

Schweizerisches Talsperrenkomitee
Comité suisse des barrages
Comitato svizzero delle dighe
Swiss Committee on Dams



DISPOSITIF D'AUSCULTATION DES BARRAGES

Concept, fiabilité et redondance

Groupe de travail pour l'observation des barages

Avril 2005

CONTENU

Partie 1: Concept de mesure

Partie 2: Equipement et méthodes de mesure

Partie 3: Feuilles explicatives

DISPOSITIF D'AUSCULTATION POUR LA SURVEILLANCE DES BARRAGES



Figure 1: Ouvrage d'accumulation de l'Hongrin

PREAMBULE

En 1987, le groupe de travail "Observation des barrages" publiait un volumineux rapport intitulé "Dispositif d'auscultation - Concept, fiabilité et redondance", résultat d'un travail intensif et poussé d'un sous-groupe de travail. L'intention était de présenter les idées de base qui gouvernent la mise en place d'un dispositif d'auscultation pour suivre le comportement des ouvrages d'accumulation. Le rapport passait en revue les principales méthodes de mesures et les instruments les plus utilisés en Suisse, dont chacun faisait l'objet d'une feuille explicative. Il faut aussi mentionner que le rapport se limitait aux instruments utilisés en Suisse pour lesquels les auteurs du rapport disposaient d'une grande expérience.

Depuis cette parution, une évolution importante de la technique des mesures a été constatée. De ce fait, il a été jugé opportun d'actualiser et de compléter cette publication tout en conservant son mode de présentation en 3 parties.

Afin de préparer le présent document, un nouveau sous-groupe de travail a été constitué, composé des personnes suivantes:

Marcel Lutz, Forces Motrices du Nord-Est de la Suisse SA, 5401 Baden

Rudolf W. Müller, Office fédéral des eaux et de la géologie, 2501 Bienne

Henri Pougatsch, Office fédéral des eaux et de la géologie, 2501 Bienne

Karl M. Steiger, Colenco Power Engineering SA, 5405 Baden

Ruedi Straubhaar, Electrowatt-Ekono SA, 8037 Zürich.

Pour la rédaction de feuilles explicatives spécifiques, le sous-groupe de travail a reçu l'aide des spécialistes suivants:

Pour la géodésie:

Kurt Egger, expert en géodésie, Félix Walser, Schneider Ingénieurs SA, 7007 Coire

Pour la géologie:

Dr Max Kobel, 8832 Wilen

Pour la technique de la fibre optique:

Dr Daniele Inaudi, SMARTEC SA, 6928 Manno

Pour les méthodes géophysiques:

Dr Hans Rudolf Keusen, Geotest AG, 3052 Zollikofen.

PARTIE I CONCEPT DE MESURE

Le dispositif d'auscultation

Raison d'être du dispositif d'auscultation

Le dispositif d'auscultation est un système de mesures qui, s'il est judicieusement conçu, permet de juger, par le suivi de paramètres représentatifs, le comportement du barrage et de ses fondations en regard des charges qui les sollicitent. Les contrôles sont exécutés tout d'abord pendant la construction et le premier remplissage, puis pendant l'exploitation afin de pouvoir garantir la détection rapide de tout comportement anormal. L'analyse des résultats est effectuée de façon à obtenir une appréciation du comportement à court et à long terme. Cette analyse est aussi indispensable pour compléter et améliorer les connaissances de l'ingénieur.

Par ailleurs, la collecte d'informations relatives au milieu environnant, parmi lesquelles les conditions météorologiques et hydrologiques, la stabilité des versants, les risques d'avalanche et de chute de glace, fait partie également de la surveillance de l'ouvrage d'accumulation.

Conception globale du dispositif d'auscultation

Il n'y a pas de règle établie fixant le nombre d'appareils de mesure à mettre en place. Ce nombre

varie selon le type de barrage et ses dimensions, son mode de construction, son âge, ainsi que les conditions propres au site, en particulier celles relatives aux fondations. L'expérience acquise dans le domaine de l'analyse du comportement des ouvrages d'accumulation doit aussi être prise en considération.

Le dispositif d'auscultation doit être conçu de telle façon qu'il soit possible de mesurer aussi bien les charges, telles la poussée hydrostatique et la température qui sollicitent l'ouvrage (causes), que les différents paramètres (grandeurs) qui caractérisent le comportement d'un ouvrage de retenue (conséquences). Les charges directes et les conditions extérieures vont engendrer, d'une part, des déformations, des variations de température en particulier dans le corps d'un ouvrage en béton et, d'autre part, des pressions hydrostatiques (sous-pressions, pressions interstitielles) et des infiltrations (percolations). Le tableau 1 donne les principaux paramètres qui doivent être relevés pour les barrages en béton et en remblai, ainsi qu'en fondations.

Barrage en béton	Barrage en remblai	Fondations
Déformations de la structure	Déformations du corps du barrage	Déformations Mouvement des appuis
Mouvements particuliers (fissures, joints)	Mouvements particuliers (liaisons avec une structure béton)	Mouvements particuliers (fissures, diaclases)
Température dans le corps du barrage	Eventuellement température dans le corps du barrage pour la détection de percolation	Eventuellement température dans la fondation pour la détection de percolation
Sous-pressions (au contact béton-fondation et dans le rocher)	Pressions interstitielles dans le corps du barrage en remblai et niveau piézométrique	Pressions interstitielles Sous-pressions en profondeur Niveau piézométrique Niveau de la nappe phréatique
Débits d'infiltration et de drainage	Débits d'infiltration et de drainage	Débits d'infiltration, de drainage et résurgences (sources)
Analyse chimique des eaux de percolation Turbidité (éventuelle)	Analyse chimique des eaux de percolation Turbidité	Analyse chimique des eaux de percolation Turbidité

Tableau 1 : Paramètres significatifs pour le suivi du comportement des barrages et de ses fondations

Le dispositif d'auscultation doit être adapté aux particularités et à l'importance de l'ouvrage d'accumulation. Sa conception doit prendre en compte que l'ouvrage de retenue et ses fondations constituent un ensemble. Toutefois, il doit permettre de

distinguer clairement le comportement de l'un et de l'autre. Le dispositif d'auscultation n'étant pas un système figé, il est nécessaire d'examiner périodiquement s'il satisfait toujours aux exigences et aux

besoins. Les cas échéant, il sera complété ou adapté, voire modernisé.

