Dam Monitoring Instrumentation

Concepts, Reliability and Redundancy

Dispositif d'auscultation des barrages

Concept, fiabilité et redondance

- *Edited by the Swiss Committee on Dams on the occasion of the 22nd Congress of the International Commission on Large Dams, Barcelona, June 2006*
- *Edité par le Comité suisse des barrages à l'occasion du 22éme Congrès de la Commission internationale des grands barrages à Barcelone, juin 2006*

Preface

The working group for dam observations of the Swiss Committee gathers representatives form federal authorities; owners and engineers specialized in the construction and supervision of dams. Its target is to promote the return of experiences, to maintain a high level of knowledges and expertise in the appraisal of the behaviour of the dams and their security.

It is a permanent group being at the origin of numerous publications and, among them, an important one dedicated to the dam instrumentations. Republishing of the 1987 report on dam instrumentations is bringing to the engineers a document presenting the last developments of equipments and tools at disposal.

The developments of the measuring means, of the data acquisition and transmission systems and the coming up of new equipments due to the development of the electronic and the computers, as well as the evolution of the traditional mechanical instruments have considerably contribute to an evolution of the programmes and the possibilities for dam behaviour supervising.

Nevertheless some basic principles must remain unchanged, on one side it is the necessity to guarantee the perenniality and the stability of the measuring system on a long term basis and on the other side to allow a rapid analysis of the collected data. To reach this goal the basic instruments such as pendulums, piezometers, measurement of seepages and drainage water and thermometers are still the elementary and efficient means of supervision of dam behaviour to evaluate immediately a potential irregularity. Even if they are of very different types between them, they are redundant, based on the fact that an unusual behaviour will appear simultaneously through this different and simple but complementary ways of supervising.

In addition to this exhaustive inventory of instruments and existing means of supervising, this report is bringing an assessment on the measuring rhythms to foresee and on the accuracy to take under consideration for the different types of measurements as well as on the advantages and inconveniences of the various supervising systems. With this view, it is an important tool for every engineer in charge of a dam design in which the supervising system has to be integrated from the beginning or for the reevaluation of the equipment of an existing dam.

It is with a great pleasure that the Swiss Committee on Dams is presenting this publication at the occasion of the 22nd ICOLD Congress of Barcelona, with the hope to contribute to a fruitful discussion on the evaluation of the behaviour of dams and their security.

The Chairman of the Swiss Committee on Dams, *Bernard Hagin*

Préface

Le groupe de travail pour l'observation des barrages du comité suisse, rassemble des représentants des autorités fédérales de surveillance, des exploitants et des ingénieurs spécialisés dans la construction et le suivi du comportement des barrages. Il a pour but de favoriser le retour d'expérience afin de maintenir un haut niveau de savoir-faire et d'expertise dans la surveillance du comportement de ces ouvrages et l'appréciation de leur sécurité.

Ce groupe permanent est à l'origine de nombreuses publications dont l'une des plus importantes est consacrée aux dispositifs d'auscultation. La réédition du rapport de 1987 sur ces dispositifs d'auscultation apporte aux ingénieurs un document qui tient compte des dernières évolutions des équipements et des moyens disponibles.

Le développement des moyens de mesure, d'acquisition et de télétransmission, l'apparition de nouveaux équipements grâce à l'apport l'électronique et de l'informatique ainsi que l'évolution des instruments de mesure mécaniques plus traditionnels ont considérablement fait évoluer les programmes et les possibilités de surveillance.

Cependant des principes de base doivent rester immuables, d'une part assurer la garantie de la pérennité et de la stabilité des moyens de mesures à long terme et d'autre part permettre une analyse rapide des résultats collectés. A ce titre, les instruments de base tels que les pendules, les piézomètres, les systèmes de mesure des débits d'eau d'infiltration et de drainage et les thermomètres restent les moyens de mesures élémentaires et efficaces de surveillance du comportement d'un barrage dans le temps qui doivent permettre d'appréhender immédiatement une éventuelle anomalie. Bien que de type très différents, ils sont redondants car un comportement exceptionnel se manifestera simultanément par ces moyens de contrôles très simples mais complémentaires.

En plus d'un inventaire exhaustif des instruments et moyens disponibles de surveillance, ce rapport donne une appréciation sur les cadences de mesure à prévoir et sur la précision de résultats à attendre des divers types de mesure à disposition, ainsi que sur les avantages et inconvénients de ces systèmes de contrôle. A ce titre, il est un outil important pour tout ingénieur chargé d'un projet de barrage qui doit intégrer le système de surveillance dès la conception de l'ouvrage ou pour la réévaluation de l'équipement d'un barrage existant.

C'est avec grand plaisir que le Comité suisse des barrages présente cette publication à l'occasion du 22ème congrès de la CIGB à Barcelone, en espérant pouvoir ainsi contribuer à une discussion fructueuse sur l'évaluation du comportement et de la sécurité des barrages.

Le président du Comité suisse des barrages, *Bernard Hagin*

Authors/Auteurs
Marcel Lutz, North-East Switzerland, Power Company, CH-5401 Baden
Rudolf W. Müller, Federal Office for Energy, CH-3003, Bern
Henri Pougatsch, CH-3065 Bolligen
Karl M. Steiger, Colenco Power Engineering Ltd, CH-5405 Baden
Ruedi Straubhaar, Pöyry Energy Ltd, CH-8037 Zürich
For certain specific explanatory notes in part three, the following experts also contributed / Pour la rédaction de feuilles explicatives spécifiques, les spécialistes suivants sont également intervenues:
For geodetic equipment/Pour la géodésie: *Kurt Egger,* Expert in geodetic measurements, *Felix Walser,* Schneider Engineers Ltd, CH-7007 Chur
For Geology/ Pour la géologie: Dr. *Max Kobel,* Office for Technical Geology, CH-8832 Wilen
For fibre optic techniques/Pour la technique de la fibre optique: Dr. D*aniele Inaudi,* SMARTEC Ltd, CH-6928 Manno
For geophysics methods/ Pour les méthodes géophysiques: Dr. *Hans Rudolf Keusen,* Geotest Ltd, CH-3052 Zollikofen

Contents

Introduction

Part 1: Measurement Concept

Aim of dam monitoring

External loads

Deformations

Seepage and pressures

Other measurements in the vicinity of the dams

Automation and transmission

Measurement Programme

New Instrumentation technology: Fibre Optics

Geophysical Methods

Part 2: Equipment and Measurement Methods

Part 3: Explanatory Notes

available to Internet on page: www.swissdams.ch/monitoring

Contenu

Préambule

Partie 1: Concept de mesure

Le dispositif d'auscultation

Sollicitations extérieures

Déformations

Infiltrations et pressions

Autres mesures à proximité de l'ouvrage de retenue

Automatisation et transmission

Programme de mesure

La fibre optique comme nouvelle technologie de mesure

Méthode géophysiques

Partie 2: Equipement et méthodes de mesure

Partie 3: Feuilles explicatives

disponible sur Internet à la page: www.swissdams.ch/monitoring

Illustration of the front page: Geodetic measurements on Zeuzier dam (photo: Schneider Ingénieurs SA, Coire).

Page de couverture: Mesures géodésiques sur le barrage de Zeuzier (photo: Schneider Ingénieurs SA, Coire).

Dam Monitoring Instrumentation

Introduction

In 1987 the committee on «Dam monitoring» of the Swiss Committee on Dams published a rather thick report on «Measur-ing Installations for Dam Monitoring – Concepts, Reliability and Redundancy», which was the result of very intensive work from a subcommittee. The aim was to present basic ideas for the installation of dam monitoring equipment in order to monitor the behaviour of water retaining structures. This report reviewed the main methods of measurement and the most commonly used equipment in Switzerland. It should be noted that the report only took into account equipment used in Switzerland for which the authors of the report had experience.

Since this publication, measurement techniques have widely developed. Therefore a revised more complete version of the report seemed necessary.

In order to prepare the present document, a new sub-committee has been set-up.

Figure 1. Hongrin dam and reservoir.

Part I – Measurement Concept

Aim of dam monitoring

The dam monitoring device is a measurement system, which if well conceived, allows the judgement by the monitoring of the respective parameters, of the behaviour of a dam and its foundation subjected to the applied loading. Checks are necessary first during the construction phase of the dam, the first impounding and finally during the operation in order to detect any signs of abnormality and take action promptly. The analysis of the obtained data gives an appreciation on the short and long term behaviour. This analysis is absolutely indispensable to complete and improve the understanding of the engineer.

Moreover, the collection of data related to the surroundings of the dam such as the weather conditions, hydrology, stability of the terrain, the risk of avalanches and falling ice, is also part of the monitoring of water retaining structures.

Global conception of a monitoring device

There is no rule establishing the number of monitoring devices that are to be installed. This number varies according to the type of dam and its dimensions, the mode of construction, the age as well as the conditions specific to the site, in particular those related to the foundation. The experience acquired in the domain of water retaining structure behaviour analysis must also be taken into consideration.

The monitoring device needs to be conceived in such a way that it is possible to measure loads such as the hydrostatic pressure and the temperature which act on the structure (causes) as well as the different parameters (magnitudes) that characterize the behaviour of a dam (consequences). The direct loads and external conditions will create not only deformations and temperature variations, especially in the dam body, but also hydrostatic pressures (uplift, interstitial pressures) and seepage (water infiltration). The main parameters that must be monitored for embankment and concrete dams, including their foundations, can be found in *table 1*.

The monitoring device must be adapted to the particularities and the importance of the dam. Its conception must take into account the fact that the structure and its foundations form a whole. Nevertheless, the device must clearly allow the behaviour of one or the other to be distinguished. The monitoring device is not an inflexible system and it is necessary to check it regularly to make sure that it is still suitable. If not it will be supplemented, adapted or even modernised.

The monitoring device should be extensive enough so that in case of abnormal behaviour, useful data could be recorded in order to find the causes of the problem. The installation of a supplementary instrumentation may prove necessary.

The appreciation of dam behaviour is mostly done by interpretation of the monitoring data. The recording of these data is generally attributable to the competence of the operator. The interpretation of data concerns all the parties involved (operators, experienced engineers, confirmed experts and the monitoring authority). It is up to the operator to make sure that the readings are plausible and to validate them. It is the responsibility of the experienced professional

Concrete Dam	Embankment Dam	Foundations
Structural deformations	Deformations of the dam body	Deformations Abutment movements
Special movements (cracks, joints)	Special displacements (links with a concrete structure)	Special displacements (cracks, diaclases)
Dam body temperature	Possible dam body temperature to detect seepage	Possible dam body temperature to detect seepage
Uplift pressures (Contact concrete-foundation and in the rock)	Pore pressures in embankment dam body and piezometric level	Pore pressures Deep body uplift pressure Piezometric level Phreatic line level
Seepage and drainage rates	Seepage rates and drainage	Seepage and drainage rates and resurgences (sources)
Chemical analysis of seepage water Turbidity (possible)	Chemical analysis of seepage water Turbidity	Chemical analysis of seepage water Turbidity

Table 1. Significant parameters for the follow-up of the behaviour of the dam and its foundations.

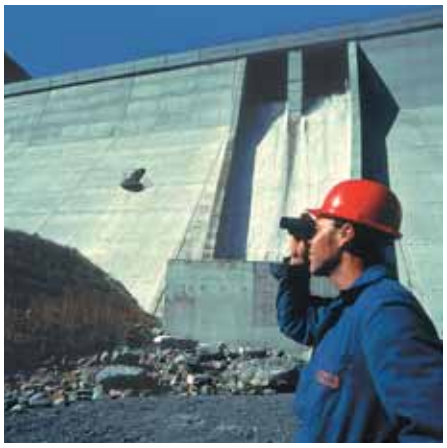

Figure 2. Visual inspection.

to confirm the results obtained and to adopt them if the behaviour is adequate.

It is essential that the interpretation is done as soon as possible after the readings are recorded in order to detect any abnormal behaviour as quickly as possible.

Measurement instrumentation characteristics

It is essential to choose the measuring instruments very carefully taking into account the different parameters to monitor, the construction technique and the technical installation possibilities. The monitoring equipment is chosen according to the needed measuring range. It should be remembered that some measurement instruments can obtain more precise readings than what is actually needed. Therefore it is not always useful to record data that have too many decimals. It is important to make sure the instruments are installed correctly in order to ensure a high reliability of the readings which is a condition for adequate interpretation of the results.

Priority must be given to instruments that are:

- simple in their concept and use,
- robust,
- not sensitive to outside conditions (temperature, humidity, current overloading),
- longlasting (longevity is essential especially for instruments that are integrated in the dam body during construction),
- precise,
- reliable and
- easy to read.

