

Auscultation des barrages en Suisse

Dam monitoring in Switzerland

Nicola-V. Bretz, HYDRO Exploitation SA
Rue des Creusets 41, CH-1950 Sion

Téléphone : +41 (27) 328 44 11, Fax : +41 (27) 328 44 12, Courriel : nicola.bretz@hydro-exploitation.ch

Raphaël Leroy, Alpiq Suisse SA
Chemin de Mornex 10, CH-1003 Lausanne

Téléphone : +41 (21) 341 21 11, Fax : +41 (21) 341 20 41, Courriel : raphael.leroy@alpiq.com

Olivier Vallotton, Stucky SA
Rue du Lac 33, CH-1020 Renens

Téléphone : +41 (21) 637 15 13, Fax : +41 (21) 637 15 08, Courriel : ovalotton@stucky.ch

MOTS CLÉS

Cadre légal, concept de surveillance, niveau de surveillance, dispositif, géodésie, interprétation, mesures, barragiste, professionnel expérimenté, expert, autorité.

RÉSUMÉ

Auscultation des barrages en Suisse

Quatre aspects de l'auscultation des barrages en Suisse sont présentés.

1. Cadre légal et concept de surveillance

En Suisse, la sécurité des barrages est régie par

l'Ordonnance sur la Sécurité des Ouvrages d'Accumulation (OSO) du 7 décembre 1998. 227 ouvrages d'accumulation sont assujettis sur la base de leur géométrie et du danger particulier qu'ils peuvent représenter. La sécurité d'un barrage est garantie de manière optimale si elle s'appuie sur trois piliers : 1) la sécurité structurale, 2) la surveillance et l'entretien, 3) le plan en cas d'urgence. Le concept suisse de surveillance prévoit 4 niveaux de surveillance : les barragistes sur site (Niveau 1), le professionnel expérimenté (Niveau 2), les experts confirmés (Niveau 3) et l'autorité de surveillance (Niveau 4).

2. Dispositif d'auscultation

Il n'y a pas de règle établie déterminant le dispositif d'auscultation à installer dans un barrage, mais un principe pragmatique d'instrumentation suffisante pour que l'ingénieur responsable de sa sécurité puisse juger valablement son état et son comportement.

3. Géodésie

Les mesures géodésiques font partie intégrante du concept de sécurité. La géodésie permet de réaliser un système de mesure étendu pour le contrôle des déformations de l'ouvrage et du comportement de ses environs.

4. Interprétation des mesures

L'interprétation des mesures d'auscultation est une tâche de spécialiste expérimenté. L'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) a fait développer et met à disposition des ingénieurs chargés de la surveillance des barrages un logiciel d'analyse des mesures d'auscultation.

ABSTRACT

Dam monitoring in Switzerland

Four aspects of dam monitoring in Switzerland are presented.

1. Legal frame and surveillance concept

In Switzerland, the dam safety is governed by the Prescription on the Safety of the Accumulation Works of December 7th 1998. 227 works of accumulation are subjected on the basis of their geometry and of the particular danger which they can represent. The safety of a dam is guaranteed in a optimal way if it leans on three pillars: 1) the structural security, 2) the monitoring and the maintenance, 3) the plan in case of emergency. The Swiss concept plans 4 levels of surveillance: the on-site barragistes (Level 1), the experimented professional (Level 2), the confirmed experts (Level 3) and the authority of surveillance (Level 4).

2. Monitoring device

There is no established rule determining the monitoring device to install in a dam, but a pragmatic principle of sufficient instrumentation so that the engineer responsible for its safety can judge validly its state and its behavior.

3. Geodesy

The geodesic measures are an integral part of the concept of safety. The geodesy allows to realize a widened measurement system for the control of the deformations of the work and the behavior of its neighborhood.

4. Interpretation of the measures

The interpretation of the monitoring measures is a task of experimented specialist. The Swiss Federal Office of Energy made develop and gives engineers in charge of the surveillance of dams a software for analysis of the measures.

1. CADRE LEGAL ET CONCEPT DE SURVEILLANCE

En Suisse, la sécurité des barrages est régie par l'Ordonnance sur la Sécurité des Ouvrages d'Accumulation (OSOA) du 7 décembre 1998. 227 ouvrages d'accumulation sont assujettis sur la base de leur géométrie et du danger particulier qu'ils peuvent représenter. Pour les ouvrages de moindre hauteur ou de moindre volume, les activités de surveillance sont transférées aux cantons. Les barrages suisses sont donc sous bonne surveillance.

La sécurité d'un barrage est garantie de manière optimale si elle s'appuie sur trois piliers : 1) la sécurité structurale, 2) la surveillance et l'entretien, 3) le plan en cas d'urgence.

Le concept suisse de surveillance prévoit 4 niveaux de surveillance :

- Niveau 1 : barragistes sur site,
- Niveau 2 : professionnel expérimenté (ingénieur civil),
- Niveau 3 : experts confirmés (ingénieur civil et géologue),
- Niveau 4 : autorité de surveillance (Confédération suisse).

1.2 Barragistes (Niveau 1)

L'exploitant procède entre autres à l'inspection régulière, à l'exécution des mesures, aux essais et contrôles des installations, aux travaux d'entretien (sur la base de l'art. 12 de l'OSOA).

Le barragiste a un rôle primordial, car il est le premier en mesure de détecter une anomalie sur un barrage, par son excellente connaissance de l'ouvrage et de son dispositif d'auscultation. Il dispose d'une formation technique appropriée et travaille de manière indépendante et précise. Il sait faire preuve d'initiative et est conscient de ses responsabilités. Il doit avertir ses supérieurs en cas de constat particulier.

Les tâches du barragiste sont les suivantes :

- mise en place des instruments de mesures,
- exécution des mesures et première appréciation des résultats,
- observations visuelles,
- réalisation des essais de fonctionnement des vannes de vidange,
- entretien et maintenance des installations.