Le dispositif d'auscultation doit être assez complet pour donner, en cas d'anomalie, les informations utiles pour la recherche de la cause ou des causes du phénomène observé. La mise en place d'une instrumentation complémentaire peut éventuellement s'avérer nécessaire.

L'appréciation du comportement d'un barrage s'effectue essentiellement en interprétant les résultats des mesures d'auscultation. La saisie des données d'auscultation est en général de la compétence de l'exploitant. Les tâches d'interprétation concernent, à divers titres, l'ensemble des intervenants (exploitants, ingénieurs expérimentés, 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 confirmer les résultats acquis et de les entériner si le comportement est adéquat.

Il est essentiel que l'interprétation s'effectue peu de temps après l'exécution des mesures pour déceler sans délai toute anomalie de comportement de l'ouvrage.

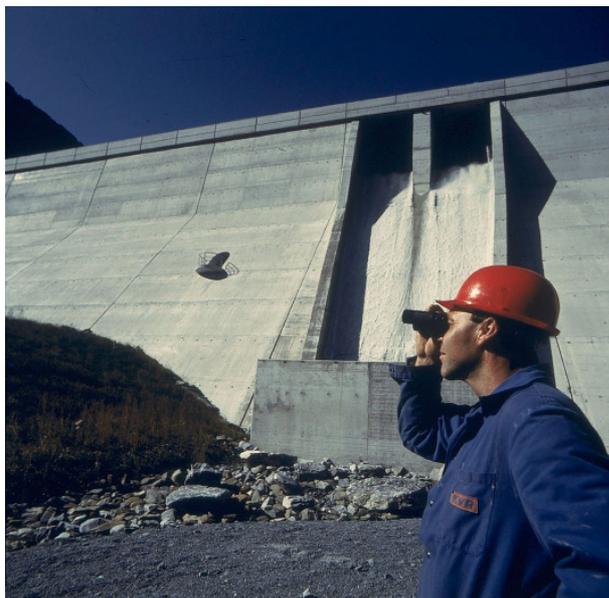


Figure 2 : Contrôles visuels

Caractéristiques des instruments de mesure

Il est primordial d'apporter un soin particulier au choix des instruments de mesure en tenant compte des paramètres à observer, du mode de construction de l'ouvrage et des possibilités techniques d'installation. Les instruments de mesure sont choisis en fonction de la plage de mesure prévue. Il ne faut pas perdre de vue que certains appareils

permettent d'obtenir des valeurs plus précises que celles recherchées. Il n'est donc pas toujours utile de relever des valeurs comportant un trop grand nombre de décimales. Il importe de veiller à une mise en place correcte afin de garantir une excellente fiabilité des mesures, ce qui est une condition pour l'interprétation adéquate des résultats.

La priorité doit être donnée aux instruments:

- simples dans leur concept et leur exploitation,
- robustes,
- insensibles aux conditions environnementales (température, humidité, surtensions),
- durables (la longévité des appareils doit être assurée surtout pour ceux qui sont directement intégrés dans le corps de l'ouvrage lors de la construction),
- précis,
- fiables et
- de lecture facile.

Pour autant qu'ils ne soient pas noyés dans le corps de l'ouvrage, ils doivent être accessibles et remplaçables. Lors du remplacement d'un appareil, il est primordial d'assurer la continuité des mesures. Enfin, pour parer à des pannes ou défaillances, il est recommandé, dans la mesure du possible, de prévoir des mesures redondantes des principaux paramètres. Il est aussi utile de pouvoir recouper les mesures sur la base de 2 méthodes différentes (par exemple, pendule – polygonale, indicateurs de tassements – nivellement).

Sollicitations extérieures

Les charges extérieures (en particulier la poussée hydrostatique) sont celles qui agissent directement sur l'ouvrage. Les conditions extérieures reflètent les conditions atmosphériques sur le site (par exemple la température ambiante).

La poussée hydrostatique étant une charge importante, les variations du niveau du plan d'eau doivent être relevées et enregistrées, même si le bassin reste vide la plupart du temps comme c'est le cas, par exemple, d'un bassin pour la protection contre les crues. Le champ de mesure doit s'étendre au-delà du niveau du seuil d'un déversoir ou de crête de vannes de l'évacuateur de crue, voire de celui du couronnement afin de suivre les niveaux extrêmes lors d'une crue. En outre, la température de l'eau est aussi une valeur à relever.

Dans le cas où les dépôts de sédiments seraient importants (modification des charges, diminution marquée du volume utile, risque d'obturation des organes de vidange), il est nécessaire de procéder périodiquement au relevé de leurs niveaux. On peut procéder dans ce cas à des relevés bathymétriques,

dont la fréquence dépend de l'ampleur des apports en sédiments.

Les conditions atmosphériques (température et humidité de l'air, pluviométrie, neige) sont également des données importantes. La température ambiante a une incidence importante sur les déformations d'un barrage en béton. Les variations de température dans le corps du barrage peuvent être suivies par des thermomètres placés directement dans la masse lors du bétonnage. Ils sont implantés à plusieurs niveaux et répartis sur l'épaisseur du mur. Les thermomètres situés près de la surface seront fortement influencés par les conditions extérieures locales (air et eau). Les thermomètres électriques peuvent être glissés dans des forages en les isolant pour éviter les effets de la température extérieure ou régnant dans une galerie. En cas de défaillance, il sera alors possible de les retirer et de les remplacer.

