité Français des Barrages et Réservoirs*.
- [6] CNR 2014, Référentiel technique sur les ouvrages poids, Synthèse comparative des mouvements des ouvrages poids CNR en fonction de la nature des sols de fondation.