Les mesures d'auscultation et leurs fréquences se basent sur le programme établi par les ingénieurs des niveaux 2 ou 3. Pour les mesures principales, la fréquence minimale est d'une fois par mois. Les mesures effectuées par le barragiste sont nombreuses et variées, comme par exemple :

- déplacements amont-aval et rive gauche-rive droite à l'aide de pendules directs ou inversés,
- tassements et soulèvements à l'aide de rocmètres,
- pressions et sous-pressions à l'aide de manomètres,
- débits d'infiltration à l'aide de jaugeages volumétriques,
- ouverture de joints et de fissures à l'aide de jointmètre,
- températures du béton à l'aide de thermomètre électrique.

Les observations visuelles sont, avec l'exécution des mesures, l'élément clé de la surveillance de l'ouvrage. Le barragiste doit régulièrement (au moins une fois par mois) inspecter en détail le barrage et ses abords.

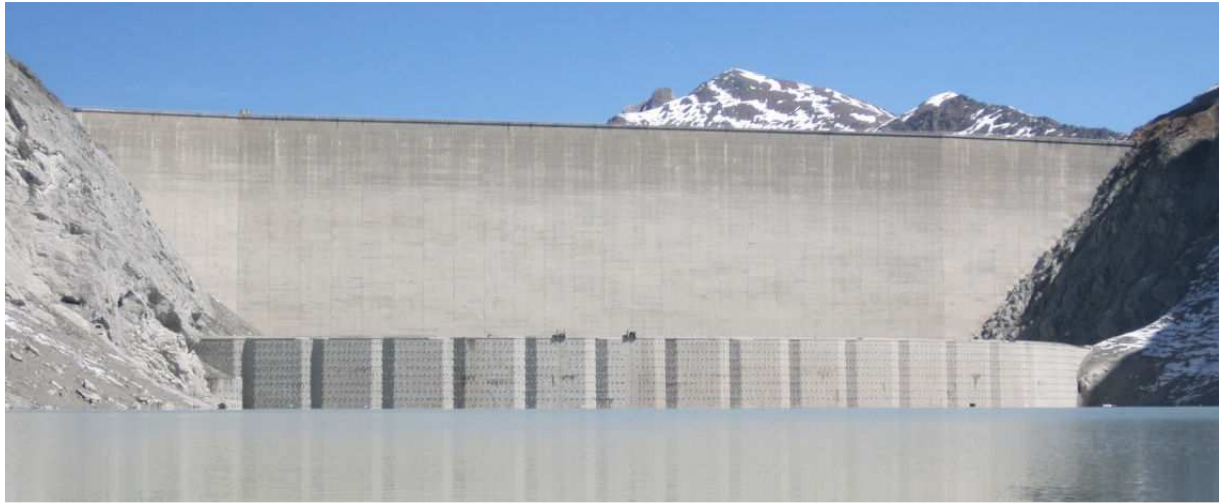


Figure 1 : Barrages de la Dixence (premier plan) et de la Grande Dixence (arrière-plan), le 5 mai 2011.

Le barragiste réalise chaque année l'essai de fonctionnement des vannes de vidange, avec lâcher d'eau, selon une procédure bien définie.

Une autre activité du Niveau 1 est celle des géomaticiens dont la mission est l'exécution des mesures géodésiques selon programme de l'expert. Un rapport de mesures (valeurs, graphiques et interprétation) est ainsi édité à chaque campagne de mesures.

1.2 Professionnels expérimentés (Niveau 2)

Selon l'art. 13 de l'OSOA : « L'exploitant fait en sorte qu'un professionnel expérimenté en la matière procède de manière suivie à l'interprétation des mesures d'auscultation, qu'il en consigne les résultats dans un rapport de mesures annuel et qu'il effectue lui-même une fois par année un contrôle visuel de l'ouvrage d'accumulation (contrôle annuel). »

Le professionnel expérimenté a un rôle important car il contrôle, analyse et valide régulièrement les mesures reçues des barragistes : il reste ainsi attentif à tout changement d'état ou de comportement du barrage. En cas d'événement exceptionnel avéré, il avise l'expert génie civil (ingénieur N3) et l'autorité de surveillance (OFEN, section barrages, Niveau 4).

Le profil du professionnel expérimenté doit satisfaire la plupart des critères suivants :

- ingénieur spécialisé en génie civil,
- expérience dans le domaine de la construction des ouvrages hydrauliques, de la géotechnique, de la mécanique des roches, de l'hydraulique, de l'hydrologie et des structures,
- 5 à 10 ans de pratique dans ces domaines,
- collaboration à l'étude ou à l'exécution d'ouvrages hydrauliques,
- collaboration au niveau 2 avec un autre professionnel expérimenté.

Les tâches du professionnel expérimenté sont les suivantes :

- interprétation de manière suivie des mesures d'auscultation,
- rédaction d'un rapport annuel avec les résultats des mesures,
- inspection annuelle de l'ouvrage (contrôle visuel) et de ses abords,
- organisation et suivi des essais de fonctionnement des vannes de vidange.

Le professionnel expérimenté est le répondant pour la sécurité de l'ouvrage d'accumulation et est ainsi l'interlocuteur privilégié en ligne directe de l'autorité de surveillance.

1.3 Experts (Niveau 3)

Selon l’art. 14 de l’OSOA, « la sécurité des ouvrages d’accumulation dont la hauteur de retenue est de 40 m au moins ou, si cette hauteur est d’au moins 10 m, dont la capacité dépasse 1 million de m³, doit être examinée de manière approfondie tous les cinq ans par des experts confirmés. »

Le profil d’un expert doit comprendre les qualités et compétences suivantes :

- être auteur du projet ou avoir participé à la conception ou à l’exécution du projet,
- avoir une expérience dans le domaine de la conception et de la construction des barrages,
- avoir une expérience de leur surveillance,
- avoir exercé la fonction de professionnel expérimenté (niveau 2),
- avoir au moins 10 ans de pratique,
- être indépendant par rapport au propriétaire ou l’exploitant,
- être agréé par la Haute Autorité de surveillance.