Il est recommandé de consigner si les précipitations tombent sous forme de pluie ou de neige. Enfin, il faut relever que les précipitations et la fonte des neiges ont parfois une influence directe sur les infiltrations à travers la fondation, ainsi que sur les sous-pressions.

Dans certains cas, les conditions sismiques sur le site peuvent être enregistrées.

Déformations

Suivi des déformations des barrages en béton

Le but est de connaître les déplacements horizontaux et verticaux en des points choisis. Selon la configuration du barrage (avec ou sans galeries et/ou puits), les points de mesure sont situés, à différents niveaux et à l'intérieur du barrage ou fixés sur son parement aval en suivant des lignes horizontales et verticales. Si possible, les lignes de mesure sont prolongées dans le rocher pour connaître aussi les déformations des fondations. Le maillage ainsi constitué permet de connaître les déformées horizontales et verticales de la structure. Pour les ouvrages d'accumulation de petite hauteur de retenue, il s'agit au moins de prévoir la mesure des déformations au niveau du couronnement.

Concernant les déformations horizontales (déformations radiales et tangentielles), elles peuvent être déterminées le long de lignes verticales par des mesures de pendules directs et/ou inversés. Dans le cas de l'installation d'un nouveau pendule inversé, les techniques actuelles de forage permettent de garantir leur verticalité. Il existe aussi la possibilité de faire glisser un guide-fil autocentreur le long d'un tube rainuré, ce qui permet d'avoir des points de mesure à différents niveaux. Cette solution a fait ses preuves comme complément au dispositif

d'auscultation par l'installation d'un pendule inversé en fondation et dans un barrage sans galeries de contrôle et puits. Des mesures d'angles et de distances (mesure de vecteurs) sur cibles extérieures, de même que des visées par alignement sont des méthodes géodésiques simples de mesures de déformation adaptées pour des petits ouvrages. Les déformations horizontales peuvent aussi être déterminées par un alignement par fil qui peut être installé dans une galerie horizontale rectiligne ou le long d'un parapet également rectiligne.

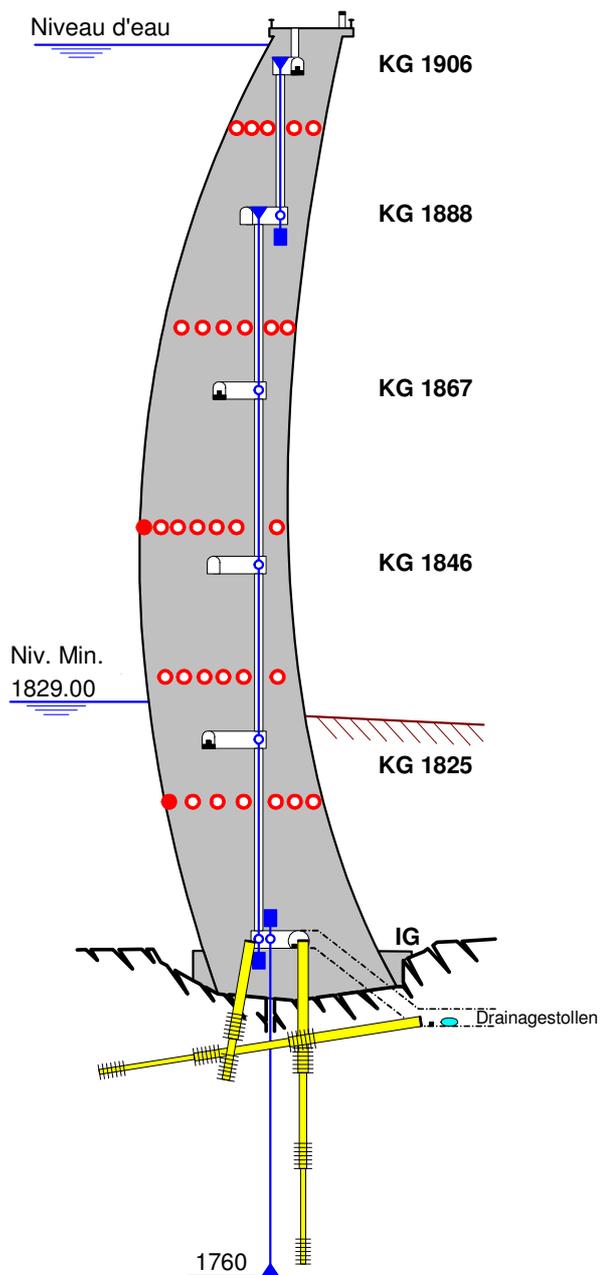


Figure 3: coupe typique d'un barrage-voûte

Quant au nivellement, il permet de connaître les mouvements verticaux (tassement ou soulèvement) de l'ouvrage.

Les déformations locales, par exemple celles de la partie supérieure du barrage, peuvent être déterminées par la pose d'extensomètres.

Des mesures au moyen d'inclinomètres (avec possibilité de mesures automatisées) permettent de calculer la déformée ou peuvent être comparées à la mesure de pendules.

Les barrages en béton ne sont pas exempts de fissures. Si, parfois, le relevé visuel des fissures et leur report sur un plan sont suffisants, il est indiqué de suivre le mouvement des lèvres de certaines fissures particulières au moyen de micromètres, de jointmètres ou de déformètres. A tout le moins, il est possible de placer des témoins (en mortier de ciment) à cheval sur la fissure, toutefois ce procédé ne représente pas une solution optimale. En outre, des repères sont aussi mis en place pour la mesure des mouvements des joints de la structure.