If the instruments are not integrated in the dam body, they must be of easy access and replaceable. When replacing an instrument, it is essential to ensure continuity in the measurements. Also to prevent a breakdown or malfunction, it is advised that the system, as far as possible, is sufficiently redundant. It is also useful to counter check data using two different methods of measurement (for example, pendulum – polygonal, settlement gauges – levelling).

External loads

External loads (especially hydrostatic pressure) directly affect the dam. The outside conditions affecting the dam are mostly atmospheric conditions on site (ambient temperature for example).

Hydrostatic pressure being an important load, the changes in the reservoir water level must be read and recorded even if the reservoir stays empty most of the time as it is the case for detention ponds. The measuring range must extend beyond the dam crest in order to follow extreme values of the water levels in case of flooding. Moreover, water temperature is also a data to record.

In case of important sedimentation (changes in the loads, marked decrease of useful volume, risk of blocking outlet works), it is necessary to check their level regularly. Bathymetric readings could be performed in this case, as often as necessary according to the amount of sediments accumulating.

The atmospheric conditions (temperature and air humidity, rain gauge, snow) are equally important data. The ambient temperature has an important incidence on the deformations of a concrete dam. The variations of temperature in the body of the dam can be followed by thermometers placed directly in the mass during the concreting. They are installed at several elevations and distributed across the thickness of the concrete section. The thermometers situated close to the surface are extremely influenced by the local external conditions (air and water). Thermometers can be inserted in drill holes whilst isolating them thus avoiding the external temperature or dominant in a gallery. In the case of failure, it shall thus be possible to remove and replace them.

It is recommended to record if precipitations fall as rain or snow. Finally, it is necessary to note that precipitations and the melting of snow sometimes have a direct influence on the infiltrations within the foundation, as well as on uplift pressures.

In certain cases, the seismic conditions at a site may be recorded.

Deformations

Monitoring of concrete dam deformations

The objective is to know the horizontal and vertical displacements at a given point. According to the dam configuration (with or without galleries and/or shafts), measurement points are located at different elevations and inside the dam or fixed on the downstream face following horizontal and vertical lines. If possible, the measurement axes are extended into the rock to also ascertain the foundation deformations. The devised network thus allows horizontal and vertical deformations of the structure to be obtained. For small dams, it is at least necessary to foresee the measurement of crest deformations.

Horizontal deformations (radial and tangential deformations) can be determined along vertical lines by direct and/or inverted pendulum measurements. In the case of a new inverted pendulum, the drilling techniques currently in use allow the verticality to be guaranteed. The possibility of sliding an autocentring guide wire along the length of a slotted tube also exists, which allows measurement points to be established at different elevations. This solution has been successfully applied as a complementary monitoring device by installing an inverted pendulum in the foundation and in a dam which has no control galleries and shafts.

Angular and distance measurements (vector measurements) taken on external tar-

gets, just as alignment sightings, are simple geodesic methods used to measure deformations on small structures. Horizontal deformations can also be determined by wire alignment which can be installed in a straight horizontal gallery or along a parapet which is equally straight.

Concerning levelling, this allows vertical movements to be ascertained (settlement or heaving) of the structure.

Local deformations, for example those of the upper part of the dam, can be determined by the installation of extensometers.

Measurements taken by inclinometers (with possibility for automation) allow the actual deformation to be calculated or compared with the pendulum measurement.

Concrete dams are not exempt from cracking and if sometimes visual inspection of cracks and logging on paper are sufficient, it is suggested to monitor the opening of the crack lips of certain cracks using in particular micrometers, joint meters or deformation meters. At the very least, it is possible to place telltales (with cement mortar) across the crack; however, this solution is not optimal. Besides, benchmarks are also placed to measure the joints of the structure.

Monitoring of embankment dam deformations

For embankment dams, the objective is firstly to know the evolution of vertical deformations (settlements) and horizontal deformations at the crest, but then also if possible, settlements at various elevations, and in particular settlements in the foundation. In general, horizontal displacements of points are determined by geodesic measurements such as angular and distance readings (vector measurements), alignment sightings and polygonal surveys. Concerning vertical displacements (settlements or heaving), we employ levelling as well as settlement meters or hydraulic settlement gauges.

Monitoring of foundation deformations

Extensometers allow rock foundation measurements to be carried out according to the different directions. The choice and orientation of the instruments will depend on the geology and on the direction of the forces notably transmitted in the case of arch dams. To better ascertain foundation deformations, it is recommended to place extensometers in at least two directions or to create a tripod. An extensometer can regroup up to six bars of different lengths in the same drillhole. In particular cases, recourse to drillhole micrometers can be made which allow measurements to be taken every meter. They can also be equipped with an inclinometer which allows the measurement not only of the variation of distance, but also inclinations.

Punctual horizontal measurements in two directions (for example upstream – downstream, left bank – right bank), can be carried out using an inverted pendulum (perhaps equipped with an autocentring guidewire that allows measurements at different elevations) or an inclinometer.

Levelling, settlement meters and hydraulic settlement gauges are amongst the available techniques that can be used to measure settlements in soft ground. Levelling is carried out in a gallery, provided it exists, in the transversal or longitudinal direction of the embankment dam.

Abutment movements can be monitored by points installed in the immediate proximity of the dam and connected to the geodetic network.

Geodetic deformation measurements

Inherently only relative deformations can be obtained and they must be completed by a local reference space (geodetic network) to which it is connected. Thanks to the geodetic network, it is possible to measure the displacement of benchmarks with respect to a network consisting of (assumed) fixed stations or reference points. This method presents the advantage of determining the absolute displacements.

Knowledge of the absolute displacements is necessary to obtain indications on the longterm evolution of deformations and more particularly for the case of abnormal behaviour. However, measurement campaigns are dependent on the meteorological conditions. Finally, is it worthwhile mentioning that recourse should be made to specialists to execute these measurements.

An extended network can be coupled to the local geodetic network whereby points could be measured by means of GPS (Global Positioning System). The GPS offers an appropriate method that can be integrated to the control network consisting of points which are geologically stable and situated outside of the influence zone of the reservoir basin. The incorporation to existing geodetic networks can be realised with the conventional terrestrial method or the GPS. The combination of the GPS with terrestrial geodetic measurements constitutes a hybrid network.

With respect to the triangulation network, the installation of fixed points outside the zone of the dam requires collaboration between the surveyor, engineer and engineering geologist. Fixed points shall be installed both upstream and downstream of the structure.

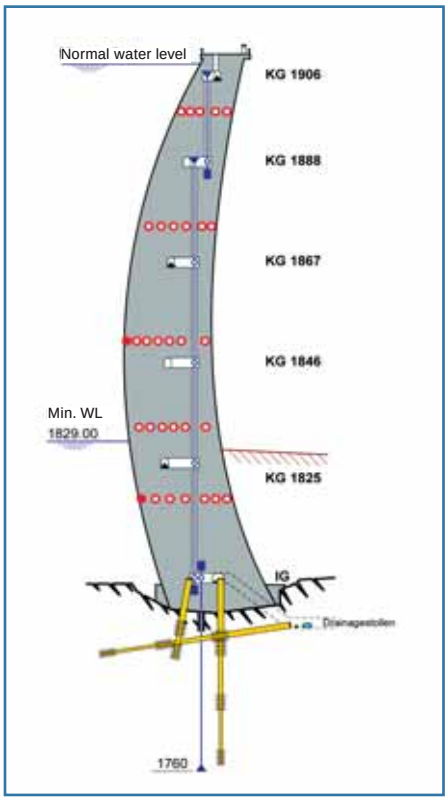

Figure 3. Typical arch dam cross section.

Control or measurement points could be installed on the crest, in galleries and/or on the downstream face of the dam, as well as on the terrain. It is useful to incorporate pendulums and the heads of extensometers to the triangulation network. In the case of small dams, these points are essentially located on the crest.

Deformations can be obtained by distance and angular measurements (vector measurements) and by alignment. The polygon gives information relative to the planar displacements.

Levelling allows altimetry displacements to be determined. We distinguish precision levelling (direct measurement of the difference in elevation between two points) and the topographical levelling (angular measurement between two known points). It is recommended to extend the development of the levelling scheme as far as possible downstream of the dam as well as along the upstream banks.

The equipment consists initially of a theodolite, levels, distance meters and then accessories such as targets, reflectors, optical plumbs, backsights, invar wires etc.

Seepage and pressures

Seepage rates and drainage

The hydrostatic load provokes seepage infil-

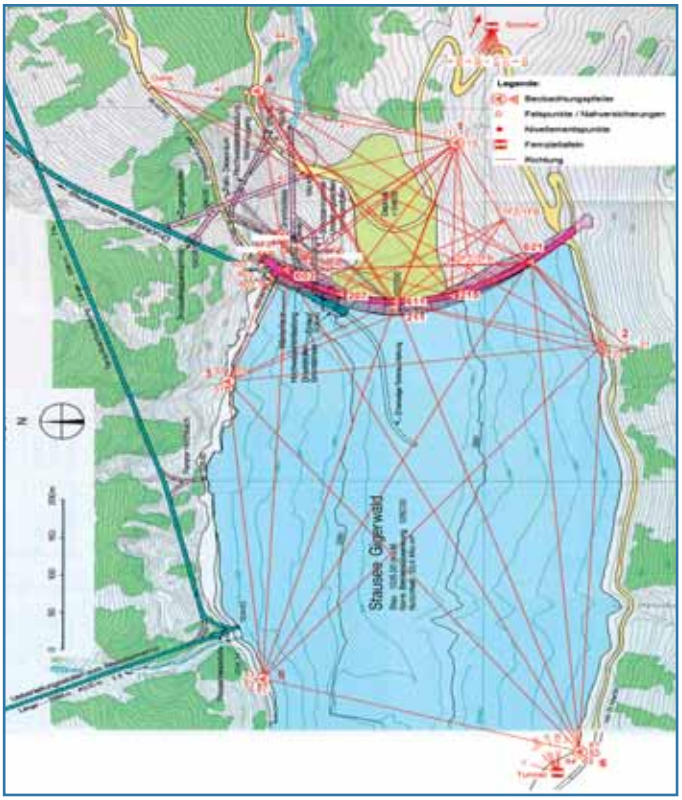

Figure 4. Geodetic network.

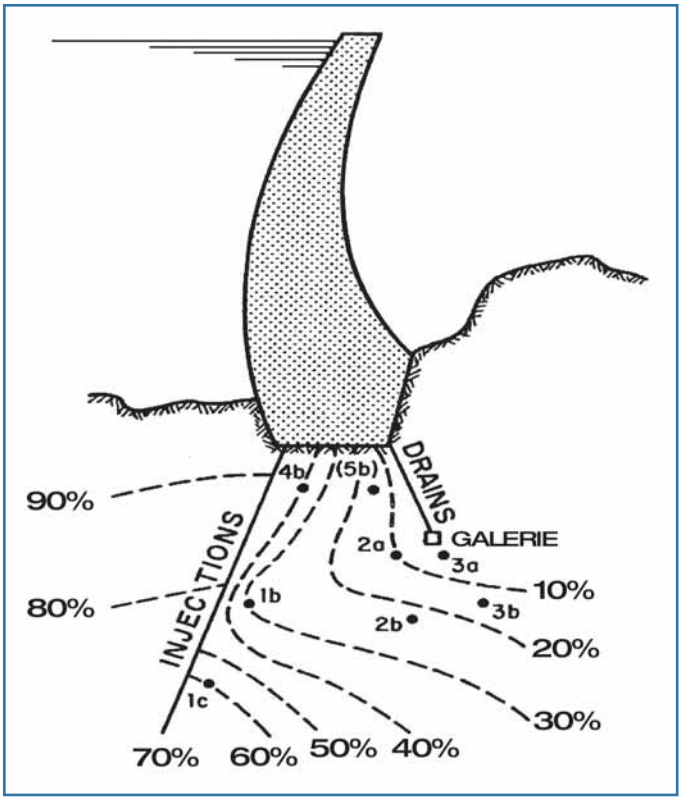

Figure 5. Seepage network in foundation of a concrete dam.

trations across the water retaining structure and the foundation.

In the case of concrete dams, seepage rates remain in general concentrated along zones where the concrete is less watertight. Water can in particular find preferential percolation passage ways for example across vertical joints and horizontal construction joints as well as at the contact between concrete and rock.

Seepage within the foundation creates uplift pressures the evolution of which must be followed attentively since the influence on the stability is not negligible.

For embankment dams, seepage similar to that in ground develops because the materials of construction used are more or less permeable. Seepage through and under an embankment dam are at the origin of interstitial pressures which take on a primordial importance for the stability of the structure. Water infiltrations must therefore be closely monitored since each deviation from the normal state represents an evolution of interstitial pressures that could place into question the safety of the water retaining structure.

The seepage rate varies according to the reservoir elevation and it can also be influenced by atmospheric conditions and the melting of snow. The total water discharge rate gives an indication of the global behaviour of the infiltrations. The layout of measurement stations is delineated such as to measure partial discharges for predefined zones. This procedure allows, in the case of anomalies, to localise the critical zone and to facilitate the causes.