Les tâches des experts (ingénieur génie civil et géologue) sont listées ci-après :

- revue détaillée de la sécurité sur la période,
- rapport quinquennal de sécurité (état et comportement),
- recommandations,
- programme de mesures pour les 5 années suivantes.

1.4 Autorité de surveillance (Niveau 4)

Le Conseil Fédéral a délégué la tâche de surveillance des ouvrages d’accumulation à l’Office Fédéral de l’Energie (OFEN) par sa section barrages.

Les tâches de l’autorité de surveillance sont le contrôle de l’organisation de l’exploitant, l’analyse des documents techniques, l’examen du comportement de l’ouvrage et la vérification de l’état et de l’entretien.

L’OFEN a édicté des directives d’application pour différentes thématiques :

- sécurité structurale,
- vérification de la sécurité en cas de crue,
- vérification des ouvrages aux séismes,
- surveillance et l’entretien.



Figure 2 : Diverses directives éditées par l’OFEN.

2. DISPOSITIF D'AUSCULTATION

Il n'y a pas de règle établie déterminant le dispositif d'auscultation à installer dans un barrage, mais un principe pragmatique d'instrumentation suffisante pour que l'ingénieur responsable de sa sécurité puisse juger valablement son état et son comportement. Le dispositif fait partie intégrante du projet de construction de barrage et est soumis à l'approbation de l'autorité de surveillance. Il peut évoluer au fil du temps en fonction des besoins et des exigences particulières des experts. Il est intégré dans les consignes de service et de surveillance de l'ouvrage.

Le Comité Suisse des Barrages a édité en 2005 le document "Dispositif d'auscultation des barrages", composé de 3 parties : 1) Concept de mesures, 2) Equipement et méthodes de mesures et 3) Feuilles explicatives. L'intention est de présenter les idées de base qui gouvernent la mise en place d'un dispositif d'auscultation, de décrire les équipements adaptés aux différents types de grandeurs physiques à mesurer et de fournir des fiches détaillées pour ces équipements.

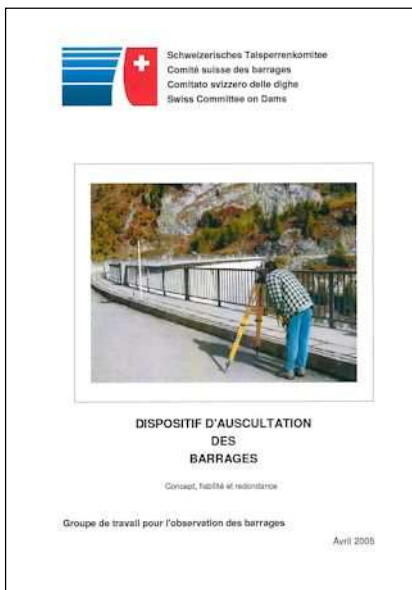


Figure 3 : Brochure « Dispositif d'auscultation des barrages », avril 2005, Comité Suisse des Barrages.

Le dispositif d'auscultation doit permettre de mesurer les charges, telles la poussée hydrostatique et la température qui sollicitent l'ouvrage, et également les paramètres caractérisant son comportement, comme les déformations de la structure (déplacements horizontaux, verticaux et inclinés, rotations), les mouvements particuliers (fissures, joints), la température dans le corps du barrage, les sous-pressions au contact béton-rocher, les débits d'infiltration et de drainage.

L'appareillage utilisé en Suisse pour l'auscultation est celui standard, tel qu'il se trouve dans les barrages en général :

- pendules directs et inverses,
- rocmètres, extensomètres,
- déversoirs, venturis,
- manomètres,
- clinomètres.

Les mesures peuvent être manuelles et/ou automatiques. Dans ce dernier cas, elles doivent être contrôlées manuellement régulièrement. L'automatisation des mesures par la preuve de sa fiabilité a permis de lever l'obligation de la permanence des barragistes sur sites.

Le programme de mesures est adapté aux dimensions de l'ouvrage d'accumulation et est défini soit par l'ingénieur responsable de sa sécurité, soit par l'expert génie civil pour les plus grands barrages. La fréquence des mesures peut être fonction du niveau de la retenue et du comportement de l'ouvrage; elle peut être plus élevée en cas d'anomalie ou de comportement particulier. Des campagnes complémentaires de mesures sont également effectuées suite à un séisme.

3. GEODESIE

Le Comité Suisse des Barrages a édité en 2011 le document “Géodésie pour la surveillance des ouvrages d’accumulation” qui présente les exigences requises pour la géodésie dans le concept de mesures des barrages, l’exécution et l’interprétation des mesures géodésiques, le rôle de l’exploitant pour l’entretien du réseau géodésique (piliers et lignes de visée) et les exigences pour les géomaticiens (formation et expérience) et les bureaux de géomaticiens (suivi à long terme, appareillage disponible, programmes spécifiques).



Figure 4 : Brochure « Géodésie pour la surveillance des barrages », 2011, Comité Suisse des Barrages.

En effet, les mesures géodésiques font partie intégrante du concept de sécurité. Etant donné que la géodésie détermine la position et l’altitude de points, elle permet de réaliser un système de mesure étendu pour le contrôle des déformations de l’ouvrage et du comportement de ses environs. Ainsi, la possibilité est offerte de mettre en place des dispositifs de mesure à deux ou trois dimensions. Ceci augmente considérablement l’efficacité de la surveillance compte tenu d’une redondance.