Suivi des déformations des barrages en remblai

Pour les barrages en remblai, l'objectif est d'abord de connaître l'évolution des déformations verticales (tassements) et horizontales de l'ouvrage en crête, mais aussi si possible à divers niveaux, et en particulier les tassements de la fondation. En règle générale, les déplacements horizontaux des points sont déterminés par des mesures géodésiques telles que les mesures d'angles et de distances (mesure de vecteurs), alignement et polygonales. Quant aux déplacements verticaux (tassements ou soulèvements), on procède à des mesures par nivellement, ainsi qu'au moyen de tassomètres ou de repères de tassement hydraulique.

Suivi des déformations des fondations

Les extensomètres permettent la mesure de déformations de fondations rocheuses selon des directions différentes. Le choix de l'orientation de ces instruments va dépendre de la géologie et de la direction des forces transmises notamment pour les barrages-voûtes. Pour saisir au mieux la déformation des fondations, il est recommandé de placer les extensomètres selon au moins 2 directions ou de former un tripode. Un extensomètre peut regrouper jusqu'à 6 barres de longueurs différentes dans un même forage. Dans des cas particuliers, on peut recourir à des micromètres de forage qui permettent une mesure tous les mètres. Ceux-ci peuvent aussi être équipés d'un inclinomètre, ce qui permet la mesure non seulement des variations de distance, mais aussi celles d'inclinaison.

La mesure ponctuelle des déformations horizontales dans 2 directions (par exemple amont – aval,

rive gauche – rive droite), peut se faire au moyen d'un pendule inversé (éventuellement équipés d'un guide-fil autocentreur qui permet des mesures à différents niveaux) ou d'un inclinomètre.

Le nivellement, le tassomètre, les repères de tassement hydrauliques sont parmi les moyens disponibles pour mesurer les tassements en terrain meuble. Ces mesures sont effectuées dans une galerie, pour autant qu'elle existe, dans le sens transversal ou longitudinal d'un barrage en remblai.

Les mouvements des appuis peuvent être suivis par des points implantés à proximité immédiate du barrage et reliés au réseau de mesures géodésiques.

Geodätische Deformationsmessungen

Le système propre au barrage ne livre que des déformations relatives et doit être complété par un espace de référence de proximité (réseau géodésique) auquel il est relié. Grâce à la géodésie, il est possible de mesurer le déplacement de repères par rapport à un réseau composé de stations supposées fixes. Cette méthode présente l'avantage de déterminer des déplacements absolus.

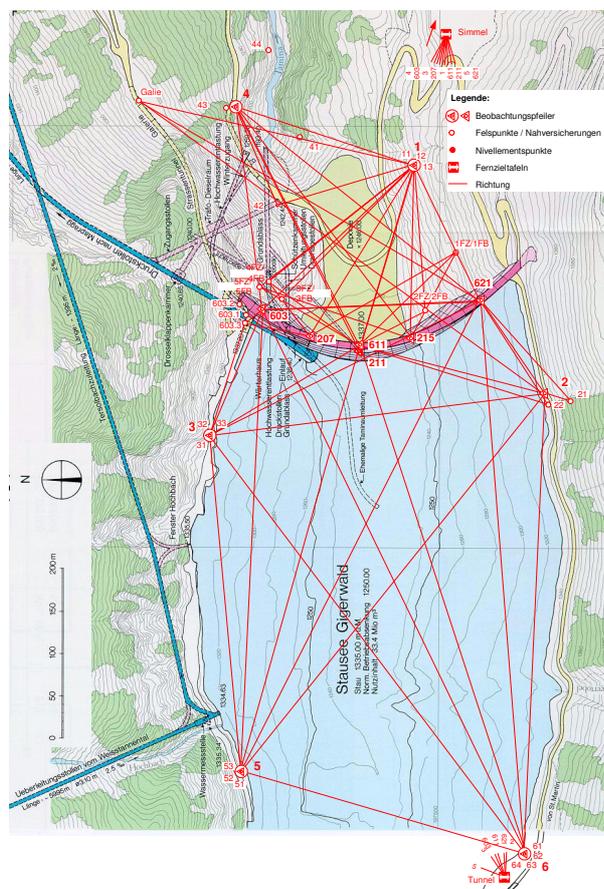


Figure 4 : Réseau de mesure géodésique

La connaissance de déplacements absolus est nécessaire pour obtenir des indications sur l'évolution des déformations à long terme et plus particulièrement dans le cas d'un comportement inhabituel. Toutefois, les campagnes de mesure sont tributaires des conditions météorologiques. Enfin, il faut mentionner qu'il est nécessaire de faire appel à des spécialistes pour exécuter ces mesures.

Au réseau géodésique de proximité peut être adjoind un espace de référence étendu dont les points pourront être mesurés par le système GPS (Global Positioning System). Le système GPS offre une méthode appropriée pour intégrer au réseau de contrôle des points géologiquement stables situés hors de la zone d'influence de l'ouvrage d'accumulation. Le rattachement à des réseaux géodésiques existants peut être réalisé avec la méthode terrestre conventionnelle ou le GPS. La combinaison du GPS avec les mesures géodésiques terrestres constitue un réseau hybride.

En ce qui concerne le réseau de triangulation, l'implantation des points fixes hors de la zone d'influence du barrage fait l'objet d'une collaboration entre le géomètre, l'ingénieur et le géologue. Ils seront implantés tant à l'amont qu'à l'aval de l'ouvrage.

Les points de contrôle ou de mesure pourront être implantés sur le couronnement, dans les galeries du barrage et/ou sur le parement aval, ainsi que sur le terrain. Il est utile de prévoir le rattachement des pendules et des têtes des extensomètres au réseau de triangulation. Dans le cas des barrages de petite hauteur, ces points sont essentiellement situés sur le couronnement.

Les déformations peuvent être obtenues par des mesures de distances et d'angles (mesure de vecteurs) et par alignement. La polygonale donne une information relative aux déplacements en plan.

