

Les mesures d'auscultation : principes et outils le rapport d'auscultation

Dam monitoring : principles and tools - The monitoring report

Paul Royet

Irstea, UR “Ouvrages hydrauliques”, CS 40061, 13182 Aix-en Provence Cedex 5, France

e-mail : paul.royet@irstea.fr

Marc Hoonakker

BETCGB, 44, Avenue Marcellin Berthelot, 38030 Grenoble Cedex 2, France

e-mail : marc.hoonakker@developpement-durable.gouv.fr

Huguette Félix

Irstea, UR “Ouvrages hydrauliques”, CS 40061, 13182 Aix-en Provence Cedex 5, France

e-mail : huguette.felix@irstea.fr

MOTS CLÉS

Auscultation des barrages, instrumentation, analyse statistique, modèles HST

RÉSUMÉ

Le rapport d'auscultation constitue le document de synthèse qui présente les résultats des mesures et l'analyse comportementale de l'ouvrage par un spécialiste.

Après un bref rappel des exigences réglementaires issues du décret du 11/12/2007, la communication se propose de mettre en perspective les étapes incontournables pour une analyse efficiente des mesures d'auscultation :

- *qualité des mesures brutes et contrôle de premier niveau par l'opérateur ;*
- *contrôle de second niveau par l'ingénieur et analyse des graphes des mesures brutes ;*
- *choix des séries de mesures pour lesquelles l'analyse statistique pourra apporter un complément ;*
- *description rapide des modèles statistiques et de leurs récents développements ;*
- *du bon usage des modèles statistiques mais aussi de leurs « pièges » ;*
- *présentations de synthèse des résultats de l'analyse par famille d'instruments ou par zone du barrage, sur des documents graphiques facilement lisibles ;*
- *conclusions sur la sûreté de l'ouvrage et propositions éventuelles d'actions.*

On s'attache à présenter le niveau de qualité attendu par l'administration de contrôle, à l'appui des nombreux rapports reçus et analysés, tant dans le domaine des barrages concédés que des barrages autorisés. L'importance de la compétence des divers acteurs de la chaîne de mesure et d'analyse est mise en avant.

ABSTRACT

The monitoring report presents the results of measurements and behavioral analysis of the dam by a specialist.

After a brief review of regulatory requirements from the 11/12/2007 Decree, the paper aims to put into perspective the essential steps for an efficient analysis of monitoring measurements:

- *Quality of the raw measurements and first-level control by the operator;*
- *Second-level control by the engineer and analyze of the raw measurements graphs;*
- *Choice of measurements series for which statistical analysis can supplement;*
- *Brief description of the statistical models and their recent developments;*
- *Proper use of statistical models, and also their "traps";*
- *Presentations summarizing the analysis results by device family or by dam area on graphics easy to read;*
- *Conclusions on the structure safety and possible proposals for action.*

It attempts to present the expected level of quality control by the administration. The importance of the skills of various actors in the chain of measurement and analysis is emphasized.

1. LE CONTEXTE REGLEMENTAIRE

L'auscultation des barrages est de la responsabilité des exploitants. Elle est destinée à quantifier le comportement des ouvrages grâce au suivi de paramètres physiques choisis pour leur représentativité et la possibilité de les mesurer [ICOLD, 1989], [Dibiagio, E., 2000]. Ce suivi répond à un triple objectif :

- aide à la surveillance immédiate : les appareils de mesure doivent être aptes à détecter rapidement une évolution et délivrer une alarme ;
- amélioration de la connaissance du comportement du barrage et de son évolution de façon à pouvoir détecter, en temps utile, des dérives dangereuses à moyen et long terme ;
- calage de modèles de calcul déterministes, notamment pour les réévaluations de sûreté des ouvrages.

La présente communication traite du second objectif, traduit par une chaîne d'actions qui débute par la réalisation périodique de mesures et qui s'achève par la production de rapports synthétiques offrant la vision globale du comportement.

Les barrages ont été auscultés depuis de nombreuses décennies, du moins pour les plus importants, et cette préoccupation sécuritaire était déjà largement présente dans la circulaire dite "70-15" pour les barrages de plus de 20 m de hauteur. La réglementation récente issue du décret du 11/12/2007 a formalisé les exigences en matière d'auscultation et les a étendues aux barrages plus modestes, à l'exception des barrages de classe D. La concrétisation de ces actions s'effectue au travers de plusieurs documents que l'exploitant doit produire :

- la consigne de surveillance, qui, en matière d'auscultation, décrit le dispositif de mesures, les périodicités et les modalités de vérification de celui-ci, les périodicités des mesures, ainsi que le contenu du rapport de surveillance et du rapport d'auscultation. La consigne est soumise à l'approbation du préfet, sauf pour les barrages de classe D ;
- le rapport de surveillance, qui, au titre de l'auscultation, n'a pas pour objet de présenter l'ensemble des résultats. A partir de quelques mesures représentatives du comportement de l'ouvrage, généralement présentées en valeurs brutes (piézométrie, fuites), le rapport permet de mettre en évidence d'éventuelles anomalies sur la période récente, notamment celles qui peuvent être expliquées par des dysfonctionnements du dispositif de mesure ou par des événements particuliers d'exploitation ou liés aux conditions météorologiques ;
- le rapport d'auscultation, qui résulte d'un travail d'expertise portant sur l'ensemble de l'auscultation de l'ouvrage. Les mesures de la période récente sont analysées dans la perspective historique du comportement à long terme. Le rapport cherche notamment à différencier les effets réversibles des effets irréversibles. Il se positionne clairement sur la sûreté de l'ouvrage en rapport avec son comportement, et propose le cas échéant des améliorations y compris sur le dispositif d'auscultation. Il est établi par un organisme agréé ;
- le rapport d'auscultation correspondant à l'échéance décennale de la revue de sûreté est l'occasion d'effectuer un travail d'expertise particulièrement synthétique sur le comportement de la décennie en cours mais aussi depuis la mise en eau, ainsi que sur l'état et les évolutions souhaitables du dispositif d'auscultation.

Classe du barrage	A	B	C	D
Rapport de surveillance	1 an	5 ans	5 ans	/
Rapport d'auscultation	2 ans	5 ans	5 ans	/

Tableau 1 : Périodicités de production des rapports de surveillance et d'auscultation.

2. LA MESURE PAR L'EXPLOITANT

Pour réaliser les mesures d'auscultation, l'exploitant peut utiliser divers outils, allant d'un tableau papier à un périphérique électronique portable.

Les conditions essentielles pour obtenir des séries de mesures fiables et de qualité nous paraissent être les suivantes :

- les différents instruments de mesure doivent être clairement identifiés avec un système qui ne laisse aucune ambiguïté (par exemple une lettre par type d'instrument, une éventuelle identification de la rive ou de la galerie et une numérotation dans un ordre logique) (Fig. 1 et 2). Avec le temps et les différentes évolutions apportées au système d'auscultation, il peut parfois être intéressant de reprendre complètement un système d'identification qui serait devenu trop complexe ;
- le repérage des instruments doit également être rigoureux avec un report sur des vues en plan et des coupes qui figurent dans la consigne de surveillance du barrage ;
- les systèmes de lecture des mesures doivent être facilement accessibles et bien éclairés.



Figure 1 (à gauche) : identification d'un piézomètre (photo Paul Royet)

Figure 2 (à droite) : identification d'un fissuromètre (photo Gérard Degoutte)

Lorsque l'opérateur effectue une mesure (éventuellement répétée si la consigne le prescrit), il doit vérifier si la valeur mesurée est dans la gamme des mesures précédentes. Cette opération est largement facilitée quand l'opérateur utilise un outil de saisie électronique qui contient cette fonctionnalité d'aide. Mais, même en cas de saisie sur un tableau papier, on peut y faire figurer les plages habituelles de variation des mesures. En cas de mesure "anormale" (c'est-à-dire sortant des plages habituelles de variation de l'appareil considéré), l'opérateur effectue une vérification du bon fonctionnement de l'appareil puis renouvelle la mesure.