For concrete dams, water infiltrations are directed to gallery channels and then towards discharge measurement stations. Seepage water from embankment dams can be collected in drains situated downstream of the core or at the interface of an impermeable membrane and from the body of the dam and directed to a discharge measurement station.

The discharge rate of seepage and drainage at the outlet can be measured by volume (with a recipient and stopwatch), by a calibrated weir, a venturi or by variation of water head in a tube.

A reduction of discharge can indicate a clogging of drainages.

Paying attention once again to temperature distribution readings along a fibre optical cable also allows leakages within the interior of the embankment dam or behind a membrane to be detected. This approach gives no quantitative indication.

For embankment dams consisting of materials that are easily soluble or erodible or that are based on such materials, it is also desirable to proceed with regular checks of the turbidity and periodic chemical analyses of water. Turbidity measurements allow an appreciation concerning the content of fine particles; as for the chemical analysis, this gives information relative to dissolved materials (for example, those coming from the grout curtain).

The discharge of water within the foundation of the structure as well as water originating from drainage drillholes or drainage galleries, are equally measured. These readings, jointly with those of uplift pressures, give information relative to the state of the grout curtain and the efficiency of the drains. A reduction of the discharge can indicate a clogging from the reservoir or also the drainage system. It is important at that time to verify the repercussions on the uplift pressures that can increase substantially.

Resurgence discharge readings downstream must also be carried out since a variation of discharges can indicate an anomaly in the underground water circulation network. Volumetric discharge measurement can be made perhaps using a calibrated weir.

Finally, the reading of the fluctuation in the level of the phreatic surface is sometimes suggested (for example downstream of the embankment dam). Level readingscan be carried out using a calibrated probe which is lowered into an open drillhole or by the use of a pressure sensor with recording device.

Interstitial pressures and piezometric level

In an embankment dam, it is important to check the evolution of interstitial pressures (in particular in the core and the foundation). The interstitial pressures must not exceed the values allowed for the project. This can be achieved by placing pneumatic, hydrau-

lic or electrical pressure cells. The check will be improved with the increasing number of measurement profiles as well as the number of cells per profile. This way of operating guarantees a certain level of redundancy which is justified by the high level of failure of cells.

We can simply control the evolution of infiltrations, such as the equipotentials, at given points. Hence, we use a tube in which we read the height of the piezometric head. When these tubes are installed in permeable soil, the measurements are reliable and durable. If on the other hand, these tubes are found in impermeable terrain, a time delay which is relatively long is necessary before noting a change in the piezometric level; this is due to the displacement time of the volume of water in question. In such a case, closed piezometric cells are more appropriate.

Uplift pressures

Seepage under water retaining structures leads to the development of uplift pressures. The reading of uplift pressures is important since they can have a negative affect on the stability of gravity dams whereby the stabilising selfweight is reduced. The construction of a grout curtain and sometimes drainage drillholes must allow these uplift pressures to be limited and this is why the efficiency of these measurements must be checked. Uplift pressure, of which the values usually vary as a function of the reservoir water level, are measured at the concrete-rock interface and in certain cases, at different depths within the foundation. Uplift pressures vary from upstream to downstream and it is desirable to distribute several measurement points along the base of the concrete structure and if possible at the intersection of several sections.

The measurement of uplift pressures at the concrete-rock interface can be made using a tube equipped with a manometer. Since the speed of water infiltrations is slow, despite the important pressure slopes in question, the effective pressure will only sometimes be reached after a long period (days or months). To avoid erroneous measurements, the tubemanometer system must be continually maintained under pressure. Measurements can be distorted or interrupted by clogging of the conduit pressure intake or even by a defective manometer. For the measurement of pressures at greater depths in the foundation, cells or tubes with manometers can also be employed.

Other measurements in the vicinity of the dam

The flood event can lead to scouring at the dam toe which could compromise its stability. Topographical or bathymetric readings carried out periodically (every 3 to 5 years) or following an exceptional flood event allow the shape and the depth of the scouring to be determined.

In certain cases, it is imperative to follow the evolution of unstable zones that could, during a slide, provoke a wave and an overtopping of the crest. In this case, triangulation measurements (following of surface point movements), distance between several points and inclinometer measurements can be used to follow the deformation at depth.

Furthermore, important ice falls that could reach the reservoir can equally constitute a risk of overtopping. The monitoring of glaciers can be carried out using photogrammetry or direct deformation measurements according to the specific techniques.

Automation and transmission

Following the developments in electronics and computing, the possibilities and interest in automating monitoring devices have increased and they now provide a direct link to the user. Such devices consist of measurement (measuring devices), data transmission, data acquisitioning and storage (database) and the processing and presentation of data (measurement analyses, elaboration of graphs and preparation of reports).

Recourse to measurement automation, for points rigorously selected a prior, as well as the teletransmission of data is left to the appreciation of the operators. It should be noted that automation allows an almost permanent monitoring of the structure and can be used in the case of difficult access to the dam site, especially in winter. This installation may complete the classic manual device, but by no means can it be totally replaced. Moreover, it is necessary to assure the continuity of measurements in the case of a breakdown. Finally, automation measurements (for example, pendulums) must be checked at least monthly with the help of in-situ measurements. This way of working allows a periodical and regular presence of the dam personnel to be assured as well as allowing the verification of installations to be executed.

In the case of an automation project, it is important to install simple and robust devices with an appropriate operating temperature range and to pay attention to the electromagnetic compatibility for the protection against current overloading and humidity.

In the case of a permanent measurement system, the information given in *table 2* is useful to allow an analysis at distance to be performed. It is not indispensable to foresee an automation of the all measurement points and it is recommended to limit the choice to a few parameters which represent the behaviour of the structure. The automation system can also be useful for measurement points that are difficult to access.

At least one value per day shall be conserved (instantaneous or average) for the parameters which are automatically measured (water level, air temperature, behaviour indicators such as deformations, pressures and percolation discharges).

It is also important to periodically verify that the automation devices are working (in-situ inspection, test at distance) since a malfunction could lead to data losses.

Measurement programme

The measurement programme is adapted to the size of the water retaining scheme. The frequency of measurements can be as a function of the water level (distinguishing between lowered and full reservoir conditions) and the type of behaviour of the structure (normal or exceptional situations). In the case of an anomaly or a particular behaviour, the rhythm of measurements shall be increased. Punctual measurements are also carried out following a seismic or flood event.

To answer the objective of rapidly being able to identify an anomaly, the most often taken measurements (weekly, fortnightly, monthly) concerning the indicators which are representative of the global behaviour of the structure (for example, deformations, total discharge from drains, pressures) are applied. Other complimentary parameters (for example, joint deformations, rotation measurements), are recorded once or twice during the year.

For all types of dams	For Concrete Dams	For Embankment Dams
Reservoir level	Deformation characteristics (for example, total deformation of the section)	Seepage and drainage discharge characteristics (for example, total discharge)
Weather conditions (rainfalls)	Concrete Temperature	Interstitial pressures
	Seepage and drainage rates at specific points	Turbidity of seepage water

Table 2. Parameters that could constitute the objective of continuous measurements.

The complete campaign of geodesic measurements is performed by specialists every 5 years. For embankment dams, levelling and perhaps polygonal measurements are performed once or even twice every year to follow the evolution of deformations at surface points. Concerning small embankment dams (between 10 and 15 m), the programme shall be established whilst taking into account installed equipment as well as possible variations in the measured parameters. If the expected deformations are small, it is possible to perform a single annual check measurement to assure that the behaviour of the structure is correct. It is however recommended to perform at least one monthly measurement concerning water infiltration discharges and to record piezometric levels.

New instrumentation technology: fibre optics

Introduction

The technique of fibre optics has been applied as a measurement instrument for hydraulic structures since the 1990's. In the beginning, it was necessary to perform tests to assure the possible applications. Today, such instruments can be found on the market; however, it is noted that the longterm experience with them has not yet been obtained.

Fibre optic principles

At the surface that separates two mediums which are more or less transparent, a fan of light is separated into two: one part is reflected, the second is refracted. A limiting angle exists from which a total reflection is produced and the light ray remains confined within the same material.

The fibre optic consists of a silica core and a weak refraction sheath index. The more the core of the fibre optic is fine, the more the propagation path is direct. From a diameter of 8 µm, the wave propagates without reflection (monomode fibre).

For certain applications, the slope index fibre, for which the refraction index of the sheath decreases from the interior to the exterior is used. Instead of total reflections, the light ray takes a sinusoidal shape.

Fibre optic used in measurement techniques

As a measurement instrument, fibre optics is employed as follows:

- a device in which the optical fibre consists of the measurement instrument (such as the extensometer);
- a device in which various phenomena are measured along the optical fibre (temperature);
- a device in which the optical fibre consists of a means of data transmission (pressure, temperature, change in length).

Fibre optic used as measurement instrumentation

The application type is the extensometer where the optical fibre replaces the metal rod between the fixed points and the measurement point. The length of the section is measured by sending an infrared signal along the optical fibre which is then reflected on to a mirror at the extremity of the fibre. The propagation time allows the length of the fibre and any differences to be determined.

Since the extension of the optical fibre and the propagation time are temperature dependent, a reference optical fibre is measured at the same time.

Temperature measurement along an optical fibre

During the temperature measurement along an optical fibre placed in a soil or embedded in the concrete, the temperature is measured at various locations.

The diffused light allows the measurement point to be located. If the light at the support is strong, diffusion takes place, for which the location can be determined by the measurement difference between the propagation time of the emitted light and that of the return light. Due to the precise definition of the frequency of a laser beam, the signal point can be defined with a precision of 1 m.

The temperature at a particular point can be determined since the spectral frequency of the diffused light depends on the temperature (the silica molecules of the optical fibre are stimulated by the temperature).

Combining these measurements, it is thus possible to know the distribution of the installed temperatures along the optical fibre.

This system has also found an application in the detection of water infiltration passageways in embankment dams, since the cables several kilometres in length can be installed. Complementary information can be acquired by placing in parallel to the optical fibre a heating wire along which the distribution of the temperature by heating or cooling can be analysed.

In fresh concrete, the temperature variations during the first phase of hardening and cooling in one or several sections can be followed.

Measurement instrumentation with a fibre optic wire

Fibre optic cables have the advantage, with respect to normal electrical cables, of being less sensitive to wear and other factors. Moreover, instruments equipped with optical fibres are not placed in danger by electromagnetic and current overload interferences (for example, caused by lightening).

Measurement cells work in the same way as an electrical instrument while undergoing a small deformation due to external influences (temperature, deformation, pressure). This deformation is measured by a device called Fabry-Pero, determining the variation of the length of the fibre optical cable due to a semi-transparent.

The following instruments are proposed:

- soil pressure cells,
- settlement indicators,
- extensometer for soft materials,
- extensometer for concrete,
- joint meters, displacement measurements,
- piezometers,
- temperature sensors.

The reading system is adapted to the various instruments. It is not necessary to have a laser light source, from a cheaper system and less sensitive to breakdowns.

Geophysical methods

Different geophysical prospecting methods are commonly used in the domain of geological engineering for the underground surveys. Geophysical methods have also found a use for the internal inspection of the body of a water retaining structure (embankment concrete dams) with the objective of detecting anomalies or the particularities (heterogeneities, cavities and cracks, preferential seepage passageways, etc.). These methods, which are based on the study of mechanical or electromechanical waves within the structures core material, have the advantage of being nondestructive and allowing the internal characteristics of the materials to be determined. The practical application of these methods calls for knowledge of the physical or chemical properties of the materials (conductivity, magnetism, elastic modulus, temperature). Their application requires only the installation of punctual instruments.

Some examples of the methods used are mentioned below:

- seismic reflection,
- seismic refraction,
- geoelectrical methods,
- electromagnetic methods,

- Errestrial radars,
- Micro-gravimetric methods,
- Tomography,
- Ultrasound,
- Infrared recording,
- Diagraphy (logging).

References

[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 an 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] SCD-Swiss Committee on Dams/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] SCD-Swiss Committee on Dams/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.

Part 2 – Equipment and measurement Methodes

Explanations to the tables

Column 1: Reference to part 3

The commentary sheets of part 3 indicate the different devices and methods as well as further details such as a brief description, possible redundancies, technical demands, possible disturbances and measurement errors, operation checks and other remarks.

Column 2: Purpose

This column indicates the measurement data required, grouped by loads and reactions (indicators of concrete and embankment dam behaviour).

Column 3: Measuring installation, measuring devices and measuring methods

The most suitable and commonly used instruments and methods to obtain the required data are listed in this column.

Column 4: Requirements

The requirements to be fulfilled by the instruments/methods are defined as follows:

R High reliability is required for the data which are indispensable for the proper monitoring of a dam and which must be available at all times.