Le nivellement permet de déterminer des déplacements altimétriques. On distingue le nivellement de précision (mesure directe de différence de niveau entre 2 points) et le nivellement topographique (mesure d'angle entre 2 points de distance connue). Il est conseillé d'étendre le cheminement du nivellement aussi loin que possible à l'aval du barrage de même que le long des rives à l'amont.

L'équipement se compose d'une part de théodolites, de niveaux, de distancemètres, d'autre part d'accessoires tels que des cibles, réflecteurs, plombs optiques, mires, fils invar, etc.

Infiltrations et pressions

Débits de fuite et drainage

La charge hydrostatique provoque des infiltrations à travers un ouvrage de retenue et dans ses fondations.

Dans le cas des barrages en béton, les débits d'infiltration restent généralement concentrés le long de zones les moins étanches du béton. L'eau peut en particulier se trouver des chemins de percolation préférentiels par exemple au travers de joints verticaux et d'arrêts horizontaux, ainsi qu'au contact béton-rocher. Les écoulements souterrains produisent des sous-pressions, dont l'évolution doit être suivie attentivement puisque leur influence sur la stabilité n'est pas négligeable.

Dans les barrages en remblai, un écoulement semblable à celui dans un sol se développe parce que les matériaux de construction utilisés sont plus ou moins perméables. Les écoulements à travers un barrage en remblai et sous celui-ci sont à l'origine de pressions interstitielles qui revêtent une importance primordiale pour la stabilité de l'ouvrage. Les infiltrations doivent donc être étroitement surveillées car chaque déviation de la normale témoigne d'une évolution des pressions interstitielles qui peut mettre en cause la sécurité de l'ouvrage de retenue.

Les débits d'infiltration varient en fonction du niveau de la retenue. Ils peuvent aussi être influencés par les conditions atmosphériques et la fonte des neiges. Le débit total des venues d'eau donne une indication sur le comportement global des infiltrations. Les stations de mesures sont disposées de telle façon à effectuer des mesures de débits partiels selon zones prédéterminées. Ce procédé permet, en cas d'anomalie, de localiser la zone critique et de faciliter la recherche des causes.

Dans les barrages en béton, les eaux sont conduites dans les rigoles des galeries vers les stations de mesure de débit. Les eaux de percolation des barrages en remblai peuvent être récoltées dans des drainages situés à l'aval d'un noyau ou à l'interface d'une membrane étanche et du corps de l'ouvrage et dirigées vers la station de mesure.

Le débit des eaux de percolation et de drainage à l'exutoire peut être mesuré par volumétrie (avec un récipient et un chronomètre), au moyen d'un déversoir calibré, d'un venturi ou par la mesure du flux dans un tube.

Une diminution du débit peut indiquer un colmatage des drains.

Signalons encore que le relevé de la distribution des températures le long d'un câble fibre optique



permet aussi de détecter et de localiser des fuites à l'intérieur d'un remblai ou derrière une membrane. Cette approche ne livre aucune indication quantitative.

Pour les barrages en remblai comprenant des matériaux aisément solubles ou érodables ou qui sont fondées sur de tels matériaux, il est aussi souhaitable de procéder au contrôle régulier de la turbidité et à des analyses chimiques périodiques de l'eau. La mesure de la turbidité permet une appréciation concernant l'entraînement de particules fines; quant à l'analyse chimique, elle livre une information relative aux matières dissoutes (par exemple, celles issues du voile d'injection).

Les débits des eaux percolant au travers la fondation de l'ouvrage ainsi que ceux provenant de forages drainants ou de galeries de drainage sont également mesurés. Ces relevés, conjointement avec ceux des sous-pressions, livrent une information relative à l'état de l'écran d'étanchéité et à l'efficacité des drainages. Une diminution du débit peut indiquer un colmatage depuis la retenue ou aussi du système de drainage. Il est dès lors important de vérifier la répercussion sur les sous-pressions qui peuvent augmenter de manière excessive.

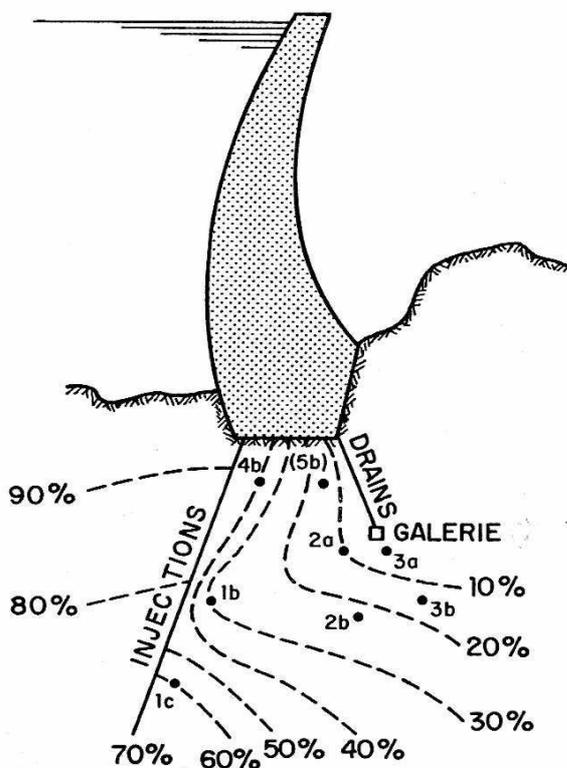


Figure 5 : Réseau d'écoulement dans la fondation d'un barrage en béton

Le relevé des débits des résurgences à l'aval doit aussi être effectué, car une variation de ces débits peut indiquer une anomalie dans le réseau de circulation des eaux souterraines. La mesure des débits peut être volumétrique, éventuellement s'effectuer au moyen d'un déversoir calibré.