De retour au bureau, l'opérateur archive les mesures dans la base de données dédiée. Cette opération s'effectue automatiquement si l'on a utilisé un outil électronique lors de la tournée. Une saisie numérique est nécessaire au bureau en cas d'utilisation d'un tableau papier lors de la tournée ; des erreurs de retranscription des données sont alors possibles. Ensuite, il convient d'afficher à l'écran le graphe des mesures brutes, ce qui permet visuellement d'identifier une mesure "anormale" (au même sens que ci-dessus) qui n'aurait pas été repérée lors de la tournée ou qui serait le fruit d'une erreur de saisie. Le cas échéant, un retour sur le terrain pour vérification de l'instrument et nouvelle mesure permettra de confirmer ou d'infirmer la mesure initiale.

Cette analyse, que l'on qualifie souvent de "premier niveau", peut être un peu plus approfondie. En particulier, le tracé du graphe des mesures brutes en regard de la cote du plan d'eau permet de détecter des

mesures qui se détachent des tendances habituelles. Enfin, certains logiciels permettent, au niveau de leur module de saisie, de déceler les mesures situées en dehors d'une plage pré-imposée pour chaque instrument, cet intervalle étant mobile en fonction de la saison et de la cote du plan d'eau.

Si le caractère "anormal" de la mesure persiste, l'opérateur doit alors en informer sa hiérarchie et le cas échéant le bureau d'études en charge de l'auscultation. Si nécessaire, l'exploitant informe le service de contrôle (exemple : forte montée piézométrique sur quelques jours, déplacement excessif d'un pendule). On entre alors dans le cadre des procédures de gestion de situations anormales voire de crise, mais cela sort du sujet de cet article.

3. L'ANALYSE DES MESURES PAR LE BUREAU D'ETUDES

3.1 Analyse qualitative des mesures

Les mesures sont destinées à alimenter le contenu du rapport d'exploitation, mais doivent aussi être exploitées dans le cadre du suivi continu du comportement de l'ouvrage. A cet effet, l'exploitant transmet périodiquement les séries de mesures d'auscultation à son bureau d'études (la périodicité est précisée dans les consignes écrites - une périodicité mensuelle à trimestrielle est recommandée). Le bureau d'étude peut soit être extérieur à la société d'exploitation (cas de la plupart des exploitants de barrages autorisés), soit faire partie de l'ingénierie intégrée au maître d'ouvrage. Il doit être régulièrement chargé de visites techniques approfondies des ouvrages, dont il cultive la connaissance du dossier technique.

Dès réception, l'ingénieur chargé de l'analyse des mesures doit s'attacher aussi à identifier toute mesure "anormale" d'abord à partir du graphe des mesures brutes, puis sur le graphe des mesures à conditions identiques si le logiciel le permet. Un contact est alors établi avec l'agent d'exploitation ayant fait les mesures, dans le but d'essayer d'apporter une explication à la mesure concernée (défaut de l'appareillage, conditions particulières le jour de la mesure, erreur humaine, ...).

Si une telle explication peut être trouvée, nous recommandons de garder telle quelle la mesure sur le graphe des mesures brutes et de cercler le point en y associant l'explication trouvée. Cela permettra de garder la mémoire de tels défauts et de leur correction éventuelle, ces aspects ayant bien évidemment vocation à être abordés par l'exploitant et le service de contrôle lors des réunions d'inspection périodique. Ce n'est qu'au stade de l'analyse statistique (voir §3.3) que l'ingénieur pourra éventuellement corriger ou éliminer une mesure jugée et confirmée "anormale".

Enfin, la comparaison des mesures de l'année en cours par rapport aux mesures des années précédentes, sur un graphe en fonction de la cote, permet de déceler rapidement d'éventuelles dérives.

3.2 Analyse quantitative des mesures dans des cas simples

Dans certaines situations telles que décrites ci-dessous (mais il en existe d'autres), l'analyse des mesures d'auscultation est relativement simple et peut assez souvent se faire à partir du graphe des mesures brutes sans avoir nécessairement recours à une analyse statistique complète. Il en est de même de façon triviale pour les instruments dont la mesure reste stable ou bien ne connaît pas de variations cycliques.

3.2.1 - Barrage à niveau d'eau quasi constant

Les barrages à vocation exclusivement touristique ou certains barrages surdimensionnés pour leurs usages sont le plus souvent soumis à de faibles variations du niveau de la retenue. Pour une première analyse, l'influence des conditions hydrostatiques pourra être considérée comme secondaire. Si le barrage n'est pas sensible aux effets thermiques, les évolutions en fonction du temps apparaîtront alors naturellement sur les graphiques des mesures brutes.

3.2.2 - Barrage en remblai

Compte tenu de ses dimensions, le remblai d'un barrage subit en son sein de très faibles variations de température au cours de l'année. La cote de la retenue est alors le principal paramètre explicatif susceptible d'influencer significativement les mesures, en particulier celles qui sont en profondeur (cellules dans le

noyau du remblai ou en fondation). Une simple analyse en fonction de la cote de la retenue suffit alors pour quantifier l'influence de cette dernière (rapport α = variation de la piézométrie pour 1 m de variation de la cote de retenue). Un effet retardé est parfois constaté, qui peut être estimé en reportant sur un même graphique les courbes des valeurs brutes de la cote de l'instrument et de la cote du plan d'eau.

La pluie est éventuellement l'autre facteur climatique susceptible d'influencer significativement les mesures de certains instruments d'auscultation (piézomètres ou fuites en particulier). Elle vient alors "bruiter" l'analyse décrite ci-dessus.

3.3 Analyse statistique des mesures

On a vu ci-dessus que l'analyse de certains instruments pouvait se faire directement à partir du graphe des mesures brutes. A contrario, lorsque les mesures d'un instrument présentent des variations réversibles et des phénomènes évolutifs, l'évolution du phénomène dans le temps n'est suggérée qu'au milieu d'un nuage de points fortement dispersés par les sollicitations. On doit alors mener une analyse statistique pour séparer l'influence respective des divers facteurs explicatifs.

Cette analyse doit être menée sur une série de données "nettoyée" de ses valeurs anormales (à condition que celles-ci soient identifiées comme indiqué au §3.1, c'est-à-dire liées aux conditions de mesure, et non au comportement du barrage). Sans ce "nettoyage", la qualité et les résultats de l'analyse statistique peuvent être significativement dégradés.

Passées les premières années, voire les premières décennies, il pourra être intéressant de cibler l'analyse statistique sur les données des seules années ou décennies récentes. Cela permet de gommer les effets de jeunesse (adaptations du barrage sur sa fondation, dissipation des pressions interstitielles de construction, ...) et de se focaliser sur le comportement du barrage à l'âge adulte. Ainsi, on met mieux en évidence son comportement réversible et les éventuels effets de vieillissement à long terme.

3.3.1 Description des modèles d'analyse statistique

Parmi tous les facteurs qui influencent le comportement d'un ouvrage, trois sont largement prépondérants :

- les conditions hydrostatiques (niveau d'eau dans la retenue et niveau de la nappe phréatique) ;
- les conditions climatiques (température et pluie) ;
- l'âge du barrage.