L’analyse et l’exploitation des mesures géodésiques intègrent le contrôle des points fixes, la précision et la fiabilité des résultats au moyen des calculs du risque d’erreur.

La connaissance des déplacements absolus est nécessaire pour comprendre l’évolution à long terme d’un ouvrage d’accumulation.

Dans le cadre de la conception d’un réseau géodésique, le plus tôt possible et de préférence lors du design du barrage, les ingénieurs génie civil et géomètres se doivent de collaborer étroitement afin de définir de la relation adéquate entre les instruments de mesure installés dans l’ouvrage et les points de contrôle géodésiques, ceci contribuant à la redondance et par conséquent à la fiabilité du système de surveillance. Pour un choix des points fixes, la collaboration du géologue est nécessaire. Ceux-ci sont localisés à proximité du barrage, mais à l’extérieur de sa zone d’influence. Ils seront situés à l’amont et à l’aval du barrage pour limiter la propagation des erreurs.

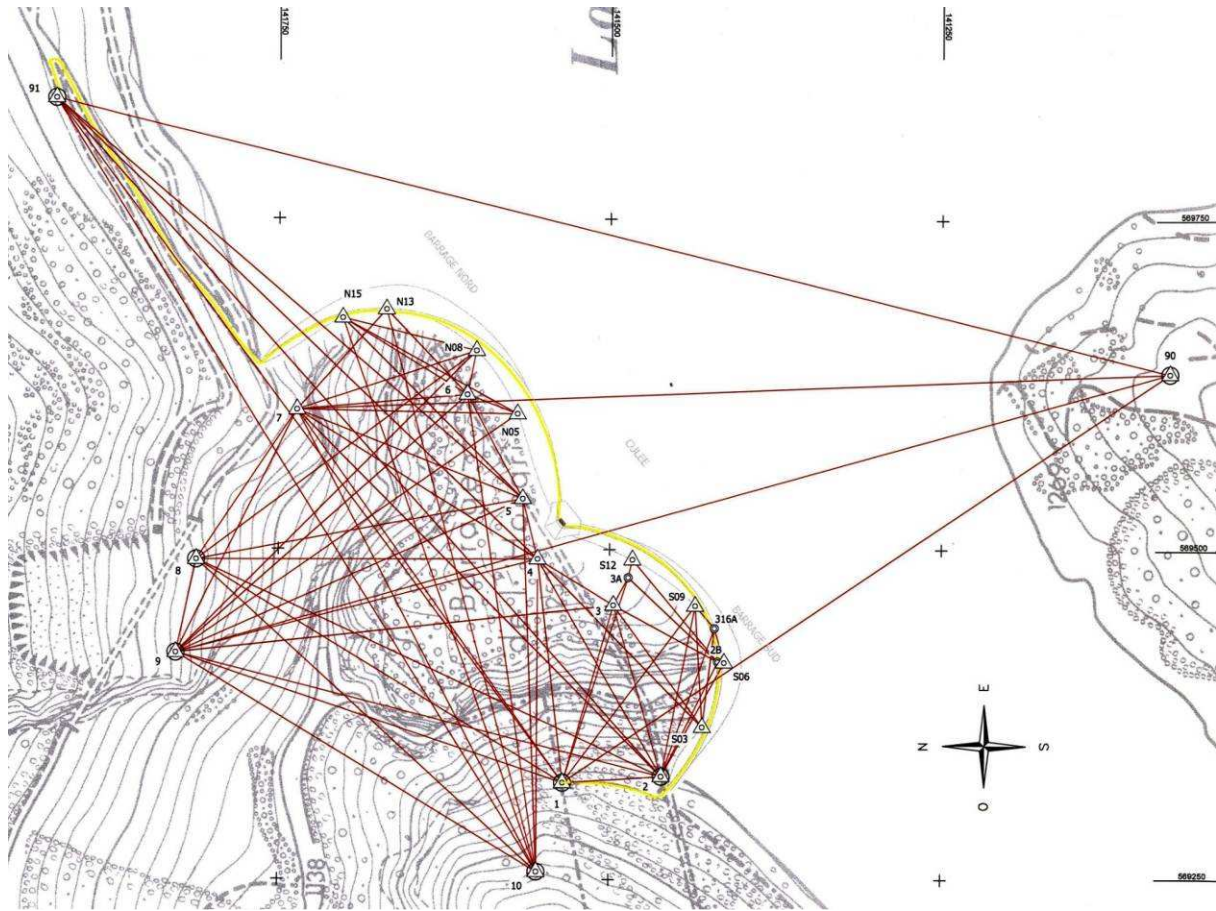


Figure 5 : Exemple du réseau géodésique des barrages de l'Hongrin.

Les observations s'organisent selon un canevas préétabli et se déroulent selon les règles éprouvées (hauteur des instruments, paramètres météorologiques, ...) et sous (température et niveau de retenue si possible constants). L'observation de tous les autres dispositifs de surveillance de l'ouvrage pendant la mesure géodésique est recommandée.

4. INTERPRÉTATION DES MESURES

L'interprétation des mesures d'auscultation est une tâche de spécialiste expérimenté qui doit dans un premier temps évaluer l'adéquation du système d'auscultation mis en place ainsi que la qualité des mesures réalisées. L'Office Fédéral de l'Énergie (OFEN) a fait développer et met à disposition des ingénieurs chargés de la surveillance des barrages un logiciel d'analyse des mesures d'auscultation. Principalement sur la base de la température du béton et de la hauteur d'eau dans la retenue, cet outil d'analyse statistique permet d'estimer rapidement l'intensité relative des causes des déplacements mesurés, mais offre également une bonne évaluation des effets irréversibles.