Enfin, le relevé de fluctuation du niveau d'une nappe phréatique est parfois indiqué (par exemple à l'aval d'un barrage en remblai). Le relevé des niveaux peut se faire au moyen d'une sonde avec témoin, glissée dans un forage ouvert ou au moyen d'un capteur de pression avec enregistrement.

Pressions interstitielles et niveau piézométrique

Dans un barrage en remblai, il importe de contrôler l'évolution des pressions interstitielles (en particulier dans le noyau et les fondations). Les pressions interstitielles ne doivent pas dépasser les valeurs admises dans le projet. Cela peut se faire par la mise en place de cellules de pression pneumatiques, hydrauliques ou électriques. Le contrôle sera d'autant meilleur que le nombre de profils de mesure ainsi que le nombre de cellules par profil seront élevés. Ce mode de faire garantit une certaine redondance justifiée par un taux de défaillance des cellules souvent important.

On peut se contenter de contrôler l'évolution des infiltrations, à savoir le niveau de la ligne de pression, en des points choisis. On utilisera alors un tube dans lequel on relève la hauteur de la nappe piézométrique. Lorsque ces tubes sont mis en place dans un terrain assez perméable, les mesures sont fiables et durables. Si par contre ces tubes se trouvent dans un terrain imperméable, un laps de temps relativement long est nécessaire avant de noter une modification du niveau piézométrique, en raison de la durée de déplacement du volume d'eau en jeu. Dans un tel cas, des cellules piézométriques fermées sont plus appropriées.

Sous-pressions

Les infiltrations sous un ouvrage de retenue conduisent à l'apparition de sous-pressions. Le relevé des sous-pressions est important, car elles ont surtout une incidence importante sur la stabilité des barrages-poids en venant s'opposer à l'effet stabilisant du poids propre. L'exécution d'un voile d'injection et parfois celle de forages drainants doivent permettre de limiter ces sous-pressions, c'est pourquoi l'efficacité de ces mesures doit être contrôlée. Les sous-pressions, dont les valeurs varient normalement en fonction du niveau du plan d'eau de la retenue, sont mesurées au niveau du contact béton-rocher et, dans certains cas, à différentes profondeurs en fondation. Les sous-pressions varient d'amont vers l'aval, il

convient de répartir plusieurs points de mesure le long de la base des ouvrages en béton, si possible au droit de plusieurs sections.

La mesure des sous-pressions au niveau du contact béton-rocher peut se faire au moyen d'un tube sur lequel est monté un manomètre. Comme les vitesses d'infiltration sont faibles, malgré les gradients importants en jeu, la pression effective ne sera parfois atteinte qu'après une longue période (jours, mois). Afin d'éviter toute mesure erronée, le système tube-manomètres doit être continuellement maintenu sous-pression. Les mesures peuvent être faussées ou interrompues par le colmatage de la prise de pression, de la conduite ou encore une défectuosité du manomètre. Pour la mesure des pressions à plus grande profondeur dans la fondation, on utilise des cellules ou également un tube muni d'un manomètre.

Autres mesures à proximité de l'ouvrage de retenue

Le passage d'une crue peut conduire à des affouillements au pied aval du barrage pouvant compromettre sa stabilité. Des relevés topographiques ou bathymétriques effectués périodiquement (tous les 3 à 5 ans) ou suite à une crue exceptionnelle permettent de connaître la forme et la profondeur des affouillements.

Dans certains cas, il est impératif de suivre l'évolution de zones de terrains instables qui pourraient, lors d'un glissement, provoquer une vague et un débordement par-dessus le couronnement. Dans ce cas, on peut recourir à des mesures de triangulation (suivi du mouvement de points en surface), à des mesures de distance entre plusieurs points et à des mesures par inclinomètre pour suivre les déformations en profondeur.

En outre, des chutes importantes de masse de glace risquant d'atteindre la retenue peuvent également constituer un risque de débordement.

Pour la surveillance de glaciers, on peut recourir à la photogrammétrie ou à des mesures directes de déformations selon des techniques spécifiques.

Automatisation et transmission

Suite aux développements de l'électronique et de l'informatique, les possibilités et l'intérêt de l'automatisation des dispositifs d'auscultation se sont accrus. Ils permettent une liaison directe avec l'utilisateur. De tels dispositifs se composent de moyens de mesure (appareils de mesure), de moyens de transmission des données, de moyens automatiques d'acquisition et de stockage des données (bases de données) et de moyens de traitement et de présentation des données (analyse des résultats de mesure, élaboration de graphiques et rédaction de rapports).

Le recours à l'automatisation des mesures, en des points rigoureusement sélectionnés, ainsi que la télétransmission des données sont laissés à l'appréciation des exploitants. Il faut souligner que l'automatisation permet une surveillance quasi permanente et peut être utile en cas d'accès difficile au site du barrage, surtout en hiver. Si cette installation complète le dispositif manuel classique, elle ne le remplace pas pour autant. Il faut de plus être en mesure d'assurer la continuité des mesures en cas de défaillance. Enfin, les mesures automatiques (par exemple, les pendules) doivent être contrôlées si possible au moins une fois par mois à l'aide de mesures in situ. Ce mode de faire permet d'assurer une présence périodique et régulière du personnel au barrage, ainsi que de procéder à la vérification des installations.

Dans le cas d'un projet d'automatisation, il est important d'installer des capteurs simples et robustes avec des plages de température de fonctionnement adéquate et de veiller à la compatibilité électromagnétique, aux protections contre les surtensions et l'humidité.