Le modèle explicatif utilisé est basé sur le modèle "HST" proposé initialement par EDF, et formulé à l'origine pour les barrages voûtes en béton [Wilm, 1967]. Le modèle comporte plus ou moins de paramètres selon les évolutions méthodologiques apportées par divers auteurs. Dans le modèle d'origine, les variables explicatives prises en compte sont au nombre de trois, les deux premières ayant des effets réversibles et la troisième des effets irréversibles :

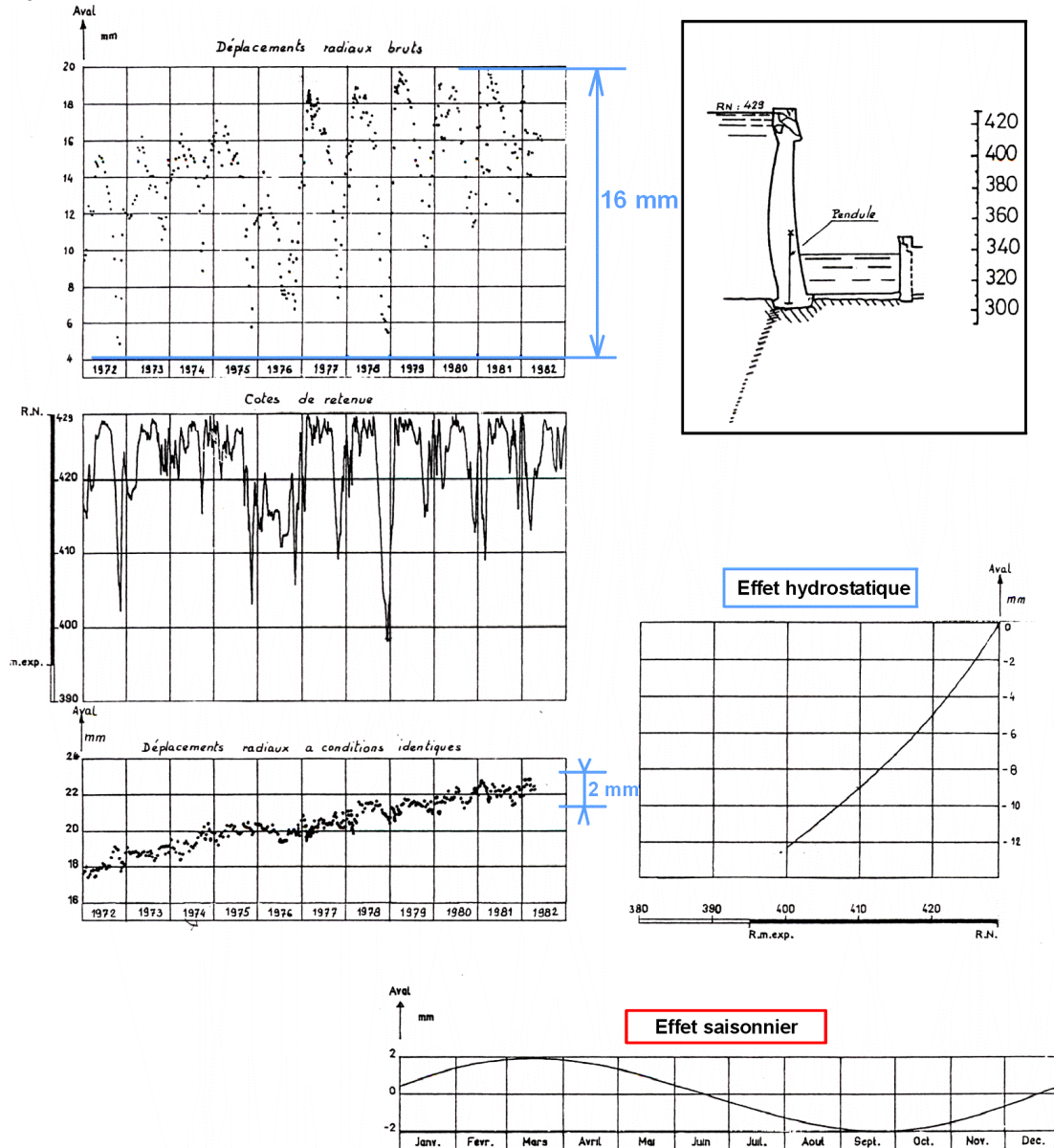
- le niveau du plan d'eau, effet hydrostatique, noté « H » et représenté par une fonction polynomiale de la cote;
- la date dans l'année, utilisée pour l'effet saisonnier de la variation de température, noté « S » et représenté par des fonctions sinusoïdales ;
- le temps, utilisé pour l'effet du vieillissement, noté « T » et représenté par la somme d'un terme linéaire, d'une exponentielle négative et parfois d'une exponentielle positive.

Selon les modèles, la variable représentant la cote du plan d'eau est la valeur du creux relatif de la retenue par rapport à la cote de la RN ou bien une cote centrée réduite (valeur relative par rapport à la cote moyenne de la retenue).

On aboutit à un modèle à 10 ou 15 paramètres qui sont estimés par régression linéaire multiple. Pour minimiser le nombre de variables explicatives, certains modèles utilisent un processus pas à pas de type Stepwise de sélection ou d'élimination des variables [Pardoux, 1982]. Les variables explicatives sont introduites progressivement selon un critère basé sur le test de Fisher-Snedecor qui mesure l'augmentation du coefficient de corrélation R, et leur sélection est remise en cause après introduction d'une nouvelle variable.

Les résultats de l'analyse statistique des mesures d'un appareil permettent de séparer et de quantifier les effets des facteurs explicatifs (Fig. 3). Dans certaines versions de la méthode, on peut également chiffrer l'influence de chaque paramètre explicatif, en termes de pourcentage d'explication des variations de la mesure. Le plus souvent, un seul facteur explicatif se détache, parfois deux. Ces résultats sont importants pour l'analyse du comportement de l'ouvrage (§ 3.4).

En outre, certains modèles, à l'image de MONITOR, permettent d'introduire une fonction "saut" pour la prise en compte des discontinuités ; l'origine de la discontinuité doit être recherchée et sa réalité physique justifiée.



Echantillon de mesures

Période : 1.1970 - 2.1982

Nb de mesures : 442

$S_0 = 2,7mm$ $S_0 = 0,59mm$ $I_a = 0,98$

Figure 3 : Présentation des résultats de l'analyse statistique avec modèle HST des mesures du pendule de clé d'un barrage voûte (la période d'analyse est légèrement plus longue que la période représentée).

3.3.2 La qualité d'une analyse statistique

Le coefficient de détermination R^2 est le rapport entre les variations expliquées par le modèle et les variations totales des mesures faites sur les instruments [Dodge, 1993].

Ce coefficient R^2 est compris entre 0 et 1. Plus R^2 est proche de 1, meilleure est l'adéquation. Afin que l'analyse soit statistiquement significative pour un risque de 5%, le coefficient R^2 doit être supérieur à 0,45. En pratique, une analyse est qualifiée de bonne lorsque R^2 est au moins de l'ordre de 0,8. Ce coefficient est toutefois sensible aux points extrêmes, et l'analyse visuelle des graphiques est indispensable pour juger de la qualité des résultats, et les interpréter au mieux.

Les lacunes potentielles sont de plusieurs ordres :

- effets des variations extrêmes des phénomènes expliqués (par construction, les effets saisonniers modélisés sont des effets "moyens");
- effets des variations dues à des phénomènes non pris en compte par le modèle (effet "retard" : influence déphasée de la retenue ou de la pluie, influence d'un écoulement venant d'un versant,...);
- forte corrélation des variables explicatives du modèle : corrélation entre retenue, saison et pluie;
- mauvaise représentativité du nuage de mesures vis à vis des phénomènes modélisés : trop grande périodicité de mesure, présence de valeurs anormales;
- incertitudes liées à l'instrument de mesure lui-même, ou à la réalisation de la mesure (changement de mode opératoire, ...).

3.3.3 Les limites des modèles statistiques

Les modèles statistiques du type décrit ci-dessus sont des outils à la fois puissants et simples à mettre en œuvre, mais dont il est important de connaître les limites.

Il faut tout d'abord disposer d'un échantillon suffisant de mesures pour lancer l'analyse. On admet que le nombre minimal de mesures est de 30 à 50. Si ce chiffre est rapidement atteint pour les mesures simples et répétitives (fuites, piézométrie, pendules), il n'en est pas de même pour les mesures faisant appel à des spécialistes (topographie, inclinométrie...) pour lesquelles il faudrait en théorie attendre plusieurs décennies avant d'obtenir un échantillon suffisant. On a alors intérêt à multiplier les mesures pendant les premières années.