L For important data it is necessary to use – together with sufficient redundancies – the longevity of measuring equipment is required. The replacement of parts or the establishment of relationships to previous measurements must not lead to important time delays or impossibilities.

M Measuring ranges must be wide enough to cover exceptional loads or unexpected behaviour.

P The required precision must cover all errors of the complete measuring installation and procedure (inaccuracy of the instruments and their calibration as well as effects of temperature, material coatings, friction, wear, zero-point deviations, non-linearities etc.).

Re Redundancy means both the (independent) duplication of a measuring device or the possibility to check or reconstruct a measurement by means of another measuring installation.

Column 5: Remarks

This column includes important indications and details or characteristics of measured data and equipment.

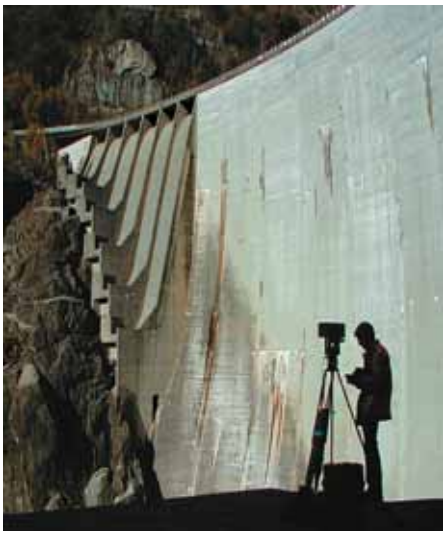

Figure 6. Geodetic measurements at the arch dam of Contra (Source: Schneider Ingénieurs SA, Coire).

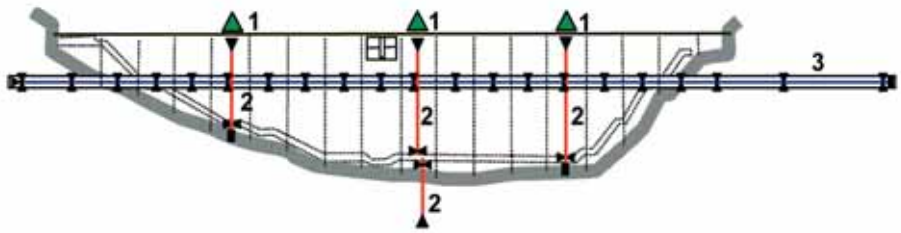

Figure 7. Device for measuring deformation of a gravity dam. 1. Geodetic pillars, 2. pendulums, 3. wire alignment.

Ref. Part 3	Purpose	Equipment Measuring device Measurement methods	Requirements R = Reliability L = Longevity M = Measuring range P = Precision Re = Redundancy	Remarks
1. LOADS AND EFFECTS FROM SURROUNDING ENVIRONMENT				
Hydraulic and Sediments Loads				
1.01	**Water Level**	**Pressure Balance**	**R**: very high **L**: low **M**: up to above the crest/parapet level **P**: ± 10 cm **Re**: Necessary	Important measurement. Range must also cover the flood levels. Possibility to set-up automatic measurements and to record data with most devices.
1.02		**Float**		
1.03		**Staff Gauge**		
1.04		**Manometer**		
1.05		**Manometer**		
1.06		**Sonar Gauge**		
1.07		**Pressure Gauge**		
1.08		**Acoustic and Light Gauge**		
1.09	**Sedimentation Level** Deposits in the reservoir and in front of the intake shaft; Loads of the sediments.	**Measurement of water depth**	**R**: moderate **L**: nil **M**: On all height **P**: ± 0.2 … 0.5 m **Re**:not necessary.	Also to measure scouring depth.
Temperatures				
1.10	**Air and water Temperature** External thermal load. Influence on snow melts.	**Thermograph** Continuous recording of air temperature variations.	**R**: moderate **L**: moderate **M**: -30°C to +40°C **P**: ± 1°C **Re**: necessary.	These instruments can be easily replaced. With possibility to set-up automatic measurements and to record data.
1.11		**Normal Thermometer** Minimum, maximum and instantaneous values.	**R**: moderate **L**: moderate **M**: -30°C to +40°C **P**: ±1°C **Re**: advised.	These instruments can be easily replaced.
1.12		**Electric Thermometer**	**R**: moderate **L**: moderate **M**: -30°C to +40°C **P**: ±1°C **Re**: advised.	These instruments can be easily replaced. With possibility to set-up automatic measurements and to record data.
1.13	**Concrete Temperature** Internal thermal loads (as they directly influence concrete deformation).	**Normal Thermometer** In boreholes.	**R**: very high **L**: very high **M**: -10°C to +60°C **P**: ± 0.5°C **Re**: necessary, foresee enough instruments.	A measuring range up to + 60°C is only necessary during the construction period. When installed later a range up to + 30°C is sufficient.
1.14		**Electric Thermometer**	**R**: very high **L**: very high **M**: -10°C to +60°C **P**: ± 0.5°C **Re**: necessary, provide enough instruments	A measuring range up to + 60°C is only necessary during the construction period. When installed later a range up to + 30°C is sufficient. With possibility to set-up automatic measurements and to record data.

Ref. Part 3	Purpose	Equipment Measuring device Measurement methods	Requirements R = Reliability L = Longevity M = Measuring range P = Precision Re = Redundancy	Remarks
1.15	**Temperature of the concrete,** **Water circulation in the embankments,** **Modification of the temperature due to seepage**	**Fibre optic temperature gauges**	**R**: very high **L**: very high **M**: -10°C to +60°C **P**: ± 0.5°C **Re**: necessary.	A measuring range up to + 60°C is only necessary during the construction period. When installed later a range up to + 30°C is sufficient. Embankment: a measuring range up to + 30°C is sufficient; tarmac surfaces up to + 60°C. Relatively easy Installation. With possibility to set-up automatic measurements and to record data.
Rainfall				
1.16	**Rainfall in the dam area** Influence on water percolation.	**Rain Gauge** **Accumulator** **Pluviometer**	**R**: moderate **L**: low **M**: Total rainfall in the measuring interval **P**: ± 10% **Re**: not necessary.	Such measurements are not absolutely necessary in the immediate vicinity of the dam. With possibility to set-up automatic measurements and to record data.
Pressure				
1.17	**Constraints in embankments and in concrete**	**Earth Pressure cell**	**R**: moderate **L**: high **M**: Total overburden (0 à 3 N/mm^2) **P**: ± 5% of **M** **Re**: not necessary.	Rarely used. The deformation modulus must be adjusted for the embankment material. Interpretation and results problematic. With possibility to set-up automatic measurements and to record data.
1.18 *)		**Tele-pressure cell**	**R**: moderate **L**: high **M**: total of constraints (0 to 10 N/mm^2) **P**: ± 5% of **M** **Re**:not necessary.	Very rarely used. Interpretations and results can be problematic. With possibility to set-up automatic measurements and to record data. *) No explanative Sheet.

Figure 8. Measurement of pendulum deformation in a dam gallery. (Source: Emosson SA).

Ref. Part 3	Purpose	Equipment Measuring device Measurement methods	Requirements R = Reliability L = Longevity M = Measuring range P = Precision Re = Redundancy	Remarks
2. DEFORMATIONS AND DISPLACEMENTS (DAM AND SURROUNDINGS)				
Geodetic Measurements				
2.01	**Measurements of Spatial Displacement of individual points** Including the influence of the surroundings.	**Triangulation** From case to case combined with: Traverses and levelling Electro-optical distance measurements Optical pendulums, pendulums Alignments Extensometers.	**R**: very high **L**: very high **P**: requirements to be fixed from case to case **R**: absolutely necessary by means of - overabundant measuring points - Combination with other measurement methods	The geodetic survey network must cover a large area and enable the long-term observation of dam deformations and its surroundings as well as control of possible displacements of the reference points of other measuring devices (redundancy). Precise measurement which can be carried out only at long intervals. Requires provision of reduced measurements for rapid appraisals of the deformations. All data and indications on measuring and evaluation methods to be filed.
2.02		**Measurements assisted by satellite (GPS)** In relation with terrestrial measurements (consolidation of triangulation network) and terrain movements.	**R, L, P**: requirements to be fixed from case to case **Re**: Necessary; with repetitive measurements or other measuring methods.	Precision depends on the length of the measurements and the satellite set-up. Possibility of automatic measurement and recording.
2.03		**Photogrammetry** For terrain and glacier movements.	**R, L**: requirements to be fixed from case to case **P**: ± 0.2 m **Re**:not important.	Generally, bird's eye photos; terrestrial photos also possible Long lasting quality of the photos is necessary. Photogrammetry can also be used to record deposits in the dam.
2.04		**Laser-Scanning** Complete scanning of the surface of an object.	**R, L, P**: requirements to be fixed from case to case **Re**:not important.	Modern measuring methods that can easily replace photogrammetry.
2.05	**Deformations along horizontal or vertical lines** Extending into abutments and valley sides.	**Levelling**	**R**: very high **L**: very high **P**: requirements to be fixed from case to case **Re**: according to circumstances; necessary in combination with triangulation.	Well-tried and simple method when modern instruments are used. Groups of reference points must be set-up on both banks.

Ref. Part 3	Purpose	Equipment Measuring device Measurement methods	Requirements R = Reliability L = Longevity M = Measuring range P = Precision Re = Redundancy	Remarks
2.06	**Deformations along horizontal or vertical lines** Extending into abutments and valley sides.	**Simple Angular Measurements and electro-optical distance measurements** From stations located outside.	**R**: very high **L**: very high **P**: requirements to be fixed from case to case **Re**: possible by means of repetitive measurements or triangulation.	Well-tried but precise measuring methods to be used only where installation of pendulums is not possible Measurements require favourable weather conditions. Precision depends upon distance and refraction. Measuring stations to be regularly controlled by triangulation.
2.07		**Optical alignment**	**R, L, M, P**: requirements to be fixed from case to case. **Re**: absolutely necessary in combination with triangulation and pendulums.	Well-tried and simple method. Measurements require favourable weather conditions. Precision depends upon distance and refraction.
2.08		**Traverse**	**R, L, M, P**: requirements to be fixed from case to case. **Re**:absolutely necessary in combination with triangulation and pendulums.	Very precise measurement. Attachment to triangulation and pendulums is absolutely necessary.
Instruments				
2.09	**Deformations along horizontal or vertical lines** Extending into abutments and valley sides.	**Pendulum, Inverted pendulum** Measuring device in two directions, with optical sighting of the pendulum wire. The wire serves as vertical reference axis.	**R**: very high **L**: very high **M**: maximum calculated deflection + 50% **P**: ± 0.2 mm **Re**: absolutely necessary by means of - Spare measuring device - Combination with triangulation, traverse, alignments, extensometers.	Well-tried and precise device. Short measuring time. Instrument control station. Tele-transmission possible; measuring device must not influence the pendulum position.
2.10		**Wire Alignment** Measuring device in one direction with optical sighting of the wire, which marks a vertical reference plane.	**R**: very high **L**: very high **M**: maximum calculated deflection+ 50% **P**: ± 0.2 mm **Re**: absolutely necessary by means of - Spare measuring device - Combination with triangulation, traverse, extensometers	Equivalent to pendulums. Precision depending on length of the wire. Applicable only to straight structures. Maximum length limited by quality and weight of the wire. Instrument control station. Tele-transmission possible.

Ref. Part 3	Purpose	Equipment Measuring device Measurement methods	Requirements R = Reliability L = Longevity M = Measuring range P = Precision Re = Redundancy	Remarks
2.11	**Deformations along horizontal or vertical lines** Extending into abutments and valley sides.	**Vertical Settlement Gauge**	**R**: high **L**: high **M**: 50 to 100 m **P**: ± 5 cm (construction phase) ± 1 cm (operation, after reinstallation) **Re**: necessary, with levelling.	Pipe elements < 6m. Verticality during placing to be checked carefully. Difficulties with inclined systems. Combination with pipe inclinometer possible.
2.12		**Hose levelling device**	**R**: high **L**: high **M**: a few meters **P**: ± 1 cm **Re**: necessary with a settlement gauge and levelling	Communication tubes with direct reading on the glass standpipe; three tubes per measuring point. Very accurate; somewhat clumsy ; sensitive to frost. Degassing of the measuring fluid necessary.
2.13	**Variations in length**	**Distometer / Distinvar**	**R**: high **L**: high **M**: 10 cm for the distometer 5 cm for the distinvar **P**: ± 0.2 mm **Re**: Necessary; by means of geodetic measurements or metric tape.	Precise measurement of distance in galleries and in the terrain. The distometer enables to measure in a given direction; the distinvar can only measure horizontally. In case of a reading outside the measuring range, the wire can extend or retract itself.
2.14	**Variations in length and deflections along boreholes** Global measurements on long stretches or differential measurements along a chain of short stretches.	**Rod or wire extensometers** With one or more rods (wires).	**R**: high **L**: high **M**: 10 to 50 mm **P**: ± 0.2 mm **Re**: not always necessary. can be achieved by: - Installing extensometers in several comparable locations - Subdividing the full length in several parts - Combination with inverted pendulum or levelling	Placing of anchors and grouting of the protective sleeves are critical operations. Possibility of automatic measuring and recording.
2.15		**Rod extensometers for embankment dams** With one or more rods.	**R**: high **L**: high **M**: 10 to 30 cm **P**: ± 1 mm **Re**: not always necessary. can be achieved by: - Installing extensometers in several comparable locations - Subdividing the full length in several parts	Placing of anchors and grouting of the protective sleeves are critical operations. Possibility of automatic measuring and recording.