4.1 Objectifs

Sur la chaîne des activités de surveillance des barrages, l'interprétation des mesures est un maillon essentiel. Elle permet bien évidemment d'évaluer le comportement du barrage, mais aussi d'apprécier la qualité du système d'auscultation, que ce soit pour l'instrumentation ou la réalisation des lectures. L'interprétation des mesures d'auscultation d'un barrage, telles que la déformation horizontale, le soulèvement, les sous-pressions, les déformations du rocher de fondation, les débits des eaux d'infiltration, permet l'identification précoce des changements inattendus dans le comportement. Ces analyses peuvent déceler les prémices d'une perte de la fonctionnalité de tout ou partie du barrage et de ses environs. Du point de vue de la sécurité du barrage, il y a donc un grand intérêt à identifier ces changements dès que possible. L'interprétation des mesures doit donc revenir à un spécialiste expérimenté.

Les directives suisses sur la sécurité des ouvrages d'accumulation indiquent que « les tâches d'interprétation concernent, à divers titres, l'ensemble des intervenants (exploitant, ingénieur expérimenté, experts confirmés et autorité de surveillance). Il est du ressort de l'exploitant de s'assurer de la plausibilité des valeurs obtenues

et ensuite de procéder à leur validation. Il appartient au professionnel expérimenté de vérifier la validité des résultats acquis et de les entériner si le comportement est adéquat. Il est notamment fait usage de modèles pour l'analyse des résultats et du comportement de l'ouvrage. »

De plus, l'Ordonnance sur la sécurité des ouvrages d'accumulation (OSOA) du 7 décembre 1998 précise dans l'article 13, chapitre 3 sur la surveillance : « L'exploitant fait en sorte qu'un professionnel expérimenté en la matière procède de manière suivie à l'interprétation des mesures d'auscultation, qu'il en consigne les résultats dans un rapport de mesures annuel et qu'il effectue lui-même une fois par année un contrôle visuel de l'ouvrage d'accumulation (contrôle annuel). »

4.2 Appréciation du système

Le spécialiste ou professionnel expérimenté doit donc dans un premier temps vérifier la validité des mesures. La première étape consiste à prendre connaissance du barrage et de l'entier de son système d'auscultation, ainsi que des moyens mis à disposition par l'exploitant pour entretenir et mesurer ce système. Une inspection du matériel fixe permettra au spécialiste de se faire son avis sur son état. En cas de doute sur les mesures, il peut être profitable de suivre en détail toute la chaîne de leur acquisition, en accompagnant les gardiens du barrage pendant leur tournée de lecture aux instruments, voire en procédant soi-même à la lecture, puis en participant à l'introduction des lectures dans la base de données.

Ces « visites de terrain » permettent bien souvent de résoudre la plupart des anomalies récurrentes soupçonnées ou avérées lors de la validation des mesures. Ces anomalies peuvent provenir par exemple :

- D'interversion dans les lectures à cause d'une nomenclature peu claire de l'instrumentation ou de protocole de tournée (tableaux sur lequel les gardiens inscrivent leurs lectures) ne correspondant à l'ordre logique de visite ;
- D'une mauvaise manipulation de l'instrument avec une mise en place erronée ou une mise à zéro intempestive, voire l'inverse ;
- D'un mauvais report de la lecture, erreur de décimale, omission du signe ;
- D'un mauvais transfert dans la base de données, nomenclature pas claire, fausse unité, erreur de signe, etc.

La participation du professionnel expérimenté à l'exercice de lecture aux instruments lui permet aussi de se faire sa propre appréciation sur la vraie précision des mesures par opposition à celle annoncée par les fournisseurs de matériel d'auscultation, les conditions de lecture étant parfois assez éloignées de celle régnant dans les laboratoires où ces instruments ont été développés (situation acrobatique, humidité, lumière, courant d'air, etc.).

4.3 Validation des mesures

La validation des mesures passe par un dépouillement des données reçues. Il suffit généralement d'aligner les mesures sur un graphique chronologique pour déceler rapidement d'éventuelles anomalies. Dans bien des cas, le professionnel expérimenté retrouve la cause de l'anomalie par déduction. Il s'agit souvent d'une interversion de deux lectures, d'une erreur de décimale, etc. Dans les autres situations, une discussion avec l'exploitant est nécessaire pour retrouver la source de l'anomalie. Les cas les plus compliqués peuvent nécessiter une intervention au barrage du spécialiste (voir ci-avant).

Dans l'analyse des mesures, le dépouillement est une étape importante. Il a comme objectifs de valider ses mesures à l'exploitant et d'offrir une base de données saine pour l'interprétation.

4.4 Dam Reg

Chaque professionnel expérimenté développe lui-même ses propres techniques et outils d'analyse, la plupart du temps grâce à des tableurs du commerce (type Excel). Des analyses statistiques de type régression peuvent vite devenir compliquées et complexes à calculer pour un ingénieur qui n'aurait pas suivi une formation mathématique spécifique. Pour atteindre rapidement l'objectif recherché d'interprétation des mesures d'auscultation du barrage, il est nécessaire de disposer d'un outil adapté et efficace.

L'Autorité suisse de surveillance des barrages a commandé le développement d'un logiciel qui permet d'effectuer des analyses de régression statistique des données de mesure d'auscultation. Ce logiciel offre donc la possibilité de comparer entre eux des états mesurés dans le passé, mais également, par extension, des états futurs avec un comportement attendu.

Ce logiciel, nommé « Damreg » peut être téléchargé sur le site de l'Office Fédéral de l'Energie (www.bfe.admin.ch → thèmes → barrages → études). Le programme utilise des algorithmes de régression standard, mais peut exécuter d'autres types de régression (Rigde, Prais-Winsten, etc.).