Les échantillons sont souvent pauvres dans le domaine des valeurs de retenue basse. On mettra donc à profit les vidanges pour multiplier les mesures dans ces phases exceptionnelles d'exploitation.

Lorsque la retenue connaît une exploitation saisonnière marquée (Fig. 4b), ce qui est typiquement le cas des barrages destinés à l'irrigation ou à l'alimentation en eau, et de certains barrages hydroélectriques, l'effet saisonnier mis en évidence par l'analyse statistique sera la combinaison de l'effet des variations de température et partiellement des variations de la retenue. L'interprétation sera alors plus délicate en termes de séparation des effets réversibles, mais la correction totale, donc la mesure corrigée, n'en est pas affectée.

Toujours sur la problématique du choix de l'échantillon, on peut faire observer qu'au cours de la vie d'un ouvrage, des changements peuvent affecter soit le mode d'exploitation de la retenue, soit le mode de fonctionnement d'un appareil de mesure. Les échantillons couvrant plusieurs modes d'exploitation donnent des analyses de qualité médiocre. Dans ce cas, il est souvent préférable de ne retenir qu'un échantillon représentatif de conditions extérieures homogènes ; il faut alors s'assurer que l'évolution des relations statistiques est bien due à ces évolutions extérieures, et non à une évolution de l'ouvrage, et vérifier que l'échantillon est de taille suffisante.

L'effet saisonnier rend compte des effets thermiques (dilatation et retrait), mais au sens des moyennes interannuelles de température. Les mesures réalisées lors des périodes pendant lesquelles la température s'écarte durablement et sensiblement de ces moyennes interannuelles ne seront donc pas parfaitement expliquées par le modèle. On observera alors un nuage de points s'écartant des variations moyennes interannuelles. Dans une évolution récente de la méthode, proposée par EDF et appelée HSTT, la fonction saisonnière est corrigée par un terme supplémentaire qui rend compte de la réaction différée de

l'ouvrage à des variations rapides (quotidiennes) de température de l'air autour de la moyenne interannuelle; le calcul intègre l'inertie thermique de l'ouvrage induisant un retard et une atténuation du signal d'entrée. Cette méthode est décrite dans [Penot, 2009] et fait l'objet d'un poster dans le présent colloque.

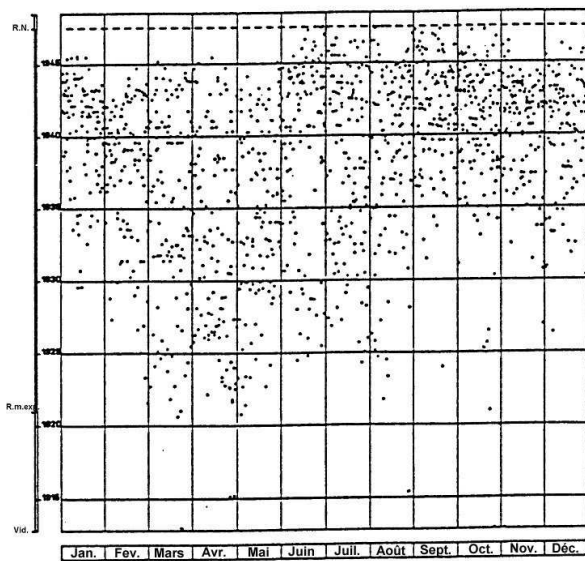


Figure 4a : Association cote/saison homogène

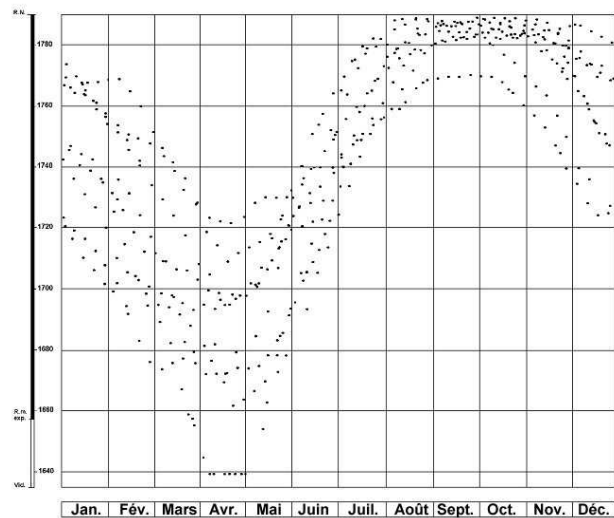


Figure 4b : Exploitation saisonnière marquée

L'effet saisonnier est également susceptible de rendre compte des effets d'une nappe phréatique dont le niveau en fondation ou sur les rives serait variable en fonction de la période de l'année. Seul l'ingénieur ayant une bonne connaissance de l'ouvrage sera en mesure de départager les deux phénomènes pouvant se cacher derrière un effet saisonnier mis en évidence par l'analyse statistique.

La température n'est pas le seul paramètre climatique susceptible d'influer sur les mesures d'auscultation. La pluie en est un autre pour ce qui concerne les mesures hydrauliques (débits et piézométrie de sub-surface). Certains modèles, tel le modèle SURVEY développé par Irstea, prennent en compte cet effet de la pluie à l'aide de variables supplémentaires qui sont les pluies hebdomadaires antérieures à la mesure.

Un effet du temps (dérive) peut résulter d'une évolution tendancielle de la cote du plan d'eau au cours de la période considérée. Avant de confirmer un diagnostic de dérive d'une mesure, on vérifiera que la cote du plan d'eau n'est pas elle-même liée statistiquement au paramètre temps.

3.3.4 Prise en compte des effets différés de la cote de la retenue

Les modèles décrits ci-dessus ne sont pas adaptés lorsqu'il y a déphasage entre la sollicitation et la réponse mesurée par l'instrument d'auscultation. Or ce retard existe dans de nombreux cas, en particulier pour les mesures hydrauliques (piézométrie et débits), où le déphasage atteint couramment plusieurs jours à plusieurs semaines. Ainsi on observe un effet d'hystérésis lorsque l'on représente la valeur de la pression interstitielle dans un noyau ou une fondation de barrage en terre, en fonction de la cote de la retenue. Le chemin décrit à la montée du plan d'eau n'est pas le même que celui à la baisse (Fig. 3). Physiquement cela s'explique par le fait que la capacité du sol n'est jamais nulle, du fait de la présence d'air dissous ou occlus, même pour les sols compactés près de la saturation.

Lorsqu'il y a retard, la valeur mesurée d'un paramètre dépend des valeurs qu'avaient les variables explicatives (cote de la retenue, température, pluie) les jours ou semaines précédant la mesure. Le principe de la méthode consiste donc à calculer au jour j l'influence d'une valeur explicative ayant des valeurs connues aux jours précédents. Pour ce qui concerne par exemple la cote de la retenue, son effet différé est proportionnel au produit du niveau de la retenue et d'une fonction spécifique à l'ouvrage (la réponse impulsionnelle), produit intégrant l'histoire des variations de la retenue (produit de convolution).