Ref. Part 3	Purpose	Equipment Measuring device Measurement methods	Requirements R = Reliability L = Longevity M = Measuring range P = Precision Re = Redundancy	Remarks
2.16	**Variations in length and deflections along boreholes** Global measurements on long stretches or differential measurements along a chain of short stretches.	**Fibre-optical extensometers** With one or more rods.	**R**: very high **L**: very high **M**: 1 to 2% of the measured part **P**: ± 0.2 mm **Re**: not always necessary. can be achieved by Installing extensometers in several comparable locations.	Relatively easy installation. Possibility of automatic measuring and recording.
2.17		**Borehole Micrometer** Differential length variations	**R**: high **L**: high **M**: expected deflection +100% **P**: ± 0.2 mm for length variations, ± 0.02 mm/m for rock deflections, ± 0.2 mm/m for soft terrain deflections **Re**: According to the aim.	Precision highly dependent of the instrument guiding system. Certain devices give very accurate and reliable results. Placing and grouting of the guiding sleeves is a critical operation. Recommended for the localization of discontinuities (cracks and/or joints) and sliding surfaces and to observe their movements. Measurement and interpretation are time consuming.
		Borehole Micrometer with inclinometer Differential deflections combined with borehole micrometer.		
2.18		**Inclinometer** Differential deflection in boreholes		
2.19	**Variations of local rotations** In vertical plan.	**Clinometer** on settlement benchmark and micrometer with electronic display. **Tiltmeter** With electronic display.	**R**: high **L**: high **M**: 20 mm/m **P**: 0.02 mm/m **Re**: this measurement is recommended only if combined with other measuring installations such as pendulums or levelling.	Near to cavities results are often influenced by stress concentration and transfer effects. Results may be improved by short chains of measuring stretches. Possibility of automatic measuring and recording for the tiltmeter.
2.20	**Movements of cracks and joints** On the surface, expansions and shear movements.	**Micrometer** **Deformeter** **Dilatometer** **Deflectometer**	**R**: moderate **L**: high **M**: 10 mm **P**: ± 0.05 mm **Re**: According to the aim.	Measurements in gallery walls or recesses are often not representative for the behaviour of the whole mass. Possibility of automatic measuring and recording.
2.21	**Specific deformations** To check stresses in the concrete.	**Electric deformeter embedded in concrete** Combined with temperature measurements.	**R**: high **L**: high **M**: Specific deformation 2 mm/m, Temperature –10°C to +50°C **P**: Extension 0.02 mm/m, Temperature ±0.2°C **Re**: necessary by means of - Over abundant instruments - Other types of instruments for comparison.	Frequent instrument failure. Behaviour often influenced by local material conditions at the instrument site. Analysis of the records problematic. Possibility of automatic measuring and recording.
2.22 *)		**Fibre-optic embedded in concrete**		*) See explanatory note 2.15

Ref. Part 3	Purpose	Equipment Measuring device Measurement methods	Requirements R = Reliability L = Longevity M = Measuring range P = Precision Re = Redundancy	Remarks
3. SEEPAGE				
Water quantity				
3.01	**Quantity of seepage and drained water** By zone and in total.	**Volumetric measurements with calibrated container and stopwatch** Or by volume displacement (for example by means of a calibrated rod in boreholes inclined downwards)	**R**: moderate **L**: moderate **M**: maximum expected discharge + 100 % **P**: ± 5 % of **M** **Re**:repetitive measurements.	Method limited to moderate discharges up to 10 l/s; The container's filling time must be at least 20 seconds.
3.02		**Wear** **Measuring Flume** With scale, sonar gauge, pneumatic scale, pressure cell.	**R**: high **L**: high **M**: maximum expected discharge + 100% **P**: ± 5% of **M** **Re**:by volumetric measurements.	Deposits must be removed periodically. Not recommended for discharges < 0.05 l/s. At the collecting point of the total dam seepage a recorder and an alarm signal should be provided for. Possibility of automatic measuring and recording.
3.03		**Measurement of flow in pipes** e.g. in pipes of drainage water pumps - Venturimeter (measurement of the pressure differential) - Sonar or magneto-inductive Measurement (measurement of the velocity of flow)	**R**: high **L**: high **M**: maximum expected discharge + 100% **P**: ± 5% of **M** **Re**:by volumetric measurements in different locations.	Simple means for a periodical check of the indications must be provided for (manometers, weirs, free flow measuring flume). Possibility of automatic measuring and recording.
3.04		**Measurement of flow in partially empty pipes** Sonar or magneto-inductive Measurement (measurement of the velocity of flow)	**R**: high **L**: high **M**: maximum expected discharge + 100% **P**: ± 5% of **M** **Re**:by volumetric measurements in different locations.	Simple means for a periodical check of the indications must be provided for (manometers, weirs, and free flow measuring flume). Possibility of automatic measuring and recording.
Measurements of Hydraulic pressure in the rock and in soft terrain				
3.05	**Pressure of the water in the rock** Pressure of the water circulating in the foundation (uplift ; water pressure in rock cracks)	**Piezometers: open systems** Gauging of the water level by a cable line with light or acoustic signal.	**R**: moderate **L**: high **M**: total length of the borehole **P**: ± 0.05 m **Re**:necessary; installation of piezometers in groups.	Watertight borehole cased down to the pressure measuring area ; protection of head of borehole against penetration of surface waters, mud, stones, etc. Ensure permanent aeration

Ref. Part 3	Purpose	Equipment Measuring device Measurement methods	Requirements R = Reliability L = Longevity M = Measuring range P = Precision Re = Redundancy	Remarks
3.06	**Pressure of the water in the rock** Pressure of the water circulating in the foundation (uplift ; water pressure in rock cracks)	**Piezometers: closed systems** Pressure indication by means of a manometer or electrical gauge	**R**: high **L**: high **M**: Total height between manometer and dam crest **P**: ± 0.5 m resp. ± 1% of **M** **R**: necessary; installation of piezometers in groups.	Well tried method. Pipes and connections to manometers must be watertight. Do not relieve pressure artificially to allow the observation of maximum pressures even if they need time to build up. Periodical venting of pipes required. Periodical check of manometers absolutely necessary. Possibility of automatic measuring and recording.
3.07		**Piezometers: pressure cells (pneumatic or electrical)** Installed in boreholes : one or more cells per level	**R**: high **L**: high **M**: Total height between manometer and dam crest **P**: ± 0.5m resp. ± 1% of **M** **Re**:necessary by means of a large number of cells or an installation in groups.	Central reading of pressure cells spread over the depth. Careful selection of the filter type in order to avoid its early clogging. Placing of cells exacting especially if several of them must be installed in the same borehole. Possibility of automatic measuring and recording.
3.08	**Water pressure on soft terrain** Pressure of the water circulating in embankment dams (core, shoulders) and in the foundation (uplift; interstitial pressures)	**Piezometers: open systems** Gauging of the water level by a cable line with light or acoustic signal.	**R**: moderate **L**: high **M**: total length of the borehole **P**: ± 0.05 m **Re**:necessary; installation of piezometers in groups.	Watertight borehole cased down to the pressure measuring area; protection of head of borehole against penetration of surface waters, mud, stones, etc. Ensure permanent aeration Good functioning of the device checked by rinsing.
3.09		**Piezometers: closed systems** Pressure indication by means of a manometer or electrical gauge.	**R**: high **L**: high **M**: Total height between manometer and dam crest **P**: ± 0.5 m resp. ± 1% of **M** **Re**:necessary ; installation of piezometers in groups.	Well tried method. Pipes and connections to manometers must be watertight. Do not relieve pressure artificially to allow the observation of maximum pressures even if they need time to build up. Periodical venting of pipes required. Periodical check of manometers absolutely necessary. Possibility of automatic measuring and recording.

Ref. Part 3	Purpose	Equipment Measuring device Measurement methods	Requirements R = Reliability L = Longevity M = Measuring range P = Precision Re = Redundancy	Remarks
3.10	**Water pressure on soft terrain** Pressure of the water circulating in embankment dams (core, shoulders) and in the foundation (uplift; interstitial pressures)	**Piezometers: pressure cells (pneumatic, electrical or hydraulic)** Installed in the embankment in the boreholes, one or more cells per level.	**R**: high **L**: high **M**: Total height between manometer and dam crest **P**: ± 0.5m resp. ±1 % of **M** **Re**: necessary by means of a large number of cells or an installation in groups.	Central reading of pressure cells spread over the depth. Hydraulic measurement only possible if the measuring control station is located below the level of minimum pressures. Careful selection of the filter type in order to avoid its early clogging. Placing of cells exacting especially if several of them must be installed in the same borehole. Possibility of automatic measuring and recording.
Physical and chemical properties of the waters				
3.11	**Recording of physical and chemical modifications** (Erosion, dissolving)	**Turbidity meter**	**R**: high **L**: high **M**: 0 to 500 ppm **P**: ± 1 ppm **Re**:necessary by means of analysis of water samples in lab.	Determination of dissolved or suspended materials. A local shelter is important. Calibration after analysis in the laboratory of seepage water. Possibility of automatic measuring and recording.
3.12		**Chemical analysis**	**R**: high **L**: none **M**: depending on expected values **P**: depending on expected values **Re**:not necessary.	To be done at long intervals. Main characteristics to be determined by specialists.
4.	**ETAT**			
4.01	**Geophysical methods** Determining geophysical characteristics of dams and underground terrain.	**Seismic reflection** **Seismic refraction** **Geo-electric** **Electromagnetic** **Geo-radar** **Geomagnetic** **Gravimeter** **Tomography** **Seismic** **Ultrasound** **Infrared reading** **Diagraphy**	**R, L, M, P**: requirements to be fixed from case to case **Re**: necessary; depending on the case by means of boreholes samples tests Other geophysical methods.	Application and interpretation of results to be done by specialists.

Ref. Part 3	Purpose	Equipment Measuring device Measurement methods	Requirements R = Reliability L = Longevity M = Measuring range P = Precision Re = Redundancy	Remarks
4.02	**Video inspection** In case of points with difficult access or inaccessibility.	**Robot under dwelling with video**	**R, L, M, P**: requirements to be fixed from case to case **Re**: not necessary.	Good visibility in the water. Good tracking / tracing of the robot is necessary.
4.03		**Video in a borehole**	**R, L, M, P**: requirements to be fixed from case to case **Re**:not necessary.	The stream / flow of the water can deteriorate the visibility.
4.04	**Concrete characteristics**	**Sclerometer (Schmidt Hammer)** Test without damaging the surface of the concrete.	**R**: medium I **L**: none **M**: probable resistance to compression + 100% **P**: ± 20% of **M** **Re**:necessary; tests in lab.	Simple in-situ measurement. The results are only valid for the surface area.
4.05		**Tests in lab** With samples.	**R, L, M, P**: requirements to be fixed from case to case **Re**: necessary, large number of tests.	The samples are small in comparison with the size of the dam.
4.06 *)	**Detection of water circulation** Localisation of leaks.	**Measurement of temperature variations due to seepage** Measurements of temperature modifications following water circulation.	**R**: very high **L**: very high **M**: from -10° C to +30°C **P**: ± 0.5°C **Re**:necessary; provide enough instruments.	New method. The fibre-optic enables to point out the changes in temperature along a line caused by water circulation. *) See explanatory note 1.15.
5.	**MISCELLANEOUS**			
5.01	**Anchor Control** For ground anchors.	**Measurement of anchoring force** (electric or hydraulic), at anchor's head.	**R**: high **L**: high **M**: anchoring force +25% **P**: ± 1% of **M** **Re**: necessary.	Access to the measuring cell is necessary for checks and replacement. Possibility of automatic measuring and recording.
5.02 *)	**Recording of seismic activities**	**Seismometer** Recording of the movements of the support over time (speed and acceleration). **Seismograph** Recording of the accelerations over time.	**R**: high **L**: medium **M**: ± 1g (a_{max}) **P**: $\Delta a \leq 0.03$ mg ($\geq$ 16 Bits); $\Delta t \leq 0.005$ sec **Re**:necessary.	Foresee 3 component instruments Install at least 3 instruments (at crest level, foundation level and in the free-field). Application and interpretation of results to be done by specialists. *) No explanatory note.

