

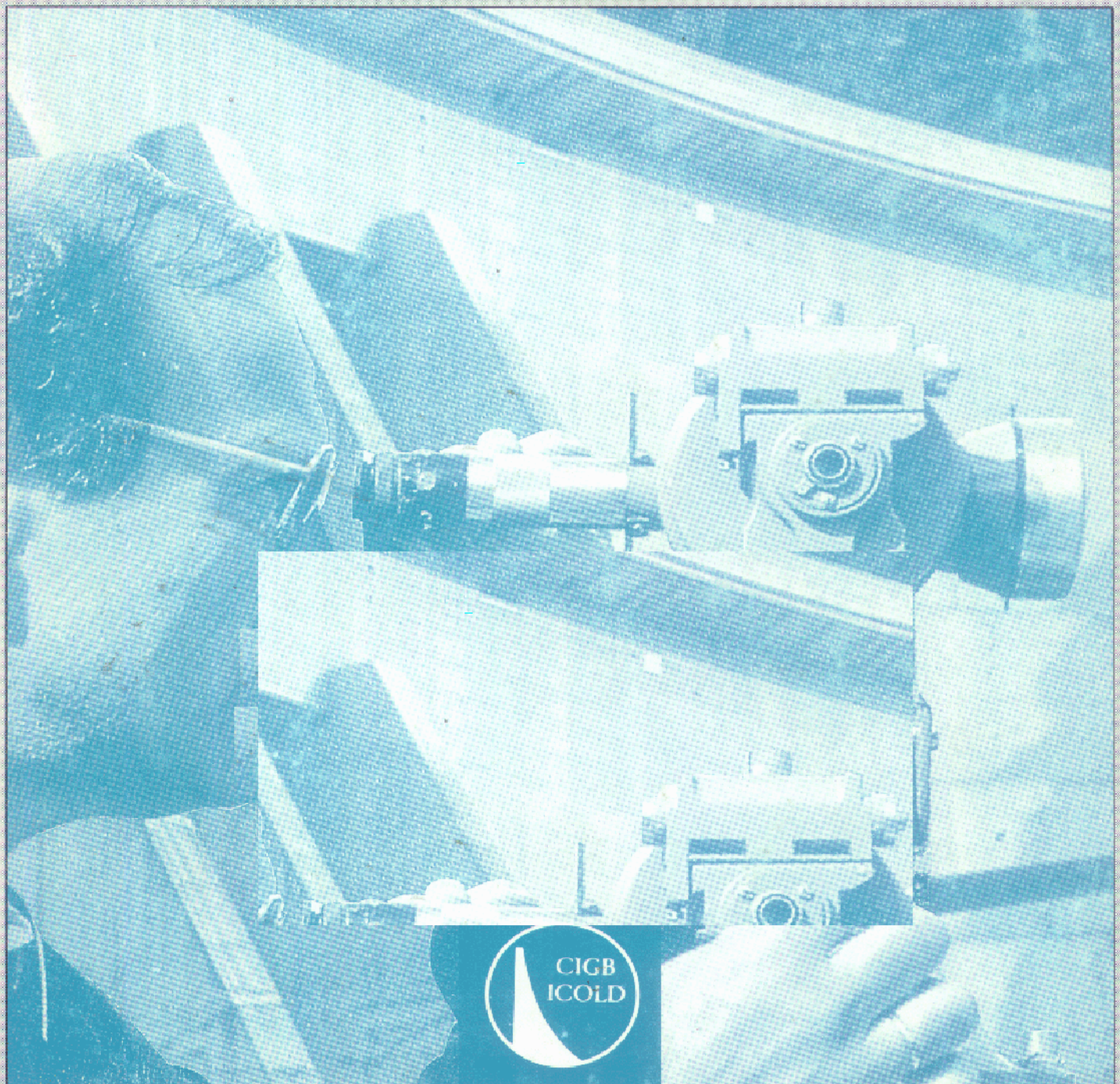
IMPROVEMENT OF EXISTING DAM MONITORING

Recommendations and case histories

AMELIORATION DE L'AUSCULTATION DES BARRAGES

Recommandations et exemples

Bulletin 87



1992

Original text from the Committee
French version finalized by Y. Le May
Text of Appendices from each National Committee

*Texte original établi par le Comité
Version française mise au point par Y. Le May
Texte des Annexes établi par chaque Comité National*

IMPROVEMENT OF EXISTING DAM MONITORING

Recommendations and case histories

AMELIORATION DE L'AUSCULTATION DES BARRAGES

Recommandations et exemples

Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris
Tél. : (33-1) 40 42 67 33 - Télex : 641320 ICOLD F - Fax : (33-1) 40 42 60 71

AVERTISSEMENT – EXONERATION DE RESPONSABILITE:

Les informations, analyses et conclusions auxquelles cet ouvrage renvoie sont sous la seule responsabilité de leur(s) auteur(s) respectif(s) cité(s).

Les informations, analyses et conclusions contenues dans cet ouvrage n'ont pas force de Loi et ne doivent pas être considérées comme un substitut aux réglementations officielles imposées par la Loi. Elles sont uniquement destinées à un public de Professionnels Avertis, seuls aptes à en apprécier et à en déterminer la valeur et la portée et à en appliquer avec précision les recommandations à chaque cas particulier.

Malgré tout le soin apporté à la rédaction de cet ouvrage, compte tenu de l'évolution des techniques et de la science, nous ne pouvons en garantir l'exhaustivité.

Nous déclinons expressément toute responsabilité quant à l'interprétation et l'application éventuelles (y compris les dommages éventuels en résultant ou liés) du contenu de cet ouvrage.

En poursuivant la lecture de cet ouvrage, vous acceptez de façon expresse cette condition.

NOTICE – DISCLAIMER :

The information, analyses and conclusions referred to herein are the sole responsibility of the author(s) thereof.

The information, analyses and conclusions in this document have no legal force and must not be considered as substituting for legally-enforceable official regulations. They are intended for the use of experienced professionals who are alone equipped to judge their pertinence and applicability and to apply accurately the recommendations to any particular case.

This document has been drafted with the greatest care but, in view of the pace of change in science and technology, we cannot guarantee that it covers all aspects of the topics discussed.

We decline all responsibility whatsoever for how the information herein is interpreted and used and will accept no liability for any loss or damage arising therefrom.

Do not read on unless you accept this disclaimer without reservation.

AD HOC COMMITTEE ON MONITORING
OF EXISTING DAMS
COMITÉ AD HOC DE L'AUSCULTATION
DES BARRAGES EXISTANTS
(1988-1991)

Chairman/Président

Italy/Italie

A. MARAZIO (*)

Members/Membres

France/France

Y. LE MAY

Japan/Japon

H. HAYASHI

Spain/Espagne

J. M. GAZTAÑAGA

Switzerland/Suisse

J. P. STUCKY (**)

USA/États-Unis

R. P. SHARMA

USSR/ URSS

A. N. MARCHUK

(*) Deceased in January 1992/Décédé en janvier 1992.

(**) Deceased in June 1991/Décédé en juin 1991.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. INTRODUCTION
2. ANALYSE DE LA SITUATION ACTUELLE
3. RECOMMANDATIONS SUR LE NOUVEAU DISPOSITIF D'AUSCULTATION

ANNEXES : EXEMPLES

CONTENTS

FOREWORD

1. INTRODUCTION
2. ANALYSIS OF PRESENT SITUATION
3. RECOMMENDATIONS ON NEW MONITORING SYSTEM

APPENDICES : CASE HISTORIES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	6
1. INTRODUCTION.....	8
2. ANALYSE DE LA SITUATION ACTUELLE.....	14
2.1. Dossier de l'aménagement	14
2.2. Inspections visuelles	16
2.3. Dispositif d'auscultation existant.....	16
2.4. Résultats des mesures antérieures.....	18
2.5. Reconnaissances sur le site et études en laboratoire	18
2.6. Modèles mathématiques ou physiques pour analyse du comportement	20
2.7. Conformité avec les règles et techniques actuelles	22
3. RECOMMANDATIONS SUR LE NOUVEAU DISPOSITIF D'AUSCULTATION.....	24
3.1. Raisons de l'intervention.....	24
3.1.1. Grandeurs susceptibles d'être mesurées	24
3.1.2. Dispositif d'auscultation inadéquat.....	28
3.1.3. Recherches scientifiques sur le comportement des barrages.....	30
3.1.4. Éléments inutiles du dispositif d'auscultation	30
3.1.5. Automatisation	32
3.2. Fréquence des interventions	32
3.2.1. Première vérification	34
3.2.2. Vérifications ultérieures.....	34
3.2.3. Durée des interventions	36
3.3. Choix des dispositifs de mesure	36
ANNEXES : EXEMPLES PRÉSENTÉS PAR	
A) France.....	45
B) Italie.....	57
C) Japon	69
D) Espagne	79
E) Suisse	90
F) États-Unis	105
G) URSS.....	115

TABLE OF CONTENTS

FOREWORD	7
1. INTRODUCTION.....	9
2. ANALYSIS OF PRESENT SITUATION	15
2.1. Project documents	15
2.2. Visual inspections.....	17
2.3. Existing monitoring system	17
2.4. Instrumental records	19
2.5. Site and laboratory investigations	19
2.6. Mathematical or physical models for behaviour analysis.....	21
2.7. Compliance with current regulations and modern practice	22
3. RECOMMENDATIONS ON NEW MONITORING SYSTEM.....	25
3.1. Need for action	25
3.1.1. Measurable quantities	25
3.1.2. Monitoring system inadequacy	29
3.1.3. Knowledge of behaviour for research purposes	31
3.1.4. Monitoring system redundancy.....	31
3.1.5. Automation	33
3.2. Timing of the intervention.....	33
3.2.1. First re-appraisal.....	35
3.2.2. Subsequent re-appraisals	35
3.2.3. Time necessary for action	37
3.3. Approach to instrumentation.....	37
APPENDICES: CASE HISTORIES FROM	
A) France	45
B) Italy.....	57
C) Japan.....	69
D) Spain	79
E) Switzerland	91
F) USA	105
G) USSR.....	115

AVANT-PROPOS

L'auscultation est l'une des opérations les plus importantes pour le contrôle et l'évaluation de la sécurité d'un barrage.

Ce bulletin donne des recommandations pour l'amélioration de l'auscultation des barrages anciens sans dispositif de mesures, ou équipés de dispositifs totalement ou partiellement vétustes, incomplets ou insuffisants.

Bien que les principes de base restent les mêmes, l'amélioration de l'auscultation des barrages existants n'est pas tout à fait identique à l'installation de dispositifs d'auscultation dans des barrages nouveaux. En effet, dans le cas d'un barrage en service, des problèmes spécifiques, par exemple des difficultés opératoires, peuvent se présenter; par contre, on dispose d'informations sur le comportement réel de l'ouvrage au cours des années écoulées.

Les tâches auxquelles doivent faire face les ingénieurs pour améliorer les dispositifs d'auscultation inadéquats sont énormes et spécifiques, étant donné le grand nombre de barrages anciens en exploitation et les techniques d'auscultation simplifiées généralement adoptées pour ces ouvrages. Aussi est-il apparu utile de traiter cette question de manière approfondie et d'y consacrer un Bulletin.

Je remercie les membres du Comité pour leur collaboration, ainsi que P. Bonaldi et G. Giuseppetti pour l'aide qu'ils m'ont apportée lors de la rédaction du texte.

A. Marazio
Président du Comité ad hoc
de l'Auscultation des Barrages Existants

FOREWORD

Monitoring is one of the most important activities for dam safety evaluation and surveillance.

This Bulletin provides recommendations for the improvement of the monitoring of existing dams where either a monitoring system does not exist, or it is wholly or partially obsolete, incomplete or insufficient.

Even though the basic principles remain the same, improving existing dam monitoring is a somewhat different problem from monitoring new dams, because specific problems such as logistic difficulties can arise and information on the actual past behaviour of the dam is available.

The task facing engineers in improving inadequate monitoring systems is really daunting and specific, considering the large number of old dams in operation and the very simplified monitoring techniques usually employed for these dams. There is evidently a need for in depth treatment of the subject, which this Bulletin is intended to meet.

It is my pleasure to thank all members of the Committee whose help made this Bulletin possible. I wish to extend my thanks to Eng. P. Bonaldi and Eng. G. Giuseppetti who contributed their time and experience and were of great help to me.

A. Marazio
Chairman, Ad Hoc Committee on Monitoring
of Existing Dams

1. INTRODUCTION

La sécurité des barrages en service présente deux aspects spécifiques : d'une part, le changement inévitable des caractéristiques des matériaux dû au vieillissements, aux nouvelles situations, aux variations cycliques des charges thermiques et hydrostatiques, aux événements exceptionnels tels que tremblements de terre, crues, etc.; d'autre part, « l'inadéquation » des ouvrages aux progrès techniques et technologiques.

Ces deux aspects sont intimement liés et doivent être examinés ensemble.

Si l'analyse complète de la situation indique que le barrage ne satisfait plus aux règles de sécurité et/ou de surveillance, tenant compte des techniques actuelles, le maître d'ouvrage, le cas échéant à la demande des autorités chargées du contrôle de la sécurité des barrages, devra prendre les mesures appropriées.

Des recommandations destinées à aider le maître d'ouvrage dans de telles tâches figurent dans les Bulletins 60 et 68 établis par le Comité de l'Auscultation des Barrages et de leurs Fondations et dans ceux préparés par le Comité du Vieillissement des Barrages. Le présent Bulletin passe en revue les problèmes (ainsi que les approches possibles) qui se posent lorsque le dispositif d'auscultation d'un barrage existant est vérifié, rénové, complété, simplifié, automatisé, ou lorsqu'un dispositif est installé pour la première fois. Le coût de telles interventions étant généralement élevé, il importe de l'évaluer avec soin.

Afin de guider le lecteur, des Annexes donnent des exemples concernant des barrages de divers types dans différentes situations.

Des recommandations sur les dispositifs spéciaux de surveillance de la stabilité des versants d'une retenue, lors du premier remplissage, d'une vidange rapide et d'un séisme, mériteraient également d'être préparées dans un proche avenir.

Un dispositif d'auscultation ne pourra être, objectivement, jugé adéquat que lorsqu'on aura acquis une connaissance approfondie de l'état effectif du barrage, de sa fondation et de la retenue. A cet effet, les enquêtes et études portent sur les points suivants :

- dossier de l'aménagement;
- inspections visuelles;
- dispositif d'auscultation existant;
- résultats des mesures antérieures;
- reconnaissances et études en laboratoire (si nécessaire);
- modèles mathématiques ou physiques pour analyse du comportement (si nécessaire);
- conformité avec les règles et techniques actuelles.

Lorsque les analyses précitées auront été exécutées, en totalité ou en partie, le dispositif d'auscultation pourra être réétudié, en tenant compte des facteurs suivants :

1. INTRODUCTION

The safety of dams in operation has two specific aspects : the inevitable change in the characteristics of the materials due to ageing, new situations, thermal and hydrostatic cycling, extraordinary events such as earthquakes, floods, etc.; their « inadequacy » in regard to the technical and technological state of the art that evolves with time.

These two aspects are closely interconnected from a practical standpoint, and one cannot be tackled without the other.

If the complete analysis of the situation indicates the dam no longer meets appropriate safety and/or monitoring standards, with reference to modern practice, the dam owner, mandated by the dam safety regulatory agency where applicable, must take the appropriate action.

Recommendations to help the manager in this task are given in Bulletins 60 and 68 by the Committee on Monitoring of Dams and their Foundations and in those prepared by the Committee on Dam Ageing. This Bulletin reviews those issues (and possible approaches) that arise when an existing dam monitoring system is inspected, updated, integrated, simplified, or automated, or a monitoring system is installed for the first time. As the investment is generally high, careful evaluation is of fundamental importance.

Examples of different types of dams in different situations are described in the Appendices to guide the reader.

Recommendations on a specialized system to monitor reservoir slope stability during first impounding, rapid drawdown and earthquake should appear in the near future.

The adequacy of a monitoring system can only be judged objectively after obtaining exhaustive knowledge on the actual state of the dam, foundation and reservoir. The points to be examined to obtain such knowledge include :

- project documents;
- visual inspections;
- existing monitoring system;
- instrumental records;
- site and laboratory investigations (if necessary);
- mathematical or physical models for behaviour analysis (if necessary);
- compliance with current regulations and modern practice.

The monitoring system can be replanned once all or some of the above-mentioned analyses have been carried out bearing in mind the following three factors :

- raisons de l'intervention;
- fréquence des interventions;
- choix des dispositifs de mesures.

Il faut également souligner que le dispositif d'auscultation d'un barrage est de faible utilité, sur le plan de la sécurité, s'il n'existe pas une organisation disposant d'un personnel et d'un budget suffisants pour effectuer les lectures et analyser les résultats.

Les raisons de l'intervention peuvent être de nature, d'importance et d'urgence différentes; on doit, en particulier, considérer les aspects suivants :

- a) absence ou inadéquation du dispositif d'auscultation pour fournir les informations sur la sécurité du barrage;
- b) comportement anormal observé (déplacements permanents observés, fissures, etc.);
- c) recherches scientifiques sur le comportement du barrage;
- d) extension, élimination des éléments inutiles et automatisation liée à des problèmes tels que : manque de personnel, erreur humaine, suppression du gardien du barrage.

En ce qui concerne la fréquence des interventions, il convient de tenir compte des trois points suivants :

- a) moment le plus approprié pour effectuer la première vérification du dispositif;
- b) nombre de fois que le dispositif doit être réexaminé après la première intervention;
- c) temps nécessaire aux travaux.

A ce propos, il faut noter que, lors de l'établissement du projet, la définition du dispositif d'auscultation ne peut pas toujours être optimale; l'optimisation du dispositif se fera ensuite au fur et à mesure de l'augmentation des connaissances sur le comportement réel de l'ouvrage.

Le choix du nouveau dispositif d'auscultation doit tenir compte :

- a) des solutions techniquement valables;
- b) des coûts.

Compte tenu des difficultés pouvant survenir lors de travaux sur des ouvrages en service, il y a lieu de mentionner que, pour les barrages non équipés de dispositifs d'auscultation, les dispositifs à installer pourront être assez simples, car on demandera à ceux-ci de détecter des anomalies préoccupantes pour la sécurité des barrages et non de fournir un état complet du comportement des ouvrages.

En cas de comportement anormal, les temps et moyens d'intervention seront imposés par la sécurité; chaque cas doit donc être examiné individuellement.

Un pays peut souhaiter que l'auscultation de ses barrages soit le plus moderne possible, de façon à :

- rendre les travaux d'auscultation aussi homogènes et uniformes que possible dans tout le pays;

- reasons for intervention;
- timing of the intervention;
- approach to instrumentation.

Instrumentation is of little use for the monitoring of dam safety unless there is an organization with the manpower and budget to take the readings and evaluate the results.

The reason for the intervention can be of different natures, importance and urgency, and in particular the following must be considered :

- a)* the inadequacy or absence of the monitoring system to collect information pertaining to the safety of the dam;
- b)* observed abnormal behaviour (permanent displacements, cracks, etc.)
- c)* investigation of behaviour of dam for research purposes;
- d)* enlargement, elimination of unnecessary parts and automation linked to problems such as shortage of personnel, human error, elimination of the dam attendant.

In regards to the timing of the intervention, three different points must be kept in mind :

- a)* the best moment to check the (existing) system for the first time;
- b)* how often the system must be re-examined after the first intervention;
- c)* the time needed to carry out the work.

The best configuration of the monitoring network cannot always be defined in the original phase and it may be necessary to review and improve it on the basis of the observed behaviour of the structure.

Designing the new instrumentation system must consider :

- a)* technically valid alternatives;
- b)* costs.

Bearing in mind the difficulties which may arise when working on existing, operating structures, previously uninstrumented dams can be provided with very simple systems intended to detect anomalies relevant to dam safety rather than a complete description of dam behaviour.

If any abnormal behaviour is noted, the times and means of intervention are dictated by safety, and therefore each case must be considered individually.

A nation may consider it desirable to maintain dam monitoring as up-to-date as possible so as to :

- make monitoring activities as homogeneous and uniform as possible throughout the country;

- réexaminer périodiquement, à la lumière de la technologie moderne, les dispositifs d'auscultation (parfois vétustes) afin de maintenir la sécurité des barrages à un niveau maximal.

Cet effort technique et financier considérable permettra également d'améliorer l'image d'une nation aux yeux du public, problème dont les ingénieurs sont de plus en plus conscients.

– periodically re-examine the (sometimes obsolete) monitoring systems, in the light of modern technological possibilities, so as to maintain the dams at maximum safety level.

This considerable engineering and cost effort will also help to improve its image in the eyes of the public, a problem which engineers are increasingly aware of.

2. ANALYSE DE LA SITUATION ACTUELLE

Les enquêtes énumérées et commentées ici doivent être considérées comme un résumé de toutes les recherches éventuelles permettant d'obtenir des renseignements sur l'état actuel du barrage; elles ne doivent pas cependant être prises en compte de manière séquentielle (certaines sont étroitement liées), ni être appliquées à tous les barrages.

Le type et le nombre d'enquêtes à entreprendre seront examinés cas par cas.

Les questions et études abordées ici sont décrites de façon plus détaillée dans les précédents Bulletins CIGB; on se limite ici à rappeler à l'ingénieur s'appêtant à rénover un dispositif d'auscultation les étapes à suivre avant d'entreprendre un travail qui, dans la plupart des cas, est exigeant aussi bien du point de vue économique que du point de vue de l'organisation.

Les types d'enquêtes possibles sont nombreux et vont des reconnaissances sur le site aux études en laboratoire, du réexamen du projet à l'interprétation des résultats des mesures disponibles.

Ces enquêtes feront connaître :

- le type de vieillissement (s'il existe) ou de détérioration subi (au sens large) par les matériaux;
- la présence et l'étendue de toutes discontinuités (fissures, fondation constituée de roche de faible qualité, etc.);
- les phénomènes qui se sont manifestés au cours des précédentes années d'exploitation du barrage et qui sont encore présents : dérives, mesures anormales, comportements inattendus, etc.);
- les appareils de mesure hors d'usage, ceux devant être réinstallés, ceux qui sont en état de marche mais sont inutilisés.

Les opérations effectuées au cours de cette phase visent à :

- constituer un dossier précis et détaillé relatif au barrage, où la situation actuelle de l'ouvrage est enregistrée ou mise à jour;
- avoir une connaissance du barrage aussi approfondie que possible;
- établir une banque de données sur le barrage, contenant les résultats de toutes les enquêtes effectuées.

Comme déjà mentionné, les nombreux renseignements recueillis de cette façon permettront à l'ingénieur de déterminer la fiabilité du dispositif d'auscultation existant et de réétudier le dispositif en pleine connaissance des faits.

2.1. DOSSIER DE L'AMÉNAGEMENT

Il convient de :

- réexaminer tous les documents de projet et s'assurer que l'exécution des travaux est conforme en tous points aux plans du projet;

2. ANALYSIS OF PRESENT SITUATION

Those investigations listed and commented on must be considered as a summary of all the investigations possible to obtain data on the current state of the dam, but they must not be considered in a sequential way (many of these items are closely interconnected) nor as items that are necessary for each dam.

Which and how many of these investigations must be carried out must be analysed case by case.

Matters and investigations proposed here are described in much greater detail in previous ICOLD Bulletins; herein these are intended only to remind the engineer who is preparing to restore the monitoring system as to which steps are recommended before undertaking a job that in most cases is exacting both from an economic and organizational standpoint.

There are many types of investigations : from *in situ* investigations to those in the laboratory, from the re-examination of the project to the interpretation of measurement data already available.

The following must emerge from these investigations :

- what type of ageing (if any) or deterioration has the material suffered (considered in a broader sense);
- the presence and extent of any discontinuities (cracks, weak rock foundations etc.);
- phenomena that occurred during past service years of the dam and that are still present : drifts, abnormal measurements, unexpected behaviours etc.;

- which sensors are out of use, which have been re-installed, which are still in working order but not used.

Those operations carried out during this phase aim to :

- draw up an accurate and detailed « file » on the dam, where the present situation of the dam is recorded or updated;
- make the most of the knowledge of the dam, that is sometimes not practically organized;
- set up a data bank of the dam in question, in which the results of all the investigations carried out are stored.

As already mentioned, an abundant store of knowledge organized in this way will enable the engineer to determine the reliability of the existing monitoring system and to replan the monitoring system with full knowledge of the facts.

2.1. PROJECT DOCUMENTS

In this phase, it is best to :

- re-examine all project documents and make sure that construction of works meets exactly the project plans;

- rassembler et relire tous les documents relatifs à la construction et à la réception du barrage;
- réévaluer la sécurité du « nouvel » ouvrage, en tenant compte de sa géométrie actuelle, des caractéristiques actuelles des matériaux et de toutes discontinuités éventuelles.

Les calculs seront effectués d'après les règles en vigueur dans le pays où est situé le barrage et suivant les techniques disponibles (par exemple, utilisation de la méthode des éléments finis pour les calculs statiques et dynamiques).

Ces calculs exécutés selon des critères modernes visent à élargir la connaissance de l'ingénieur sur le barrage et à réduire la marge d'incertitude résultant de calculs normaux effectués conformément à la réglementation.

2.2. INSPECTIONS VISUELLES

Les méthodes d'inspection sont largement décrites dans le Bulletin 59 de la CIGB.

Très souvent, les modifications de l'état d'un barrage ne sont détectées que par des inspections visuelles, pouvant être déterminantes pour décider du réexamen ou de la rénovation du dispositif d'auscultation. Une banque de données mémorisée contenant les résultats des inspections peut être utile pour la comparaison et l'identification des situations anormales.

Il convient d'effectuer une inspection détaillée afin de recueillir toutes les informations possibles, avant de réétudier les dispositifs d'auscultation des barrages non soumis à des inspections systématiques.

2.3. DISPOSITIF D'AUSCULTATION EXISTANT

La première opération à effectuer sur le dispositif d'auscultation existant consiste à reconstituer la disposition des appareils de mesure, leur emplacement exact, la précision et la fréquence de lecture de chaque appareil. Ce contrôle doit également permettre de déterminer les appareils qui peuvent être automatisés et ceux qui ne peuvent faire l'objet que de relevés manuels. Il peut s'avérer très utile de connaître le mode de fonctionnement de l'appareil : corde vibrante, résistance électrique, induction électromagnétique, etc.