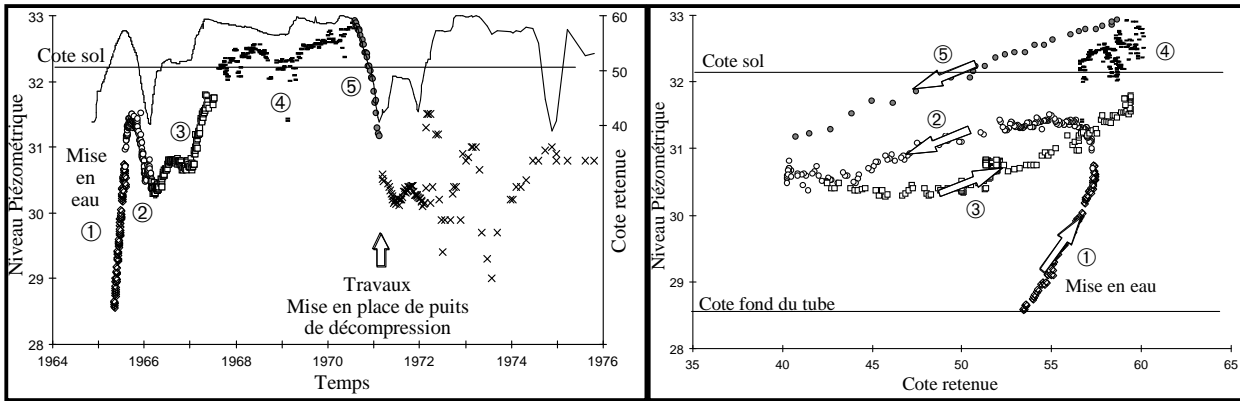


Figure 5a : Cote de la retenue et niveau piézométrique brut d'un piézomètre aval en fonction du temps (P1). **Figure 5b :** Niveau piézométrique brut en fonction de la cote de la retenue (P1).

Le modèle différé proposé par [Bonelli, 2008] comporte deux paramètres pour expliquer l'effet de la retenue:

- un coefficient compris entre 0 et 1 quantifie l'influence différée de la retenue. Il rend compte de l'efficacité des organes de drainage ou d'étanchéité, ainsi que de la position du point de mesure (instrument) par rapport au parement amont (où s'applique la sollicitation de la retenue). Un coefficient α proche de 1 signifiera que l'instrument est proche du parement amont et/ou que l'exutoire de drainage est loin, ce qui peut refléter une déficience du drain.
- le temps caractéristique intègre plusieurs informations relatives à la zone située entre le parement amont et le point de drainage, en particulier la diffusivité, grandeur matérielle qui quantifie la perméabilité et la non saturation du milieu. Un temps caractéristique très grand caractérise un sol non saturé ($S_r < 85\%$), une perméabilité très faible ou une longueur de drainage très importante.

Le nombre de paramètres étant réduit, la robustesse de l'ajustement par une méthode des moindres carrés s'en trouve améliorée et, de plus, les paramètres ont une signification physique. La figure 4 présente les résultats respectifs du modèle stationnaire classique et du modèle différé pour un piézomètre de fondation, situé en pied aval d'un barrage en terre, dont la fondation est relativement perméable.

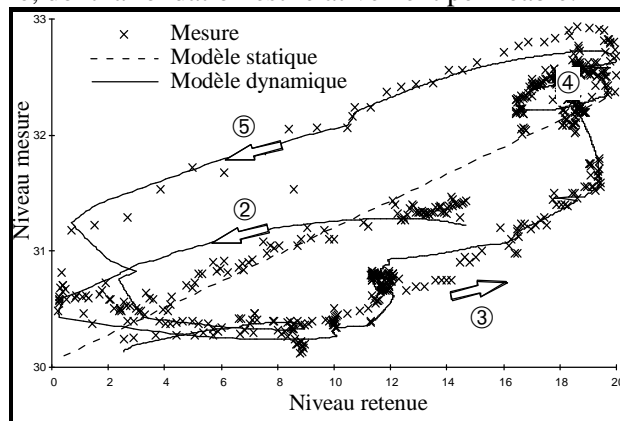


Figure 6 : Analyse des variations piézométriques dues à la retenue. Modèle différé (ou modèle dynamique)

4. CONTENU DU RAPPORT D'AUSCULTATION

Nous décrivons les différentes composantes du rapport, sans imposer de forme particulière (découpage texte / annexes par exemple).

4.1 Introduction du rapport

Le rapport d'auscultation doit rappeler les conclusions du précédent rapport périodique, indiquer la nouvelle période de mesures couverte par le présent rapport et faire mention des dernières visites techniques approfondies et de leurs principaux constats.

Les faits marquants de la période seront brièvement listés, en particulier s'ils sont susceptibles d'avoir un lien avec les résultats de l'auscultation : modifications de l'exploitation de la retenue, pluies et crues, périodes de températures remarquables, séismes, travaux, etc...

4.2 Dispositif d'auscultation

Il convient de disposer d'un inventaire du dispositif d'auscultation opérationnel au moment de la rédaction du rapport. Des schémas clairs, à jour et cotés des dispositifs sont indispensables. On trouvera ainsi classiquement des vues en plan, des coupes amont-aval, des vues en élévation RD-RG ; des schémas plus complexes et ponctuels peuvent concerner les appareils particuliers (par exemple mesures de distancemétrie en fondation).

Le rapport doit mentionner les travaux d'entretien récents réalisés sur les appareils (purges de piézomètres, remplacement de fil de pendule, etc ...). Sont indiqués si nécessaire les appareils en état de marche mais non utilisés.

Le rapport peut le cas échéant émettre un avis sur la qualité et la bonne adéquation du dispositif de mesure (les appareils et leur mode d'utilisation) et proposer à l'exploitant des évolutions du dispositif. Cet aspect est obligatoirement approfondi dans le rapport émis à l'occasion de la revue de sûreté.

4.3 Graphiques de surveillance

Sont fournis, pour chaque appareil, des graphiques montrant en fonction du temps les résultats bruts ou, si l'analyse est significative, les mesures ramenées à conditions identiques. En tête de cette liste de graphique, on trouvera naturellement la courbe d'évolution de la cote de retenue sur la période représentative des résultats de mesures et si possible, à plus grande échelle, un graphique identique pour les deux ou trois dernières années.

Les graphiques doivent être lisibles. On évitera en particulier de reporter trop de courbes sur un même graphique, même si les graphiques sont en couleurs.

Les échelles sont choisies de façon à faciliter la lecture et ne pas trop "écraser" les courbes. Les variations importantes à la mise en eau ou des points aberrants (mesure erronée ou non) peuvent, si le calcul des échelles est automatique, rendre inutilisables les graphiques. Des graphiques supplémentaires peuvent alors être nécessaires.

Les graphiques doivent indiquer les éléments nécessaires à la lecture (les unités et surtout les sens amont - aval ou rive droite - rive gauche ou les conventions de signe) et, le cas échéant, signaler les événements particuliers (par exemple discontinuités liées à un changement d'appareil de mesure).

Les graphiques de mesures à conditions identiques doivent être accompagnés d'informations permettant de comprendre les hypothèses de l'analyse statistique et d'en apprécier la qualité.

On doit notamment trouver :

- la période couverte par l'échantillon utilisé pour l'analyse statistique et qui est généralement différente de la période totale de fonctionnement de l'appareil ;
- les paramètres pris en compte dans l'analyse ;
- les indicateurs de la qualité du modèle (variances, coefficient de corrélation R^2) ;
- les courbes d'effets réversibles saisonniers et hydrostiques ; pour ces dernières, on reportera la plage de cotes prise en compte dans l'analyse, et celles qui correspondent à des valeurs extrapolées (valeurs basses de la cote de retenue ou au-delà de la RN) ;
- pour chaque type d'analyse (qui peut être commune à plusieurs appareils), un graphique indiquant la cote de retenue aux dates de mesure dans l'année ; cela permet d'apprécier visuellement la qualité de la séparation des effets hydrostatiques et saisonniers ;
- un commentaire sur les éventuelles discontinuités dans la loi $F(t)$, si le modèle l'autorise ;
- les paramètres des effets retards, si ceux-ci sont intégrés au modèle.

4.4 Analyses et synthèses

Le cœur du rapport doit apporter les éléments d'expertise permettant de comprendre le comportement du barrage dans une perspective de long terme. Une bonne interprétation des résultats de mesure nécessite donc une connaissance précise des caractéristiques du barrage et de sa fondation (celles-ci doivent être rappelées dans le rapport, y compris pour les dispositifs d'étanchéité et de drainage, zonage du remblai, ...) ainsi qu'une bonne perception du mode de fonctionnement de l'ouvrage.