Ce logiciel a été développé spécifiquement pour le suivi du comportement des barrages. Il permet donc une prise en considération rapide et simplifiée des paramètres courants dans l'analyse des mesures d'auscultation des barrages telles déformations, sous-pressions, poussée de l'eau, température du béton ou de l'air, etc.

Sans entrer dans le détail des fonctionnalités du programme, prenons l'exemple de l'analyse de déformations horizontales amont aval d'un barrage-voûte mesurées à un pendule.

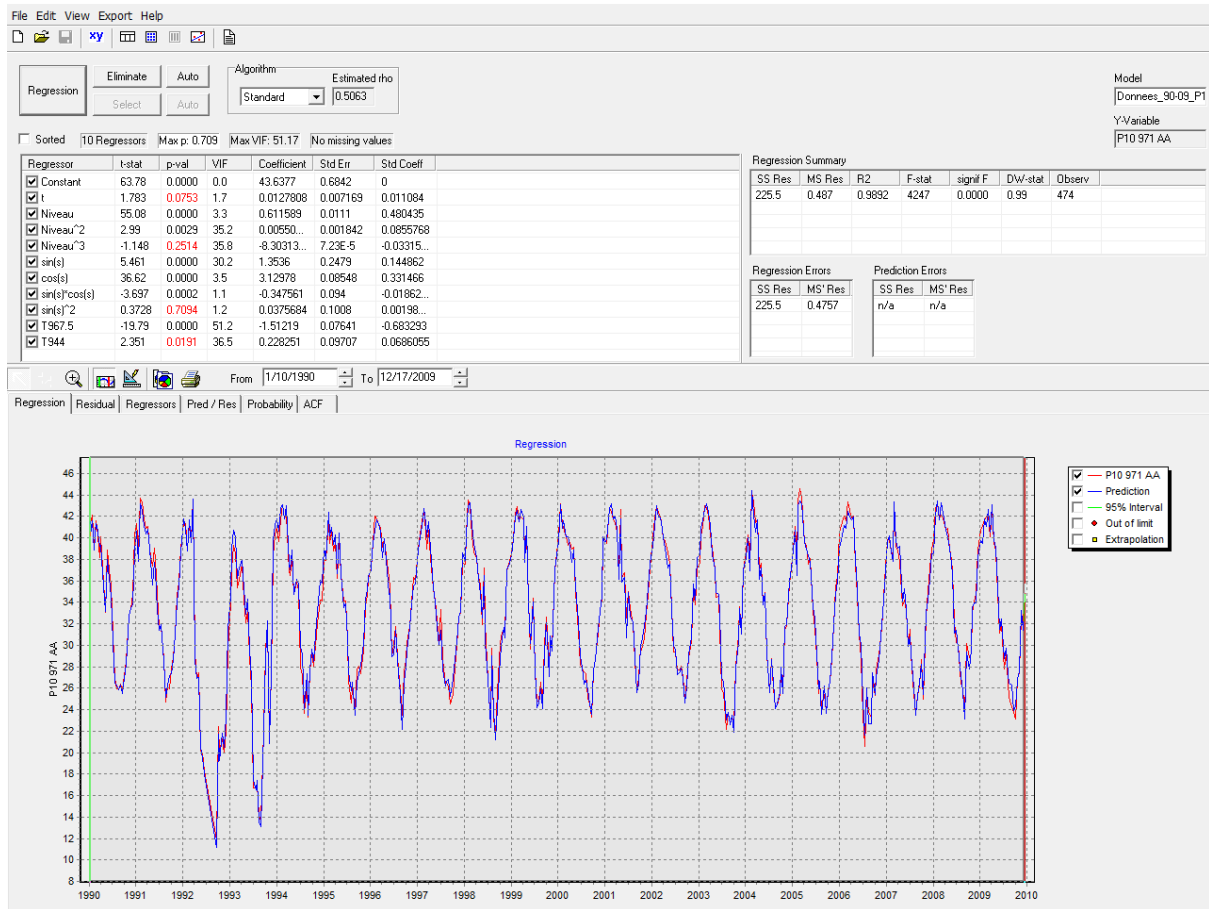


Figure 6 : Fenêtre principale du logiciel Damreg.

Dans cet exemple, on peut voir la valeur mesurée (ligne rouge) et la valeur calculée (ligne bleue). La période d'ajustement des coefficients des variables peut très facilement et rapidement être modifiée en déplaçant les lignes verticales verte et rouge ou en introduisant plus précisément les dates de début et de fin.

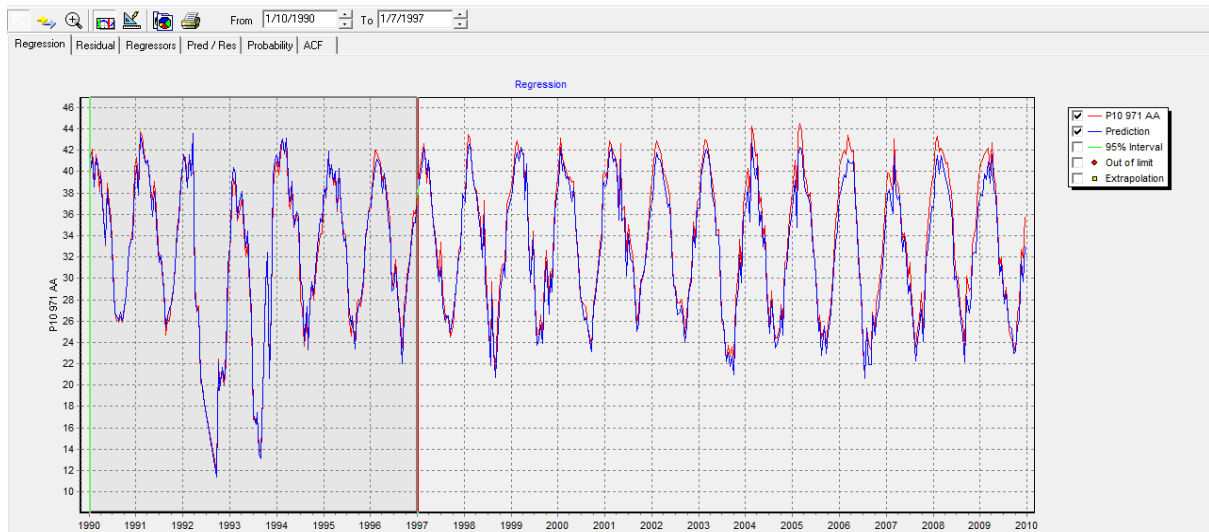


Figure 7 : Modification de la période d'ajustement des coefficients.