Il y a intérêt, pour chaque appareil de mesure installé, à noter l'âge des lectures et à examiner si celles-ci sont enregistrées sur des bandes magnétiques appropriées. Il est important de disposer de résultats antérieurs de façon à pouvoir évaluer l'importance des grandeurs mesurées par rapport au comportement du barrage.

En fait, les informations recueillies sont utilisées pour décider s'il convient de rénover ou d'étendre le dispositif d'auscultation, ou, par contre, d'abandonner des mesures qui se sont avérées inutiles ou peu utiles (étant donné qu'elles ont une faible importance pour la connaissance du comportement du barrage, ou que les lectures sont difficiles à exécuter ou à interpréter, etc.).

- recover and reread all those documents relating to the dam construction and acceptance;
- re-evaluation of the safety of the « new » structure bearing in mind its actual geometry, material characteristics and any discontinuities, if applicable.

Calculations must be made according to the standards of the country the dam belongs to and state of the art available (for example; calculations that use the Finite Element Method both for static and dynamic analysis).

Those calculations, made according to criteria adopted by the state of the art, aim to widen the engineer's knowledge of the dam and reduce any margin of uncertainty resulting from normal calculations made in accordance with regulations.

2.2. VISUAL INSPECTIONS

The use and procedures of inspection are amply described in ICOLD Bulletin 59.

In many cases, changes in the dam's integrity are detected only by visual inspections that can play a very important part in the decision of whether to re-examine or update the monitoring system. A computerized data base of inspection results can be a useful instrument to compare and identify irregular situations that are developing.

A detailed inspection to collect all the information possible on the dam must be carried out before replanning the monitoring system of those dams not subject to systematic and repeated inspections.

2.3. EXISTING MONITORING SYSTEM

The first operation to be carried out on this monitoring system is that of reconstructing the layout of those sensors installed in the dam, their exact location, precision and the reading frequency of every instrument. This check must also point out which sensors can be automated and which can be read only manually. It may be very useful to indicate on which principle the sensor functions : vibrating wire, electrical resistance, electromagnetic induction, etc.

It is best to note, for every instrument installed, how old the data is and if it is recorded on appropriate magnetic support. It is important to have past data available so that the importance of the magnitude measured can be judged in relation to the dam behaviour.

In fact, the information collected is used not only to decide whether to update or extend the monitoring system, but also whether to abandon a series of measurements that have proved to be of little or no use (as they are of little importance for obtaining knowledge on dam behaviour, or difficult to read or to interpret, etc.).

Il importe de tenir compte des possibilités offertes par de nouveaux appareils (plus grandes simplicité et/ou fiabilité, etc.) avant d'éliminer une de ces mesures.

2.4. RÉSULTATS DES MESURES ANTÉRIEURES

L'analyse des mesures antérieures doit permettre de connaître le comportement du barrage au cours des années écoulées, en vue d'en tirer le meilleur profit.

Aujourd'hui, cette analyse peut être effectuée efficacement grâce au traitement des données sur ordinateur. A cet effet, toutes les mesures antérieures seront transférées sur bande magnétique. Si la récupération des mesures pour toutes les précédentes années d'exploitation représente un travail trop lourd, on peut se limiter à analyser les mesures concernant les 5 ou 10 dernières années de la vie de l'ouvrage; il est parfois conseillé de remonter suffisamment loin dans le temps afin d'englober les événements importants survenus dans le passé; on peut remonter jusqu'à la première mise en eau en retenant seulement les mesures les plus significatives.

Lorsque les mesures auront été reportées sur un support facile à utiliser, elles seront convenablement traitées, validées, portées sur des graphiques et interprétées, en partant de méthodes simples (moyennes, moyennes mobiles, corrélations, analyses de Fourier) pour aller à des méthodes plus complexes (comparaison avec des modèles numériques).

Les opérations de traitement précitées ont pour but :

- d'interpréter l'évolution du comportement du barrage dans le temps, de façon à déceler des dérives, des phénomènes traduisant un comportement anormal de l'ouvrage, ou à sélectionner les mesures (et donc les appareils) utiles à la connaissance du barrage;
- de détecter les appareils qui ont mal fonctionné (et connaître ainsi leur niveau de fiabilité), ou qui ne sont plus nécessaires à l'auscultation de l'ouvrage.

2.5. RECONNAISSANCES ET ÉTUDES EN LABORATOIRE

Ces reconnaissances et études seront uniquement effectuées si l'on n'a aucune (ou qu'une très faible) connaissance initiale du barrage, ou si des signes manifestes ou suspects de détérioration se présentent; elles définiront la situation actuelle du barrage et de sa fondation, permettant ainsi de savoir s'il est nécessaire de vérifier le dispositif d'auscultation à la lumière des modifications des conditions du barrage.

Le programme de ces reconnaissances et études doit donc permettre :

- de déterminer des caractéristiques que l'on n'avait pas acquises au moment de la construction, du fait que leur obtention n'avait pas été jugée nécessaire ou n'avait pas été techniquement possible;
- de détecter et de quantifier le niveau de détérioration suspectée des matériaux du corps du barrage et de sa fondation;
- de procéder à des opérations qui ne seraient pas possibles au moyen d'appareils permanents (pour des raisons techniques ou économiques).

It is important to bear in mind the possibilities offered by new sensors (greater simplicity and/or reliability, etc.) before eliminating any of these measurements.

2.4. INSTRUMENTAL RECORDS

Analysis of previous data is the time at which past knowledge of the dam must be organized and put to the greatest use.

Nowadays, this analysis can be carried out efficiently by processing data with a computer. For this, all previous data must be transferred onto magnetic support. If this data recovery activity for all past years of operation is too burdensome, a reasonable compromise could be that of reorganizing and analyzing only the last 5 or 10 years of the structure's life, so long as it does not involve neglecting important events that took place in the past (in this case, it is best to go back in time till the event in question), and then go back to the first filling only for the most significant measurements.

Once data is organized on easy-to-use support, it is appropriately processed, validated, diagrammed and interpreted, from the simplest processes (to obtain averages, mobile averages, correlations, Fourier analyses), to those more complex ones for comparison with numeric models.

The above-mentioned processing operations are used to :

- interpret histories so as to point out if there are any drifts in progress or phenomena that signal irregular behaviour, or to check what measurements (and therefore instruments) are useful for knowledge of the dam;
- deduce which instruments have had one or more malfunctions during their life (and therefore how reliable they are), or no longer meet monitoring needs.

2.5. SITE AND LABORATORY INVESTIGATIONS

These investigations, that must be carried out only if there is no initial knowledge of the dam or if there are obvious or suspected signs of deterioration, identify the actual situation of the dam and its foundation, so as to justify whether it is necessary to examine the monitoring system in the light of modified dam conditions.

Therefore, investigations must be programmed to :

- carry out determinations that were not put into practice when constructed, because they were not considered necessary or were beyond the state of the art at that time;
- carry out determinations able to detect and quantify state of suspected material deterioration both of the body of the dam and its foundations;
- carry out determinations that would not be possible with permanent type instruments (for technical/or economic reasons).

Les reconnaissances et études destinées à déterminer l'état de détérioration des matériaux sont particulièrement importantes, étant donné que tous les ouvrages sont sujets au vieillissement et donc à un risque de détérioration.

Il faut noter que ces reconnaissances et études visant à constater un état de détérioration ne se limitent pas à définir les grandeurs et les éléments d'ouvrage que le nouveau dispositif d'auscultation doit suivre avec soin; elles permettent également d'acquérir les paramètres nécessaires à la définition des travaux éventuels de réparation du barrage et de sa fondation.

Le programme de reconnaissances et d'études doit donc :

- évaluer le niveau de détérioration et les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux du corps du barrage et de sa fondation;
- détecter tous dégâts ou fissures, et définir leurs caractéristiques géométriques, en particulier leur emplacement dans l'ouvrage;
- contrôler l'efficacité des organes d'étanchéité (rideau d'étanchéité, paroi moulée, masque amont, noyau d'étanchéité);
- contrôler l'état de contraintes et de déformations;
- diagnostiquer les causes des détériorations.

Certaines des reconnaissances et études précitées peuvent être répétées périodiquement afin de vérifier l'évolution des caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux du barrage et de sa fondation (par exemple, périodicité de cinq-dix ans).

Les résultats obtenus serviront à étudier les travaux de réparation des ouvrages de génie civil et des organes hydrauliques, ainsi qu'à définir un dispositif d'auscultation plus précis et plus moderne.

2.6. MODÈLES MATHÉMATIQUES OU PHYSIQUES POUR ANALYSE DU COMPORTEMENT

Il est possible d'utiliser aujourd'hui des modèles numériques pour étudier la situation réelle des ouvrages. Les modèles physiques peuvent également être utilisés, mais ils sont incontestablement plus coûteux et demandent plus de temps bien qu'ils soient mieux connus. Lorsqu'un modèle théorique de référence n'a jamais été établi pour les travaux en question, le réexamen du dispositif d'auscultation est sans aucun doute une excellente occasion de mettre au point un modèle théorique valable permettant de faire des comparaisons avec le comportement réel du barrage.

Il faut donc considérer le modèle comme partie intégrante du nouveau dispositif d'auscultation : de même que les appareils de mesure installés dans le barrage contrôlent le comportement réel de l'ouvrage, de même le modèle théorique de référence « mesure » son comportement idéal et prévu.

Il existe différents types de modèles de référence, tels que :

- modèles statistiques;
- modèles déterministes;
- modèles hybrides.

Those investigations aimed at determining the state of material deterioration are of particular importance as all structures are subject to ageing and therefore deterioration risk.

It must be noted that those investigations used to ascertain a state of deterioration not only identify those magnitudes and structural elements that must be kept more carefully under observation with the new monitoring system, but also acquire those parameters needed to plan possible remedial works on the dam and its foundations.

Therefore, the series of investigations must :

- evaluate the state of deterioration and physical and mechanical characteristics of the materials and foundation;
- identify any cracking and damage and their geometric characteristics, in particular their spatial distribution throughout the structure;
- check the efficiency of the sealing elements (curtain or diaphragm wall, upstream face, core);
- check the state of stress and deformation;
- diagnose the cause that have produced the state of deterioration.

Some of the above-mentioned investigations can be repeated periodically to check whether the physical and mechanical characteristics of the materials and the foundation rock have deteriorated (for example an appropriate period of time could be every five-ten years).

The results of the investigations are used both to plan structural or hydraulic restoration and a more precise and up-to-date monitoring system.

2.6. MATHEMATICAL OR PHYSICAL MODELS FOR BEHAVIOUR ANALYSIS

Nowadays, numeric models can be used to examine the actual situation of the structures. Obviously physical models can also be used but they are decidedly more expensive and time consuming even though they are better-known. If a theoretic reference model has never been built before for the works in question, replanning of the monitoring system is undoubtedly an occasion to develop a valid theoretic model if warranted, to compare with the actual behaviour of the dam.

Therefore, the model needs to be considered as an integral part of the new monitoring system : just as those sensors installed in the dam monitor the actual behaviour of the structure, the theoretic reference model « measures » its ideal and expected behaviour.

There are different types of reference models such as :

- statistical models;
- deterministic models;
- hybrid models.

Le comportement statique des barrages est généralement étudié à l'aide de ces modèles, mais ceux-ci peuvent également être utilisés pour analyser le comportement dynamique prévu pour les barrages situés dans des zones sismiques. Dans ce dernier cas, les résultats de mesures (vitesses et accélérations de points significatifs du barrage, au cours d'un séisme, d'une explosion, d'excitations naturelles ou forcées) peuvent être comparés aux résultats obtenus sur les modèles.

En ce qui concerne l'utilisation des modèles numériques, il est particulièrement important d'évaluer soigneusement et de bien comprendre la fiabilité, la validité et l'étalonnage de ces modèles.

2.7. CONFORMITÉ AVEC LES RÈGLES ET TECHNIQUES ACTUELLES

Lors du réexamen d'un barrage, il faut tenir compte des progrès techniques et scientifiques, ainsi que de la connaissance du comportement du barrage au cours des années écoulées.

En fait, il s'agit d'un ouvrage existant et non d'un ouvrage à construire; aussi, certaines incertitudes se présentant au stade du projet sont-elles substantiellement réduites; il se peut, en outre, que le comportement effectif de l'ouvrage ait été observé, mesuré et interprété sur une longue période. On doit se rappeler tout cela si un barrage existant ne répond pas aux nouveaux critères ou règles.

Lorsqu'on analyse les résultats d'un nouveau contrôle d'un barrage, on doit tenir compte des éléments suivants :

- l'esprit des règles consiste à exécuter un calcul courant, en laissant toutefois la possibilité d'effectuer des analyses plus sophistiquées permettant de mieux prévoir le comportement de l'ouvrage;
- dans le cas d'un barrage en service, on dispose d'une quantité considérable de résultats sur son comportement réel; ceux-ci doivent être pris en compte et utilisés de manière appropriée.

A la lumière de ces remarques, la mise en place d'un dispositif plus précis et automatique, permettant d'évaluer le comportement du barrage en temps réel, peut constituer un facteur décisif pour continuer l'exploitation de l'ouvrage, même si celle-ci n'est pas conforme aux règles en vigueur, mais est compatible avec le comportement passé de l'ouvrage; cela s'applique particulièrement aux barrages qui ont déjà supporté les plus sévères conditions de charge (crues, séismes).

The static behaviour of the dam is usually examined with these models, but they can also be used to analyse the expected dynamic behaviour of dams in seismic areas. Here too, measurement data (velocity and acceleration of significant points of the dam during an earthquake, explosion, forced and/or natural excitations, etc.) can be compared to those obtained by models.

A particularly important point in the use of numeric models is their reliability, validity and calibration that must be carefully evaluated and understood.

2.7. COMPLIANCE WITH CURRENT REGULATIONS AND MODERN PRACTICE

When re-examining a dam, both the developments of technical and scientific knowledge and the knowledge of the past behaviour of the dam must be considered.

In fact, one is not faced with structures that still have to be built but a real, existing structure; therefore, some of the uncertainties which must be considered during the design stage are substantially reduced, and the actual behaviour of the structure may have been observed, monitored and understood for a long period of time. All this must not be forgotten if an existing dam does not meet with new criteria or regulations.

When examining the results of a dam recheck, the following elements must be kept in mind :

- the spirit of regulations is that of establishing a calculation standard, however leaving room for more sophisticated analyses that predict behaviour more realistically;
- in the case of a dam in operation, there is a considerable amount of data on its actual behaviour, that must be appropriately considered and used.

In the light of these remarks, the implementation of a more accurate and automatic system that evaluates the dam performance in real time could be a decisive factor in continuing dam operation even if it is not consistent with current regulations, but consistent with its past behaviour, particularly for those dams that have already experienced the most severe loading conditions (floods, earthquakes).

3. RECOMMANDATIONS SUR LE NOUVEAU DISPOSITIF D'AUSCULTATION

La connaissance complète de la situation réelle du barrage, obtenue grâce aux reconnaissances et études mentionnées ci-dessus (l'étendue de celles-ci dépendant du cas examiné), fait que l'étude du nouveau dispositif d'auscultation ou de la rénovation du dispositif existant peut être abordée de manière rationnelle.

Jusqu'ici, on a effectué ce type de réexamen à la suite d'événements particuliers ou de mauvais fonctionnements; toutefois, si l'auscultation est considérée d'un point de vue plus systématique et rationnel, on peut appliquer un tel réexamen à tout barrage.

3.1. RAISONS DE L'INTERVENTION

Les raisons de l'installation de dispositifs d'auscultation efficaces sont amplement décrites dans les Bulletins antérieurs 60 et 68.

Les raisons qui conduisent généralement l'exploitant à améliorer un dispositif d'auscultation comprennent :

- inadéquation, insuffisance ou absence de dispositif (diagnostic et raisons de sécurité);
- recherches scientifiques;
- extension, élimination des éléments inutiles et automatisation résultant de problèmes logistiques.

3.1.1. Grandeurs susceptibles d'être mesurées

Le Bulletin 68 de la CIGB donne des informations détaillées sur les grandeurs susceptibles d'être mesurées sur un barrage en service, suivant leur importance du point de vue du contrôle de la sécurité ou du point de vue de l'étude scientifique. Il est recommandé de se référer à ce Bulletin pour le réexamen d'un dispositif d'auscultation.

a) *Grandeurs susceptibles d'être mesurées en vue de détecter d'éventuelles situations critiques ou anormales :*

- i) Barrages en béton ou en maçonnerie
 - niveau de la retenue,
 - températures de l'air et de l'eau,
 - bathymétrie du réservoir,
 - déplacements horizontaux du barrage,
 - déplacements verticaux du barrage,

3. RECOMMENDATIONS ON NEW MONITORING SYSTEM

Complete knowledge of the actual situation of the dam, obtained with the above-mentioned investigations (all or in part depending on the actual needs of the case in question), means that the design of the new monitoring system or updating of the existing one can be tackled rationally.

Up to now, this type of re-analysis is carried out as a result of particular events or malfunctions, but if monitoring is seen from a more systematic and rational point of view it could be used for any dam.

3.1. NEED FOR ACTION

The reasons for installing effective monitoring systems are widely described in the previous Bulletins 60 and 68.

The reasons that more commonly lead the manager to take action with reference to the improvement of the monitoring system include :

- monitoring system inadequacy, insufficiency or absence (diagnostic and safety reasons);
- research purposes;
- enlargement, elimination of unnecessary parts, and automation owing to logistic problems.

3.1.1. Measurable quantities

The quantities that can be monitored on a dam in operation have been amply described in ICOLD Bulletin 68, according to their importance from a safety, behaviour control and study point of view. This Bulletin is a reference source for monitoring system replanning.

a) *Quantities that can be monitored to point out possible critical or irregular situations*

- i) For concrete or masonry dams :
 - storage level;
 - air and water temperatures;
 - basin bathymetry;
 - dam horizontal displacements;
 - dam vertical displacements;

- rotations du barrage,
- évolution de fissures dans le corps du barrage,
- déplacements horizontaux de la fondation,
- déplacements verticaux de la fondation,
- mouvements relatifs entre le béton du barrage et le rocher de fondation,
- percolations dans le barrage et la fondation,
- sous-pressions,
- turbidité et analyse chimique des eaux de fuite.

ii) Barrages en remblai

- niveau de la retenue,
- bathymétrie du réservoir,
- pressions interstitielles dans le corps du barrage et la fondation,
- percolations dans le barrage et la fondation,
- nappe phréatique dans la fondation,
- turbidité des eaux de fuite;
- tassements du barrage,
- déplacements horizontaux du barrage,
- déplacements et/ou fissuration des ouvrages en béton (évacuateurs de crue, etc.).

b) *Grandeurs susceptibles d'être mesurées pour des recherches scientifiques ou une amélioration des connaissances*

i) Barrages en béton ou en maçonnerie

- neige et pluie,
- pression atmosphérique,
- humidité,
- épaisseur de la glace,
- mouvement des joints,
- contraintes et déformations unitaires dans le corps du barrage,
- déformations du rocher de fondation,
- températures du béton.

ii) Barrages en remblai

- température de l'air,
- neige et pluie,
- pression atmosphérique,
- humidité,
- température de l'eau,
- épaisseur de la glace,
- déformations,
- pression totale.

- dam rotations;
 - crack development in body of dam;
 - foundation horizontal displacements;
 - foundation vertical displacements;
 - relative movements between dam concrete and rock foundation;
 - seepage through the dam and the foundation;
 - uplift pressures;
 - leakage turbidity and chemical analysis.
- ii) For embankment dams :
- storage level;
 - basin bathymetry;
 - interstitial pressures in the dam body and in the foundation;
 - seepage through the dam and the foundation;
 - foundation water table;
 - leakage turbidity;
 - dam settlements;
 - dam horizontal displacements;
 - displacements and/or cracking of concrete structures (spillways, etc.).

b) *Quantities that can be monitored for study purposes or to widen knowledge*

- i) For concrete or masonry dams :
- snow and rain;
 - atmospheric pressure;
 - humidity;
 - ice thickness;
 - joint movement;
 - stresses and strains in the dam body;
 - foundation rock deformations;
 - concrete temperature.
- ii) For embankment dams :
- air temperature;
 - snow and rain;
 - atmospheric pressure;
 - humidity;
 - water temperature;
 - ice thickness;
 - deformations;
 - total pressure.

Les recommandations présentées dans le Bulletin 68 et concernant un barrage nouveau peuvent être utilisées pour le choix des types et de l'emplacement des appareils de mesure devant être installés dans un barrage existant. L'association des évaluations techniques, économiques et relatives à l'organisation définira la solution convenant le mieux à chaque cas, et représentant le meilleur compromis entre la solution optimale et celle (ou celles) compatible (s) avec l'engagement financier.

3.1.2. Dispositif d'auscultation inadéquat

Lorsqu'on réétudie le dispositif d'auscultation d'un barrage existant, il faut déterminer les grandeurs fondamentales pour le contrôle de la sécurité et pour la compréhension du comportement du barrage, de telles grandeurs n'ayant pas été mesurées ou leurs mesures n'ayant pas été faites aux bons emplacements ou avec les fréquences nécessaires.

Un exemple significatif de ce problème est fourni par des barrages anciens où le comportement des fondations (déplacements, déformations, pressions) n'est généralement pas mesuré. Lors du réexamen du dispositif d'auscultation, une telle surveillance ne devra donc plus être négligée et on considérera l'installation de nouveaux appareils : pendules inversés, extensomètres à longue base, inclinomètres, piézomètres, etc. On ne s'est pas rendu compte parfois, dans le passé, de l'importance du comportement de la fondation, le barrage proprement dit et sa fondation étant considérés comme un seul élément.

La charge thermique est également un autre paramètre qui a été parfois négligé dans le passé.

En fait, pour les barrages en béton, la connaissance des variations des températures à l'intérieur de la masse de béton est très importante (principalement pour les barrages minces), chaque fois que le comportement du barrage est étudié sur des modèles déterministes.

Souvent, l'auscultation n'a pas tenu compte également des effets sismiques. Lors de la révision d'un barrage, on devra donc examiner avec soin l'extension du dispositif d'auscultation en vue de permettre des mesures sismiques (principalement si la classification sismique du site du barrage a été modifiée, l'ouvrage étant déjà en service).

Les importants progrès technologiques et techniques, aussi bien dans le domaine des appareils de mesure et des systèmes d'acquisition de données que dans celui du traitement et de l'interprétation des données acquises, permettent aujourd'hui de contrôler efficacement le comportement d'un barrage au cours d'un séisme, grâce à l'installation d'un réseau d'auscultation sismique.

A partir d'essais expérimentaux *in situ* (par exemple, en utilisant des excitateurs mécaniques), on peut mesurer les paramètres fondamentaux du comportement dynamique réel du barrage (fréquences naturelles, formes modales, facteurs d'amortissement); on peut alors étalonner les modèles numériques pour évaluer le seuil sismique au-dessous duquel le barrage peut être considéré comme sûr et au-dessus duquel des dégâts sont susceptibles de se produire.

Indépendamment de ces exemples, il convient de vérifier si toutes les grandeurs mentionnées au point a) du paragraphe 3.1.1 ont été prises en compte dans le dis-

The guidelines defined in Bulletin 68 for a new dam can be used to select the type and position of instruments to be installed on an existing dam. The combination of technical, economic and organizational evaluations will identify the most appropriate solution for each case, that is the best compromise between the optimal solution and that (or those) compatible with the economic commitment.

3.1.2. Monitoring system inadequacy

When replanning the monitoring network of an existing dam, it must be noted whether there are any quantities that are of fundamental importance to monitor safety and understand the behaviour of the dam, that for some reason have not been monitored, or not monitored in the right points with the necessary frequency.

A significant example of this problem is found in older dams where foundation behaviour (displacements, deformations, pressures) is not usually measured. Therefore, when the monitoring system is re-examined, this can no longer be neglected and the installation of new inverted plumb lines, long base extensometers, inclinometers, piezometers, etc., need to be considered. This is because the importance of foundation behaviour for a dam might not have been understood in the past, so much so that the two parts are considered as one.

Thermal load is another quantity that was sometimes neglected in the past.

In fact, for concrete dams, knowledge of temperature variations within the concrete mass is of primary importance (especially for thin dams) every time the behaviour of the dam is monitored with deterministic type models.

Seismic effects were also usually ignored in the monitoring activities. Therefore, during the dam recheck, the enlargement of the monitoring network to acquire seismic quantities should be carefully considered (mostly if the seismic classification of the dam site has been changed when the dam was already in operation).

The great improvement of the technology and the state of the art, both in instrumentation and acquisition systems, and in processing and interpreting the acquired data, enables nowadays an effective and timely check of dam behaviour during a seismic event by means of the installation of a seismic monitoring network.

Using *in situ* experimental tests (e.g. using mechanical exciters), the fundamental parameters of the actual dynamic behaviour of the dam (natural frequencies, mode shapes, damping values) can be measured; numerical models can then be calibrated and used to evaluate the seismic threshold below which the dam can be considered safe and above which possible damages can occur.

Apart from these examples, at this point it is best to check whether all the quantities referred to in point a) of paragraph 3.1.1 have been taken into account in

positif d'auscultation examiné, et de déterminer, en tenant compte également des conditions particulières du site, quels éléments du dispositif d'auscultation existant sont inappropriés.

3.1.3. Recherches scientifiques sur le comportement des barrages

Les grandeurs indiquées au point b) du paragraphe 3.1.1 seront aussi mesurées si l'expérience des ouvrages sert à développer des études, à améliorer des méthodes ou à élargir les connaissances sur les barrages en exploitation.

Compte tenu du caractère particulier de cette motivation, il apparaît évident que l'extension du dispositif d'auscultation n'est généralement pas urgente, ni limitée uniquement aux grandeurs susmentionnées (représentant seulement la partie courante et minimale pour une étude plus approfondie); chaque cas nécessitera des mesures particulières.