Pour tous les ouvrages	Pour les barrages en béton	Pour les barrages en remblai
Niveau du plan d'eau	Déformations caractéristiques (par exemple, déformation totale dans une section)	Débits de percolation et de drainage caractéristiques (par exemple, débit total)
Conditions météorologiques (précipitations)	Température du béton	Pressions interstitielles
	Débits d'infiltration et de drainage en des points particuliers	Turbidité des eaux de percolation

Tableau 2 : Paramètres pouvant faire l'objet d'une mesure continue

Dans le cas d'un système de mesure permanente, les informations qui figurent dans le tableau 2 sont utiles pour conduire une analyse à distance du comportement. Il n'est pas indispensable de prévoir l'automatisation de tous les points de mesure. Il est recommandé de se limiter à quelques paramètres choisis et représentatifs du comportement de l'ensemble de l'ouvrage. Ce système automatique peut aussi être une aide pour des points de mesure difficiles d'accès.

On conservera au moins une valeur par jour (instantanée ou moyenne) pour les paramètres mesurés automatiquement (niveau du plan d'eau, température de l'air, indicateurs de comportement, tels que déformations, pressions, débits de percolation).

Il est aussi important de procéder à une vérification périodique de fonctionnement du dispositif automatique (inspection sur place, test à distance). Un dysfonctionnement peut entraîner une perte de données.

Programme de mesure

Le programme de mesures est adapté aux dimensions de l'ouvrage d'accumulation. La fréquence des mesures peut être fonction du niveau de la retenue (distinction entre retenue abaissée ou pleine) et de la nature du comportement de l'ouvrage (situation normale ou exceptionnelle). En cas d'anomalie ou de comportement particulier, le rythme des mesures sera plus élevé. Des mesures ponctuelles sont aussi effectuées suite à un séisme ou une crue.

Pour répondre au mieux à l'objectif de mettre rapidement en évidence une anomalie, les fréquences de mesure les plus élevées (hebdomadaire, bimensuelle, mensuelle) concernent les indicateurs représentatifs du comportement global de l'ouvrage (par exemple, les déformations, les débits totaux de drainage, les pressions). D'autres paramètres complémentaires (par exemple les déformations de joints, les mesures de rotation) ne sont relevés qu'une ou deux fois par an.

Les campagnes de mesures géodésiques complètes, qui sont des mesures confiées à des spécialistes, sont effectuées tous les 5 ans. Il faut relever que dans le cas des barrages en remblai, des mesures de nivellement et éventuellement de polygonale, sont exécutées une, voire deux fois par an pour suivre l'évolution des déformations de points en surface.

En ce qui concerne les barrages en remblai de petite hauteur (entre 10 et 15 m de hauteur), le programme sera établi en tenant compte des équipements mis en place ainsi que des variations possibles des paramètres mesurés. Si les défor-

mations attendues sont faibles, il est possible de ne procéder qu'à une mesure annuelle de contrôle pour s'assurer du comportement correct de l'ouvrage. Il est toutefois recommandé d'effectuer au moins une mesure mensuelle en ce qui concerne les débits d'infiltration et le relevé de niveaux piézométriques.

La fibre optique comme nouvelle technologie de mesure

Introduction

La technique de la fibre optique est appliquée comme instrument de mesure dans les ouvrages hydrauliques depuis les années 1990. Au début, il a fallu procéder à des tests afin de s'assurer des possibilités d'application. A l'heure actuelle, de tels instruments se trouvent sur le marché. Toutefois, il faut souligner que l'on ne dispose pas encore d'un retour d'expérience sur le long terme.

Principe de la fibre optique

A la surface qui sépare deux milieux plus ou moins transparent, un faisceau de lumière est divisé en deux: une partie est réfléchi, la seconde est réfractée. Il existe un angle limite à partir duquel une réflexion totale se produit et le rayon lumineux reste confiné au sein du même matériau.

La fibre optique est constituée d'un cœur en silice et d'une gaine à faible indice de réfraction. Plus le cœur de la fibre optique est fin, plus le chemin de propagation est direct. A partir d'un diamètre de 8 μm , l'onde se propage sans réflexion (fibre monomode).

Pour certaines applications, la fibre à gradient d'indice, pour laquelle l'indice de réfraction de la gaine décroît de l'intérieur vers l'extérieur, est utilisée. En lieu et place de réflexions totales, le rayon lumineux prend une forme sinusoïdale.

Fibre optique dans la technique des mesures

En tant qu'instrument de mesure, les applications de la fibre optique concernent:

- un dispositif dans lequel la fibre optique constitue elle-même l'instrument de mesure (tel l'extensomètre);
- un dispositif dans lequel divers phénomènes sont mesurés le long de la fibre optique;
- un dispositif dans lequel la fibre optique constitue un support de transport des données (pression, température, différence de longueur).

La fibre optique comme instrument de mesure

L'application type est l'extensomètre où la fibre optique remplace la tige métallique entre le point d'ancrage et le point de mesure. On procède à la



mesure de la longueur du tronçon en envoyant dans la fibre optique un signal infrarouge qui est réfléchi sur un miroir fixé à l'extrémité de la fibre. Le temps de parcours permet de déterminer la longueur de la fibre et les éventuelles différences peuvent être déterminées. Comme l'extension de la fibre optique et le temps de parcours dépendent de la température, une fibre libre, de référence, est mesurée en même temps.

Mesure de la température le long d'une fibre optique

Lors de la mesure de température le long d'une fibre optique posée dans le sol ou noyée dans le béton, la température est mesurée en divers endroits.

La lumière diffusée permet de situer le point de mesure. Si la lumière sur le support est forte, il se produit une diffusion, dont l'endroit peut être déterminé par la mesure de la différence entre le temps de parcours de la lumière émise et celui de la lumière en retour. Grâce à une définition précise de la fréquence de la lumière d'un rayon laser, le point d'un signal peut être défini avec une précision de 1 m.

La température en un point particulier peut être déterminée car le spectre de fréquence de la lumière diffusée dépend de la température (les molécules de silice de la fibre optique sont stimulées par la température).

En combinant ces mesures, il est ainsi possible de connaître la distribution des températures le long de la fibre optique mise en place.