Dispositif d'auscultation des barrages

Préambule

En 1987, le groupe de travail «Observation des barrages» duComité suisse des barrages publiait un volumineux rapport intitulé«Dispositifd'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 trois parties.

Afin de préparer le présent document, un nouveau sous-groupe de travail a été constitué.

Figure 1. Barrages de l'Hongrin.

Partie 1 – Concept de mesure

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.

Le dispositif d'auscultation doit être est 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

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.

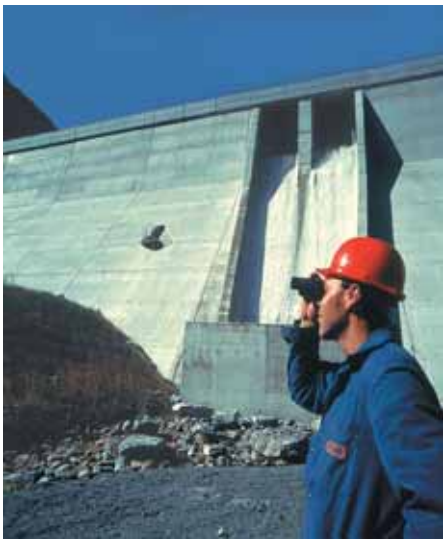

Figure 2. Contrôles visuels.

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.

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 deux méthodes différentes (par exemple, pendule et polygonale, indicateurs de tassements et 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 radiale et ngentielles), 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 la verticalité. Il existe aussi la possibilité de faire glisser un guide-fil auto-centreur 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.

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

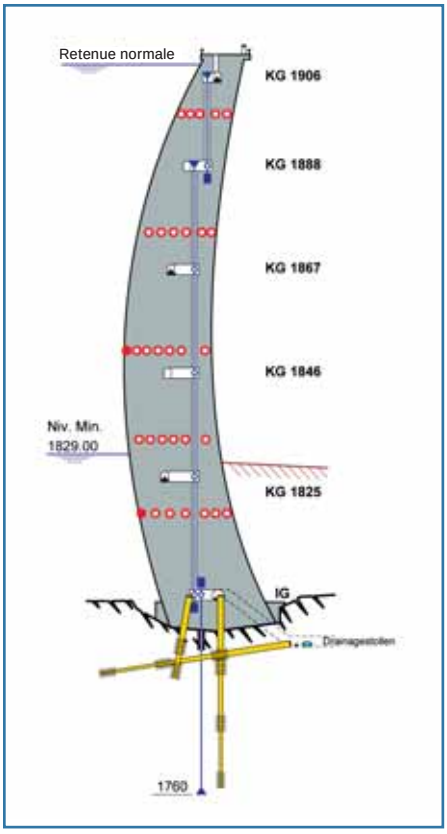

Figure 3. Coupe typique d'un barrage-voûte.

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 deux directions ou de former un tripode. Un extensomètre peut regrouper jusqu'à six 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 deux directions (par exemple amont – aval, rive gauche – rive droite), peut se faire au moyen d'un pendule inversé (éventuellement équipés d'un guide-fil auto-centreur 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

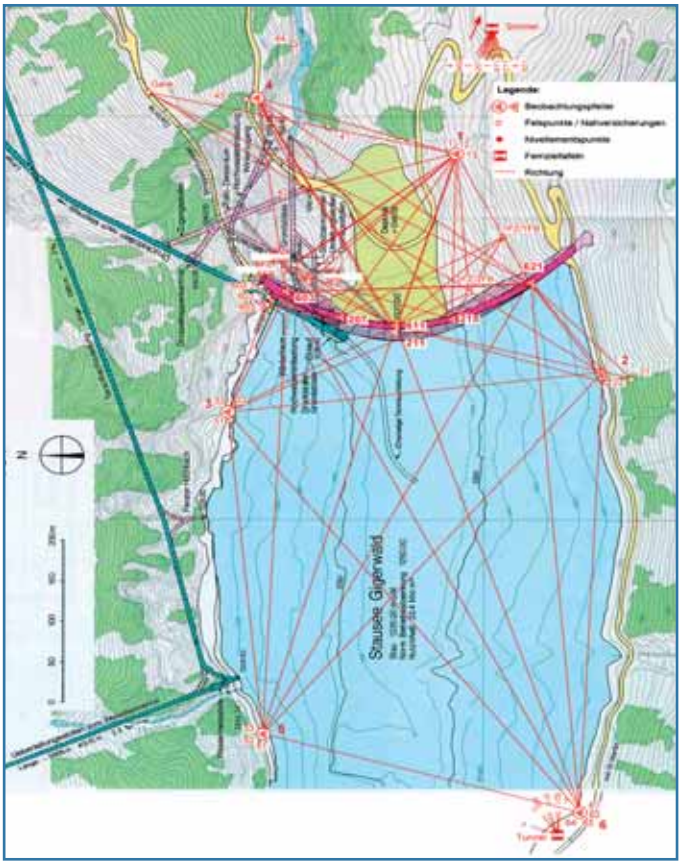

Figure 4. Réseau de mesure géodésique.

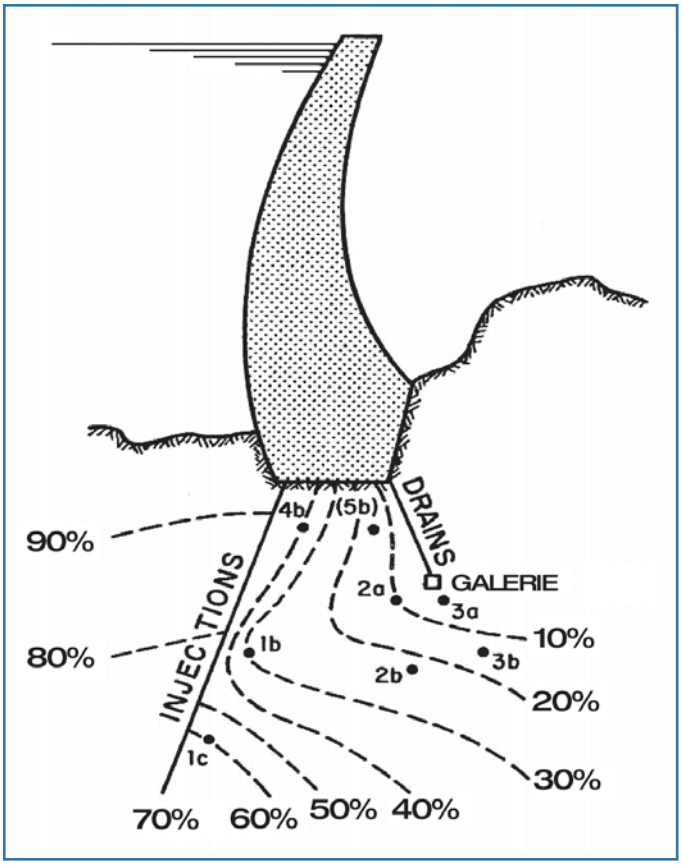

Figure 5. Réseau d'écoulement dans la fondation d'un barrage en béton.

proximité immédiate du barrage et reliés au réseau de mesures géodésiques.

Mesures géodésiques de déformation

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.

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 adjoint 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 deux points) et le nivellement topographique (mesure d'angle entre deux 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 souspressions qui peuvent augmenter de manière excessive.

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 barragespoids 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 variant 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 tubemanomètres 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.

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 déformations 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.

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.

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 réfléchie, la seconde est ré-fractée. 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 un 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 déplace ment,
- 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.

Méthodes 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 géo-électrique,
- 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 an 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 Léuft – 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.

Partie 2 – Equipements et méthodes de mesure

Explication des tableaux

1re colonne: Référence partie 3

Les feuilles de commentaires de la partie 3 indiquent pour les différents appareils et méthodes de plus amples indications telles que brève description, possibilités de redondance, exigences techniques, dérangements possibles et erreurs de mesure, contrôles de fonctionnement indispensables et autres remarques.

2e colonne: But

Dans cette colonne sont indiqués les buts des mesures déterminant les paramètres du comportement des barrages en béton et en remblai selon la nature des charges et des réactions.

3e colonne: Equipements, appareils et méthodes de mesures

Pour chaque type de mesure, les appareils et les méthodes les mieux adaptés et les plus usuels sont mentionnés.

4e colonne: Exigences

Les conditions exigées pour les appareils et les méthodes sont définies comme suit:

F Une grande fiabilité est demandée pour la détermination des valeurs des mesures qui sont indispensables pour une surveillance parfaite des barrages et qui doivent de ce fait être disponibles en tout temps.

L Pour les valeurs de mesures importantes – en plus de la redondance – la longévité du dispositif d'auscultation est nécessaire; le renouvellement de l'équipement ou le rattachement aux mesures antérieures ne doit pas conduire à une perte de temps trop importante ou à une impossibilité.

M La plage de mesure doit être suffisante pour couvrir une charge exceptionnelle ou un comportement inattendu.

P La précision demandée doit englober les erreurs de tout le dispositif d'auscultation et l'exécution de l'ensemble des mesures (imprécision des instruments et de leur calage, influence de la température, matériau d'enrobage, frottement, usure, déplacement du point zéro, défaut de linéarité, etc.).

R Par redondance, on entend le doublement (indépendant) d'un moyen de mesure ainsi que la possibilité de contrôler ou de rétablir une valeur de mesure au moyen d'un autre mode de mesure.

5e colonne: Remarques

Dans cette colonne apparaissent les renseignements et les indications, ou les caractéristiques distinctives concernant les buts des mesures et les dispositifs d'auscultation.

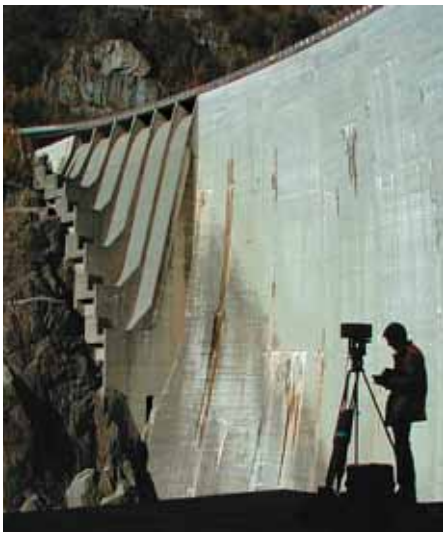

Figure 6. Mesures géodésiques au barrage-voûte de Contra (Source. Schneider Ingénieurs SA, Coire)

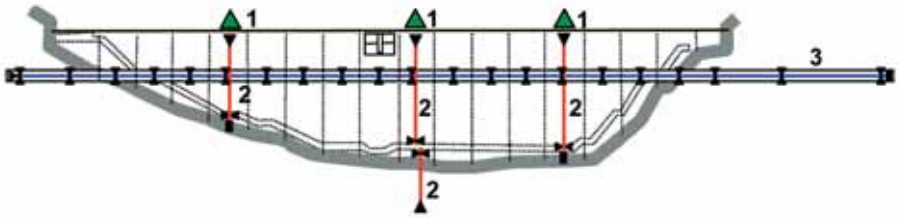

Figure 7. Dispositif pour la mesure des déformations d'un barrage-poids. 1. Piliers de la géodésie, 2. pendules, 3. alignement par fil.

Réf. Partie 3	But	Equipement Appareil de mesures Méthodes de mesures	Exigences F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision R = Redondance	Remarque
1. CHARGES ET SOLLICITATIONS EXTERIEURES				
Charge hydraulique d'eau et sédiments				
1.01	**Niveau du plan d'eau**	**Balance à pression**	**F**: très élevée **L**: faible **M**: jusqu'au-dessus du couronnement / parapet **P**: ± 10 cm **R**: indispensable.	Mesure importante. La plage de mesure doit également englober les crues. Possibilités de mesure automatique et d'enregistrement pour la plupart des instruments.
1.02		**Flotteur**		
1.03		**Echelle limnimétrique**		
1.04		**Manomètre**		
1.05		**Sonde pneumatique**		
1.06		**Sonde à ultrasons**		
1.07		**Sonde de pression**		
1.08		**Câble avec témoin sonore ou lumineux**		
1.09	**Niveau du dépôt des sédiments** Dépôts dans la retenue et devant les prises; charges des sédiments.	**Mesure de profondeur d'eau**	**F**: modérée **L**: aucune **M**: sur toute la hauteur **P**: ± 0.2 … 0.5 m **R**: pas indispensable.	Egalement pour la mesure de la profondeur d'affouillement.
Températures				
1.10	**Température de l'air et de l'eau** Charges thermiques externes. Influence sur la fonte des neiges.	**Thermographe** Enregistrement continu de l'évolution de la température de l'air.	**F**: modérée **L**: modérée **M**: -30°C à +40°C **G**: ± 1°C **R**: nécessaire.	Ces instruments sont facilement remplaçables. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
1.11		**Thermomètre normal** Valeurs minimum, maximum et instantanée.	**F**: modérée **L**: modérée **M**: -30°C à +40°C **P**: ±1°C **R**: souhaitable.	Ces instruments sont faciles à remplacer.
1.12		**Thermomètre électrique**	**F**: modérée **L**: modérée **M**: -30°C à +40°C **P**: ±1°C **R**: souhaitable.	Ces instruments sont faciles à remplacer. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
1.13	**Température dans le béton** Charges thermiques internes (influençant directement la déformation du béton).	**Thermomètre normal** dans les forages.	**F**: très élevée **L**: très élevée **M**: -10°C à +60°C **P**: ± 0.5°C **R**: nécessaire, prévoir assez d'instruments.	La plage de mesure jusqu'à + 60°C est nécessaire pendant la période de construction seulement. Lors d'une installation ultérieure, une échelle jusqu'à + 30°C est suffisante.
1.14		**Thermomètre électrique**	**F**: très élevée **L**: très élevée **M**: -10°C à +60°C **P**: ± 0.5°C **R**: nécessaire, prévoir assez d'instruments.	La plage de mesure jusqu'à + 60°C est nécessaire pendant la période de construction seulement. Lors d'une installation ultérieure, une échelle jusqu'à + 30°C est suffisante. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.