On peut citer comme exemple l'étude des variations « thermiques » dans le corps du barrage et des réactions de l'ouvrage qui en résultent. Dans ce cas, une rénovation adéquate du dispositif d'auscultation examinera la possibilité de mesurer le paramètre thermique, soit directement (en installant des sondes thermiques sur les parements et dans le corps du barrage), soit indirectement (en mesurant approximativement les variations thermiques sur les deux parements et en connaissant les caractéristiques thermiques des matériaux).

D'autres aspects indiqués ci-après peuvent également être mis en évidence, même s'ils ne sont pas directement liés à l'auscultation de l'ouvrage.

L'installation d'indicateurs de niveau d'eau et de pluviomètres aux points stratégiques du bassin versant est un aspect important dont il faut tenir compte lors du réexamen d'un dispositif d'auscultation (du point de vue de l'étude et de la recherche). En fait, l'installation de tels appareils de mesure, équipés de dispositifs appropriés pour l'interprétation des données recueillies, peut fournir des prévisions utiles sur les apports d'eau dans la retenue, permettant ainsi une bonne exploitation du dispositif d'auscultation tout en signalant les crues.

Une meilleure connaissance hydrologique, s'appuyant sur un réseau de mesures adéquat, peut limiter considérablement les risques de déversements dangereux et optimiser la gestion de l'eau.

En outre, si les évacuateurs de crue sont sous-dimensionnés, on peut envisager – **dans une certaine limite** – l'installation de dispositifs de prévision et d'alerte, du type susmentionné, comme alternative aux interventions sur ces ouvrages. Il va sans dire que **tout cela est dans une phase expérimentale et d'étude**, mais semble répondre à toutes les exigences; **il faudra toutefois analyser de près certaines réalisations** avant qu'un tel procédé ne devienne une pratique courante dans l'avenir.

3.1.4. Éléments inutiles du dispositif d'auscultation

Comme déjà mentionné au paragraphe 2.3, la rénovation d'un dispositif d'auscultation peut entraîner également l'abandon de certaines mesures qui ne sont plus du tout utilisées. Cependant, ce n'est pas toujours une décision facile à prendre; en effet, on estime souvent qu'il est préférable de continuer ces mesures, même si elles semblent inutiles pour le moment, car il se peut qu'elles deviennent utiles par la

the monitoring system in question, and to determine, taking into account also site specific conditions, which facets of the existing monitoring system are inadequate.

3.1.3. Knowledge of behaviour for research purposes

Those quantities referred to in point b) of paragraph 3.1.1 should also be monitored when experience of the works is needed to develop studies, improve methods or widen know-how on dams in operation.

It is obvious that, owing to the specificity of this motivation, the extension of the monitoring system is not usually urgent or limited only to the above-mentioned quantities (that represent only the common and minimal part for a more exhaustive study), but particular measurements will be requested from case to case.

An example could be that relating to the investigation of « thermal » variations within the dam body and consequent structural responses. An appropriate updating of the monitoring system should in this case take into consideration the possibility of recovering the knowledge of this quantity directly (installing thermal sensors on the surface and inside the dam mass) or indirectly (measuring approximately the thermal variations of the two faces and knowing the thermal characteristics of the materials).

Other aspects, described hereunder, can also be put in evidence, even if they are not directly connected to the monitoring of the structure.

An important aspect to be kept in mind when re-examining a monitoring system (from a study and research point of view) is that relating to the installation of water level indicators and rain gauges in points of the catchment basin that are of strategic importance. In fact, these types of systems, appropriately equipped with the means to interpret the data collected, can provide useful forecasts on the hydrologic input to the reservoir so that the system can be managed correctly and at the same time signalling floods.

Current improved hydrologic knowledge (if equipped with suitable measuring networks) could greatly limit the risks of dangerous overtopping and could optimize water management.

Moreover, if the discharge capacity does not appear adequate, forewarning systems of the above-mentioned type could be taken into consideration, **within certain limits**, as an alternative to structural interventions. Needless to say **all this is in the experimental and study phase** but seems to meet all those requirements, **if appropriately analysed through certain practical achievements**, necessary to become routine in the near future.

3.1.4. Monitoring system redundancy

As already mentioned in paragraph 2.3, updating a monitoring system involves also abandoning the collection of those measurements that are not used in any way. However, this is not always an easy decision to make, as often it is considered best to continue collecting even those measurements that at that moment seem useless, but could become useful in the future. Therefore, the effort put into collecting all

suite. L'exécution de toutes les mesures – même de celles qui s'avèrent inutiles à l'époque considérée – peut être estimée comme un investissement à long terme.

Cependant, ceci ne s'applique pas aux appareils de mesure dont le fonctionnement n'est pas fiable. Ces mesures seront abandonnées afin d'éviter une confusion et des efforts inutiles.

En ce qui concerne les mesures valables du point de vue numérique, mais inutiles (ou inutilisées) pour l'auscultation du barrage (par exemple, mesures extensométriques, souvent importantes lors de la construction et de la première mise en eau, mais non au cours de l'exploitation normale d'un barrage), chaque cas doit être examiné individuellement avant de prendre une décision sur leur abandon éventuel. Si toutefois on décide de les conserver, il convient alors de procéder au traitement des mesures et de classer les résultats dans un dossier.

3.1.5. Automatisation

Le Bulletin CIGB 68 « Auscultation des barrages et de leurs fondations – technique actuelle » examine en détail les avantages et les inconvénients des dispositifs d'acquisition automatique des données pour l'auscultation des barrages.

On reconnaît, en général, que le traitement et l'analyse des données sont plus rapides et plus sûrs en utilisant de tels dispositifs. Une accessibilité permanente et une fréquence plus élevée de lectures, si nécessaire, sont considérées également comme des avantages. La fiabilité douteuse de l'équipement électronique et des raccordements des lignes de transmission est compensée par l'élimination de l'erreur humaine dans les opérations. En général, on observe une tendance à l'automatisation d'au moins une partie des mesures à exécuter, en vue de réduire les coûts des opérations.

Il convient cependant de noter que l'automatisation ne signifie pas l'élimination totale des inspections visuelles, aucun dispositif de mesures ne pouvant fournir des informations sur ce qui se passe en des points de l'ouvrage non équipés d'appareils.

La rénovation d'un dispositif d'auscultation existant – ou l'installation d'un dispositif sur un barrage qui n'en comporte pas – est une excellente occasion pour étudier si une automatisation est justifiée. L'exécution simultanée des deux opérations, c'est-à-dire la mise en place d'appareils de mesure et l'automatisation, peut s'avérer économique. Il est probable que le coût en personnel augmentera si le dispositif d'acquisition des données n'est pas automatisé. Certains appareils de mesure existants nécessiteront des modifications ou, à l'extrême, un remplacement, pour les adapter aux lectures automatiques, même si leur fonctionnement a toujours été satisfaisant depuis leur installation.

Il faut se rappeler que l'évaluation de la sécurité du barrage relève de la responsabilité de l'ingénieur, à qui incombent l'analyse et l'interprétation des informations fournies par le dispositif d'acquisition des données, qu'il y ait ou non automatisation.

3.2. FRÉQUENCE DES INTERVENTIONS

Le programme d'intervention sur le dispositif d'auscultation sera établi en tenant compte du temps nécessaire aux reconnaissances et à l'installation, ainsi que

measurements possible (even those that are of no use at that moment) is seen as a future investment.

However, this does not include those measurements that are obtained by sensors that are not reliable from a functional point of view. These measurements should be abandoned so as not to create confusion or waste effort.

Instead, for those measurements that are valid from a numeric point of view, but useless (or not used) to monitor the dam behaviour (for example, in many cases all extensometer measurements, important during construction and first filling of a dam but not during its normal operation), each case must be considered individually to decide whether or not it is useful to collect such data. If however these are not to be abandoned, then it is better to process them first and then file.

3.1.5 Automation

The pros and cons of automated data acquisition systems for dam monitoring are discussed in detail in ICOLD Bulletin 68, « Monitoring of Dams and their Foundations. State of the Art ».

It is generally recognized that the handling and analysis of the data is faster and surer whenever an automated system is in use. Continuous accessibility and higher frequency of readings, if required, are also regarded as advantages to be considered. The elimination of human error in the process is somewhat balanced by the dubious reliability of electronic equipment and transmission lines connections. In general, a trend is observed towards automation of at least part of the measurements to be made, with the expectation of reduced labour costs.

It should be noted, however, that automation does not mean the complete elimination of visual inspections, since no instrumentation system can provide information of what is happening in the structure at the points where no instrument has been installed.

The upgrading of an existing monitoring system – or the provision of one where none has been present – is a particularly appropriate occasion to study the convenience or pertinence of automation. Some economy might be derived from the simultaneous performing of both interventions, that is the instrumentation and the automation. It is likely that the cost of personnel will increase if the data acquisition system is not automated. Some of the existing instruments will need modifications or, in the worst case, replacement, to adapt them to automated reading, even if they have been performing satisfactory ever since they were installed.

It should be remembered that the evaluation of the safety of the dam will always be the responsibility of the engineers, who will analyse and interpret the information provided by the data acquisition system, whether automated or not.

3.2. TIMING OF THE INTERVENTION

The time schedule for intervention on the monitoring systems should consider both the time needed to carry out the necessary investigations and the implementa-

de l'intervalle de temps au bout duquel toutes ou une partie de ces opérations seront répétées. Il faut cependant souligner que le programme recommandé pour les diverses phases d'intervention sera complètement réexaminé en cas de comportement anormal du barrage, représentant une situation critique qui exige une intervention urgente.

3.2.1. Première vérification

Plusieurs facteurs doivent être pris en considération pour déterminer le meilleur moment de la première révision ou rénovation du dispositif d'auscultation du barrage. Parmi ceux-ci, on peut citer : le type de barrage et les conditions d'exploitation, la situation géographique, la détérioration des appareils de mesure, etc. On doit également tenir compte d'autres facteurs importants : problèmes de sécurité publique plus préoccupants du fait de la mise en valeur de terres conduisant à l'implantation de populations à l'aval des barrages, effets nuisibles de l'environnement sur les matériaux du barrage entraînant des détériorations et des dégradations des caractéristiques des matériaux, progrès dans les appareils et les techniques permettant une surveillance plus fréquente et plus fiable du comportement du barrage. On peut évidemment définir un certain intervalle de temps (un certain nombre d'années) au bout duquel les dispositifs d'auscultation existants et les conditions de projet seront réexaminés pour étudier si une rénovation est justifiée, à moins qu'une situation critique n'oblige à intervenir plus tôt pour rétablir les conditions de sécurité.

La continuité à long terme du personnel engagé dans le projet et l'exploitation des ouvrages et du dispositif d'auscultation est un facteur intervenant pour déterminer un intervalle de temps limite. De ce fait, une révision complète de l'ouvrage et, en particulier, du dispositif d'auscultation aura lieu moins de 25 à 30 ans après sa mise en service.

On peut considérer cet intervalle de temps comme une limite à ne pas dépasser. Cependant, il est opportun de vérifier plus souvent si le dispositif d'auscultation est adéquat; une période de temps plus courte (par exemple, 5 à 10 ans) est généralement suffisante pour analyser et bien connaître le comportement du barrage, et pour décider de l'amélioration éventuelle du dispositif d'auscultation en service.

Au fur et à mesure que le barrage vieillit, il sera nécessaire de procéder à des révisions plus fréquentes.

3.2.2. Vérifications ultérieures

Après la première révision du barrage et la première intervention (si nécessaire) sur le dispositif d'auscultation, la fréquence des vérifications ultérieures de l'ensemble du dispositif tiendra compte des facteurs suivants :

- Le barrage continue de vieillir avec risque de dégradation, ce qui entraîne une plus grande fréquence des reconnaissances et études sur le site et des révisions du dispositif d'auscultation.
- La durée de l'exploitation du barrage dans des conditions de sécurité. Plus le nombre d'années d'un tel fonctionnement sera grand, plus le barrage démontrera qu'il est en mesure de faire face aux variations de l'environnement.

tion and the appropriate interval within which some or all of these activities are to be repeated. It is, however, emphasized that the average time interval recommended for various phases of intervention must be completely re-examined if there are indications of inconsistent and/or abnormal dam performance representing a critical situation that would warrant urgent intervention.

3.2.1. First re-appraisal

Several factors need to be considered to decide as to what is the reasonable time when the monitoring system in the dam must be reviewed or updated for the first time. These include the dam type and operating conditions, geographic location and deterioration of instruments, etc. Other significant factors that need to be taken into account include the increasing concern for public safety because of advancing land developments involving human settlements downstream of the dams, adverse effects of environmental factors on dam materials resulting in deterioration and degradation of material capacities, and continuing advances in instruments and techniques that enable more frequent and reliable comprehensive dam performance monitoring. Obviously, a time-span (number of years) can be established after which the existing monitoring systems and project conditions should be thoroughly re-examined to assess if any updating is warranted, unless some critical problems develop that would compel earlier appropriate remedial action to restore safety conditions.

One consideration that aids in determining a limit time-span is the problem of long-term continuity of personnel who were involved in planning and operation of the original works and the monitoring system. Based on this consideration, comprehensive re-examination of the work and especially of the monitoring system should take place no later than 25 to 30 years after commissioning.

This can be considered a limit time-span that should not be exceeded. However, it is important to point out the opportunity to review more frequently the adequacy of the monitoring system; it must be taken into account the fact that a shorter period of time (such as 5 – 10 years) is usually sufficient for an effective analysis and comprehension of the dam behaviour and, therefore, of the need of improvement of the operating monitoring system.

As the dam gets older, partial re-examination at more frequent intervals will be necessary.

3.2.2. Subsequent re-appraisals

The question of how frequently the entire dam system should be re-examined following the first check of the dam and first intervention (if necessary) on the monitoring system should be decided taking into consideration the following factors :

- The dam continues to age and, therefore, would need more frequent site investigations and monitoring system updating.

- Duration of normal safe service operation of a dam. The greater the number of years of such safe operation, the more convincingly the dam demonstrates that it can properly and adequately meet environmental variations.

Les considérations précédentes conduisent à proposer les fréquences suivantes pour les vérifications ultérieures du dispositif :

- Tous les 5 à 10 ans, effectuer des reconnaissances et études complètes ou limitées, afin d'analyser la situation du barrage et le niveau de détérioration (vieillessement).

- Tous les 10 à 15 ans, réviser le dispositif d'auscultation si l'examen précité ne révèle aucun défaut important.

3.2.3. Durée des interventions

Il est difficile d'indiquer la durée des interventions, car cela dépend du type de celles-ci et de la situation géographique du barrage qui peut réduire la saison de travail au cours de l'année. Une étude précise revêt une grande importance, spécialement lorsque les travaux doivent être partiellement ou totalement interrompus. A ce propos, voir les exemples figurant en Annexes.

En général, on peut dire que la durée des reconnaissances et études « préliminaires » sur le site varie de quelques mois à 1 ou 2 ans; la rénovation et/ou l'extension du dispositif d'auscultation nécessitent des périodes de temps dépendant de la nature de la modification et de la nécessité éventuelle de forage, d'excavation, de construction de supports, etc.

3.3. CHOIX DES DISPOSITIFS DE MESURE

Il n'y a pas de solution unique pour l'extension ou la rénovation d'un dispositif d'auscultation : les différents coûts et délais dépendent généralement des solutions techniques disponibles, mais la solution optimale ne peut être définie que dans chaque cas particulier. On devra tenir compte de toutes les solutions techniquement possibles, en évaluant leur fiabilité, leur pérennité, leur coût, les temps nécessaires pour l'intervention, l'entretien, l'extension modulaire, l'automatisation éventuelle, etc.

Il faut toutefois noter que l'installation d'appareils de mesure dans un barrage existant peut-être plus difficile que dans le cas d'un barrage en construction. Le coût de l'intervention est généralement plus élevé et, dans certains cas, l'installation de certains appareils peut s'avérer techniquement impossible à cause de l'accès difficile aux points de mesure. Cela dépend du type de barrage et de l'existence ou non de galeries, de puits, etc. Il est évident que la méthode adoptée pour un barrage à contreforts, où aucun point de l'ouvrage ne se trouve très éloigné des parements, sera différente de celle applicable à un barrage en terre ou en enrochement, où il peut être pratiquement impossible d'atteindre certains points internes.

Il est probable que les considérations d'accessibilité détermineront souvent la solution à retenir. Les appareils de mesure devant être noyés dans la masse du barrage pour l'auscultation interne, bien qu'ils soient couramment utilisés dans les barrages nouveaux, peuvent ne pas convenir pour les barrages existants. Outre le fait que certains ne sont utiles que durant la construction ou les premières phases d'exploitation, leur installation dans une masse de béton ancien, par exemple, peut

The foregoing considerations suggest the following frequencies for system re-check :

- Every 5 to 10 years, carry out comprehensive or pertinent limited investigations in order to analyze the existing condition of the dam and the state of degradation (ageing).
- Every 10 to 15 years, update the monitoring system if no significant defects revealed from the above-mentioned examination.

3.2.3. Time necessary for action

It is difficult to say how much time would be required for implementation as it depends upon the type of intervention and the geographic location of the dam which may limit the working season during the year. However, correct assessment is of great importance especially in those cases where the works have to be partially or totally shut down. For these aspects, see examples presented in the Appendices for more specific information.

In general, it can be said that « preliminary » site investigations require a period of time that varies from a few months to 1 or 2 years; updating and/or extension of monitoring system requires different periods of time depending on the nature of modification and whether drilling, excavation, construction of support structures, etc., are involved.

3.3 APPROACH TO INSTRUMENTATION

There is not a unique solution for the extension or updating of a monitoring system : different costs and delays generally correspond to the technical variants available, but the optimal solution can only be identified for the individual case. Thus it will be the task of the project manager to consider all the technically feasible alternatives, assessing their reliability, useful life, cost, time needed to complete the intervention, maintenance, modularity and possible automation, etc.

However, it should be noted that the difficulty of installing some instruments in an existing dam can be much higher than in the case of a dam under construction. The cost of the intervention is generally rather more substantial, and, in some cases, it may be technically impossible to carry out the installation of some instruments. This is generally related to the difficult accessibility to the points at which the measurements are to be performed. It depends on the type of the dam and the existence or absence of galleries, shafts, etc. Obviously, the approach adopted for the case of a buttress dam, where no point of the structure will be more than a few meters away from the surface, will be different from the one feasible in the case of an earth and rockfill dam, where it may be very impractical to try to reach some of the interior locations.

It seems likely that, in many cases, the accessibility considerations will dictate the solution to be chosen. The embedded-type instruments that are installed in the mass of the dam for internal monitoring, although commonly used in new dams, can be not suitable for existing ones. Apart from the fact that some of them are only relevant during construction or in the first stages of operation, their installation, for instance, in a mass of old concrete, may introduce a severe disruption of its charac-

provoquer une importante modification de ses caractéristiques et conduire à des informations erronées. Dans certains cas, les méthodes de mesure mises au point pour des essais non destructifs constitueront une solution de substitution aux techniques classiques. Lors du choix des appareils de mesure, on devra tenir compte, non seulement de leur précision, mais aussi des difficultés liées à leur installation, aux conditions d'environnement, etc, qui peuvent avoir une grande importance.

Il faut attirer l'attention sur le fait que, lorsqu'on modifie ou remplace un appareil d'auscultation, on doit se préoccuper du raccordement des mesures faites avant et après.

Quelques problèmes particuliers à l'auscultation de barrages existants sont abordés ci-après :

a) *Mouvements du barrage*

Les pendules directs ou inversés sont les appareils convenant le mieux à la mesure des mouvements horizontaux. Ils nécessitent cependant, dans le corps du barrage, des passages verticaux dont la réalisation est parfois très coûteuse. Dans certains barrages, on peut utiliser des puits de drainage ou même des puits d'ascenseur; on peut parfois installer des pendules en les plaçant dans un tube scellé sur un parement vertical du barrage. On peut également faire appel à d'autres méthodes : méthodes optiques convenant bien aux barrages-voûtes; procédés topographiques, soit classiques, soit avec utilisation de techniques au laser; mesures de rotation au moyen de clinomètres et/ou de niveaux à eau, dont les relevés sont généralement faciles à exécuter et peuvent être intégrés le long d'une section verticale pour obtenir des déplacements.

La mesure des mouvements verticaux n'est généralement pas difficile le long de la crête du barrage, tandis que la mesure des tassements à l'intérieur du noyau d'un barrage en remblai peut être un problème insurmontable. De toute façon, les tassements internes d'un barrage en remblai après construction ont lieu essentiellement au cours des premières années d'exploitation et, par la suite, les techniques d'observations externes peuvent convenir.

Les mouvements relatifs entre les plots des barrages en béton peuvent être mesurés au moyen d'appareils placés sur les joints à la paroi de galeries, ou de jauges mécaniques installées sur les parements; mais si l'on considère que ces mesures ne traduisent pas les conditions internes, il est peu probable qu'un dispositif de mesure en forage puisse être installé de façon satisfaisante.

La mesure des mouvements des fissures, par exemple au pied amont des barrages-voûtes, peut être faite au moyen d'un micromètre coulissant ou autre appareil similaire.

b) *Mouvements des fondations*

Ici encore, le pendule inversé constitue la meilleure solution; on peut indiquer également les inclinomètres en forage et les extensomètres à points de mesure multiples. La mesure des mouvements des fondations est le plus souvent possible; le seul inconvénient est son coût généralement élevé.

c) *Piézomètres*

Les tubes piézométriques et les piézomètres électriques – soit à résistance, soit

teristics and provide erroneous information. In some cases, measuring methods developed for structural non-destructive testing should be considered as an alternative to conventional techniques. Methods of measurement to be used should be compared not only on the basis of accuracy, but also taking into consideration other difficulties (installation, severe environmental conditions, etc.) that can be of paramount importance.

It must be underlined that, when an instrument is modified or replaced, it is necessary to take care of the proper link between the measurements acquired before and after the intervention.

Following are a few considerations about particular problems in the instrumentation of existing dams :

a) *Dam movements*

Horizontal movements can be best monitored with the use of direct and inverted plumb-lines. However, it requires some kind of vertical opening in the body of the dam, although in many cases providing such an opening can be very expensive. In some dams, drainage wells or even elevator shafts can be used; in some cases, plumb-lines can be installed using external tubes fixed to the dam face. Possible alternatives include optical devices that can be well suited to an arch dam, topographic surveys, either conventional or with use of laser alignment techniques, and, in some cases, rotation measurements with clinometers and/or hydrostatic levelling system that are usually easy to perform and can be integrated along a vertical section to provide measure of displacement.

Vertical movements are usually not too difficult to monitor along the crest of the dam, although settlement readings within the core of an embankment may mean an insurmountable problem. Anyhow, internal settlement of an embankment dam after construction essentially takes place during the first years of operation and, afterwards, external observation techniques could be adequate.

Relative movements between monoliths in concrete dams can be measured with superficial joint meters in galleries or by mechanical gages at the faces, but, if this is considered not sufficiently representative of inner conditions, it is doubtful that a satisfactory borehole device can be installed.

Monitoring of movements over cracks, for example cracking of the upstream heel of arch dam, can be made by sliding micrometers or similar instruments.

b) *Foundation movements*

Again, inverted pendulums are the best option, together with borehole inclinometers and multiple-point extensometers. Foundation movement instrumentation is generally possible, its only drawback being the usually high cost involved.

c) *Piezometers*

Open stand pipe and electrical – either resistance or vibrating wire – piezome-

à corde vibrante – sont plus faciles à installer dans un barrage existant que les autres types de piézomètre; aussi sont-ils les plus utilisés.

Les tubes piézométriques, les piézomètres électriques ou hydrauliques, peuvent être facilement automatisés; l'automatisation des piézomètres du type pneumatique est plus laborieuse et plus coûteuse.

d) *Température*

Pour la mesure des températures de l'ouvrage, on peut indiquer les dispositifs suivants :

- installation de sondes thermiques dans le corps du barrage,
- installation de sondes thermiques sur les parements externes,
- thermographie à l'infra-rouge de la surface externe.

Si l'on connaît les caractéristiques thermiques des matériaux du corps du barrage (coefficient de dilatation, diffusivité thermique, conductivité thermique, etc.) et si l'on a établi un modèle mathématique pour déterminer les conditions thermiques internes à partir des conditions ambiantes aux parements du barrage, on peut recommander le deuxième dispositif sus-mentionné.

e) *Contraintes*

Les mesures de déformations unitaires et de contraintes effectuées en divers points à l'intérieur d'un barrage nouveau ne seront pas réalisables dans un barrage existant, car il est pratiquement impossible d'installer des appareils pour de telles mesures dans le corps de barrages existants.

f) *Auscultation sismique*

Dans certains cas, l'auscultation d'un barrage existant comprendra des mesures sismiques. Cela ne posera pas, en général, de problèmes importants, du fait du type d'appareils nécessaires et de la facilité de leur installation.

ters present less difficulties than other types for their installation in an existing dam, and they are also more widely used.

The open stand pipe, electrical and hydraulic piezometers can be easily automated; the automatic reading of the pneumatic ones is more laborious and expensive.

d) *Temperature*

For the monitoring of the structure temperature, some of the alternatives are :

- Installation of thermal sensors in the body of the dam.
- Installation of thermal sensors on the external faces.
- Infrared scanning of outer surface.

If the thermal characteristics of the materials in the dam body (thermal expansion coefficient, thermal diffusivity, thermal conductivity, etc.) are known, and a mathematical model has been established for computing internal thermal conditions from ambient exposure conditions at the dam boundaries, then the second alternative seems to be the most practical one.

e) *Stress monitoring*

Stress and strain measurements that are performed at various interior locations in a new dam will not be feasible in an existing dam because embedding stress and strain meters in the existing dam mass will be practically impossible.

f) *Seismic monitoring*

In quite a few cases, the monitoring of an existing dam will include some kind of seismic surveillance. This will generally pose no serious problems, due to the type of instruments required and the ease of their installation.

ANNEXES - APPENDICES

Exemples présentés par

- A) France
- B) Italie
- C) Japon
- D) Espagne
- E) Suisse
- F) États-Unis
- G) URSS

Case histories from

- A) France
- B) Italy
- C) Japan
- D) Spain
- E) Switzerland
- F) USA
- G) USSR

Amélioration de l'auscultation des barrages existants

BARRAGE-VOÛTE DE VOUGLANS

Exemple présenté par le Comité National Français

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DU BARRAGE ET DE SA FONDATION

Barrage-voûte en béton, à double courbure, de 130 m de hauteur au-dessus de sa plus basse fondation et de 425 m de longueur en crête, réalisé entre 1964 et 1969 (Fig. ci-jointes).