La perspective historique est indispensable, en particulier lors des revues de sûreté. Une synthèse du comportement antérieur du barrage doit figurer, le cas échéant en remontant jusqu'à la mise en eau. La période récente est naturellement analysée plus en détail.

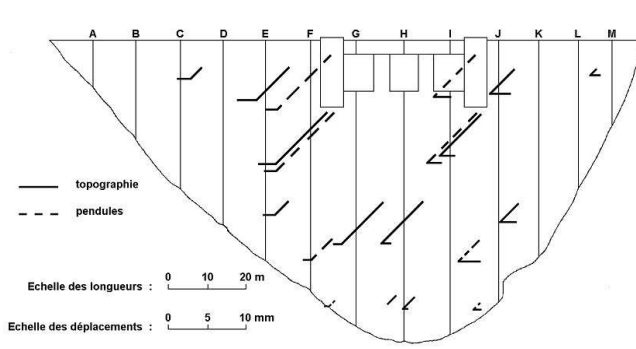
Dans un premier temps, les analyses sont menées appareil par appareil. Un jugement doit être porté sur la qualité de l'analyse statistique. Les points singuliers sur les graphiques de surveillance doivent être décrits et si possible expliqués. Il est, par exemple, totalement anormal de lire des rapports dans lesquels on trouve des niveaux piézométriques situés largement au-dessus de la cote de RN, sans aucun commentaire

L'analyse comportementale s'appuie bien entendu sur les graphiques de surveillance (pour l'examen des dérives éventuelles) et sur les courbes d'effets réversibles (représentatives de la souplesse mécanique de la structure ou encore de la sensibilité du régime des sous-pressions à la cote de retenue). Pour les mesures hydrauliques (piézométrie et fuites), on exploitera également les mesures brutes, révélatrices du comportement instantané de l'ouvrage (à la différence des mesures mécaniques qui traduisent les effets indirects et souvent différés des actions extérieures). Les mesures inhabituelles ou effectuées dans des conditions exceptionnelles (en crue ou en vidange) sont particulièrement intéressantes. Dans certains cas, l'utilisation de graphiques exprimant l'évolution des valeurs brutes en fonction de la cote de retenue permet d'affiner le diagnostic (par exemple détection d'un seuil de déclenchement des fuites).

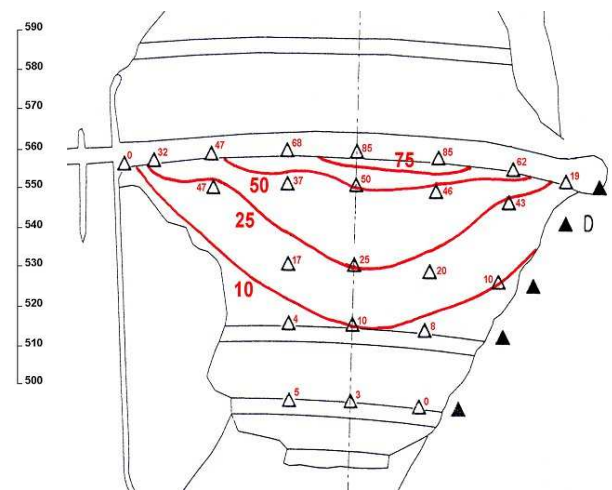
Les changements de comportement visibles sur les graphiques de surveillance doivent naturellement être reliés à un phénomène particulier, relatif aux conditions météorologiques (températures), aux conditions d'exploitation de la retenue (vidanges), à des travaux (rénovations de piézomètres, déplacement d'un réseau de drainage, renforcement d'une structure, de l'étanchéité, etc...), ou encore à des incidents connus.

Mais on ne peut se contenter d'une analyse appareil par appareil. Le rapport d'auscultation doit proposer des synthèses sur le comportement global ou partiel du barrage, en s'appuyant sur des corrélations entre appareils, sur des rapprochements entre mesures d'un même type, sur l'intégration de mesures de déplacements pour trouver une déformée d'ensemble, etc (Fig. 5). Cette analyse comparative peut s'appliquer aussi bien aux valeurs corrigées qu'aux valeurs brutes, mais également aux effets réversibles.

Le rapport peut également effectuer une comparaison entre les grandeurs mesurées et les observations visuelles (plans de fissuration, traces de suintements).



Déformée d'ensemble d'une voûte sous l'effet du remplissage



Tassements cumulés d'un remblai

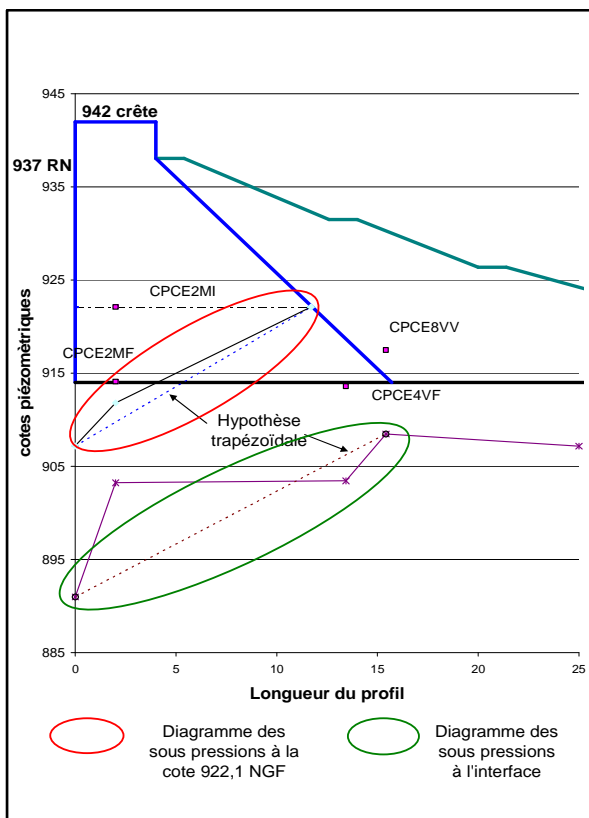
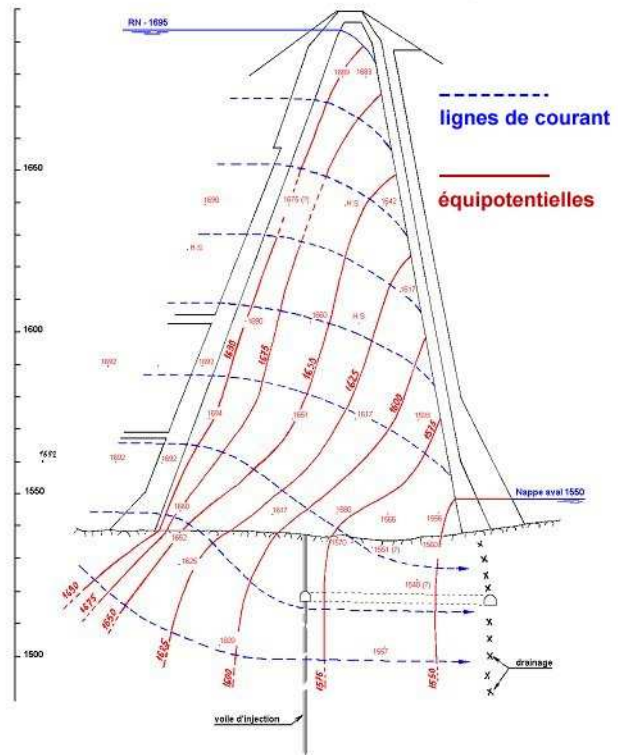


Schéma des sous pressions mesurées et théoriques dans un profil d'un barrage poids



Schémas d'écoulements dans un noyau de remblai

Figure 7 : Exemples de représentations schématiques d'ensemble

Concernant les déplacements, une vue spatiale des déformations de l'ouvrage est toujours riche d'enseignements. Elle permet par exemple de mettre en évidence des dissymétries de comportement RD-RG, une mobilité particulière de la fondation localement, la présence d'une fissuration, la répartition des contraintes principales à partir des extensomètres, le type d'encastrement d'un plot béton en fonction de l'allure de la déformée, des tassements localisés d'une fondation sous le poids d'un remblai, etc ...