Dans cet exemple, la période d'ajustement a été réduite à sept années, de 1990 à 1996. A partir de 1997, la ligne bleue devient une prévision des déformations basée sur le comportement du barrage de 1990 à 1996.

Le logiciel offre la possibilité d'utiliser (entre autres) les variables suivantes :

- Poussée de l'eau : le programme propose soit des puissances normales, soit des polynômes de Tchebychev.
- Température du béton ou de l'air : le programme permet de considérer les températures directes (au moment de la mesure de déformation) ou alors les températures mesurées précédemment. Le logiciel offre également une estimation de la température du béton à une profondeur donnée si l'on connaît la température de la surface.
- Climat : le programme offre toute une gamme de fonctions périodiques pour prendre en compte tous les effets saisonniers.
- Tendence : le programme fournit la possibilité de considérer diverses tendances à long terme permettant de simuler des effets irréversibles.

Ce logiciel offre donc une gamme importante de combinaisons de variables. Elles sont regroupées par thèmes ou signification physique (poussée de l'eau, température, climat, tendance). Une autre sortie graphique permet d'apprécier l'intensité de chacun des phénomènes.

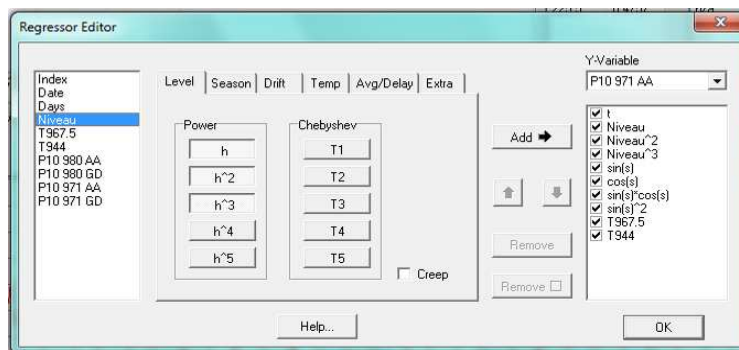


Figure 8 : Exemple de sélection de variable.

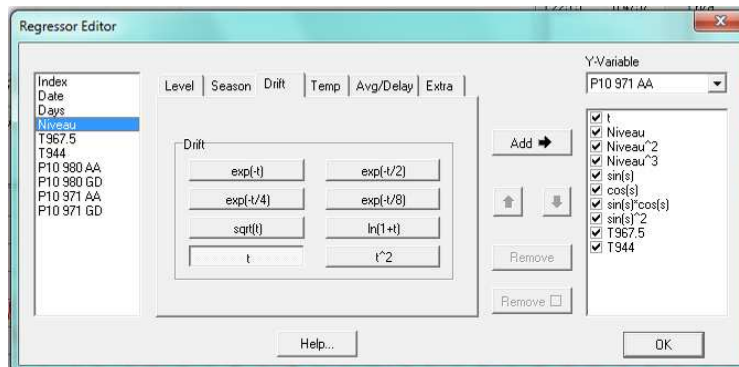


Figure 9 : Exemple de sélection de variable.

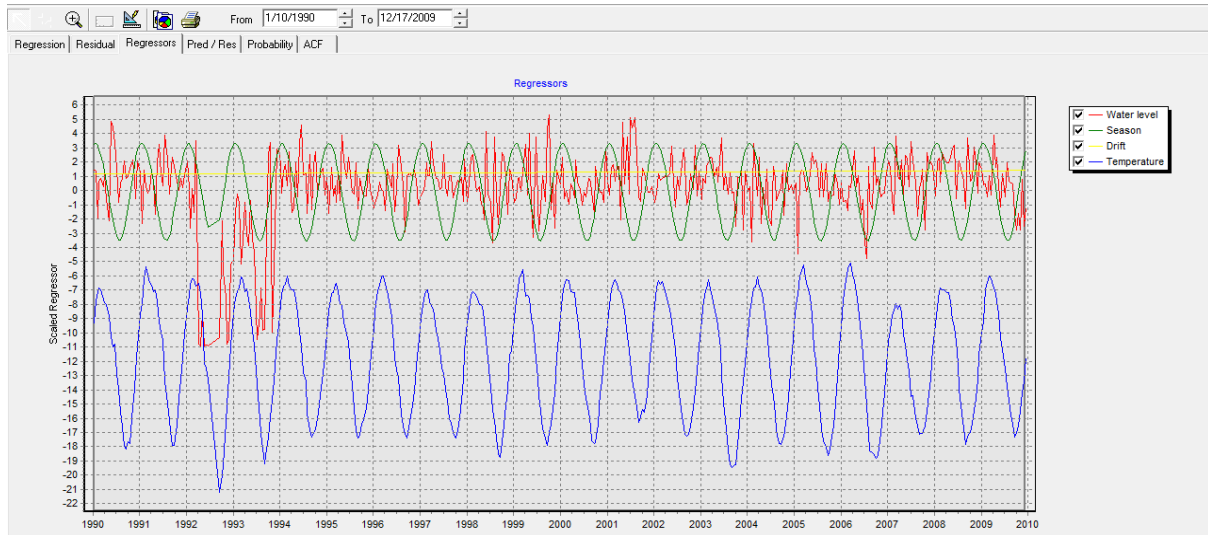


Figure 10 : Représentation des variables classées par phénomène physique.