Il est implanté dans une vallée étroite en forme de V symétrique, à fond plat, creusée dans des bancs calcaires horizontaux appartenant au jurassique supérieur. Le rocher est très compact ; aucune faille importante n'affecte le rocher qui, cependant, est découpé par un double réseau de fissures verticales et par un réseau de stratification horizontale.

L'organisation des voiles d'étanchéité et de drainage à Vouglans constituait une innovation lors de la construction [1] (*). On cherchait alors à protéger les appuis rocheux contre la pression de l'eau. Le voile d'injection, réalisé depuis le bord amont des fouilles, est raccordé au bulbe des injections superficielles de serrage et de consolidation du rocher. Le rideau de drainage est foré depuis une série de galeries (3 de chaque côté) étagées dans les rives, et depuis une galerie de pied aval en fond de vallée.

2. ANALYSE DE LA SITUATION EXISTANTE

Le comportement du barrage au cours de sa première mise en eau (1968-1969) a été suivi par un dispositif d'auscultation très étoffé (voir Tableau ci-joint, colonne 1968-1969). En dehors des préoccupations habituelles, le contrôle du calcul du projet (planimétrie, extensomètres), l'étude, qui était d'actualité à l'époque, de la zone rocheuse mise en traction à la base des plots (fils invar en galerie, fils de fondation au pied de la voûte), ainsi que la surveillance de stabilité des bancs calcaires constituant les appuis de la voûte (piézomètres des rives), justifiaient l'importance des moyens mis en place.

(*) Les chiffres entre crochets renvoient à la liste de références - Chapitre 6.

Les déformations de la voûte à sa première mise en eau furent bien conformes aux prévisions du calcul Trial Load, compte tenu d'une part irréversible liée à sa mise en place. De plus, un certain desserrage du contact vertical béton-rocher au pied amont fut mesuré (5 à 7 mm d'ouverture horizontale) ; en même temps, le décollement du contact béton-rocher sous le pied amont (desserrage vertical) était mis en évidence indirectement par des forages de contrôle piézométrique.

Le rideau de drainage, en fond de vallée, recueille généralement moins de 6 litres/minute tant que la retenue n'est pas pleine et le barrage bien froid. Lorsque ces conditions extrêmes sont réunies (typiquement vers le mois de février), le débit des drains de pied aval peut être globalement multiplié par un facteur 20, atteignant au total 120 l/mn. C'est le signe du décollement effectif du pied amont, et de l'établissement d'une sous-pression élevée sous le barrage.

Le comportement de l'ouvrage se caractérise principalement par :

- des déformations réversibles directement liées aux fluctuations de la retenue (de l'ordre de 18 mm de flèche radiale en clé pour les 20 derniers mètres de remplissage), et aux effets thermiques saisonniers (de l'ordre de 18 mm également au maximum, cet effet décroissant plus rapidement avec la hauteur du point considéré du fait de l'épaississement de l'ouvrage),

- une certaine dérive à long terme, qui a été en s'amortissant lentement et aura totalisé de l'ordre de 10 mm vers l'aval en 20 ans (maximum en haut de la console de clé). Cette dérive apparaît sur les graphiques de mesures pendulaires tracés "à conditions identiques", une fois éliminés les effets hydrostatiques et saisonniers. Le lent basculement de la voûte vers l'aval, détecté par cette dérive des flèches, a progressivement amplifié le desserrage du pied amont et la sensibilité du comportement hydraulique associé [2].

3. MISE A JOUR DU DISPOSITIF D'AUSCULTATION EXISTANT

3.1. Les drains de fond de vallée avaient recueilli des débits importants à la première mise en eau, provenant de couches perméables, profondes. Ils furent raccourcis et complétés par une auréole de drains profonds forés plus en aval à l'extérieur du barrage. Dans le même temps, étaient installés des piézomètres en fond de vallée (2 sous la voûte, et 7 à l'aval) ; le dispositif d'origine n'en comportait que dans les rives, où les pressions restèrent toujours très modérées à l'aval du rideau de drainage.

La fréquence des mesures fut réduite à celle admise pour les ouvrages français à comportement satisfaisant.

3.2. Devant le bon comportement de la voûte durant la période 1970-1974, l'étude d'un allègement de l'auscultation était entreprise en 1974. L'absence d'anomalies dans les déplacements observés (seule se poursuivait une lente évolution vers l'aval attribuée au fluage et au retrait du béton), la présence d'un dispositif de pendules bien structuré et la lourdeur des mesures planimétriques poussaient à abandonner ces dernières mesures après installation de pendules inversés supplémentaires en fondation. Les nivellements et les mesures au fil invar ne présentaient plus d'intérêt. Les mesures extensométriques, qui avaient permis de bien connaître l'état de contraintes et n'avaient plus d'autre objectif que celui de la connaissance des modifications intrinsèques à long terme du béton, pouvaient être espacées dans le temps [3].

3.3. Une lente remontée de la piézométrie en fond de vallée, couplée à la persistance d'une dérive des flèches mesurées aux pendules, et une meilleure connaissance des phénomènes susceptibles de se produire dans la fondation des plots centraux de voûtes larges ont conduit à mettre en place (voir Tableau, colonne 1978-1990) :

- un nivellement des deux galeries amont et aval de pied des plots centraux (mesure du soulèvement et du basculement),
- une série continue de piézomètres peu profonds dans la fondation de cette même zone,
- un drainage supplémentaire du rocher de fondation.

Ultérieurement (1991), une demi-douzaine de piézomètres supplémentaires ont été mis en place sous le bassin d'amortissement, dans le rocher du fond de vallée à l'aval du pied de la voûte.

4. ANALYSE DU COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE

Le dispositif d'auscultation mis à jour : pendules, nivellement topographique, fils de fondation, extensomètres, piézomètres, drains, mesures de fuites, permet de bien connaître le comportement de l'ouvrage.

Les pendules inversés ancrés en fondation montrent que la lente évolution de la voûte vers l'aval, mesurée pendant 20 ans, n'était pas attribuable à un mouvement des appuis, mais à un phénomène d'adaptation du béton de type retrait ou fluage. Des dérives analogues étaient par ailleurs observées sur les extensomètres noyés dans le béton.

Près de vingt ans après la mise en service du barrage, son propriétaire (Electricité de France) a fait faire une étude détaillée de comportement de l'ouvrage pour bien comprendre les

évolutions détectées sur une longue période et en évaluer toutes les conséquences. Cette étude s'est appuyée sur une modélisation du barrage et de sa fondation par éléments finis tridimensionnels à comportement non linéaire (codes COBEF3 et NOTEN3) [4].

Une telle étude permet, dans un premier temps, de raccorder entre elles toutes les observations acquises par l'auscultation et concernant le comportement cyclique réversible du barrage, de vérifier à la fois son bon état de sollicitation et la parfaite adéquation des modèles mathématiques employés (modèles qui servent, par ailleurs, à la mise au point de nouveaux projets). Elle permet ensuite d'apprécier ce qui pourrait être le phénomène générateur des dérives observées, de le quantifier (ici : équivalent à un retrait de 40 à 50.10^{-6} au total), et d'en évaluer toutes les conséquences.

Les calculs non-linéaires permettent d'examiner "à la loupe" les conditions régnant au pied de l'ouvrage, et notamment d'apprécier l'ouverture du contact béton-rocher en fond de vallée. Le décollement amont ressort à Vouglans à :

- 4 mm environ après libération des tractions au premier remplissage (calcul effectué avec application de la sous-pression),

- une valeur sensiblement double, à terme, du fait des variations dimensionnelles en retrait du béton.

L'étude de comportement de l'ouvrage calée sur les acquis de son auscultation permet finalement de mieux appréhender le comportement hydraulique complexe des fondations, où des facteurs d'ordre physico-chimique se surajoutent aux effets proprement mécaniques (effets d'ouverture des zones de rocher desserré ou tendu sous le pied amont de la voûte). Elle guide la réflexion pour mieux maîtriser les sous-pressions en fond de vallée à l'aval immédiat de la voûte, où est aménagé un bassin de réception de l'évacuateur de crue.

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5.1. L'exemple du barrage de Vouglans montre que, lors de l'établissement du projet d'auscultation d'un barrage, le choix des paramètres significatifs du comportement de l'ouvrage, ainsi que la localisation des appareils de mesure, ne peuvent pas toujours être optimaux.

Le nombre des appareils peut parfois surprendre par son importance au moment de la construction. Il se justifie par la nécessité d'assurer une surveillance aussi efficace que possible sur un ouvrage dont on ne connaît pas encore le comportement.

L'optimisation du dispositif (abandon de certaines mesures, mise en place d'appareils complémentaires) se fait au fur et à mesure de l'augmentation des connaissances sur le comportement réel de l'ouvrage.

5.2. Il faut souligner l'influence importante des fondations sur le comportement du barrage et la nécessité de bien suivre les déformations et le fonctionnement hydraulique de ces fondations.

5.3. Le cas de Vouglans est une bonne illustration de l'importance croissante attribuée aux piézomètres dans l'auscultation hydraulique des fondations d'une grande voûte, qui constituent un complément indispensable à la seule mesure des fuites.

L'attention est attirée sur le soin à apporter à la mise en place de ces appareils, qui nécessitent la réalisation de chambres de mesure isolées (piézomètres dits "ponctuels", par opposition à des forages ouverts sur toute leur longueur) et le recours à des manomètres étalonnés, fiables et régulièrement contrôlés.

5.4. Dans le passé, le calcul des barrages-voûtes était conduit suivant des méthodes moins précises qu'aujourd'hui et l'auscultation cherchait surtout à s'assurer que les niveaux des contraintes en différents points de l'ouvrage ne dépassaient pas des valeurs susceptibles de provoquer des désordres dans le béton.

Les progrès réalisés au cours de ces dernières années dans les méthodes de calcul des barrages-voûtes (méthodes des éléments finis tridimensionnels - relaxation des contraintes de traction dans la fondation) ont entraîné une bien meilleure connaissance des niveaux de sécurité vis-à-vis des contraintes engendrées par les différents cas de charge.

L'utilisation d'extensomètres apparaît donc, maintenant, moins nécessaire et ne serait utile que dans les cas d'incertitudes dans les hypothèses de calculs, d'ouvrages de conception nouvelle, ou d'applications de nouvelles méthodes de calculs, en vue de vérifier les résultats.

Les mesures extensométriques peuvent donc être espacées dans le temps sur les barrages anciens. Elles restent utiles pour apprécier tous les phénomènes évolutifs à long terme.

5.5. Pour mesurer les déplacements des barrages-voûtes, on a tout d'abord utilisé des méthodes topographiques planimétriques mettant en oeuvre des appareils de visée précis. L'inconvénient majeur de ces méthodes est d'entraîner l'intervention d'équipes spécialisées, dans des conditions d'accès irrégulières

(notamment en haute montagne), et de nécessiter sur le site un réseau de stations d'observations dont on doit contrôler régulièrement la stabilité par rapport à des repères fixes.

C'est pourquoi on a préféré s'orienter, depuis une vingtaine d'années, vers l'auscultation par un réseau de pendules directs (voûtes) et inversés (fondation), qui permettent de mesurer les déformations de l'ouvrage à différents niveaux, par rapport à des points de référence situés dans la fondation à des profondeurs où les mouvements induits par le barrage sont suffisamment amortis.

La simplicité et la facilité des mesures de pendules (aisément automatisables d'ailleurs) permet d'en augmenter la cadence et, par suite, de constituer des bases de données de mesures nombreuses réalisées dans des conditions variées de niveau de remplissage et de saison. Cela est favorable à un bon découplage des effets réversibles correspondants par l'analyse statistique, et à la détection puis au suivi des évolutions irréversibles qui intéressent directement le contrôle de sécurité des ouvrages.

6. REFERENCES

Congrès de la Commission Internationale des Grands Barrages

(1) Groupe de travail du Comité National Français, "Essais et calculs de mécanique des roches appliqués à l'étude de la sécurité des appuis d'un barrage-voûte - Exemple de Vouglans" Q.32 - R.49, Vol. I, Istamboul, 1967.

(2) Le May Y., Catinot L., Douillet G., Pinatel R., Salembier M., "Paramètres significatifs du comportement des barrages et choix des appareils de mesures", Q.49 - R.45, Vol. II, New Delhi, 1979.

(3) Salembier M., Dubois P., Pinatel R., Ricard C., Douillet G., "Adaptation et évolution des dispositifs d'auscultation au cours de l'exploitation des ouvrages - Utilisation d'appareils nouveaux", Q.56 - R.72, Vol. I, Lausanne, 1985.

(4) Bister D., Bonnet P., Denis B., de Beauchamp R., Dubois P., Goguel B., "Contribution au suivi des barrages en béton français sujets à gonflement ou retrait - Application à des ouvrages adultes (Chambon, Vouglans) et au béton jeune (cas du BCR)", Q.65 - R.7, Vol. II, Vienne, 1991.

TABLEAU
Barrage de Vouglans - Evolution du dispositif
d'auscultation au cours de la vie de l'ouvrage

	1968-1969	1970-1976	1977-1978	1978-1990
	1 ^{ère} mise en eau	1 ^{ères} années d'exploitation	Exploitation de routine	Situation actuelle
Planimétrie (1)	38 (10)	38 (4)		
Pendules (2)	22(100)	22 (26)	24 (26)	24 (26)
Nivellement voûte (1)	49 (8)	49 (2)	49 (0.5)	49 (0.5)
Nivellement pied de voûte (1)				8 (2)
Nivellement galeries en rives (1)	12 (8)	12 (2)		
Fils invar galeries	6 (8)	6 (2)		
Fils de fondation pied de voûte	20 (50)	3 (26)	3 (26)	3 (2)
Extensomètres	295(100)	295 (6)	295 (6)	295 (6)
Piézomètres en rives	20 (75)	20 (26)	20 (26)	11 (26)
Piézomètres pied de voûte		2 (26)	2 (26)	9 (26)
Piézomètres à l'aval		7 (26)	7 (26)	7 (26)
Fuites voûte et drainage	13 (75)	14 (26)	15 (26)	15 (26)

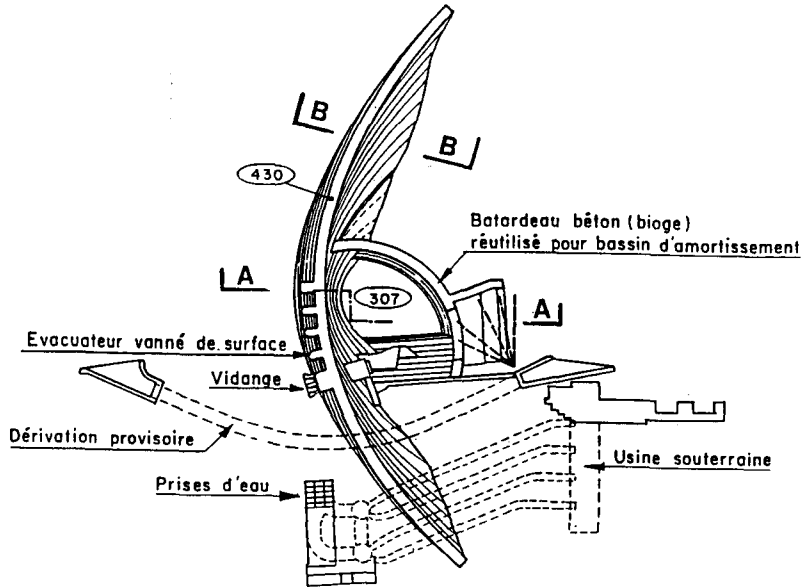
1. Nombre de repères

2. Nombre de tables

Le nombre entre () indique la fréquence des relevés

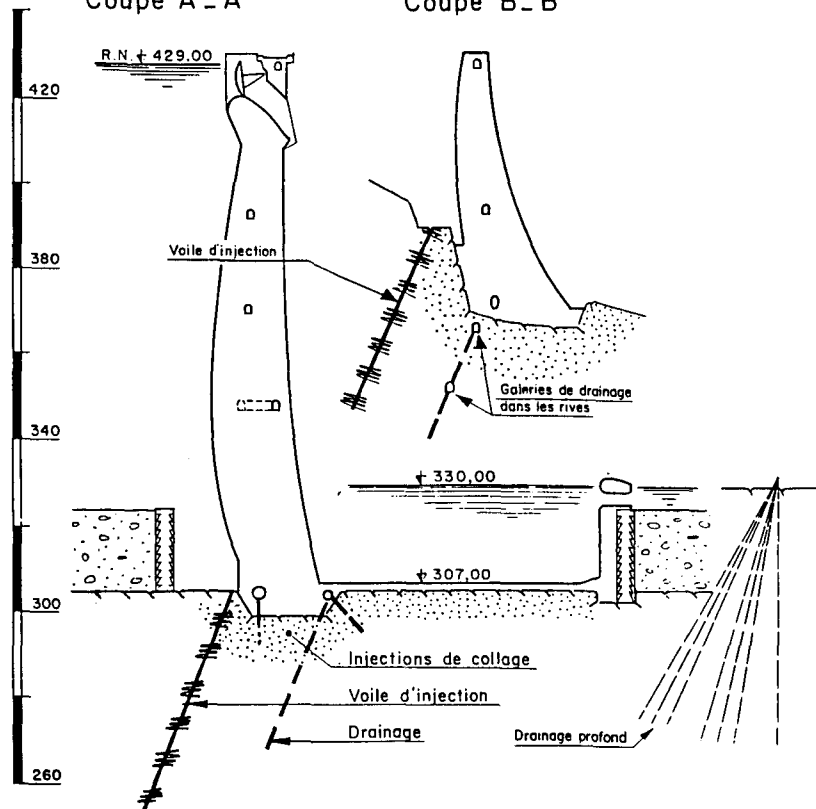
Barrage de VOUGLANS

Vue en plan

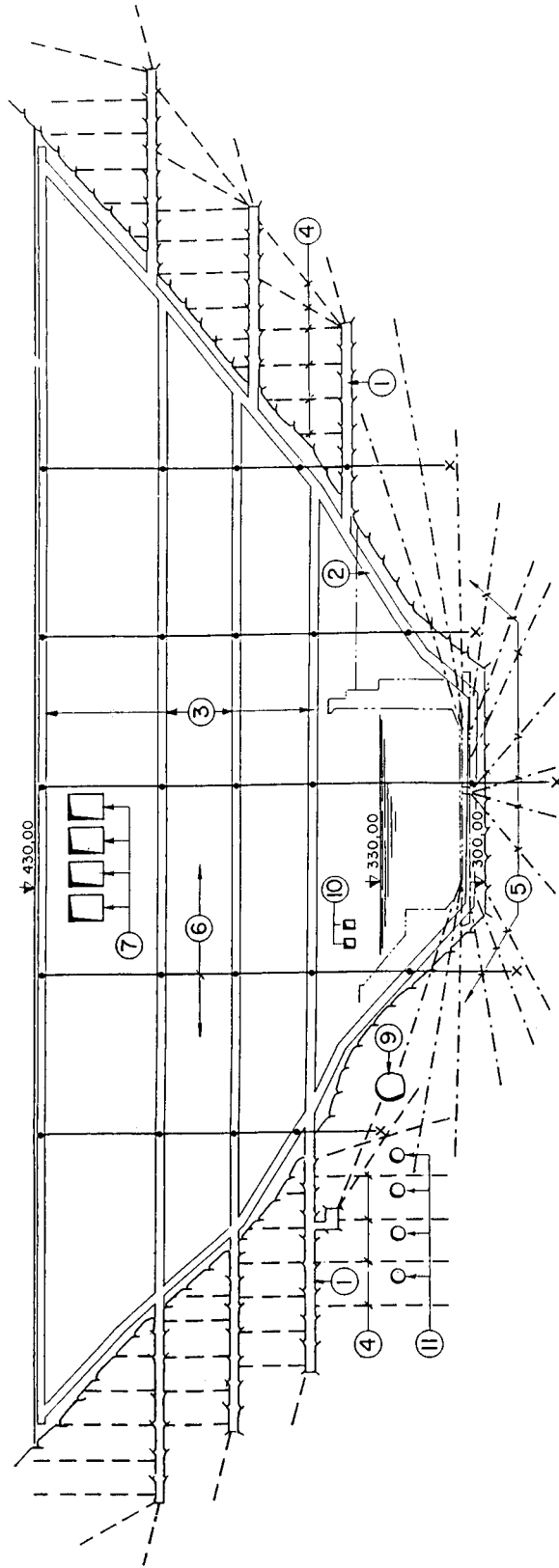


Coupe A - A

Coupe B - B



Barrage de Vouglans - Elévation aval - Galeries - Drains - Pendules - Pendules



- | | | |
|---------------------------------------|---|--------------------------|
| ① Galeries de drainage dans les rives | ⑤ Drains en fond de vallée
forés depuis galerie de pied aval | ⑧ Bassin d'amortissement |
| ② Galerie périmétrale (pied amont) | ⑥ Puits de pendules | ⑨ Dérivation provisoire |
| ③ Galeries de visite | ⑦ Evacuateur | ⑩ Vidanges de fond |
| ④ Drains en rives | | ⑪ Conduites forcées |

Amélioration de l'auscultation des barrages existants

BARRAGE-POIDS DE BOUILLOUSE

Exemple présenté par le Comité National Français

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DU BARRAGE

Ouvrage d'origine (construit entre 1904 et 1910) : barrage-poids rectiligne, en maçonnerie à la chaux, comportant un masque amont de type Lévy.

Surélévation de 3 m, entre les années 1941 et 1947.

Hauteur actuelle : 17,50 m au-dessus du terrain naturel et 25 m au-dessus de sa plus basse fondation.

Longueur en crête : 384 m.

Les deux-tiers inférieurs du parement aval sont masqués par un remblai dont l'objet était, semble-t-il, de protéger ce parement contre les intempéries (et non de conforter le barrage).

2. ANALYSE DE LA SITUATION EXISTANTE

Dès l'origine, des mesures de fuites ont été effectuées à l'aval des galeries compte tenu des débits élevés constatés (plusieurs centaines de litres par seconde).

Avant comme après la surélévation du barrage, de multiples interventions ont été nécessaires pour maintenir ces fuites à un niveau acceptable.

En 1962, une importante opération de régénération des maçonneries du barrage par injection et d'étanchement du parement amont a été exécutée.

3. NOUVEAU DISPOSITIF D'AUSCULTATION

La circulaire interministérielle du 14 août 1970 a prévu, pour les barrages anciens, la possibilité d'engager une procédure de révision spéciale pouvant conduire, en particulier, à la mise en place ou à l'amélioration de dispositifs d'auscultation.

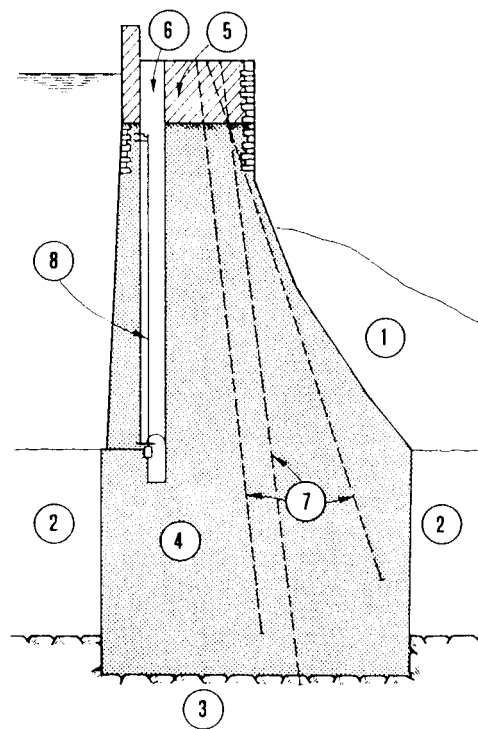


Fig.

Barrage de Bouillouse - Coupe-type
Bouillouse Dam - Typical section

- | | |
|--------------------|---------------------|
| 1. Remblai | 1. Fill |
| 2. Remplissage | 2. Backfill |
| 3. Rocher | 3. Rock foundation |
| 4. Maçonnerie | 4. Masonry |
| 5. Surélévation | 5. Raised section |
| 6. Puits de visite | 6. Inspection shaft |
| 7. Piézomètres | 7. Piezometers |
| 8. Pendule | 8. Pendulum |

Lors des travaux de 1962, il a été décidé d'installer au barrage de Bouillouse un dispositif d'auscultation comprenant (Fig. ci-jointe) :

- Des mesures de fuites en différents points ;
- Six groupes de piézomètres forés à partir de la crête du barrage et implantés dans la moitié aval de la section ;

Ces piézomètres permettent de mesurer les pressions au contact entre la maçonnerie et le rocher de fondation, ainsi que dans la maçonnerie du socle sur lequel repose le barrage proprement dit. On doit préciser qu'il existe quelques drains de fondation sous le radier de la galerie.

- Des repères topographiques sur la crête du barrage : mesures planimétriques dans le sens perpendiculaire à la crête, à partir de piliers construits sur chaque rive, sensiblement dans l'alignement de ces repères ; mesures de nivellement.

Les contrôles de stabilité des piliers ayant mis en évidence un déplacement de l'un d'eux, ce dispositif a été modifié en 1972 et l'on s'est orienté vers l'exécution de mesures topographiques par visée de nouveaux repères implantés sur le parapet amont du barrage, à partir de nouveaux piliers placés à l'amont.

La comparaison des résultats de ces nouvelles mesures avec ceux des mesures précédentes a fait douter de la parfaite solidarité du parapet avec le corps du barrage et l'auscultation topographique a finalement été abandonnée au profit de l'auscultation par pendules.

Ces pendules, au nombre de quatre, ont été installés en profitant des puits de visite qui avaient été conservés lors de la surélévation du barrage, les lectures étant faites dans la galerie de pied.

4. RESULTATS DES MESURES ET ANALYSE DU COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE

Ce dispositif d'auscultation installé : pendules, piézomètres, mesures de fuites, permet la réalisation de mesures fréquentes et de bien connaître le comportement de l'ouvrage.