Réf. Partie 3	But	Equipement Appareil de mesures Méthodes de mesures	Exigences F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision R = Redondance	Remarque
1.15	**Répartition de la température dans le béton,** **Circulation d'eau dans les remblais,** **Modification de température due aux infiltrations**	**Capteurs distribués de température à fibres optiques**	**F**: très élevée **L**: très élevée **M**: -10°C à +60°C **P**: ± 0.5°C **R**: nécessaire.	La plage de mesure jusqu'à + 60°C est nécessaire pendant la période de construction seulement. Lors d'une installation ultérieure, une échelle jusqu'à + 30°C est suffisante. Remblai: le domaine de mesure jusqu'à + 30°C suffit ; sous les revêtements bitumineux jusqu'à + 60°C. Installation relativement facile. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
Précipitation				
1.16	**Précipitations dans la région de la retenue** Influençant les infiltrations.	**Pluviomètre** **Totalisateur** **Pluviographe**	**F**: modérée **L**: faible **M**: précipitation totale dans l'intervalle de temps de mesure **P**: ± 10% **R**: pas nécessaire.	Il n'est pas indispensable que la mesure soit effectuée dans les environs immédiats du barrage. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
Pression				
1.17	**Contraintes dans les remblais et dans le béton**	**Mesure de la pression des terres**	**F**: modérée **L**: élevée **M**: surcharge totale (0 à 3 N/mm^2) **P**: ± 5% de **M** **R**: pas nécessaire.	Rarement utilisé. Le module de déformation doit être ajusté avec le matériel de remblai. Interprétation et résultats problématiques. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
1.18 *)		**Télépressmètre**	**P**: modérée **L**: élevée **M**: totalité du domaine de contrainte (0 à 10 N mm^2) **P**: ± 5% de **M** **R**: pas nécessaire.	Très rarement utilisé. Interprétation et résultats problématiques. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement. *) Pas de fiche explicative.

Figure 8. Mesure de déformation par pendule dans une galerie d'un barrage. (Source: Emosson SA).

Réf. Partie 3	But	Equipement Appareil de mesures Méthodes de mesures	Exigences F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision R = Redondance	Remarque
2. DÉFORMATIONS ET DÉPLACEMENTS (BARRAGE ET ENVIRONS)				
Mesures géodésiques				
2.01	**Mesure du déplacement spatial des points** y compris l'influence des environs.	**Triangulation** de cas en cas combinées avec: Polygonales et nivellements Mesures de distances électro-optiques Pendules optiques, pendules Alignements Extensomètres.	**F**: très élevée **L**: très élevée **P**: exigences à fixer de cas en cas **R**: indispensable moyennant - Points de contrôle surabondants - Combinaison avec d'autres méthodes de mesure.	Le réseau géodésique doit englober un espace étendu et permettre l'observation à long terme des déformations de l'ouvrage et de ses alentours, de même que le contrôle des déplacements éventuels des points de références d'autres équipements de mesure (redondance). Mesure délicate qui ne peut être exécutée qu'à intervalles importants. Concevoir des mesures réduites permettant l'appréciation rapide de l'état des déformations. Archiver d'une manière sûre les données et les indications relatives aux méthodes de mesure et de calcul.
2.02		**Mesures assistées par satellites (GPS)** En liaison avec les mesures terrestres (consolidation du réseau de triangulation) et les mouvements de terrain.	**F, L, P**: exigences à fixer de cas en cas **R**: nécessaire; avec mesures répétitives ou d'autres méthodes de mesure.	La précision dépend de la durée des mesures et de la configuration des satellites. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
2.03		**Photogrammétrie** Pour mouvement de terrain et de glaciers.	**F, L**: exigences à fixer de cas en cas **P**: ± 0.2 m **R**: pas important.	En général, photos aériennes; prises de vue terrestres aussi possibles. Longue durée de conservation des photos aériennes nécessaire. La photogrammétrie peut aussi être utilisée pour le relevé des dépôts dans les retenues.
2.04		**Laser-Scanning** Balayage complet de la surface d'un objet.	**F, L, P**: exigences à fixer de cas en cas **R**: pas important.	Méthode de mesure moderne qui remplace avantageuse-ment la photogrammétrie.
2.05	**Déformées le long de lignes horizontales ou verticales** avec prolongation dans les appuis et les versants de la vallée.	**Nivellement**	**F**: très élevée **L**: très élevée **P**: exigences à fixer de cas en cas **R**: selon les circonstances, nécessaire en combinaison avec triangulation.	Méthode éprouvée et simple avec emploi d'instruments modernes. Prévoir des groupes de points de référence sur les deux rives.

Réf. Partie 3	But	Equipement Appareil de mesures Méthodes de mesures	Exigences F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision R = Redondance	Remarque
2.06	Suite: **Déformées le long de lignes horizontales ou verticales** avec prolongation dans les appuis et les versants de la vallée.	**Mesure simple d'angles et mesure de distances électro-optique** depuis des stations extérieures.	**F**: très élevée **L**: très élevée **P**: exigences à fixer de cas en cas **R**: possible au moyen de mesures répétitives ou de la triangulation.	Méthode de mesure éprouvée mais délicate. A n'appliquer qu'au cas où une installation de pendules n'est pas possible. Mesures nécessitant des conditions météorologiques favorables. Précision dépendant des distances et de la réfraction. Stations de mesure à contrôler périodiquement par triangulation.
2.07		**Alignement optique**	**F, L, M, P**: exigences à fixer de cas en cas. **R**: indispensable en combinaison avec triangulation et pendules.	Méthode de mesure éprouvée et facile. Mesures nécessitant des conditions météorologiques favorables. Précision dépendant des distances et de la réfraction.
2.08		**Polygonale**	**F, L, M, P**: exigences à fixer de cas en cas. **R**: indispensable en combinaison avec triangulation et pendules.	Méthode de mesure très délicate. Rattachement indispensable à la triangulation ou aux pendules.
Instruments				
2.09	**Déformées le long de lignes horizontales ou verticales** avec prolongation dans les appuis et les versants de la vallée.	**Pendule, pendule inversé** Dispositif de mesure à deux axes, avec optique permettant de viser le fil du pendule qui sert d'axe de référence.	**F**: très élevée **L**: très élevée **M**: déformation maximale calculée + 50% **P**: ± 0.2 mm **R**: indispensable; moyennant - Instrument de réserve - Combinaison avec triangulation, polygonales, alignements, extensomètres.	Méthode de mesure précise et éprouvée. Durée de mesure réduite. Station de contrôle de l'instrument. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement; le dispositif de mesure ne doit pas fausser la position du pendule.
2.10		**Alignement par fil** Dispositif de mesure à un axe, avec optique pour viser le fil qui représente un plan de référence vertical.	**F**: très élevée **L**: très élevée **M**: déformation maximale calculée + 50% **P**: ± 0.2 mm **R**: indispensable; moyennant - Instrument de réserve - Combinaison avec triangulation, pendues, extensomètres.	Equivalent au pendule. Précision dépendante de la portée du fil tendu. Ne convient que pour des ouvrages rectilignes. La portée maximale est limitée par le poids et la qualité du fil d'acier. Station de contrôle de l'instrument. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.

Réf. Partie 3	But	Equipement Appareil de mesures Méthodes de mesures	Exigences F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision R = Redondance	Remarque
2.11	Suite: **Déformées le long de lignes horizontales ou verticales** avec prolongation dans les appuis et les versants de la vallée.	**Repère de tassement vertical**	**F**: élevée **L**: élevée **M**: 50 à 100 m **P**: ± 5 cm (phase de construction) ± 1 cm (opération, après reconstruction) **R**: nécessaire, par nivellement.	Eléments tubulaires < 6m. Vérifier soigneusement la verticalité lors de la mise en place. Difficultés de réalisation pour systèmes inclinés. Combinaison avec un inclinomètre à tube.
2.12		**Repère de tassement hydraulique**	**F**: élevée **L**: élevée **M**: quelques mètres **P**: ± 1 cm **R**: nécessaire, par repère de tassement et nivellement.	Tubes communicants et lecture directe sur les marques du tube de niveau; 3 tuyaux par point de mesure. Très précis; quelque fois délicat, sensible au gel. Dégazage de l'eau de mesure nécessaire.
2.13	**Variation de longueur**	**Distomètre / Distinvar**	**F**: élevée **L**: élevée **M**: 10 cm pour le distomètre 5 cm pour le distinvar **P**: ± 0.2 mm **R**: nécessaire, par des mesures géodésiques ou ruban métrique.	Mesure de distance précise en galerie et dans le terrain. Le distomètre permet de mesurer dans une direction voulue, le distinvar seulement horizontalement. Le fil peut se raccourcir ou se rallonger en cas de dépassement de la plage de mesure.
2.14	**Variation de longueur et déformée le long de lignes de forages** Mesures globales sur grands tronçons de mesure ou mesures différentielles entre repères aménagés sous forme d'une chaîne.	**Extensomètres à tiges et à fils** à une ou à plusieurs tiges.	**F**: élevée **L**: élevée **M**: 10 à 50 mm **P**: ± 0.2 mm **R** : pas toujours nécessaire. Peut être atteinte par: - Installation d'extensomètres en plusieurs endroits comparables - Subdivision en plusieurs tronçons - Combinaison avec pendule inversé ou nivellement.	Travaux de mise en œuvre de l'ancrage et injection des gaines de protection délicats. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
2.15		**Extensomètre à tiges pour barrage en remblai** à une ou à plusieurs tiges .	**F**: élevée **L**: élevée **M**: 10 à 30 cm **P**: ± 1 mm **R**: pas toujours nécessaire. Peut être atteinte par: - Installation d'extensomètres en plusieurs endroits comparables - Subdivision en plusieurs tronçons.	Travaux de mise en œuvre de l'ancrage et injection des gaines de protection délicats. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.