Toutes les variables ne sont pas pertinentes lors d'une analyse. À l'aide de coefficients statistiques, le programme permet de sélectionner rapidement les variables les plus utiles à l'analyse. Il écarte de lui-même les moins pertinentes ou ceux qui présentent entre elles une multi-colinéarité, l'utilisateur peut toutefois récupérer les variables que le logiciel aurait automatiquement écartées.

Regressor	t-stat	p-val	VIF	Coefficient	Std Err	Std Coeff
<input checked="" type="checkbox"/> Constant	63.78	0.0000	0.0	43.6377	0.6842	0
<input checked="" type="checkbox"/> t	1.783	0.0753	1.7	0.0127808	0.007169	0.011084
<input checked="" type="checkbox"/> Niveau	55.08	0.0000	3.3	0.611589	0.0111	0.480435
<input checked="" type="checkbox"/> Niveau ²	2.99	0.0029	35.2	0.00550...	0.001842	0.0855768
<input checked="" type="checkbox"/> Niveau ³	-1.148	0.2514	35.8	-8.30313...	7.23E-5	-0.03315...
<input checked="" type="checkbox"/> sin(s)	5.461	0.0000	30.2	1.3536	0.2479	0.144862
<input checked="" type="checkbox"/> cos(s)	36.62	0.0000	3.5	3.12978	0.08548	0.331466
<input checked="" type="checkbox"/> sin(s)*cos(s)	-3.697	0.0002	1.1	-0.347561	0.094	-0.01862...
<input checked="" type="checkbox"/> sin(s) ²	0.3728	0.7094	1.2	0.0375684	0.1008	0.00198...
<input checked="" type="checkbox"/> T967.5	-19.79	0.0000	51.2	-1.51219	0.07641	-0.683293
<input checked="" type="checkbox"/> T944	2.351	0.0191	36.5	0.228251	0.09707	0.0686055

Figure 11 : Variables retenues pour l'analyse et leur pertinence statistique.

Dans l'exemple précédent, Damreg propose d'écarter certaines variables qu'il estime non pertinentes ($p\text{-val} > 0.01$) et qui avait été choisies par l'utilisateur. L'utilisateur a ensuite la possibilité de laisser le logiciel éliminer automatiquement ces variables et recommencer la régression sans elles, ou de (partiellement) les conserver. Ainsi, selon le logiciel, l'utilisation du thermomètre « T944 » ou la puissance 3 du niveau du lac n'est pas pertinente pour l'analyse statistique. De même, il n'observe pas d'effet irréversible à long terme et propose d'abandonner le terme « t » d'une tendance linéaire.

4.5 Développement

En bref, Damreg est un logiciel complet, d'accessibilité aisée et offrant une grande palette de possibilités d'analyse pour interpréter les mesures d'auscultation des barrages. « L'utilisateur moyen » ne maîtrise qu'une petite partie de ces nombreuses possibilités, c'est pourquoi le « groupe de travail sur l'observation des barrages » du Comité Suisse des Barrages met en place un cours de sensibilisation à l'utilisation de Damreg avec rappel théorique.

De plus, ce logiciel est encore en cours de développement, les pistes d'amélioration concernent : une meilleure prise en compte des effets thermiques pour les prévisions de déformation, une extension de l'application pour les barrages en remblai (aujourd'hui presque exclusivement centrée sur les barrages en béton), une extension de l'application pour l'analyse d'autres paramètres que les déformations (pratique la plus commune actuellement), le développement d'un algorithme permettant de détecter tout changement soudain de comportement.

5. CONCLUSIONS

Quatre aspects de l'auscultation des barrages en Suisse sont présentés.

1. Cadre légal et concept de surveillance

En Suisse, la sécurité des barrages est régie par l'Ordonnance sur la Sécurité des Ouvrages d'Accumulation (OSOA) du 7 décembre 1998. 227 ouvrages d'accumulation sont assujettis sur la base de leur géométrie et du danger particulier qu'ils peuvent représenter. La sécurité d'un barrage est garantie de manière optimale si elle s'appuie sur trois piliers : 1) la sécurité structurale, 2) la surveillance et l'entretien, 3) le plan en cas d'urgence. Le concept suisse de surveillance prévoit 4 niveaux de surveillance : les barragistes sur site (Niveau 1), le professionnel expérimenté (Niveau 2), les experts confirmés (Niveau 3) et l'autorité de surveillance (Niveau 4).

2. Dispositif d'auscultation

Il n'y a pas de règle établie déterminant le dispositif d'auscultation à installer dans un barrage, mais un principe pragmatique d'instrumentation suffisante pour que l'ingénieur responsable de sa sécurité puisse juger valablement son état et son comportement.

3. Géodésie

Les mesures géodésiques font partie intégrante du concept de sécurité. La géodésie permet de réaliser un système de mesure étendu pour le contrôle des déformations de l'ouvrage et du comportement de ses environs.

4. Interprétation des mesures

L'interprétation des mesures d'auscultation est une tâche de spécialiste expérimenté. L'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) a fait développer et met à disposition des ingénieurs chargés de la surveillance des barrages un logiciel d'analyse des mesures d'auscultation.

RÉFÉRENCES

- [1] Conseil Fédéral Suisse (1998). Ordonnance sur la Sécurité des Ouvrages d'Accumulation.
- [2] Comité Suisse des Barrages (2005). Dispositif d'auscultation des barrages.
- [3] Comité Suisse des Barrages (2011). Géodésie pour la surveillance des ouvrages d'accumulation.