5. CONCLUSIONS

Les pendules constituent un excellent moyen de suivre le comportement des barrages-poids anciens. L'existence fréquente de puits de bonnes dimensions facilite la mise en place de ces appareils. Lorsque ce n'est pas le cas, on peut envisager la réalisation de forages verticaux depuis la crête du barrage, y compris pour la mise en place de pendules inversés dans les fondations.

Improvement of existing dam monitoring

TALVACCHIA DAM

Example presented by the Italian National Committee

1. FOREWORD

Talvacchia dam (Fig.1) was provided in 1986 with a completely centralized monitoring system that combined an improved static control system (an old system was already operating for more than a decade), with a monitoring system for seismic response. Moreover a dynamic excitation system for measuring the dynamic response of the structure under the changes of environmental conditions (storage level and temperature) was installed.

2. DAM DESCRIPTION

The dam, built in 1957-60, is an arch-gravity structure provided with a pulvino.

At the dam site the rock formation consists of big, slightly fractured sandstone layers, intercalated with fine grained sandstone foliated and rich in micaceous scales.

The main features of the dam and reservoir are the following:

- height of the dam 77.12 m
- length of the crest 225.85 m
- volume of dam 100×10^3
- storage capacity 14.35 hm³
- natural catchment area 128.00 km²

3. ANALYSIS OF THE SITUATION BEFORE THE IMPROVEMENT OF THE STATIC MONITORING SYSTEM AND THE INSTALLATION OF THE DYNAMIC AND SEISMIC MONITORING SYSTEMS.

The dam has always behaved normally.

Its general state at the time of the improvement and installation of the systems was good considering that the structure was built quite recently (with reference to the average age of ENEL's dams). All of the physical, mechanical and geometric data of the structure were available.

In its initial configuration the main instruments installed were the following:

- direct pendulum located in the main cross section;
- collimation;
- thermometric network embedded in the concrete, both in the main cross section and in two lateral sections;
- external thermometers to measure air and water temperatures;
- dilatometers to measure the opening of the joints;
- clinometric network;
- devices for measuring leakage and uplift pressures.

It is worth while noting that in 1966 an analogical processor was installed with the first static deterministic model for the control of the structural behaviour. This installation represented the first example of monitoring, on-line control system, ever installed on an Italian dam.

In 1972 the first campaign of forced excitation tests through vibrodyne devices was carried out, allowing the characterization of the structure in terms of natural frequencies, modal shapes, dampings and, moreover, the calibration of the first dynamic numerical model.

4. IMPROVEMENT OF THE STATIC MONITORING SYSTEM

In 1973 the static monitoring system was improved by the installation of an automatic collimator and by the automation of the plumb-line readings and the temperature measurements.

In 1986 the system was completely automatized and centralized. The availability of pluri-daily measurements has allowed a better calibration of the

deterministic model. A more correct interpretation of the structural behaviour and a greater reliability of the forecasting model to be used for the on-line safety control was then possible.

5. DYNAMIC AND SEISMIC MONITORING SYSTEM

Periodical visual inspections, carried out at regular intervals, confirmed the regular behaviour already denoted by the measurements.

However, since the dam is located in a seismic area, it seemed proper to install suitable instrumentation to measure possible seismic events and the relevant structural response of the dam. This also represented a prototype of a seismic control system accomplished in view of a possible extension of the experience to other dams.

In 1986, contemporaneously to the improvement of the static monitoring system, instruments for the recording of the dynamic and seismic response of the structure were installed.

The dynamic control system was installed for measuring the dynamic response of the structure under the changes of environmental conditions (storage level and ambient temperature). To this aim two forced excitation tests were carried out every day for a period of more than two years.

The dynamic control system was interfaced with a sophisticated dynamic numerical model, which takes into account the influence of changes in environmental conditions (i.e. storage level and temperature) on the dynamic response of the dam.

The seismic monitoring system has been installed in order to achieve the following goals;

- signalling the seismic event, allowing the characterization in terms of intensity, epicentral distance, and frequency content;
- evaluating the structural response in terms of velocity, acceleration and damping particularly when caused by high intensity seismic events that cannot be taken into account with usual forced excitation tests;
- allowing, by means of measurements of static and dynamic quantities measured after the seismic event as well as by comparison of the measurements recorded during the earthquake with the results of the numerical dynamic model properly calibrated, the identification of possible damages to the structure.

At the system completion, in order to properly record the "free-field" seismic event, 1-3 seismometers will be installed at various distances from the dam, in

positions chosen on the basis of geo-morphological and seismo-tectonic features of the area.

The location of accelerometers is shown in Fig.2. From the operational point of view, the seismic monitoring system is part of general system controlled by a single computerised unit (Fig.3). The unit for seismic data acquisition is provided with a temporary memory that is continuously updated until a seismic event occurs. This activates a trigger signal, that allows the storage of acquired data for a period of 5 seconds before the event. At the end of the seismic data acquisition, the system records the static and environmental quantities.

The installation costs of the seismic and dynamic monitoring systems have been particularly high, due to the study and research purposes of the activity.

From the operational point of view, during civil works (instrument installation, cable laying etc.) no particular problems were met, thanks to the presence of footpaths along the downstream facing of the dam that aided the installation.

The purchase of the instrumentation and acquisition systems does not pose any particular problem since there is an extensive market to choose from.

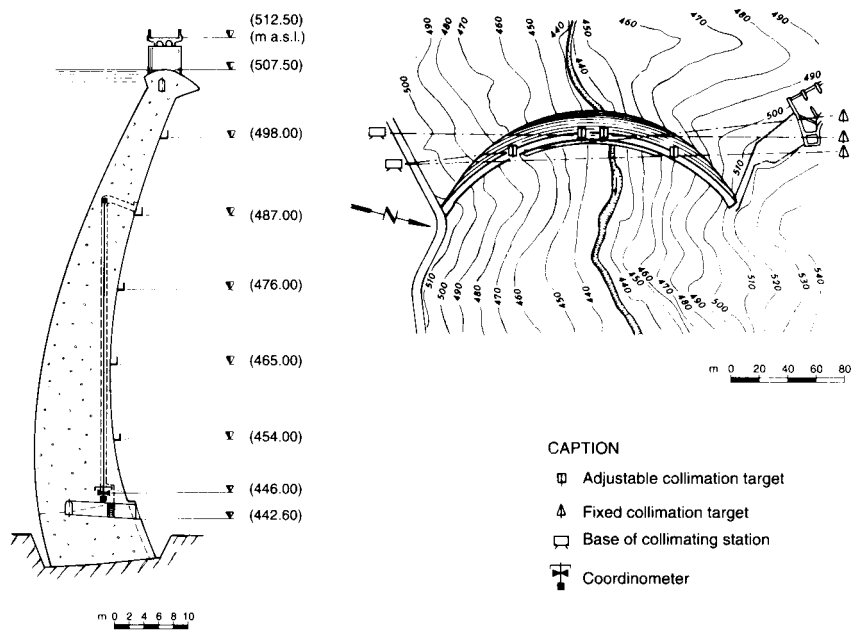


Fig. 1 - TALVACCHIA DAM

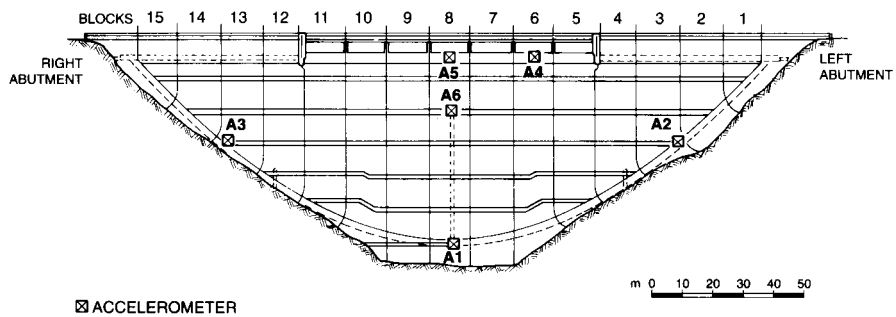


Fig. 2 - ACCELEROMETERS POSITION ON DAM

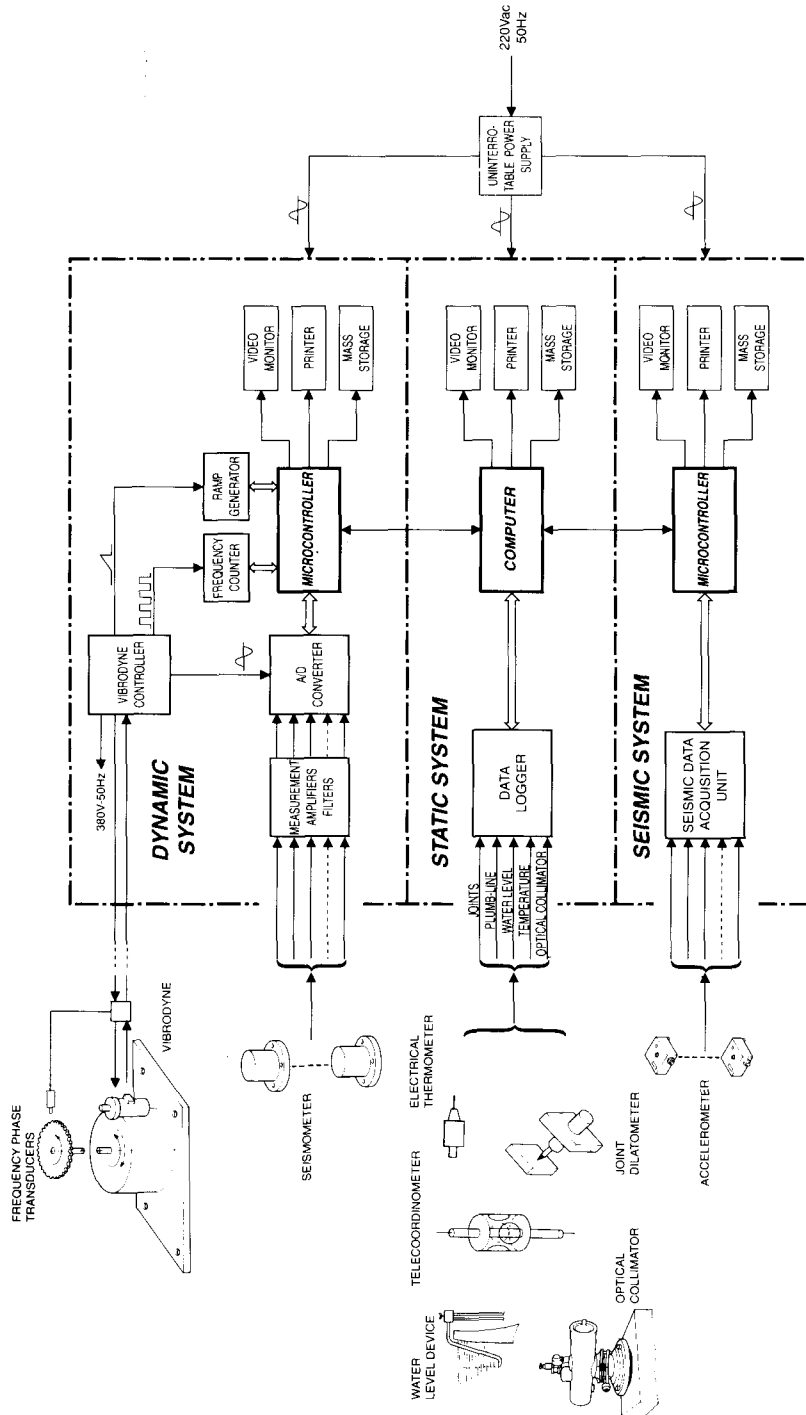


FIG. 3 - TALVACCHIA DAM: MONITORING SYSTEMS

Improvement of existing dam monitoring

BAITONE DAM

Example presented by the Italian National Committee

1. FOREWORD

The two main elements of interest concerning the monitoring intervention program on existing dams in Italy, are safety evaluation and checking of the structural behaviour.

The Baitone Dam is a recent and significant example of automatic monitoring for dam safety evaluation.

The dam is located at 2300 m a.s.l. and for such a high elevation the continuous surveillance by wardens is very difficult.

The monitoring intervention has been carried out together with in-situ and laboratory investigations in order to evaluate the physical and mechanical characteristics of the dam and foundation materials (the dam has been operating for 60 years).

2. DAM DESCRIPTION

Baitone dam (Fig.1) is located on the southern slope of Adamello and forms a reservoir having a capacity of about $16 \times 10^6 \text{ m}^3$.

The dam, built in the period 1927-1930, is a masonry gravity dam having a lightly arched shape; it is 38 m high and has a crest length of 227 m. The imperviousness is ensured by a Levy mantle. There are no shrinkage joints.

3. CONFIGURATION OF THE MONITORING SYSTEM BEFORE THE INTERVENTION

The monitoring system, before the intervention, consisted basically of instruments to measure manually the following quantities:

- hydrometeorological quantities (daily);

- dam leakage (weekly);
- crest displacements, by means of three collimation lines (monthly).

Such measurements, made since the dam was built, never pointed out problems concerning the dam behaviour.

4. TARGETS OF THE INTERVENTION

Taking into account the location of the dam and the operational difficulties due to the high elevation, it has been decided to install an automatic monitoring system; the dam can actually be reached only by helicopter and cannot be surveyed for long periods of the year because of plentiful snowfalls. The installation of automatic monitoring system was considered to be a very important element to improve the surveillance of the dam safety.

The tele-transmission of the main measured quantities to a constantly manned center is foreseen, so as to acquire timely possible signal of anomalous behaviour.

Together with the works for installation of the monitoring instrumentation, both in-situ and laboratory investigations on dam and foundation materials were carried out.

5. DESCRIPTION OF THE INTERVENTIONS

5.1 Monitoring system

Consistently with the above mentioned targets, the existing monitoring systems was completed with the installation of the following additional instruments (see Fig.1):

- one inverted plumb-line, in the main section of the dam, anchored in the foundation rock at a depth of about 25 m, with two reading stations (one located in the transversal tunnel at the dam base, the second housed in a chamber close to the crest);
- three piezometers to measure the uplift pressures at the contact between the dam and the foundation.

The automation of the monitoring system is based on the automatic acquisition and tele-transmission of the following quantities:

- water-level;

- meteorological quantities (rain, ambient temperature, snow);
- planimetric displacements measured by the two reading stations of the inverted plumb-line;
- uplift pressures (three piezometers);
- leakage.

A scheme of the updated monitoring system is shown in Fig.1.

5.2 Tests on dam and foundation materials

For the characterization of the dam masonry and of the foundation rock the following in situ and laboratory tests were carried out: sonic tests in bereholes, sonic tomography, inspection with television probe, laboratory tests on samples.

The masonry was found to be rather sound; the contact between the dam and the foundation was generally good, and the foundation rock was also in good condition.

6. COMPARISON OF ALTERNATIVE SOLUTIONS

The installation of rockmeters in the main section and of inverted plumb-lines in two lateral sections were examined as possible additional expansions of the monitoring system.

But it was judged that such addition, although providing a more complete description of dam behaviour, did not add much in regards to the dam safety surveillance.

Therefore the cost for such additional installation (about 60% in addition to the designed solution) was not considered justifiable.

7. EXECUTION OF THE INTERVENTION

The dam location and the difficult environmental conditions required stringent planning both for the drilling operations and for the installation of the equipment.

The limited rooms available within the dam body affected some works, such as the realization of the leakage collecting system.

In some cases the work conditions have influenced the adopted solutions. For instance, the difficulty of introducing the boring probe in the transversal tunnel, as requested to house two reading stations of plumb-lines in a single room, suggested the realization of a single inverted plumb-line with two reading stations, one in the transversal tunnel and one close to the crest elevation (see Fig.1).

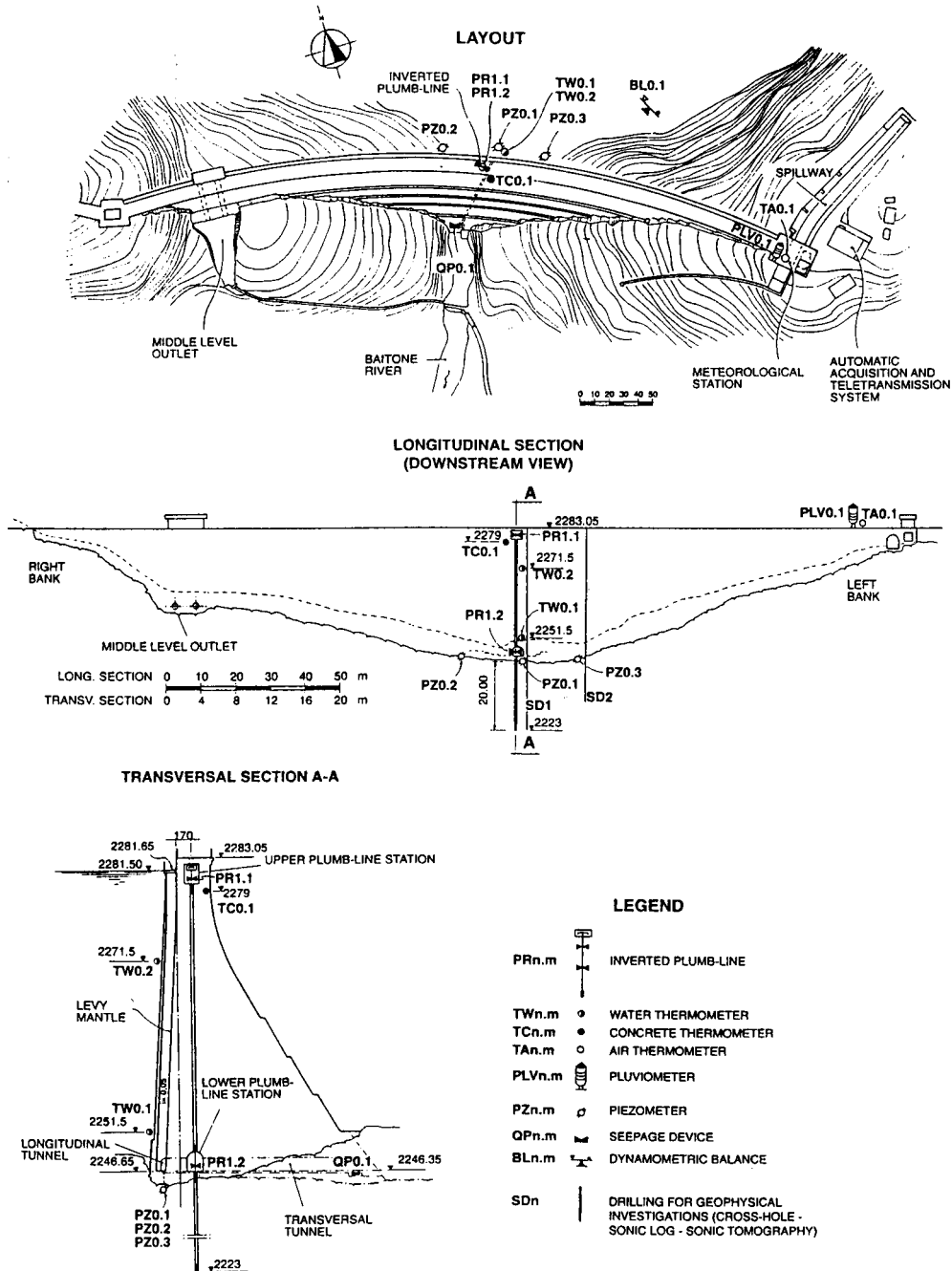


Fig. 1 - BAITONE DAM MONITORING SYSTEM

Improvement of existing dam monitoring

MARUNUMA BUTTRESS DAM

Example presented by the Japanese National Committee

1. INTRODUCTION OF MARUNUMA BUTTRESS DAM

Marunuma Dam is located in northwest 150 km far from Tokyo and is managed by Tokyo Electric Power Company. The old Marunuma Dam was constructed in 1930 and has been deteriorated by the severe weathering. Based on the analysis of inspection data, the dam was repaired in 1968-1969.

2. DAM AND RESERVOIR

General data is shown in Table 1.

TABLE 1. General Data of Marunuma Dam

Type	Buttress dam
Height	32.1 m
Crest length	88.2 m
Volume of dam	13 540 m ³
Total storage capacity	13 600 000 m ³
Effective storage capacity	11 500 000 m ³
Available depth	28.0 m

Photographic view from downstream site is presented in photo 1.

3. INVESTIGATION OF OLD DAM

3.1 Examination of old dam

This dam is located at EL. 1400 m.

Old dam has been cracked in the upstream concrete deck caused by the freezing and thawing. Therefore much leakage had been found from construction joints between the deck slab and supporting wall.

RC slab and buttress were monitored by the strain meter, joint meter, etc., as shown in Fig.3.

3.2 Analysis of observed data

Analysis was made on the following items:

- 1) chemical analysis of cored concrete
- 2) compressive strength of cored concrete
- 3) sonic property of cored concrete
- 4) deformability of cored concrete
- 5) deformability of reinforced steel
- 6) joint movement during the reservoir operation
- 7) leakage of water during the reservoir operation
- 8) opening of existing cracks

3.3 Conclusion from the analysis of observed data

Judgement for repair of dam and foundation have been reduced as follows:

- 1) Causes of deterioration: Many cracks had developed due to the freezing and thawing of reinforced concrete deck and due to the differential movement of heterogeneous rock foundation.

- 2) Deterioration of cracked concrete: The calcium component was liquidated out by leakage water, and this phenomenon accelerated the deterioration of reinforced steel

4. DESIGN OF NEW MONITORING SYSTEM

New concrete slab was covered on the old deck slab. This construction was carried out in 1968-1969. Compressed force in the slab had been introduced to the renewal deck by strand. The repaired dam is shown in Fig.1 and in Fig.2.

Safety of the dam has been monitored by the new monitoring system as shown in Fig. 3. Displacement at crest of dam is only several millimeters and the maximum tensile stress in steel is only 600 kgf/cm².

5. IMPORTANT ROLE OF MONITORING SYSTEM FOR SAFETY ASSESSMENT OF OLD DETERIORATING DAM

This deteriorating old dam has refreshed by careful inspection of the dam and by suitable repair of dam and foundation. Safety of the new dam has been assured by the new monitoring system.

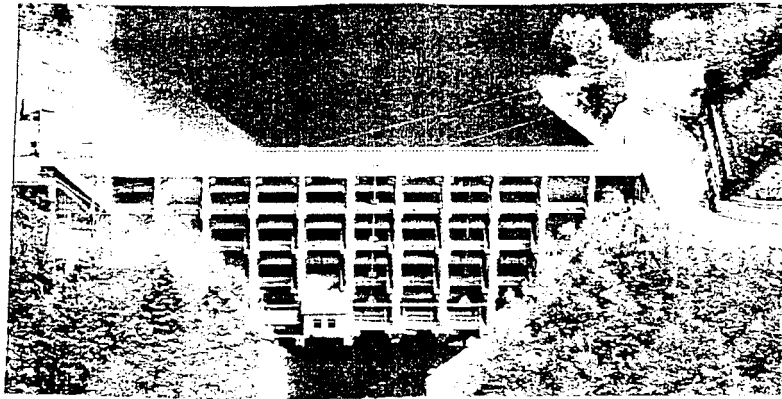


Photo 1 Marunuma Buttress Dam after Repair

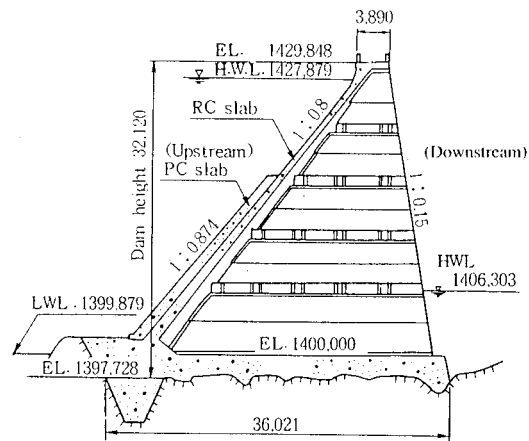


Fig. 1. Principal Cross Section

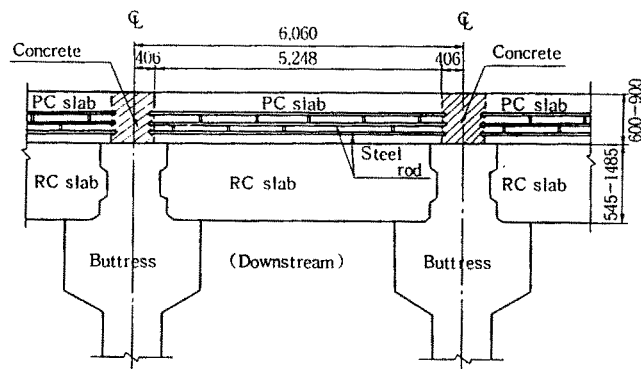


Fig. 2. Detailed Cross Section of Upstream Slab

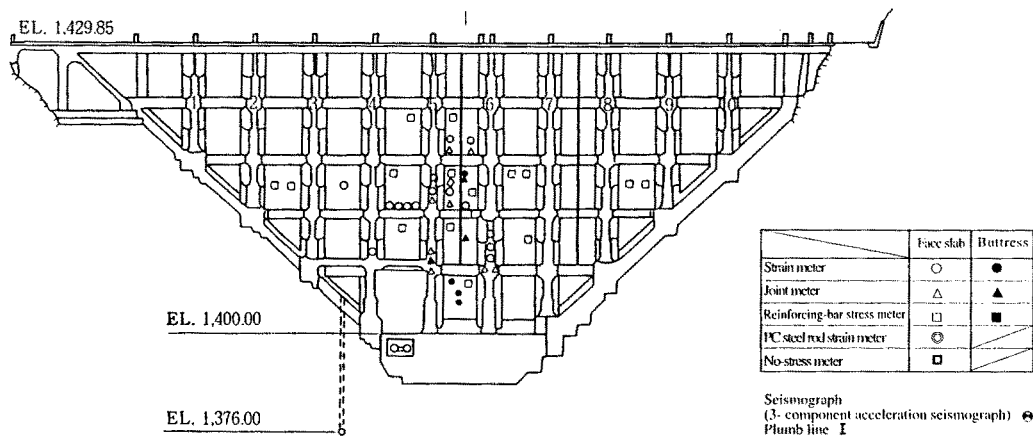


Fig. 3. Monitoring System of Marunuma Dam

Improvement of existing dam monitoring

KOHMYO-IKE FILL DAM

Example presented by the Japanese National Committee

1. INTRODUCTION

Kohmyo-Ike fill dam has been used for irrigation for 60 years in Osaka Prefecture.