Réf. Partie 3	But	Equipement Appareil de mesures Méthodes de mesures	Exigences F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision R = Redondance	Remarque
2.16	Suite: **Variation de longueur et déformée le long de lignes de forages** Mesures globales sur grands tronçons de mesure ou mesures différentielles entre repères aménagés sous forme d'une chaîne.	**Extensomètre fibre-optique** à une ou à plusieurs tiges.	**F**: très élevée **L**: très élevée **M**: 1 à 2% du tronçon de mesure **P**: ± 0.2 mm **R**: pas toujours nécessaire; peut être atteinte par l'installation en plusieurs endroits comparables.	Mise en place relativement facile. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
2.17		**Micromètre de forage** Variation de longueurs différentielles. **Micromètre de forage avec inclinomètre** Déformation différentielle combiné avec micromètre de forage.	**F**: élevée **L**: élevée **M**: Déformation attendue +100% **P**: ± 0.2 mm pour des modifications de longueur, ± 0.02 mm/m pour des déflexions en rocher, ± 0.2 mm/m pour des déflexions en terrain meubles **R**: selon le but.	Précision dépendant fortement du système de guidage de l'instrument. Certains instruments fournissent des mesures très précises et fiables. Travaux de mise en œuvre et injection des tubes de guidage délicats. Indiqué pour localiser et observer les mouvements des discontinuités (fissures) et surface de glissement. Mesures et interprétation demandent beaucoup de temps.
2.18		**Inclinomètre** Déformation différentielle dans un forage.		
2.19	**Variation de rotations locales** Dans le plan vertical.	**Clinomètre** sur repère de tassement hydraulique et micromètre, avec indicateur électronique. **Tiltmètre** Avec indicateur électronique.	**F**: élevée **L**: élevée **M**: 20 mm/m **P**: 0.02 mm/m **R**: la mesure n'est indiquée qu'en combinaison avec d'autres équipements de mesures tels que pendules ou nivellement.	A proximité d'espaces vides, les résultats peuvent être influencées par des concentrations de contraintes. Des chaînes de mesure courtes peuvent améliorer les résultats. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement pour le tiltmètre.
2.20	**Mouvement de fissures et de joints** En surface, dilatations et mouvements de cisaillement.	**Micromètre** **Déformètre** **Dilatomètre** **Déflectomètre**	**F**: modéré **L**: élevée **M**: 10 mm **P**: ± 0.05 mm **R**: selon le but.	Les mesures sur les parois d'une galerie ou d'une niche ne sont souvent pas représentatives du comportement du massif. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
2.21	**Déformation ponctuelle** Pour contrôler les contraintes dans le béton.	**Déformètre électrique noyé dans le béton** Combiné avec mesures de température.	**F**: élevée **L**: élevée **M**: Déformation spécifique 2 mm/m, Température –10°C à +50°C **P**: Allongement 0.02 mm/m, Température ±0.2°C **R**: nécessaire moyennant - instruments en surabondance - autres types d'instruments pour comparaison.	Pannes fréquentes. Résultats souvent influencés par les conditions locales des matériaux au droit de l'instrument. Evaluation et résultats problématiques. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
2.22 *)		**Fibre-optique noyée dans le béton**		*) Voir fiche explicative 2.15

Réf. Partie 3	But	Equipement Appareil de mesures Méthodes de mesures	Exigences F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision R = Redondance	Remarque
3. INFILTRATIONS				
Débits d'eau				
3.01	**Débit des eaux d'infiltration et de drainage** Par zone et global.	**Mesure volumétrique avec récipient taré et chronomètre** ou par supplantation de volume (par exemple à l'aide d'une tige étalonnée dans des forages inclinés vers le bas)	**F**: modéré **L**: modéré **M**: débit maximal présumé + 100 % **P**: ± 5 % de **M** **R**: par mesures répétitives.	Méthode limitée à des débits modérés jusqu'à 10 l/s; le temps de remplissage du récipient doit être d'au moins 20 secondes.
3.02		**Déversoir** **Canal de mesure** Avec échelle, capteur à ultrasons, échelle pneumatique, sonde de pression.	**F**: élevée **L**: élevée **M**: débit maximal présumé + 100% **P**: ± 5% de **M** **R**: par une mesure volumétrique.	Enlever périodiquement les concrétions. Pas indiqué pour des débits < 0.05 l/s. Pour le débit total du barrage, prévoir l'enregistrement et un signal d'alarme. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
3.03		**Mesure du flux dans des tubes** Par ex. pour eaux d'infiltration dans une conduite alimentée par pompe - Venturimètre (mesure d'une différence de pression) - Mesure de la vitesse d'écoulement par capteur à ultrasons ou mesure magnéto inductive	**F**: élevée **L**: élevée **M**: débit maximal présumé + 100% **P**: ± 5% de **M** **R**: par des mesures volumétriques en d'autres endroits.	Prévoir des possibilités simples pour contrôler périodiquement les indications (manomètres, déversoir, canal de mesure à écoulement libre). Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
3.04		**Mesure du flux dans des tubes partiellement remplis** Mesure de la vitesse d'écoulement par capteur à ultrasons ou mesure magnéto inductive	**F**: élevée **L**: élevée **M**: débit maximal présumé + 100% **P**: ± 5% de **M** **R**: par des mesures volumétriques en d'autres endroits.	Prévoir des possibilités simples pour contrôler périodiquement les indications (manomètres, déversoir, canal de mesure à écoulement libre). Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
Mesures des pressions hydrauliques dans le rocher et dans les matériaux meubles				
3.05	**Pression de l'eau dans le rocher** Pression de l'eau circulant dans la zone des fondations (sous-pression, pression de l'eau dans des fissures)	**Piézomètres: systèmes ouverts** Mesure du niveau de la nappe par câble avec témoin lumineux ou sonore.	**F**: modéré **L**: élevée **M**: longueur totale du forage **P**: ± 0.05 m **R**: nécessaire moyennant une disposition en groupes.	Tuber le forage d'une manière étanche jusqu'à la prise de pression; protéger la tête du forage contre la pénétration d'eau de surface, de boue, de cailloux, etc. Garantir une aération permanente.

Réf. Partie 3	But	Equipement Appareil de mesures Méthodes de mesures	Exigences F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision R = Redondance	Remarque
3.06	Suite: **Pression de l'eau dans le rocher** Pression de l'eau circulant dans la zone des fondations (sous-pression, pression de l'eau dans des fissures).	**Piézomètres: systèmes fermés** Indication de pression par manomètre ou capteur électrique.	**F**: élevée **L**: élevée **M**: toute la hauteur comprise entre le manomètre et le couronnement du barrage **P**: ± 0.5 m resp. ± 1% de **M** **R**: nécessaire moyennant une disposition en groupes.	Méthode éprouvée. Les tubes et raccords du manomètre doivent être étanches. Ne pas provoquer artificiellement une décharge de pression, afin que les pressions puissent être saisies en totalité, même si elles se constituent très lentement. Aérer périodiquement les conduites. Contrôle périodique indispensable des manomètres. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
3.07		**Piézomètres: cellules de pression (pneumatique ou électrique)** installée dans des forages, une ou plusieurs cellules par niveaux	**F**: élevée **L**: élevée **M**: toute la hauteur comprise entre le manomètre et le couronnement du barrage **P**: ± 0.5m resp. ± 1% de **M** **R**: nécessaire moyennant un grand nombre de cellules ou une disposition en groupes.	Centralisation possible des mesures des cellules réparties sur la profondeur. Déterminer soigneusement le genre de filtre, de manière à éviter que des cellules se bouchent trop rapidement. Mise en place délicate surtout si installation de plusieurs cellules dans un même forage. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
3.08	**Pression de l'eau dans les matériaux meubles** Pression de l'eau circulant dans le barrage en remblai (noyau, corps d'appui) et dans les fondations (sous-pressions et pressions interstitielles)	**Piézomètres: systèmes ouverts** Mesure du niveau de la nappe par câble avec témoin lumineux ou sonore.	**F**: modéré **L**: élevée **M**: longueur totale du forage **P**: ± 0.05 m **R**: nécessaire moyennant une disposition en groupes.	Tuber le forage d'une manière étanche jusqu'à la prise de pression; protéger la tête du forage contre la pénétration d'eau de surface, de boue, de cailloux, etc. Garantir une aération permanente. Contrôle de fonctionnement par rinçage.
3.09		**Piézomètres: systèmes fermés** Indication de pression par manomètre ou capteur électrique.	**F**: élevée **L**: élevée **M**: toute la hauteur comprise entre le manomètre et le couronnement du barrage **P**: ± 0.5 m resp. ± 1% de **M** **R**: nécessaire moyennant une disposition en groupes.	Méthode éprouvée. Les tubes et raccords du manomètre doivent être étanches. Ne pas provoquer artificiellement une décharge de pression, afin que les pressions puissent être saisies en totalité, même si elles se constituent très lentement. Aérer périodiquement les conduites. Contrôle périodique indispensable des manomètres. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.

Réf. Partie 3	But	Equipement Appareil de mesures Méthodes de mesures	Exigences **F** = Fiabilité **L** = Longévité **M** = Plage de mesure **P** = Précision **R** = Redondance	Remarque
3.10	Suite: **Pression de l'eau dans les matériaux meubles** Pression de l'eau circulant dans le barrage en remblai (noyau, corps d'appui) et dans les fondations (sous-pressions et pressions interstitielles)	**Piézomètres: cellules de pression (pneumatique, électrique ou hydraulique)** Installées dans le remblai dans des forages, à une ou plusieurs cellules par niveau.	**F**: élevée **L**: élevée **M**: toute la hauteur comprise entre le manomètre et le couronnement du barrage **P**: ± 0.5m resp. ±1 % de **M** **R**: nécessaire moyennant un grand nombre de cellules ou une disposition en groupes.	Centralisation possible des mesures des cellules réparties sur la profondeur. Mesure hydraulique possible seulement si le poste de mesure se situe au-dessous du niveau minimal des pressions. Déterminer soigneusement le genre de filtre, de manière à éviter que des cellules se bouchent trop rapidement. Mise en place délicate surtout si installation de cellules à plusieurs niveaux. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
Propriétés physiques et chimiques des eaux				
3.11	**Relevé des modifications physiques ou chimiques** (Erosion, dissolution)	**Turbidimètre**	**F**: élevée **L**: élevée **M**: 0 à 500 ppm **P**: ± 1 ppm **R**: nécessaire; par analyse d'échantillons d'eau en laboratoire.	Détermination des matières dissoutes ou en suspension. Un local abrité est important. Etalonnage après analyse en laboratoire de l'eau de percolation. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
3.12		**Analyse chimique**	**F**: élevée **L**: aucune **M**: selon les valeurs recherchées **P**: selon les valeurs recherchées **R**: pas nécessaire.	Exécution à grands intervalles. La détermination des caractéristiques importantes est l'affaire de spécialistes.
4.	**ETAT**			
4.01	**Méthodes géophysiques** Détermination de caractéristiques géophysiques des barrages et du sous-sol.	**Sismique réflexion** **Sismique réfraction** **Géoélectrique** **Electromagnétique** **Géoradar** **Géomagnétique** **Gravimétrie** **Tomographie sismique** **Ultrason** **Relevé infrarouge** **Diagraphie**	**F, L, M, P**: exigences à fixer de cas en cas **R**: nécessaire; selon les cas au moyen de forages, prise d'échantillons et d'essais ou par d'autres méthodes géophysiques.	Application et interprétation par des spécialistes.

Réf. Partie 3	But	Equipement Appareil de mesures Méthodes de mesures	Exigences **F** = Fiabilité **L** = Longévité **M** = Plage de mesure **P** = Précision **R** = Redondance	Remarque
4.02	**Inspection par caméra** Dans le cas de points inaccessible ou difficile d'accès.	**Robot sous lacustre muni d'une caméra**	**F, L, M, P**: exigences à fixer de cas en cas **R**: pas nécessaire.	Bonne visibilité dans l'eau requise. S'assurer de la localisation du robot.
4.03		**Caméra dans un forage**	**F, L, M, P**: exigences à fixer de cas en cas **R**: pas nécessaire.	La turbidité de l'eau peut gêner les conditions de visibilité.
4.04	**Caractéristiques des bétons**	**Scléromètre (Marteau de Schmidt)** Essai non destructif à la surface du béton.	**F**: moyenne l **L**: aucune **M**: résistance probable à la compression + 100% **P**: ± 20% de **M** **R**: nécessaire; par essais en laboratoire.	Mesure in situ simple. Les résultats ne sont représentatifs que pour la zone de surface.
4.05		**Essais en laboratoire** Sur échantillons.	**F, L, M, P**: exigences à fixer de cas en cas **R**: nécessaire, par un grand nombre d'essais.	Les échantillons sont petits par rapport aux dimensions de l'ouvrage.
4.06 *)	**Détection des circulations d'eau** Localisation de fuites.	**Mesure des variations de température en raison des percolations** Mesures de modification de température suite aux circulations d'eau.	**F**: très élevée **L**: très élevée **M**: de -10° C à +30°C **P**: ± 0.5°C **R**: nécessaire; prévoir un nombre suffisant d'instruments.	Nouvelle méthode. La fibre optique permet de localiser les changements de température le long d'une ligne provoqués par les circulations d'eau. *) Voir fiche explicative 1.15.
5.	**DIVERS**			
5.01	**Contrôle des ancrages** Pour tirants d'ancrage.	**Mesure de la force d'ancrage** (électrique ou hydraulique), en tête d'ancrage.	**F**: élevée **L**: élevée **M**: force d'ancrage +25% **P**: ± 1% de **M** **R**: nécessaire.	La cellule de mesure de charge doit être contrôlable et remplaçable. Avec possibilités de mesure automatique et d'enregistrement.
5.02 *)	**Enregistrement d'événements sismiques**	**Sismomètre** Enregistrement des mouvements du support en fonction du temps (*vitesse* ou *accélération*). **Accélérographe** Enregistrement des *accélérations* en fonction du temps.	**F**: élevée **L**: moyenne **M**: ± 1g (a_{max}) **P**: $\Delta a \leq 0.03$ mg ($\geq$ 16 Bits); $\Delta t \leq 0.005$ sec **R**: nécessaire.	Prévoir des appareils à 3 composantes. Installer au moins 3 appareils (au couronnement, au niveau de la fondation et en champ libre). Application et interprétation par des spécialistes. *) Pas de fiche explicative.