Certaines analyses fines de l'évolution au cours du temps des effets réversibles permettent de détecter une modification du fonctionnement de la structure : rupture d'encastrement d'un plot dans sa fondation (allure de la déformée hydrostatique), ou bien encore changement du fonctionnement arcs- consoles d'une voûte (orientation et intensité des mesures extensométriques).

Concernant les mesures hydrauliques, la piézométrie et les débits de fuite sont deux éléments de surveillance indissociables (tableau 2).

		Fuites	
		Baisse	Hausse
Piézométrie	Baisse	Colmatage du fond de la retenue par dépôts alluvionnaires <u>Situation favorable</u>	Augmentation du drainage Prévoir un suivi des entraînements de matériaux <u>Situation à surveiller</u>
	Hausse	Dégradation du drainage par colmatage : prévoir curage des drains ou drains complémentaires <u>Situation défavorable</u>	Décolmatage du fond de la retenue Dégradation de l'étanchéité <u>Situation défavorable</u>

Tableau 2 : Synthèse de l'interprétation conjointe des mesures hydrauliques

L'un des points forts de l'expertise apportée par le rapport d'auscultation concerne l'interprétation des **dérives irréversibles**. Le rapport doit pouvoir distinguer les grandes familles suivantes :

- dérives au jeune âge : retrait, fluage, ou mouillage du béton – baisse piézométrique dans les remblais argileux – tassements des recharges en enrochements ou remblais, de la fondation – adaptation des appuis rocheux des voûtes ;
- changements dans le mode d'exploitation de la retenue, ou évolutions climatiques particulières, pouvant conduire à une modification des effets thermiques moyens perçus par le barrage ;
- travaux d'entretien ou de confortement (piézométrie modifiée par une campagne d'étanchéité ou de re-forage de drains) ;
- appareillage de mesure : c'est une cause fréquente de dérive des mesures, à identifier absolument : fil de pendule gêné par des corps étrangers, instabilité d'un pilier de visée topographique, dérive d'extensomètres à cordes vibrantes ou de cellules piézométriques, dysfonctionnement de manomètres, ...
- problème structurel réel : gonflement du béton, mouvement d'appui, érosion interne, lessivage d'une maçonnerie, ...

Par-delà toute la subtilité des analyses statistiques et des discussions techniques d'interprétation des mesures, le rapport d'auscultation doit déboucher sur une conclusion et des recommandations pratiques claires. En effet, il a, le cas échéant, une fonction d'alerte et de sensibilisation du Maître d'Ouvrage.

5. EXEMPLE : UN PETIT BARRAGE EN REMBLAI

5.1. Présentation du barrage

Il s'agit d'un barrage en terre homogène de 15,5 m de hauteur. La fondation est constituée d'arènes granitiques de perméabilité comprise entre 10^{-5} et 10^{-6} m/s. Elle a été étanchée par un voile d'injection. Le remblai comporte un drain vertical, raccordé à l'aval par des cordons drainants entourés de filtres (Fig. 6). Des puits de décompression débouchent dans le caniveau de pied qui récupère les eaux drainées. Les crues sont évacuées par un déversoir frontal posé sur le remblai.

Outre un dispositif d'auscultation topographique, le barrage est doté d'un dispositif de mesures hydrauliques, effectuées mensuellement, qui comporte :

- 14 piézomètres, implantés en pied aval du remblai du haut de la rive gauche jusqu'en haut de rive droite ;
- 7 cellules de pression interstitielle ;
- la mesure des débits de fuite en 4 points, où l'on mesure globalement les fuites dans le remblai et dans la fondation.

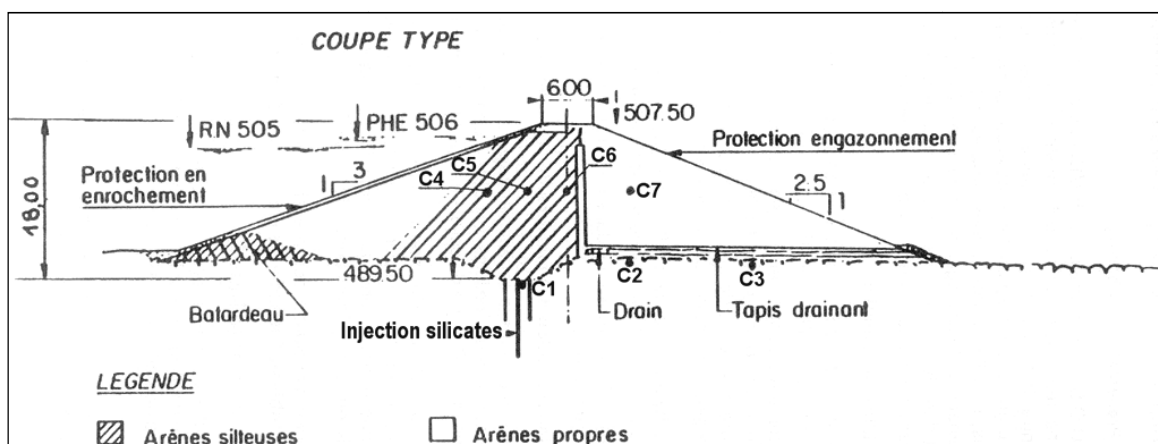


Figure 8 : Coupe type du barrage et implantation des cellules de pression interstitielle

5.2. Interprétation des mesures de pressions interstitielles

Les pressions sont mesurées dans la section centrale du barrage, dans l'axe de l'évacuateur. Les appareils utilisés sont des cellules à corde vibrante. Trois des cellules (C1, C2, C3) interrogent le contact remblai-fondation. Trois autres (C4, C5, C6) sont placées dans le remblai en amont du drain vertical. Enfin une cellule (C7) est placée dans le remblai en aval du drain (implantation en Fig. 6).

Le tableau 3 présente la synthèse de l'analyse statistique des mesures de ces cellules.

a) Dans la fondation (cellules C1 à C3)

Pour ces trois cellules, le modèle statistique monte une très nette corrélation avec la cote du plan d'eau, plus forte en C1 et C2 qu'en C3, ce qui est normal. Le comportement général de la fondation est satisfaisant avec une diminution régulière des pressions de l'amont vers l'aval comme le montre le profil figure 7.

Nom	Influence de la retenue		Variations saisonnières		Influence de la pluie	Evolution avec le temps		
	α (%)	α (m/m)				v (cm/an)		
C1	93%	0,41	-	-	-	2%-	+4	↗=
C2	91%	0,31	-	-	-	-	-1	=
C3	30%	0,17	3%	+5cm (avr) -5cm (oct)	5%	21%	-5	↘
C4	35%	0,23	6%	+12cm(sep) -10cm (mai)	18%	23%	-5	↘
C5	29%	0,15	10%	+12cm (fev) -8cm (sept)	16%	23%	-4	↘
C6	-	-	2%	-	4%	52%	(1990-91)	┌
C7	-	-	-	-	2%	55%	-4	↘

= : stabilisation ↘ : diminution ↗ : augmentation ┌ : discontinuité

Tableau 3 : Explication statistique des évolutions des pressions interstitielles

b) Dans le remblai (cellules C4 à C6 dans le noyau et C7 en aval du drain vertical)

C4 et C5 montrent une certaine corrélation avec la cote de la retenue. Ce n'est pas le cas de C6 et encore moins de C7, toutes deux proches du drain. Le remblai montre donc une meilleure étanchéité que la fondation, puisqu'à une variation de la cote de retenue, les cellules en fondation réagissent plus que les cellules du remblai.