Main data of the dam is shown in Table 1. During the period of 60 years, the phenomena of leakage from downstream surface had become a severe problem concerning the dam safety, as shaded zone in Fig. 1.

Therefore, based on the careful inspection of leakage water, the upstream surface was repaired using the silty clay.

After the repair, monitoring system of phreatic surface shows the sound state in seepage flow.

Table 1. Kohmyo-Ike Dam

height	26.5 m
crest length	350.0 m
slopes	1 : 3.2 (upstream) 1 : 2.7 (downstream)
reservoir	3 690 000 m ³

2. INVESTIGATION TO ANALYSE THE PRESENT SITUATION

In order to grasp the state of leakage water from the dam body, following investigations were carried out. These are follow up the phreatic surface by monitoring of water level in some vertical holes, and measurement of the amount of leakage water etc..

Based on the investigations, repair of dam body was decided.

Table 2. Soil Property

grain	gravel 0%, sand 8%, silt 62%, clay 30%	
consistency	WL = 53.4% Wr = 24.9% Ir = 28.5%	
water content	32.7%	
specific weight	2.63	
shear (UU)	cohesion	0.6 kg/cm ²
	friction angle	16°30'
optimum water content	25.6%	
max. dry density	1.38 g/cm ³	
permeability	3.58 x 10 ⁻⁷ cm/s	

3. DESIGN OF THE NEW MONITORING SYSTEM

The number of monitoring instruments in order to measure the behaviour of seepage water is summarized in Table 3.

TABLE 3. Number of Monitoring Instruments

ITEM	PLACE	BEFORE REPAIR	AFTER REPAIR
Vertical hole for the measurement of phreatic surface	Dam	11	21
	Abutment	0	2
Measurement of Leakage water	downstream toe	1	2
	downstream berm	2	0
Piezometer		0	3

4. COMPARISON BEFORE AND AFTER REPAIR

Phreatic surface has been appeared in the downstream toe. Muddy zone due to the seepage water has been spreading in this area year by year.

The phreatic surface change of repaired dam has been monitored as Fig. 2 comparing with the state of before repair. And the decrease of leakage water was verified after the repair as shown in Fig. 3.

5. ECONOMICAL EVALUATION OF REPAIR AND MONITORING

It is notified that the location of the dam is very near to the populative town of OSAKA district. Therefore the disaster of Kohmyo-Ike dam would happen a serious loss of human life and social rejection of the using of the dam. Therefore it is emphasized that the benefit of repair and monitoring system of the dam is evaluated as excellent from not only point of view of safety but also of economy of public investment.

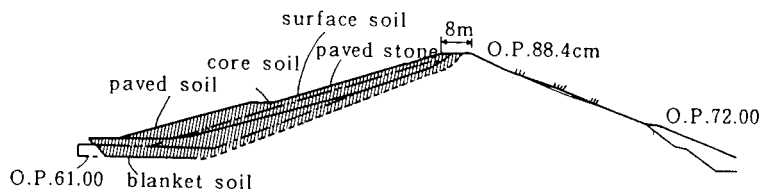


Fig. 1. Design for the Repair

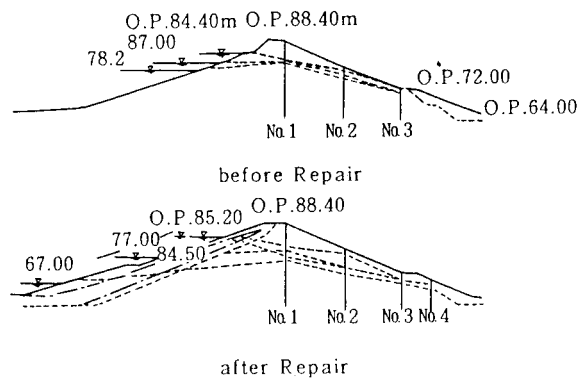


Fig. 2. Phreatic Surfaces before and after Repair

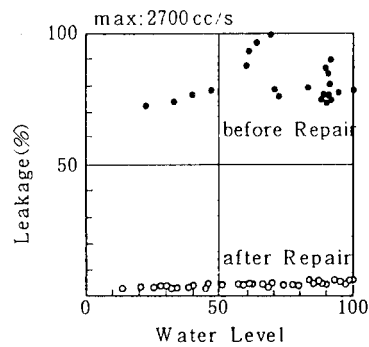


Fig. 3. Comparison of Leakage before and after Repair

Improvement of existing dam monitoring

COMPUERTO DAM

Example presented by the Spanish National Committee

1. INTRODUCTION

Compuerto dam was built in 1960, on the river Carrion, a tributary to the Duero, in the north of Spain. It is a gravity structure, 78 m high with a crest 273 m long. The slopes of both faces are 0.05 upstream and 0.71 downstream, the total concrete volume being 261 000 m³.

The foundation rock is fractured quartzite, in thick layers, dipping 65° downstream. The dam was built in 17 monoliths and has four levels of galleries close to the upstream face.

2. INVESTIGATIONS TO ANALYSE THE PRESENT SITUATION

A drilling campaign has been executed to establish the characteristics of the dam concrete and of the rock-concrete interface.

Tests have been made on the samples obtained in order to determine the compression strength, porosity and permeability.

The permeability has also been studied through Lugeon tests practised on the boreholes.

3. DESIGN OF THE NEW MONITORING SYSTEM

The dam being a gravity structure it was decided that control of uplift pressures and checking of displacements were the main goals of the intervention. To that effect the following elements were installed:

3.1 Grout curtain

The foundation rock has been sealed with a grout curtain 10 m deep all along the upstream side of the dam.

3.2 Drainage

All existing drains have been cleaned up and those in the foundation have been bored to a minimum depth of 10 m.

3.3 Drainage flow measurement

Ten Thomson weirs have been installed in various points along the galleries, one of them equipped with an automatic piezo-resistant limnimeter to control the total flow of water from the dam. Individual drain flows are measured with lower frequency.

3.4 Uplift pressures control

Two piezometers have been installed at the base of each monolith. Also two piezometers were installed in each joint between monoliths 6 and 14.

3.5 Pendulums

In monoliths 6, 9 and 12 a system of two pendulums, one direct and one inverted, have been installed.

The direct pendulums make use, whenever possible, of existing 300 mm diameter drains between galleries. The inverted ones have required the perforation of 300 mm diameter boreholes with depth of 15 m in monoliths 6 and 12, and 20 m in monolith 9.

3.6 Extensometers

In coincidence with the three pendulums, two extensometers, with two anchor points each, have been installed at the base of monoliths 6, 9 and 12, to check relative movements between the dam and its foundations.

3.7 Collimation and levelling

To observe the movements of the dam, both along the river axis and in the vertical direction, a system of targets and reference signals has been installed in the twelve highest monoliths.

3.8 Rotations

To check the rotations of the monoliths seven bases for clinometer and one permanent clinometer have been installed close to the dam foundation.

3.9 Concrete temperature

Monolith 9 has been equipped with 14 thermometers to map the internal temperature distribution, so that thermal effects can be separated from active load deformations.

3.10 Reservoir level monitoring

An automatic limnimeter has been installed in the bottom outlet valve chamber.

4. MONITORING SYSTEM IMPLEMENTATION

As a general consideration the control system is based upon robust and reliable instruments, that can be easily maintained and repaired.

Wherever possible local conditions at the dam have been used to facilitate the installation of the equipment. Thus, for the direct pendulums through the dam body, the existing 300 mm drain-holes have been used.

5. GUIDE-LINES FOR THE OPERATION OF THE NEW MONITORING SYSTEM

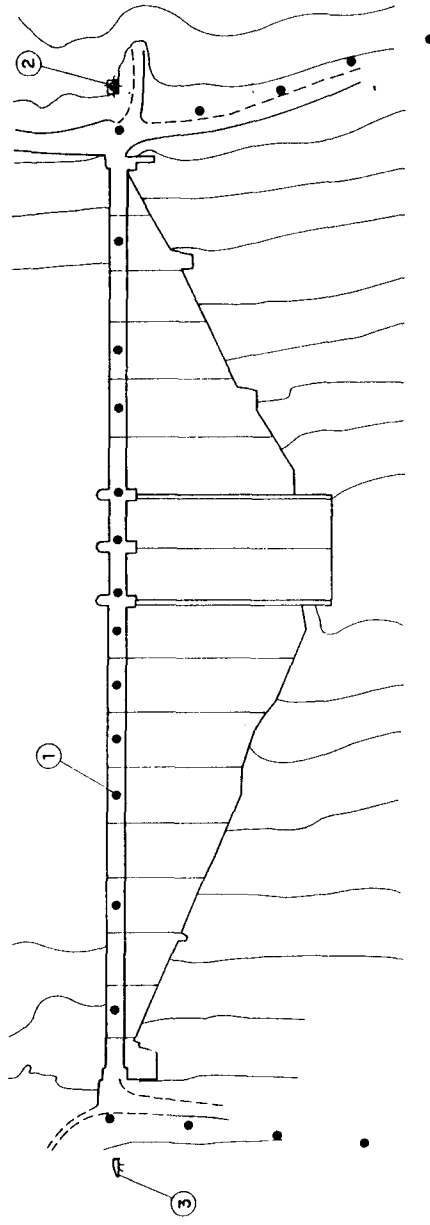
Compuerto dam is part of a system of five dams built on the rivers Carrion and Pisuega. Thus, the intervention on Compuerto dam is just one element in the whole project for the instrumentation of the system. According to this, a centralised control will be installed for the five dams, that will require the on-line checking of some of the most significant observations. An automated station has been installed in each dam to gather the data from the various

instruments. A system of data transmission to the project headquarters is being installed.

The monitoring team has been trained in the following areas:

- Surveillance and control of concrete dams
- Monitoring techniques as applied to the dams of the project
- Sensors, equipment and materials installed
- Reading procedures and general ideas on data interpretation

A practice period with actual data acquisition has been developed before the start of the operation of the system.

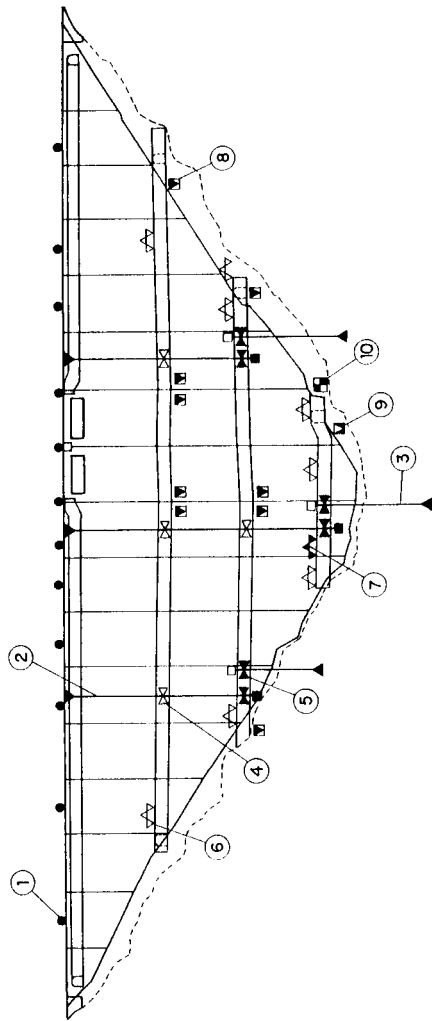


BARRAGE DE COMPUERTO
PLAN

1. Base pour collimation et nivellement
2. Repère pour collimation
3. Station pour collimateur

COMPUERTO DAM
PLAN

1. Base for collimation and levelling
2. Reference for collimation
3. Collimator station

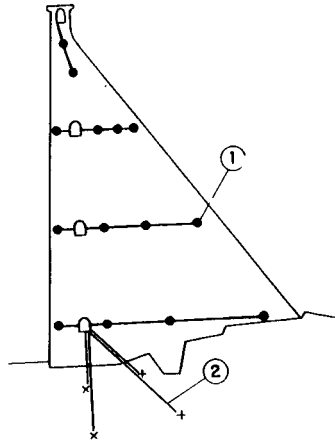


BARRAGE DE COMPUERTO
COUPE LONGITUDINALE

1. Base pour collimation et nivellement
2. Pendule direct
3. Pendule inversé
4. Planchette pour lecture du pendule
5. Planchette automatique
6. Base pour clinomètre
7. Clinomètre automatique
8. Jauge Thomson
9. Jauge Thomson automatique
10. Station de centralisation des lectures

COMPUERTO DAM
LONGITUDINAL SECTION

1. Collimation and levelling base
2. Direct pendulum
3. Inverted pendulum
4. Pendulum reading device
5. Automated pendulum reading device
6. Clinometer base
7. Automated clinometer
8. Thomson weir
9. Automated Thomson weir
10. Automated centralised reading station

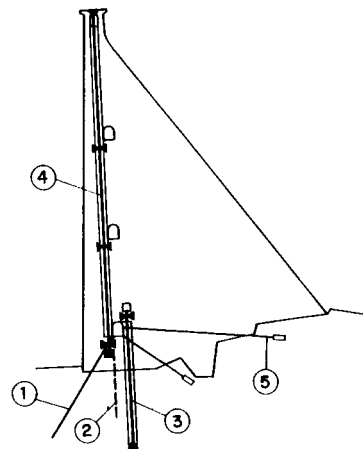


BARRAGE DE COMPUERTO
COUPE

- 1. Thermomètre
- 2. Extensomètre

COMPUERTO DAM
SECTION

- 1. Thermometer
- 2. Extensometer



BARRAGE DE COMPUERTO
COUPE

- 1. Voile d'étanchéité
- 2. Drainage
- 3. Pendule inversé
- 4. Pendule direct
- 5. Piézomètre

COMPUERTO DAM
SECTION

- 1. Grout curtain
- 2. Drain
- 3. Inverted pendulum
- 4. Direct pendulum
- 5. Piezometer

Improvement of existing dam monitoring

CHANDREJA DAM

Example presented by the Spanish National Committee

1. INTRODUCTION

Chandreja dam, built in 1953, is situated on the Navea River, in the northwest of Spain. It is a buttress dam, with a height of 85 m and a length of 236 m. The upstream slope is 0.40 and the downstream one is 0.50. Total concrete volume is 154 000 m³. The foundation rock is granite. The capacity of the reservoir is 61 hm³, and its main purpose is the production of hydroelectric power.

The only monitoring performed at the dam was the measurement of drainage flow, with some sporadic uplift observations.

2. MONITORING SYSTEM

Drainage: a curtain of drains has been drilled from the open spaces between the buttresses.

Uplift measurement: An array of piezometers has been installed in boreholes under the buttresses.

Collimation: A system for the observation of the horizontal movement of all dam blocks through angular collimation has been installed.

Joint movements: Relative displacement between several of the highest blocks is monitored with an array of bases for jointmeter.

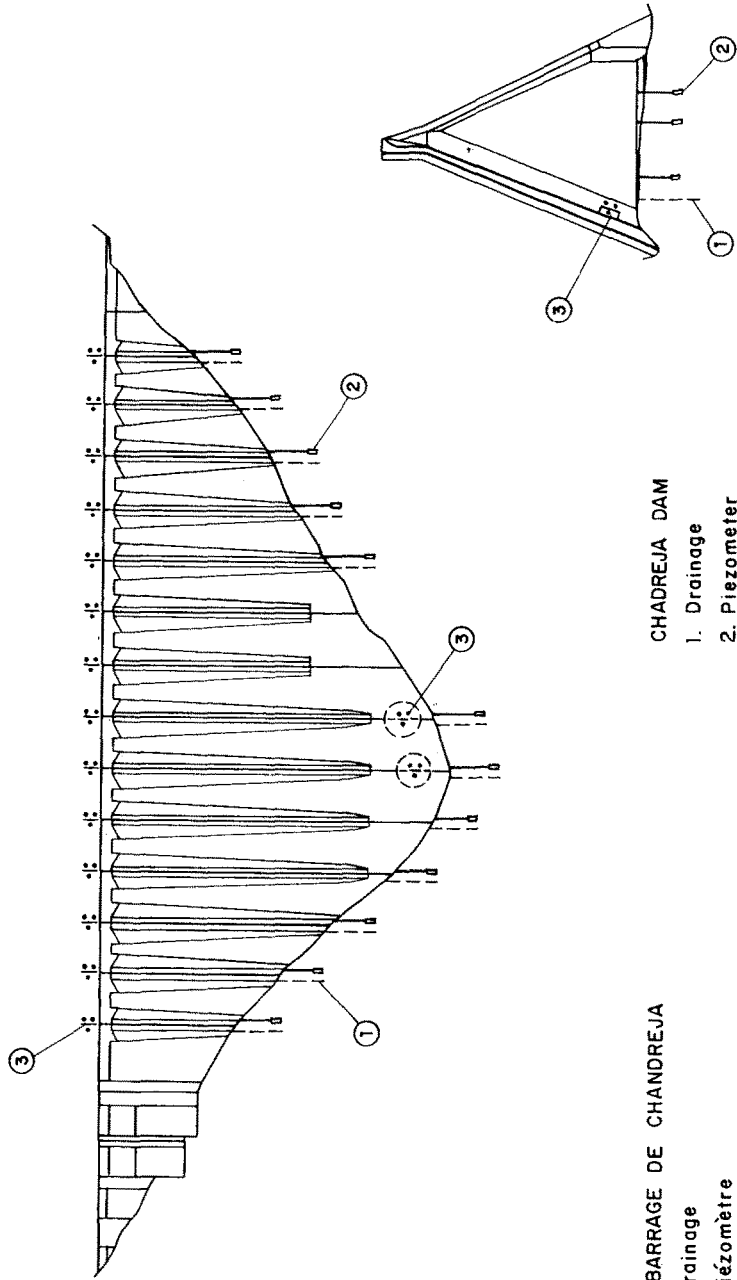
3. IMPLEMENTATION OF THE MONITORING SYSTEM

The works were facilitated by the type of the dam, which permits easy access to almost all the foundation and dam surfaces. In contrast, the reading of various instruments is somewhat hampered by bad weather conditions.

4. MONITORING SYSTEM OPERATION

Collimation and piezometer readings are performed every month. The drainage flow measurements, either drain by drain or for the whole dam, are taken fortnightly.

Once the system was in operation a sudden increase in the seepage flow and the uplift pressure in a particular area of the foundation was detected. It was treated with cement grouting and the subsequent restoration of the drainage and piezometer equipment effected.

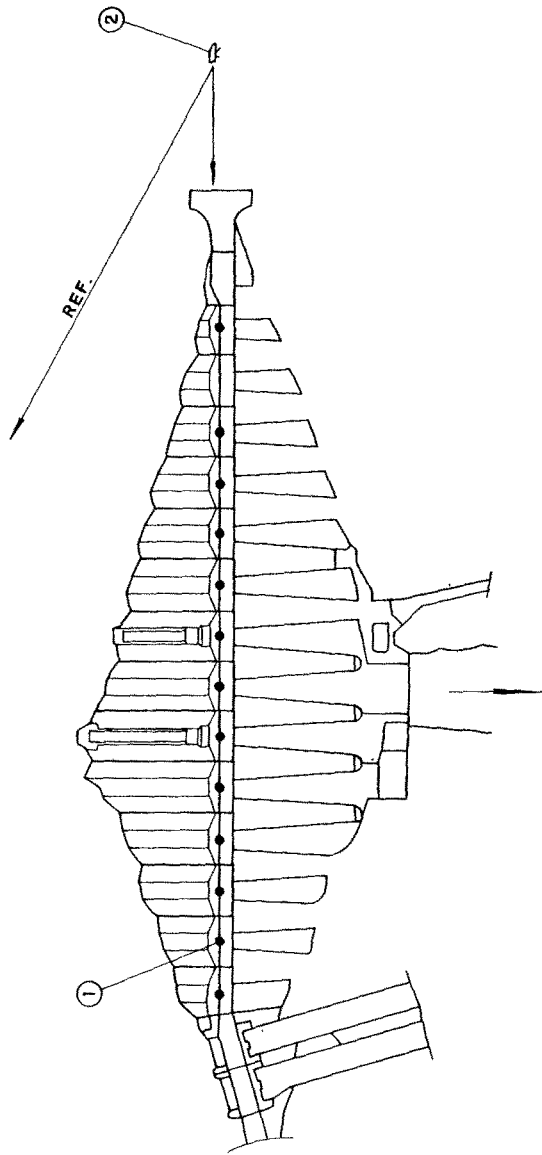


BARRAGE DE CHANDREJA

- 1. Drainage
- 2. Piézomètre
- 3. Contrôle des mouvements des joints

CHADREJA DAM

- 1. Drainage
- 2. Piezometer
- 3. Joint meter



BARRAGE DE CHANDREJA
PLAN

1. Base pour collimation
2. Station pour collimateur

CHANDREJA DAM
PLAN

1. Target for collimation
2. Collimator station

Amélioration de l'auscultation des barrages existants

BARRAGE DE SEEUFEREGG

Exemple présenté par le Comité National Suisse

1. INTRODUCTION

Dans ce qui suit, on ne considérera que le cas d'un barrage ne contenant aucun équipement, ou celui d'un barrage insuffisamment équipé (qui est le cas le plus fréquent). Lorsque les équipements sont défectueux ou démodés, il suffira en général de les remplacer par du matériel neuf ou plus moderne.

2. ANALYSE DE LA SITUATION EXISTANTE

La question que l'on doit se poser est la suivante : les équipements de mesure existants peuvent-ils encore satisfaire aux exigences que nous formulons aujourd'hui, relatives à une surveillance sûre et efficace du barrage, c'est-à-dire celles qui sont énoncées dans le bulletin 68 de la C I G B ?

Brièvement résumées, ces exigences sont les suivantes :

- a) La connaissance des charges extérieures, notamment le niveau du lac et les températures.
- b) La connaissance des paramètres qui caractérisent le comportement du barrage, à savoir :
 - les déformations du barrage et de sa fondation, mesurées :
 - . le long de lignes verticales : à l'aide de pendules et de pendules inversés prolongés dans la fondation, le cas échéant complétés par des extensomètres à barres multiples,
 - . le long de lignes horizontales : à l'aide d'alignements ou de polygonales, si possible prolongés dans les rives,
 - . dans l'espace : à l'aide de mesures géodésiques couvrant le barrage et ses environs.

Improvement of existing dam monitoring

SEEUFEREGG DAM

Example presented by the Swiss National Committee

1. INTRODUCTION

In the following analysis, only those dams containing no equipment or insufficient equipment (which is the most frequent case) will be considered. When the equipment is defective or outdated, it will generally be sufficient to replace it with new or more modern material.

2. ANALYSIS OF THE EXISTING SITUATION

The question which we must ask ourselves is the following : can the existing monitoring equipment still satisfy the requirements that we impose on it today, that is to say, those which were stipulated in bulletin 68 of the I C O L D ?

Briefly summarised, these requirements are as follows :

- a) The knowledge of the external forces, notably the level of the reservoir and the temperatures.
- b) The knowledge of the parameters which characterise the behaviour of the dam, that is :
 - the deformation of the dam and its foundation, measured :
 - . vertically : by means of plumb-lines and inverted plumb-lines extended to the foundation, if necessary complemented by multiple rod extensometers,
 - . horizontally : by means of alignments or traverses, if possible extended to the banks,
 - . in the open space : by means of geodetic measurements covering the dam and its surroundings.

- les sous-pressions au contact béton-rocher et à l'intérieur de la fondation (les pressions interstitielles s'il s'agit d'une digue) :
 - . mesurées à l'aide de prises de pression équipées de manomètres, ou par cellules hydrauliques ou électriques.
 - les infiltrations locales à travers le corps du barrage (et leur turbidité s'il s'agit d'une digue); le débit des eaux de drainage; les sources éventuelles à l'aval du barrage :
 - . mesurées à l'aide de stations de jaugeage judicieusement implantées.
- c) Un principe fondamental consiste à concevoir et à disposer les équipements de façon à obtenir des redondances, aussi bien à l'intérieur d'un même type de mesure que par la combinaison de mesures d'un type différent.
- d) Les instruments doivent si possible garantir une grande longévité, afin de ne pas compromettre la continuité des mesures.

En résumé, les questions auxquelles il faut répondre sont :

- les équipements existants répondent-ils aux exigences formulées ci-dessus, ou faut-il les compléter ?
- l'état des équipements permet-il de poursuivre les mesures à long terme sans risque d'interruption, ou faut-il les remplacer ?
- le remplacement du matériel existant par du plus moderne ne permettrait-il pas, à précision et fiabilité égales (ou meilleures), de rationaliser le travail ?
- les mesures sont-elles faciles à effectuer, autrement dit peut-on éviter de faire appel à du personnel hautement spécialisé ?
- peut-on effectuer les mesures facilement en toutes circonstances, par exemple en hiver ou pendant de grosses crues ?
- y a-t-il des mesures d'importance secondaire que l'on pourrait abandonner ?

- the uplift pressures at the concrete-rock interface and at the interior of the foundation (the pore pressures in the case of embankment dams) :
 - . measured by means of pressure outlets equipped with manometers, or hydraulic or electric gauges.
 - the seepage across the core of the dam (and its turbidity in the case of embankment dams); the discharge of drainage water; possible springs downstream of the dam :
 - . measured by means of gauging stations judiciously placed.
- c) A fundamental principle is to conceive and arrange the equipment so as to obtain some redundancy, equally well at the interior with the same type of measurement as with a combination of different types.
- d) The instruments should, if possible, guarantee a long service life, so as not to jeopardize the continuity of the measurements.

To sum up, the questions we must answer are :

- does the existing equipment fulfil the requirements set out above, or must we complement it ?
- is the state of the equipment good enough to enable it to carry out the measurements in the long term without risk of interruption, or must we replace it ?
- will not the replacement of the existing material by something more modern, with an equal precision and reliability (or better), enable it to rationalise the work ?
- are the measurements easy to take, in other words can we avoid having to call out highly specialised personnel ?
- can we take the measurements easily in all circumstances, for example in winter or during large floods ?
- are there any measurements of secondary importance that we could abandon ?