Ce système trouve aussi une application dans la détection des cheminements des eaux dans les barrages en remblai, car des câbles peuvent être posés sur des longueurs de plusieurs kilomètres. Des informations complémentaires peuvent être acquises en plaçant en parallèle à la fibre optique un fil chauffant le long duquel la distribution de la température par réchauffement ou refroidissement peut être analysée.

Dans le béton frais, les variations de température lors de la phase de durcissement et de refroidissement dans une ou plusieurs sections peuvent être suivies.

Instrument de mesure muni d'un câble fibre optique

Les câbles fibre optique présentent l'avantage, par rapport aux câbles électriques normaux, d'être moins sensibles à l'usure et à d'autres influences. De plus, les appareils munis de fibre optique ne sont pas mis en danger par les interférences électromagnétiques et les surtensions (par exemple, provoquées par la foudre).

Les cellules de mesure fonctionnent de la même manière qu'un instrument électrique en subissant une petite déformation due aux influences extérieures (température, déformation, pression). Cette déformation est mesurée par un capteur Fabry-Pero, en déterminant la variation de longueur du câble fibre optique grâce à un miroir semi-transparent.

Les instruments suivants sont proposés:

- capteur de pression des terres
- indicateur de tassement
- extensomètre dans les matériaux meubles
- extensomètre dans le béton
- jointmètre, mesure de déplacement
- piézomètre
- capteur de température.

Le système de lecture s'adapte aux divers instruments. Il n'est pas nécessaire de disposer d'une source lumineuse laser, d'où un système meilleur marché et moins sensible aux pannes.

Méthode géophysiques

Différentes méthodes de prospection géophysiques sont couramment utilisées dans le domaine de la géologie de l'ingénieur pour la reconnaissance du sous-sol. Ces méthodes géophysiques ont trouvé aussi un emploi pour l'inspection interne du corps d'un ouvrage de retenue (barrage en remblai et barrage en béton) avec l'objectif de détecter des anomalies ou des particularités (hétérogénéités, cavités et fissures, cheminements d'écoulement préférentiels, etc.). Ces méthodes basées sur l'étude d'ondes mécaniques ou électromécaniques au sein des matériaux constituant l'ouvrage ont l'avantage d'être non destructives et permettent de déduire les caractéristiques internes des matériaux. La mise en pratique de ces méthodes fait appel aux propriétés physiques ou chimiques des matériaux (conductivité, magnétisme, module d'élasticité, température). Leur application ne requiert qu'une installation ponctuelle d'instruments.

Quelques exemples de méthodes utilisées sont mentionnés ci-dessous:

- Sismique de réflexion
- Sismique de réfraction
- Méthode géoélectrique
- Méthode électromagnétique
- Géoradar
- Méthode microgravimétrique
- Tomographie
- Ultrason
- Relevé par infrarouge
- Diagraphie (logging)

Littérature

- [1] Bartholomew, C.L., Haverland, M.L. (1987). Concrete Dam Instrumentation Manual. Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- [2] Bartholomew, C.L., Murray, B.C., Goins, D.L. (1987). Embankment Dam Instrumentation Manual. Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- [3] Dunicliff, John (1988). Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [4] Hanna, Thomas H. (1985). Field Instrumentation in Geotechnical Engineering. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld.
- [5] Huggenberger, A.U. (1951). Talsperren-Messtechnik, Messverfahren, Instrumente und Apparate für die Prüfung der Bauwerke in Massenbeton. Springer, Berlin.
- [6] ICOLD (1969). General Considerations applicable to Instrumentation for Earth and Rockfill Dams. Considérations générales sur l'auscultation des barrages en terre et en enrochements. ICOLD Bulletin No. 21, Paris.
- [7] ICOLD (1972). Reports of the Committee on Observation on Dams and Models. Rapports du comité sur l'observation des barrages et modèles. ICOLD Bulletin No. 23, Paris.
- [8] ICOLD (1988). Dam Monitoring, General Considerations. Auscultation des barrages, considerations générales. ICOLD Bulletin No. 60, Paris.
- [9] ICOLD (1989). Monitoring of Dams and their Foundations, State of the art. Auscultation des barrages et de leurs foundations, La technique actuelle. ICOLD Bulletin No. 68, Paris.
- [10] ICOLD (1992). Improvement of existing Dam Monitoring, Recommendations and case histories. Amélioration de l'auscultation des barrages, Recommandations et exemples. ICOLD Bulletin No. 87, Paris.
- [11] ICOLD (1996). Monitoring of Tailings Dams, Review and recommendations. Auscultation des barrages de stériles, Synthèse et recommandations. ICOLD Bulletin No. 104, Paris.
- [12] ICOLD (1999). Seismic Observation of Dams, Guidelines and case studies. Observations sismiques des barrages, Recommandations et exemples. ICOLD Bulletin No. 113, Paris.
- [13] Penman, A.D.M., Saxena, K.R., Sharma, V.M. (1999). Embankment Dams: Instrumentation, Monitoring and Surveillance. A.A. Balkema, Rotterdam.
- [14] STK - Schweizerisches Talsperrenkomitee / CSB – Comité Suisse des barrages (1991). Measuring Installations for Dam Monitoring. Wasser, energie, luft - eau, énergie, air, Vol. 83, Nr. 5/6, Baden, pp. 105-155.
- [15] STK – Schweizerisches Talsperrenkomitee / CSB – Comité Suisse des barrages (1993). Informatik in der Talsperrenüberwachung / L'informatique dans la surveillance des barrages.
- [16] STK – Schweizerisches Talsperrenkomitee / CSB – Comité Suisse des barrages (1993). Geodätische und photogrammetrische Deformationsmessung für die Überwachung der Stauanlagen / Mesures de déformation géodésiques et photogrammétriques pour la surveillance des ouvrages de retenue. Wasser, energie, luft - eau, énergie, air, Vol. 85, Nr. 9, Baden, pp. 181-242.