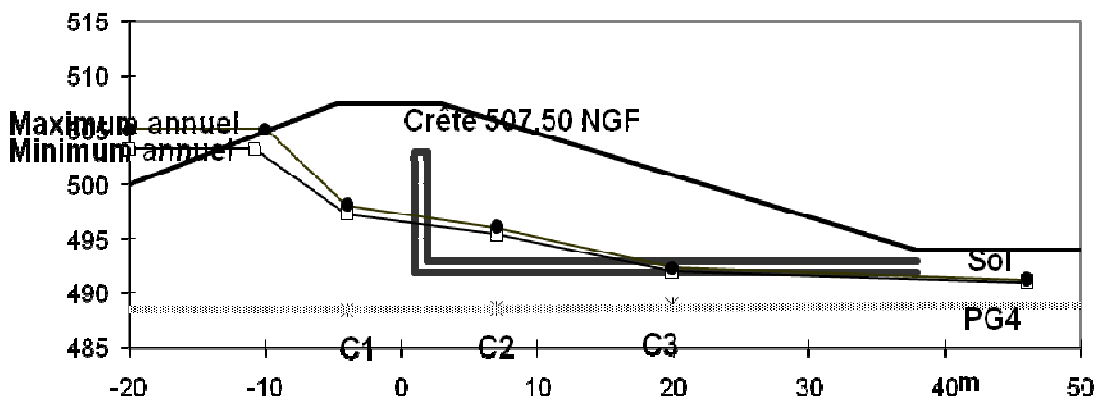


Figure 9 : Profil piézométrique amont-aval, au niveau du profil ausculté

5.3 Analyse des mesures piézométriques

La figure 8 représente, sur un profil rive à rive, la plage de variation des mesures piézométriques au cours d'une année donnée. Il s'agit de mesures brutes, sans analyse statistique autre qu'une simple corrélation linéaire entre les mesures et la cote du plan d'eau. Ce simple graphique suffit à voir que :

- la piézométrie n'est nulle part artésienne ;
- le rabattement s'effectue normalement des rives vers le centre de la vallée ;
- les piézomètres en fond de vallée sont peu sensibles aux variations de la retenue ;
- a contrario, les variations des piézomètres en versants suivent quasi intégralement les variations de la retenue, ce qui laisse supposer des contournements en rives. A noter toutefois l'exception de PG5 qui appelle une analyse plus approfondie, laquelle débouchera sur l'influence d'une nappe de versant.

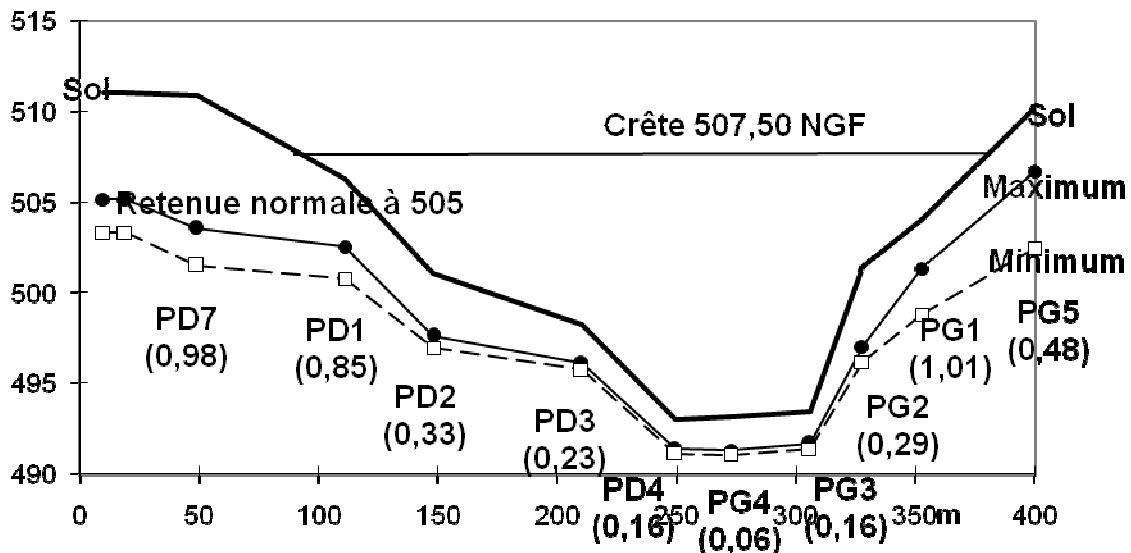


Figure 10 : Profil piézométrique en pied aval du barrage, de rive en rive (entre parenthèses, le coefficient de corrélation linéaire entre la cote piézométrique et la cote de la retenue)

CONCLUSIONS

La chaîne allant de la conception du dispositif d'auscultation à l'analyse des mesures nécessite des personnels compétents et une maîtrise de la qualité à chaque étape :

- seul un dispositif d'auscultation bien conçu et régulièrement réévalué sera à même de permettre de détecter des anomalies de comportement ;
- l'ingénieur ne peut analyser que des mesures de bonne qualité, d'où le rôle essentiel de l'exploitant (réf. autre communication sur les procédures qualités dans la chaîne de mesures) ;
- l'analyse des mesures d'auscultation et du comportement du barrage doit être menée par un ingénieur compétent (d'où la procédure de l'agrément mise en place par la réglementation), ayant la connaissance directe de l'ouvrage, donc appelé à participer à des visites techniques périodiques. Les différents modèles d'analyse des mesures d'auscultation ne sont que des outils.

La conclusion du rapport d'auscultation doit clairement porter l'avis du bureau d'études rédacteur sur le comportement du barrage, sur la période qui s'est écoulée entre la parution de deux rapports, mais aussi sur le long terme. En cas de dérives de comportement jugées préoccupantes, le rapport d'auscultation a une fonction d'alerte et de sensibilisation du maître d'ouvrage.

Pour le maître d'ouvrage et le service de contrôle, le rapport d'auscultation a un triple intérêt :

- il constitue un catalogue complet des résultats d'auscultation sur une longue période, sous une forme qui en facilite l'interprétation ;
- il comporte l'analyse détaillée par un spécialiste du comportement du barrage et de la pertinence du dispositif d'auscultation ;
- il peut permettre de recalibrer certains modèles de calcul déterministes, notamment pour les réévaluations de sûreté des ouvrages [Bourdarot, 2000].

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Bonelli, S., 2008. *On pore-pressure analysis in earthdams*, International Water Power and Dam Construction, Vol. 60, n°12, pp. 36-39.
- [2] Bourdarot E., Carrère A.J., Mei L., Hoonakker M., 2000. *Apports combinés de l'auscultation et de la modélisation pour l'analyse et la compréhension du comportement des barrages*, XXe Congrès CIGB, Beijing, Sep. 2000, Q.78-R.64, Volume III p 1039-1061.
- [3] Dibiagio, E., 2000. *Monitoring of dams and their foundations - Auscultation des barrages et de leurs fondations*, XXe Congrès CIGB, Rapport général question 78, Beijing, Sep. 2000, Volume III p 1459-1545.
- [4] Dodge, Y., 1993. *Statistique - Dictionnaire encyclopédique*, Dunod, Paris.
- [5] ICOLD, 1989. *Auscultation des barrages et de leurs fondations - Monitoring of dams and their foundations*, Bulletin 68, CIGB, Paris
- [6] ICOLD, 2009. *La surveillance : élément de base d'un processus « Sécurité des Barrages » - Surveillance :basic elements in a « Dam Safety » process*, Bulletin 138, CIGB, Paris
- [7] Pardoux C., 1982. *Sur la sélection des variables en régression multiple : une mise au point*, Institut de statistique des Universités de Paris, Cahier 39-40.
- [8] Penot I., Fabre J.P., Daumas B., 2009. *Analyse et modélisation du comportement des ouvrages de génie civil par prise en compte des températures de l'air : Méthode HST Thermique*, CIGB ICOLD Brasilia C3
- [9] Wilm G., Beaujoint N., 1967. *Les méthodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'Electricité de France. Problèmes anciens et solutions nouvelles*, IXe Congrès CIGB, Istanbul, Q34, R30. .