3. EXEMPLE DU BARRAGE-POIDS DE SEEUFEREGG

3.1 Historique

Le barrage de Seeuferegg, situé dans les Alpes bernoises, fait partie d'un aménagement hydro-électrique déjà ancien, appartenant à la Société des Forces Motrices de l'Oberhasli, qui utilise les eaux du cours supérieur de l'Aar et de ses affluents.

Les ouvrages (barrages, prises d'eau, galeries, centrales de turbinage, centrales de pompage) ont été réalisés progressivement et permettent actuellement une production annuelle moyenne de 2 000 GWh.

Les barrages à accumulation ont été exécutés en deux périodes distinctes :

Barrages exécutés

De 1926 à 1932

Gelmer : Barrage-poids
Spitallamm : Barrage-voûte
Seeuferegg : Barrage-poids

De 1948 à 1954

Räterichsboden : Barrage-poids
Mattenalp : Barrage-poids
Totensee : Barrage-poids
Oberaar : Barrage-poids

Les barrages de Spitallamm et de Seeuferegg, séparés par un éperon rocheux, créent cependant un seul lac d'accumulation.

Les équipements d'auscultation de tous ces barrages ont été modernisés et complétés entre les années 1980 et 1985. Nous avons choisi celui de Seeuferegg comme exemple caractéristique. Il a une longueur de 315 m et une hauteur de 40 m sur une fondation granitique.

3.2 Description et analyse des anciens dispositifs d'auscultation

Voir Fig. 1

D'une façon générale, ces dispositifs, jugés aujourd'hui insuffisants, étaient pourtant remarquables à l'époque. Il ne fait aucun doute que l'ingénieur qui les avait conçus, H. Juillard, a le premier posé la base pour une surveillance efficace du comportement des barrages en Suisse. Ainsi, par exemple, le premier barrage-voûte important de Suisse, celui de Spitallamm, semble être le premier barrage au monde à avoir été équipé de pendules.

3. EXAMPLE OF THE GRAVITY DAM OF SEEUFEREGG

3.1 History

The Seeuferegg dam, situated in the bernese Alps, forms part of an old hydro-electric plant, belonging to the Oberhasli Power Generation Company, which uses the upper waterways of the Aar and its tributaries.

The works (dams, water intakes, galleries, turbine halls, pumping stations) were carried out progressively and maintain, at present, an annual average production of 2 000 GWh.

The storage dams were executed in two distinct periods :

Dams executed

<u>From 1926 to 1932</u>	<u>From 1948 to 1954</u>
Gelmer : Gravity dam	Räterichsboden : Gravity dam
Spitallamm : Arch dam	Mattenalp : Gravity dam
Seeuferegg : Gravity dam	Totensee : Gravity dam
	Oberaar : Gravity dam

The Spitallamm and Seeuferegg dams, separated by a rock out-crop, create, nevertheless, a single storage reservoir.

The monitoring equipment of all these dams was modernised and complemented between the years 1980 and 1985. We have chosen that of the Seeuferegg as a characteristic example. It has a length of 315 m and a height of 40 m on a granite foundation.

3.2 Description and analysis of the original monitoring devices

See Fig. 1

In a general way, these devices, regarded today as inadequate, were, however, remarkable at the time. There is no doubt that the engineer who had conceived them, H. Juillard, laid down the first basis for an efficient surveillance of the behaviour of dams in Switzerland. Thus, for example, the first major arch dam in Switzerland, that of Spitallamm, seems to be the first dam in the world to have been equipped with plumb-lines.

Pendule. Quoique d'une longueur égale à 8 fois sa hauteur, le barrage de Seeuferegg n'était équipé que d'un seul pendule, et encore sur la moitié de sa hauteur seulement, alors qu'il est fondé sur une barre rocheuse qui constitue elle-même un barrage naturel. Dans les années 1930 déjà on s'était rendu compte à l'aide de mesures géodésiques (extérieures) et d'alignement (dans les deux galeries de contrôle) que le barrage devait subir des déformations 3 fois plus grandes que celles mesurées à l'aide du pendule (1 à 2 mm). Et pourtant les mesures géodésiques et d'alignement furent interrompues.

Quant au pendule lui-même, il était précisément du type "Juillard" : pour la mesure, le fil était successivement mis en mouvement dans le sens de deux échelles orthogonales marquées sur une table de lecture et ses positions extrêmes étaient relevées par un observateur à l'aide d'une fourchette mue par le fil et effectuant un mouvement de rotation autour d'un axe affecté à chacune des 2 échelles. La position moyenne du fil, déterminée à l'aide d'un graphique, était d'une précision au moins égale à celle d'un pendule moderne à lecture optique. Mais le système avait 2 défauts :

- la lecture demandait la présence de 2 personnes expérimentées et prenait beaucoup de temps;
- un contrôle immédiat sur place, après la lecture, était pratiquement impossible.

Sous-pressions. On ne faisait pas de mesures, bien qu'il s'agisse d'un barrage-poids.

Infiltrations. En revanche, on mesurait les infiltrations à l'extrémité des 2 galeries de contrôle inférieures.

3.3 Description et justification des nouveaux dispositifs d'auscultation

Voir Fig. 2

Mesure des déformations. L'ensemble du dispositif, de ponctuel qu'il était, est devenu spatial. (Le principe en est donné dans la Fig. 3). En effet l'ancien pendule au centre (remplacé par un appareil moderne à lecture optique) a été complété par :

- 2 sections de mesure (une sur chaque rive) équipées d'un pendule suspendu et d'un pendule inversé pénétrant 40 m dans le rocher.

Plumb-lines. Despite having a length equal to 8 times its height, the Seeuferegg dam was only equipped with a single plumb-line, and furthermore for only half its height even though it was founded on a rock buttress which itself constituted a natural barrage. During the years of 1930 it had already been realised with the aid of geodetic measurements (external) and alignment (in the two control galleries) that the dam had to sustain deformations 3 times greater than those measured by the plumb-line (1 to 2 mm). Yet nevertheless the geodetic measurements and alignment were interrupted.

Regarding the plumb-line itself, it was precisely the type "Juillard" : for the measurement, the line was set in motion successively in the direction of two orthogonal scales marked out on a measurement table and its extreme positions were recorded by an observer by means of a fork moved by the line and setting up a rotating motion about one of the axes assigned to each of the two scales. The average position of the line, determined graphically, was of a precision at least equal to that of a modern plumb-line with optic reading. But the system had 2 faults :

- the reading required the presence of 2 experienced persons and took a lot of time;
- an immediate on-site check, after the reading, was practically impossible.

Uplift pressures. No measurements were taken, even though the subject was a gravity dam.

Seepage. On the other hand, the seepages were measured at the extremities of the 2 lower control galleries.

3.3 Description and justification of the new monitoring devices

See Fig. 2

Measurement of the deformation. The system as a whole, formerly very localised, has become spatial. In fact the original central plumb-line (replaced by a modern instrument with an optic reading) has been complemented by :

- 2 sectors of measurement (one on each bank) equipped with a suspended plumb-line and an inverted plumb-line penetrating the rock for 40 m.

- 1 réseau géodésique. Les barrages de Spitallamm et de Seeuferegg ont été dotés d'un réseau géodésique moderne (mesures d'angles et de distances) unique de grandes dimensions; mais des mesures réduites peuvent être effectuées en tout temps individuellement pour chaque barrage.
- 1 alignement dans la galerie supérieure pour contrôler la continuité des déformations "amont-aval" d'une rive à l'autre; il est prévu d'effectuer 2 mesures par année, une à lac vide et une à lac plein; à l'aide des pendules, cette mesure est rattachée aux points d'ancrage de ces derniers, qui sont supposés fixes; cet alignement peut en outre être rattaché aux mesures géodésiques extérieures, ce qui permet de vérifier, de temps en temps, si les ancrages des pendules inversés sont réellement fixes.
- Le parement aval du barrage a été équipé d'un certain nombre de repères géodésiques dont quelques-uns sont situés en face des repères d'alignement.

Mesure des sous-pressions. Deux sections transversales du barrage ont été équipées chacune de 3 tubes et manomètres pour la mesure des sous-pressions au niveau de la fondation.

Infiltrations. Les deux anciennes stations de mesure ont été conservées.

4. REMARQUES FINALES

Les considérations et l'exemple qui précèdent sont parfaitement applicables à un barrage du type voûte.

Signalons aussi que le Comité National Suisse des Grands Barrages a publié récemment :

"Measuring Installations for Dam Monitoring

Concepts - Reliability - Redundancy

- 1 geodetic network. The Spitalamm and Seeuferegg dams have been provided with a unique modern geodetic network of large dimensions (measuring angles and distances); but small-scale measurements can be taken at any time individually for each dam.
- 1 alignment in the upper gallery to check the continuity of the deformations "upstream-downstream" from one bank to the other; it was anticipated to take 2 measurements each year, one with the reservoir empty and one with the reservoir full; by means of the plumb-lines, this measurement is related to the anchorage points of the aforementioned, which are presumed fixed; this alignment can in addition be related to the external geodetic measurements, which enables a verification, from time to time, of whether the anchorages of the inverted plumb-lines are fixed in reality.
- The downstream face of the dam was equipped with a certain number of geodetic targets some of which were situated in front of the alignment targets.

Measurement of uplift pressure. Two transversal sectors of the dam were each equipped with 3 manometer tubes for the measurement of the uplift pressure at the foundation level.

Seepage. The two original measurement stations were retained.

1. FINAL REMARKS

The preceding example and considerations are perfectly valid for arch dams.

The Swiss National Committee on Large Dams has also recently published :

"Measuring Installations for Dam Monitoring

Concepts - Reliability - Redundancy

- Part 1 : Concepts

- Part 2 : Measuring installations and methods"

Le texte anglais a été distribué aux participants du
16ème Congrès International des Grands Barrages à San
Francisco, en 1988.

Ainsi que :

- Partie 3 : Appareils et méthodes de mesures

- Teil 3 : Messgeräte / Messmethoden

Une traduction anglaise est prévue pour 1991.

- Part 1 : Concepts

- Part 2 : Measuring installations and methods"

The text in English was distributed to the participants of the 16th International Congress on Large Dams at San Francisco, in 1988.

Also available :

- Partie 3 : Appareils et méthodes de mesures

- Teil 3 : Messgeräte / Messmethoden

An English translation is anticipated for 1991.

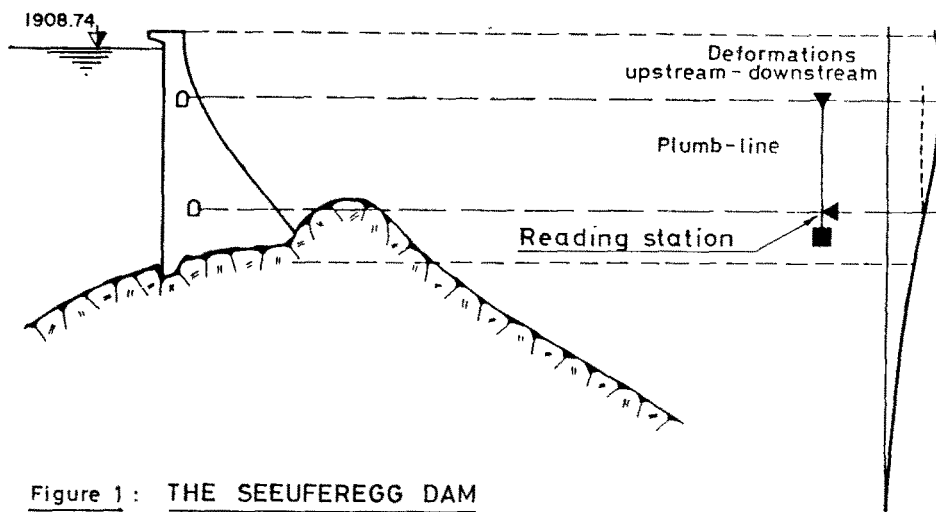
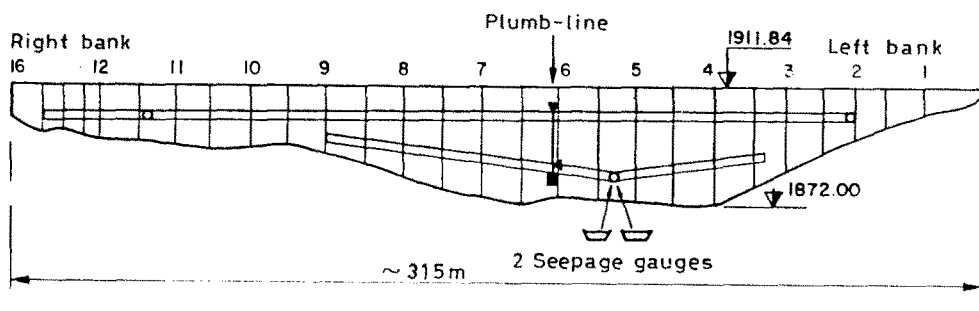


Figure 1: THE SEEUFEREGG DAM
Original devices for monitoring behaviour

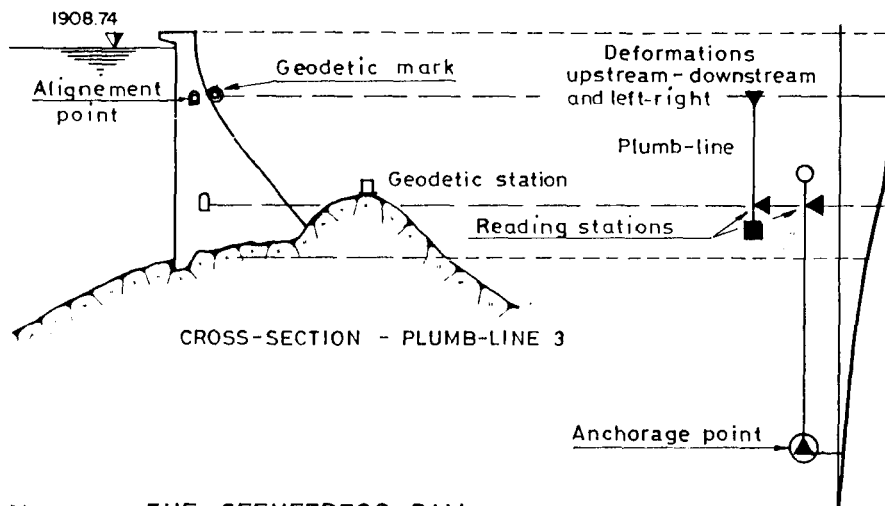
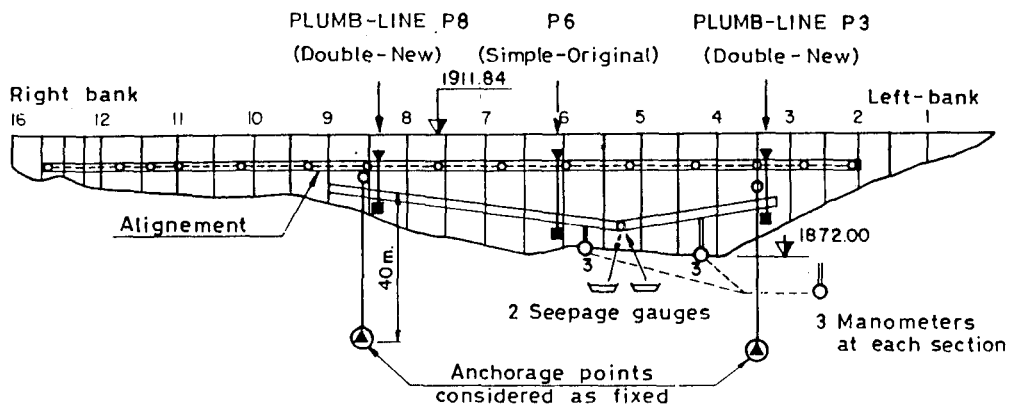


Figure 2: THE SEEUFEREGG DAM
 New devices for monitoring behaviour

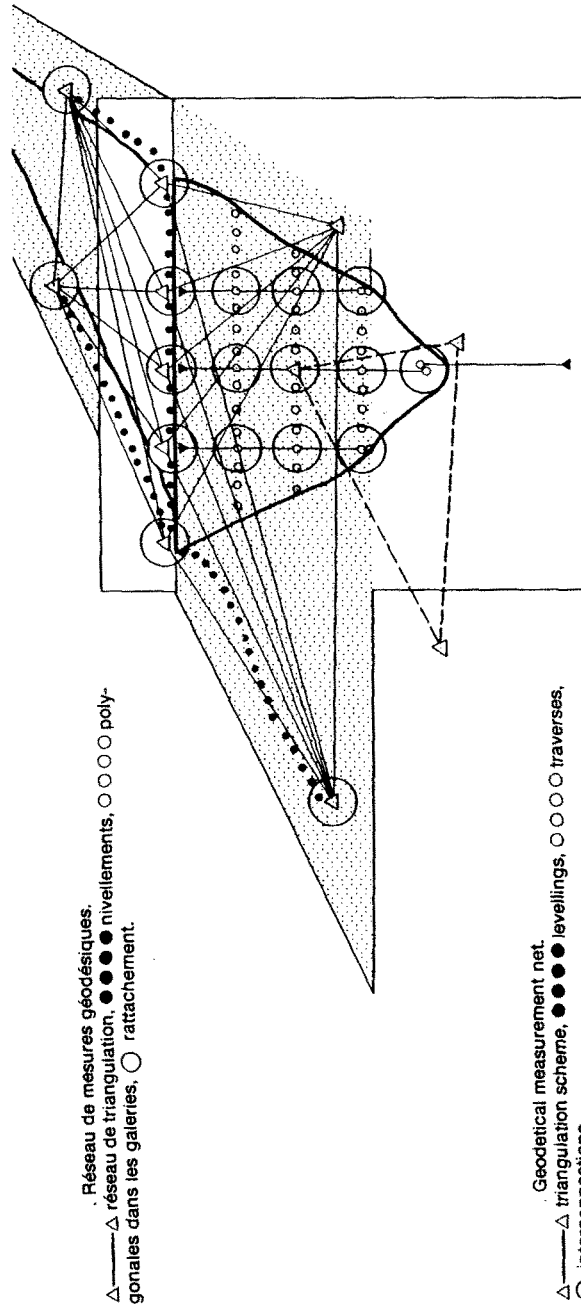


Fig. 3 Geodetical measurement network

Improvement of existing dam monitoring

PACOIMA DAM

Example presented by the USA National Committee

1. DESCRIPTION

Pacoima Dam is a 113 m high concrete arch structure built in 1928 across Pacoima Creek about 8 km from San Fernando, California, U S A.

The dam is owned by Los Angeles County Flood Control District. It has a crest length of 180 m and contains 168 000 m³ of concrete. Because of unfavourable foundation conditions at the left abutment, a low gravity thrust block was provided at this abutment both to sustain arch thrust and to provide necessary weight for adequate abutment stability against sliding. Vertical contraction joints with keys were provided in the dam, and these and the joint between the arch and the thrust block were grouted. A foundation grout curtain was provided along the entire upstream face of dam but no provisions were made for drainage

The predominant foundation rock type at the dam is gneissic quartz diorite. A combined pattern of joints and shears prevalent at the site, divides the rock into angular blocks. A very prominent joint system is present in the left abutment. The joints strike from N 70°E to S 80°E and dip from 85°N to 85°S. Seven significant faults are located within a 6 km radius of the dam.

In February 1971, the dam was strongly shaken by a Richter magnitude 6.6 earthquake with epicentre close to the dam. The principal effects of this shaking were: (i) opening of the vertical radial contraction joint between the dam and the left thrust block, (ii) a horizontal crack in the left thrust block, (iii) slight narrowing of canyon due to regional adjustment, and slight rotation and tilting of the dam, (iv) and downward movement of large blocks of rock mass along a failure plane in the left abutment. However, no noticeable cracking occurred in the arch structure.

Following the earthquake, comprehensive structural stability analyses were conducted using both trial load method and the 3-dimensional finite element static and dynamic analysis method for credible static and earthquake loading and actual material properties. The post-earthquake rehabilitation of the dam consisted of (i) repair and extension of foundation grout curtain under the dam and the abutments, (ii) installation of relief drains in the abutments to provide positive drainage and reduce development of significant water pressure within rock fractures, (iii) repair of open joint between the arch and the

thrust block, and cracks in the thrust block, and (iv) stabilization of Rock Mass B, under the thrust block by post-tensioned steel tendons.

Additional instrumentation was installed for monitoring structural performance of the rehabilitated dam.

2. INITIAL MONITORING SYSTEM

No instrumentation for monitoring structural performance of the dam and its abutments was provided at the time of construction. Careful long-term monitoring of the dam and its abutments consisted in monitoring foundation seepage, ground water levels at few important points by means of piezometers, and dam crest deflection movements by triangulation of survey markers on the dam crest and abutments, and a very systematic regular visual inspections of the dam and abutments.

3. NEW MONITORING SYSTEM

Following rehabilitation of the earthquake-shaken dam and left abutment, several rock mechanics instruments were installed to monitor the structural performance of the rehabilitated dam, especially both abutments during initial reservoir filling and subsequent service operation. Because the steep topography of the canyon prohibited use of precise survey techniques to detect movements, arrays of rock mechanics instruments were installed in both abutments at the locations shown in Figure 1.

The instrument installations were as follows:

- At the left (south) abutment, two multiple-element extensometers, two multiple-point rod extensometers, and two deflectometers were installed to monitor rock mass movement.
- At the right (north) abutment, three multiple-element extensometers and one multiple-element deflectometer were installed to monitor rock mass movement.
- A total of 20 piezometers (18 equipped with recorders), 14 in the left abutment and 6 in the right abutment, were installed to monitor ground-water levels within key areas of both abutment rock masses.
- An inclinometer was installed in the left abutment to detect any downslope movement of the rock mass adjacent to Rock Mass under thrust block.

- An array of 10 accelerometers, 6 of which are triaxial accelerometers, were installed to monitor vibrations of the dam, its foundation, and abutments.
- A water-pressure transducer was installed on the upstream face of the dam at the crown section 150 feet below dam crest.
- A precise geodetic survey network (Figure 2) established at the damsite several years before the earthquake was used to determine horizontal and vertical displacements of the dam and abutments
- Resistance thermometers installed at locations shown in Figure 3 to monitor concrete temperature in the dam.
- Load cells on eight selected tendons to monitor working force in tendons.

4. INSTRUMENT READING SCHEDULE

The monitoring instruments are observed by owner's trained personnel at a well-established regular time intervals, to furnish adequate information for continued performance monitoring of the dam and its abutments as follow:

a) Precise survey	semi annual
b) Extensometers	weekly
c) Deflectometers	weekly
d) Inclinometers	annually
e) Seismoscope, accelerometers	per occurrence
f) Seepage	weekly
g) Piezometers	weekly
h) Reservoir Water Level	continuous
i) Resistance Thermometers	weekly

5. DATA ANALYSIS AND PERFORMANCE EVALUATION

The owner's engineering division personnel collect the monitored instruments data, analyze it and assess the dam and abutment performance on the basis of criteria safety values. The monitored data has indicated satisfactory safe structural performance of rehabilitated dam and abutments.

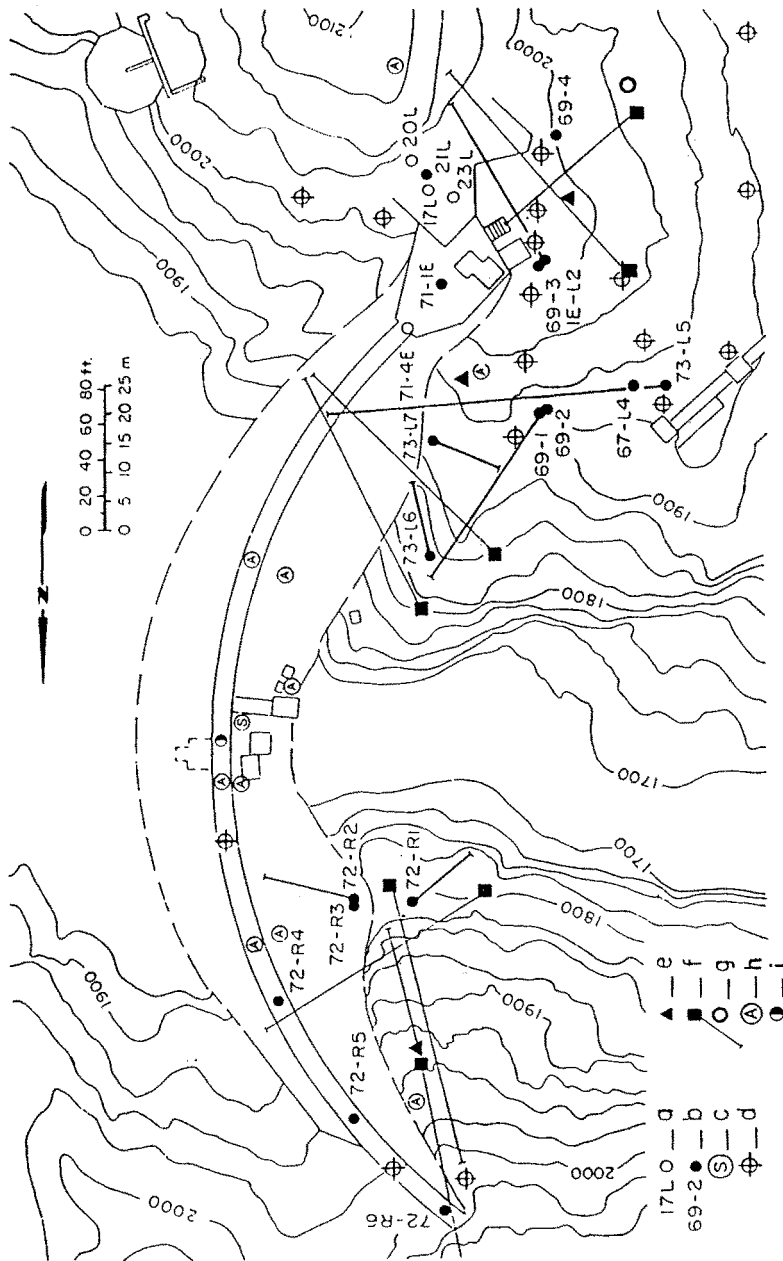


Fig. 1 Pacoima Dam

- | | | | |
|-------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|
| Instrumentation. | | Appareils de mesure. | |
| (a) Piezometer. | (e) Deflectometer. | (a) Piézomètre. | (e) Défectomètre. |
| (b) Piezometer with recorder. | (f) Extensometer. | (b) Piézomètre à enregistrement. | (f) Extensomètre. |
| (c) Seismoscope. | (g) Inclinator. | (c) Séismoscope. | (g) Inclinomètre. |
| (d) Survey marker. | (h) Accelerometer. | (d) Point de repère. | (h) Accéléromètre. |
| | (i) Thermometer. | | (i) Thermomètre. |

LEGEND
 △ 12 CMP PEDESTAL WITH BRASS INSERT
 ○ BRASS INSERT SET IN CONCRETE

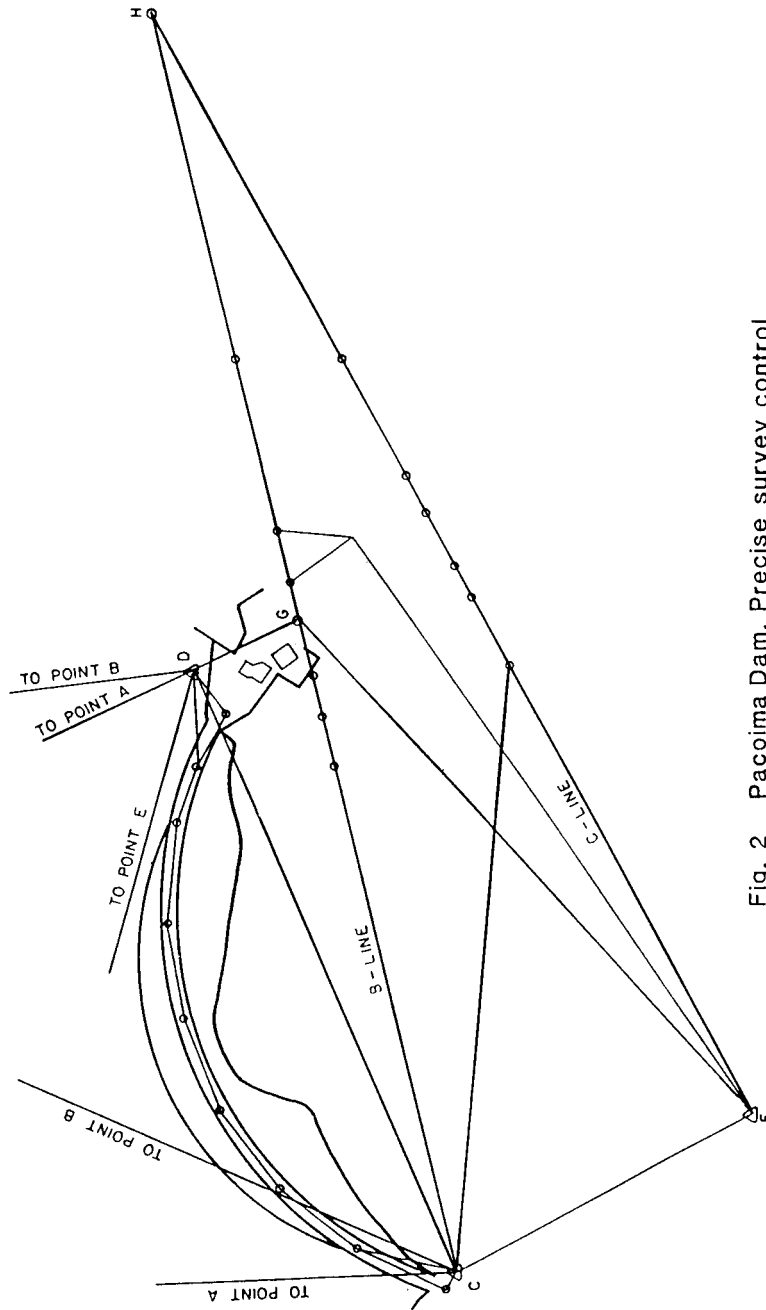


Fig. 2 Pacoima Dam. Precise survey control.

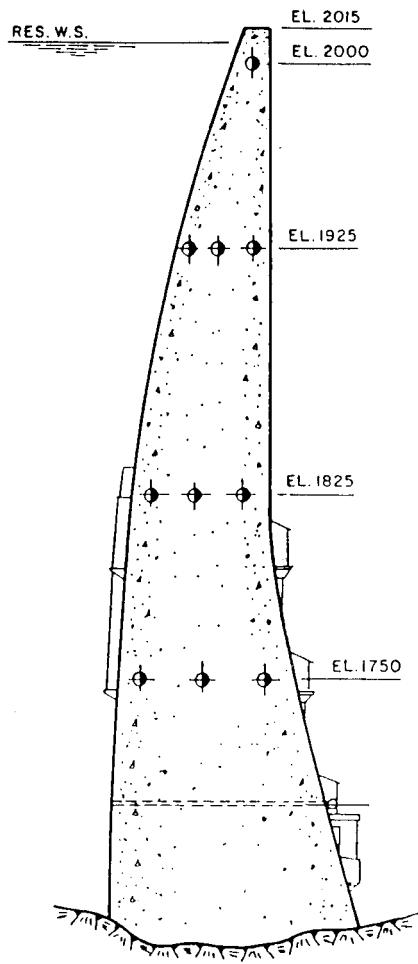


Fig. 3 Pacoima Dam. Location of thermometers.

Improvement of existing dam monitoring

EL DORADO FOREBAY DAM

Example presented by the USA National Committee

1. DESCRIPTION

El Dorado Dam, a 27.7 m high compacted earth embankment dam, is located on Long Canyon river near Pollock Pines in California, U S A. The dam built in 1923 is owned and operated by Pacific Gas and Electric Company (PG&E) for hydroelectric power generation. This is an example of a dam wherein no dam performance monitoring instrumentation was provided at the time of construction, but was subsequently retrofitted with such instrumentation. The dam has a crest length of 255 m, has crest width of 4.6 m with crest at EL 3804. The reservoir has 500 000 m³ gross capacity. The upstream face slopes at 3H:1V and the downstream face slopes at 2.5H:1V

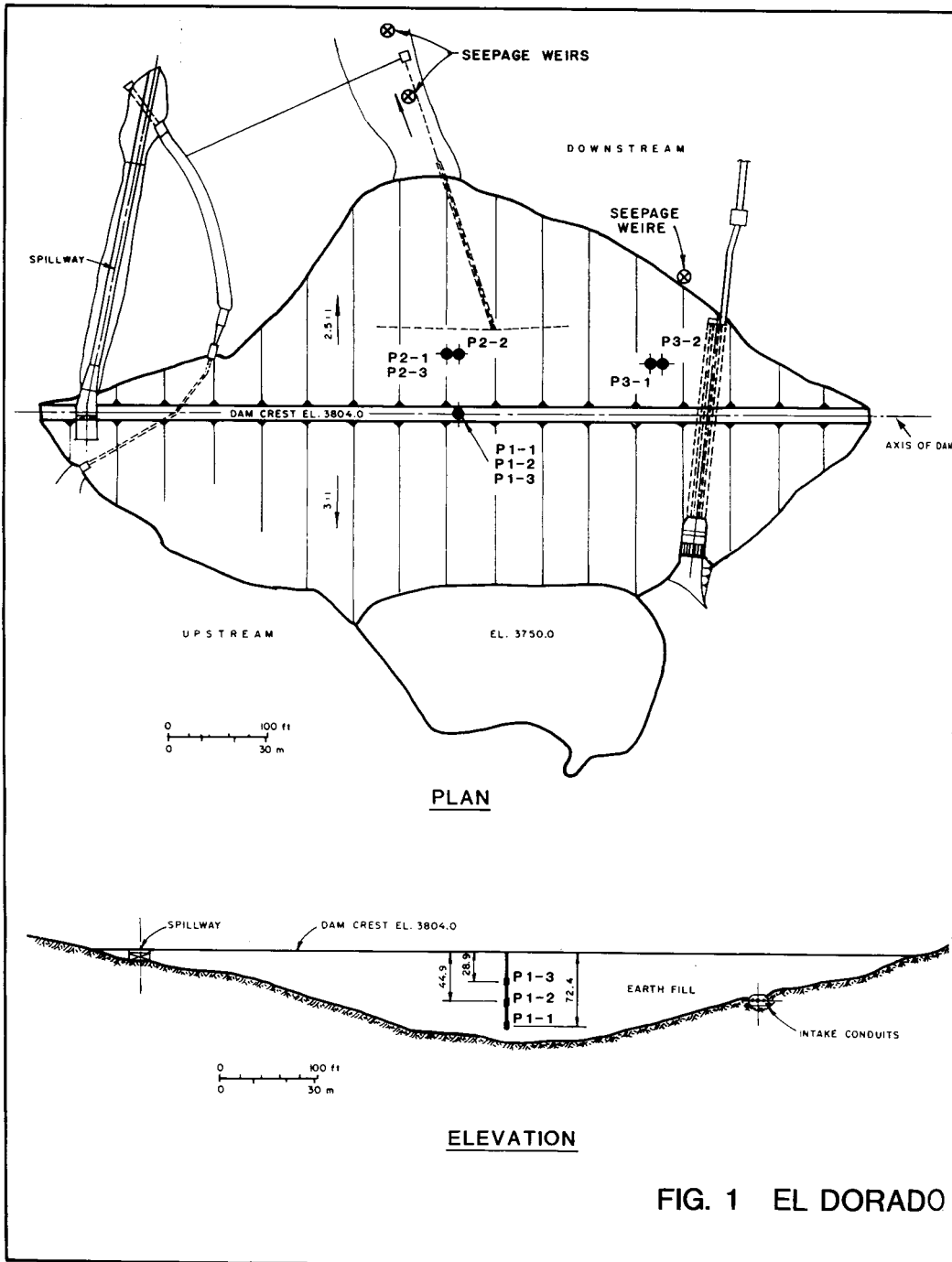
The foundation consists of approximately 10 feet of stiff sandy clayey silt with fragments of highly weathered slates and schists. Underlying this material is the bedrock composed of interlayered weathered slates and schists.

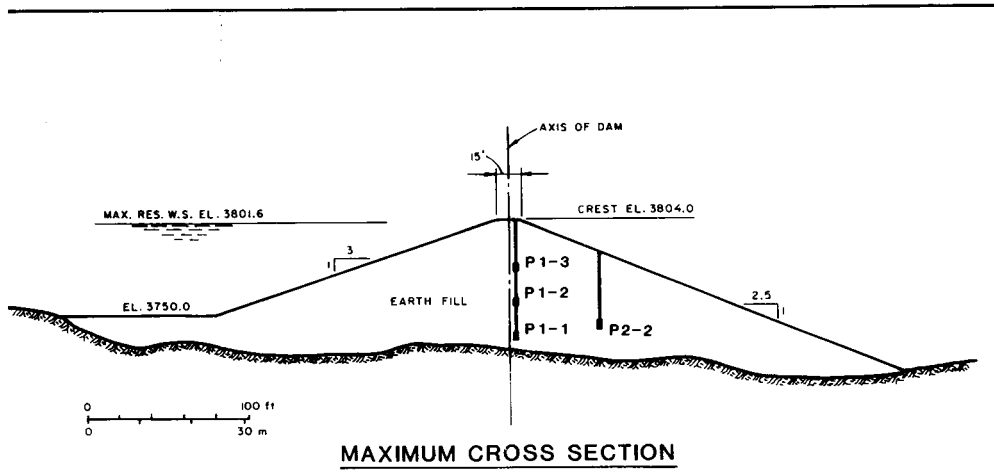
2. INITIAL MONITORING SYSTEM

No instrumentation was provided in the embankment dam when it was constructed in 1923. Subsequently, however, instrumentation has been installed for monitoring dam performance and safety.

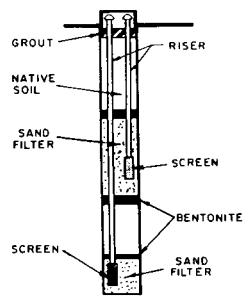
3. NEW MONITORING SYSTEM

New monitoring instrumentation system was provided in the dam in 1967 and supplemented in 1989 for providing information on necessary parameters for monitoring dam performance and safety. The new instrumentation is shown in Figure 1 and consists of the following:

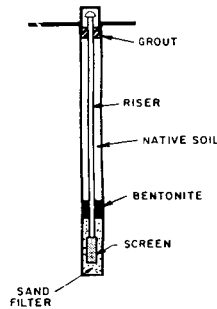




MAXIMUM CROSS SECTION



PIEZOMETER P2-1 & P2-3



PIEZOMETER P2-2

NOTE:
 PIEZOMETER RISER IS 1-1/4" PVC PIPE.
 PIEZOMETER SCREEN IS 2" PVC PIPE WITH FOUR
 0.01" HORIZONTAL SLOTS PER INCH OF LENGTH.

FOREBAY DAM

3.1 Piezometers

Eight open well piezometers were installed in 1967 at three locations in boreholes drilled to provide information on the material comprising the embankment. Three piezometers (1-1 thru 1-3) were installed at the same location at the maximum section on the crest, with sensing zones located at the embankment foundation interface and at two different levels in the embankment. Another group of three (2-1 thru 2-3) were installed approximately halfway down the downstream slope in line with the group on the crest. Sensing zones were located at the interface and two different levels in the embankment as shown in Figure 1. The remaining two (3-1 and 3-2) were installed at the same location on the downstream slope as the previous group but near the right abutment where the power conduit daylights.

In 1989 piezometers 2-1 thru 2-3 were replaced due to damage to the original installation. The replaced piezometers were also open well type. At the same time, piezometers 3-1 and 3-2 were abandoned because of the build up (accumulation) of silt in the sensing zones. Two new open well type piezometers, also labelled as 3-1 and 3-2 and with the sensing zone at the same elevation as for the abandoned 3-1 and 3-2, were installed immediately adjacent to the abandoned piezometers.

The piezometers were installed to provide long-term data for engineering studies to evaluate stability and safety of the dam and to monitor potential leakage from the power conduits underlying the embankment.

3.2 Seepage Measurements

Three 90 degree V-notch weirs shown at various locations are provided to monitor seepage from the dam.

4. OBSERVATION SCHEDULE

The piezometers and the downstream weirs are read at weekly intervals.

5. DATA ANALYSIS AND EVALUATION

The observed piezometers and seepage data are analyzed regularly and the results evaluated to assess the dam performance, by the professionals in the Owner's Engineering Organization who are experienced and well-trained in dam performance monitoring instrumentation and dam performance evaluation from monitored data.

Improvement of existing dam monitoring

SAYANO-SHUSHENSKAYA HYDROPOWER STATION DAM

Example presented by the USSR National Committee

1. TECHNICAL DATA

The 272 m high arch-gravity dam with the 230 m design head, the 40 m deep reservoir drawdown, 1066 m crest length and vertical pressure face has a 600 m radius circular curve in the upper third portion of the dam. The dam width along the foundation is 105.7 m.

The dam is divided into 15 m long sections. Each section is divided by the construction joints into 27 m wide vertical columns. The dam includes the abutment, station and spillway sections. The station part of the dam incorporates 10 water intakes and ten 7.5 m diameter turbine penstocks with 1.5 m thick reinforced concrete walls located at the downstream face. About $9 \cdot 10^6$ cubic meters of concrete has been placed in the dam, the actual strength of concrete determined by 180 days old cores equalling 36-40 MPa, and the elasticity modulus 4.4×10^4 MPa.

The dam site area is characterized by a severe climate with the average annual temperature 0.8°C . The foundation is formed by hard metamorphic schist having the average temporal compression stress equal to 150 MPa. The antiseepage measures in the foundation include a 100 m deep grout curtain and a 60 m deep hole drainage.

A complex of field observations is being carried out to control the behaviour of such a responsible structure. It includes monitoring of dam displacements, the openings of joints and the "concrete-rock" interface, the temperature, the stress-strain state, the seepage and uplift pressures both in the dam concrete and the foundation.

2. INSTRUMENTATION SYSTEMS

The measuring devices are located in the seven characteristic design cross-sections, i.e. in the arch crown, in the one-fourths of sections and between them, in the abutment, station and spillway parts of the dam. The concrete deformation devices are placed mostly near the upstream and downstream faces of

the dam (along the three directions in each measuring point). The displacements are recorded by geodetic methods using the direct and indirect plumb lines and hydrostatic levelling marks. The anchors of bench marks and plumb lines are buried below the foundation at the 60 m depth, and the hydraulic levelling marks are located in the side galleries at the 120 m distance from the toe of the arch.

The instrumentation placement was initiated in 1973, the reservoir filling in 1978, and the dam concreting was completed in 1988.

3. THE MONITORING RESULTS

The highest absolute dam settlement of 35 mm was measured in 1986 in the middle part of the river stream in the zone of the tectonic joint influence. With the higher upstream water level the settlement under the pressure face drop by 3-8 mm, and under the downstream face increase by 2-4 mm.

The measured horizontal crest displacements vary within the 152-90 mm range in the crown section (Fig.1).

The small openings of construction and radial joints prove the high quality of the structure sealing (cementation).

Only during the reservoir deep winter drawdowns the radial joint openings amount to 0.5 to 5 mm. In summer the joints are closed tightly.

The dam stress state has not yet stabilised. Basically, it is characterized by compression stresses in the cantilever and the arch directions reaching their maximum values in the mid part of the pressure face along its height (4.0-7.5 MPa).

The seepage rate through the dam concrete is 1.6 l/s, and through the foundation 123 l/s. The uplift pressures are below the design values.

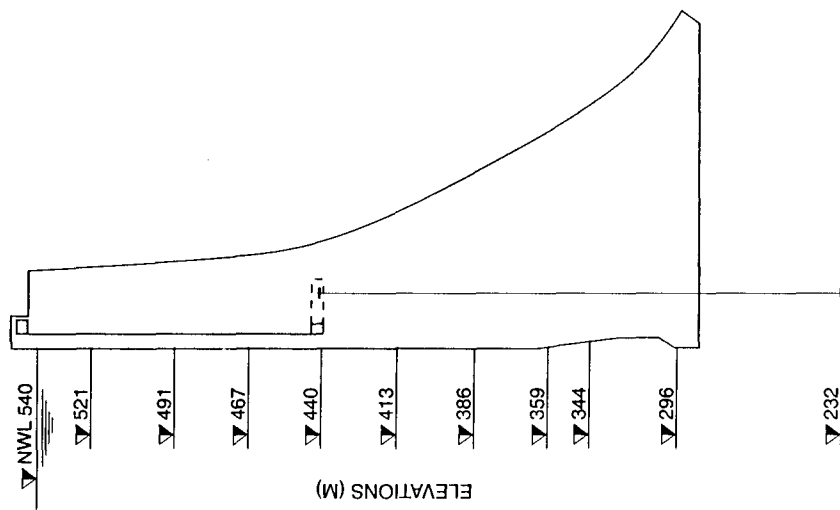
The major result of the observation performed is the measurement of the interface joint opening under the pressure face of stream sections. The opening was recorded by slot-measuring devices already at the one-third of the design head (Fig. 2). The opening width at a 0.5 m distance from the pressure face under section N 45 is 8 mm, and at a 1.3 m distance under section N 33- 5 mm. The maximum design opening of the interface joint for the design head is predicted to be 20 mm along up to 18 m length.

To closely control the condition of the interface, in 1988 some additional instrumentation was inserted in the dam(*).

In 1989 teletensometers and rock deformation meters located under sections N 25 and 39 at a 29 m distance from the pressure face with the 530 m upstream elevation showed a considerable growth of tensile strains. Therefore, the predicted value was already achieved at a head 10 m below the design one.

(*) Dam monitoring is performed by the Directorate of the Sayano-Shushenskaya hydropower station and the B.E. Vedenev All-Union Research Institute for Hydraulic Engineering (VNIIG).

SAYANO - SHUSHENSKAYA DAM



HORIZONTAL DISPLACEMENT (MM)

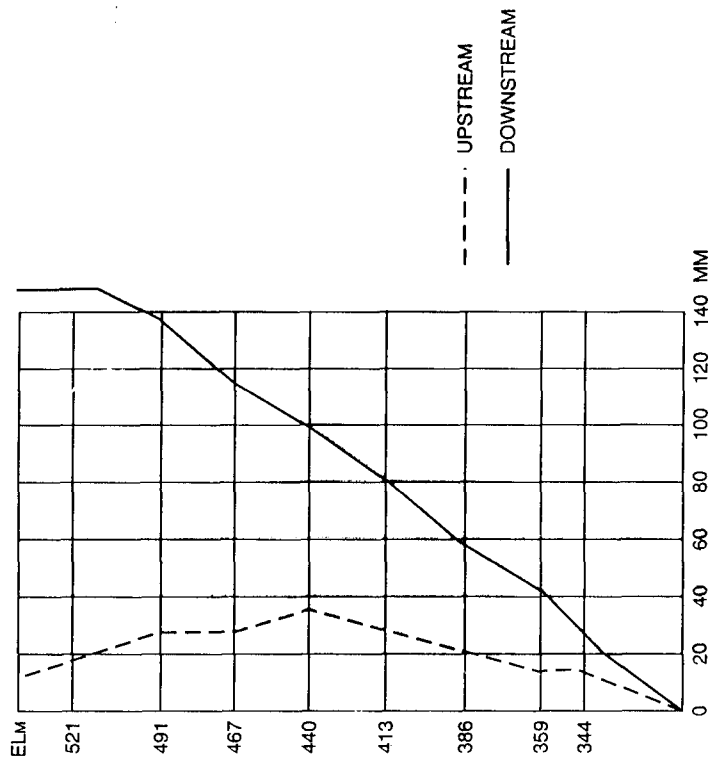


Fig. 1

SAYANO - SHUSHENSKAYA A.G. DAM

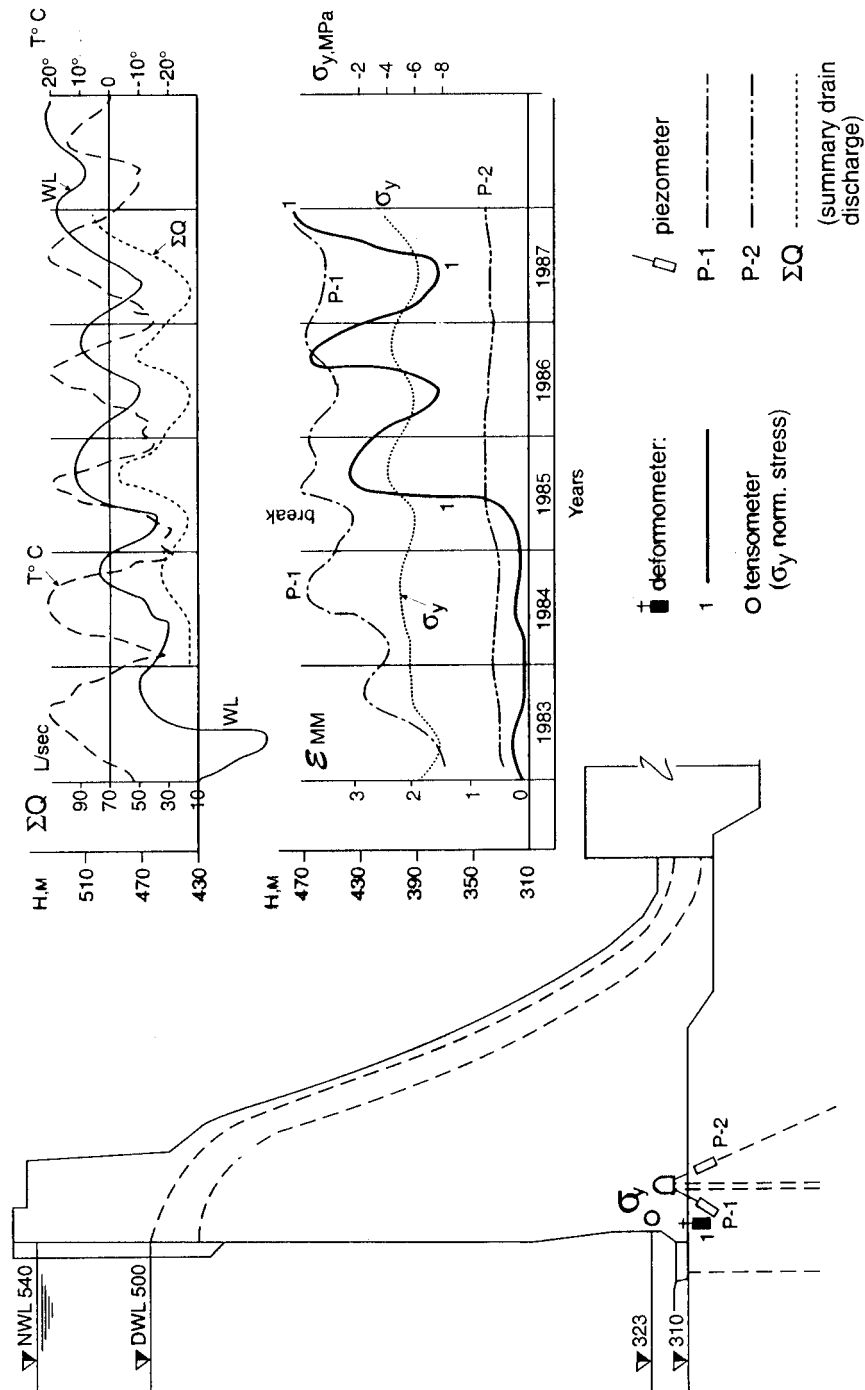


Fig. 2

Imprimerie de Montlignon
61400 La Chapelle Montlignon
Dépôt légal : juillet 1992
N° 16108
ISSN 0534-8293
Couverture : Olivier Magna

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées  *Computerized Archives*

*The General Secretary / Le Secrétaire Général :
André Bergeret - 2004*



**International Commission on Large Dams –
Commission Internationale des Grands Barrages
151 Bd Haussmann -PARIS -75008**