

DAM MONITORING

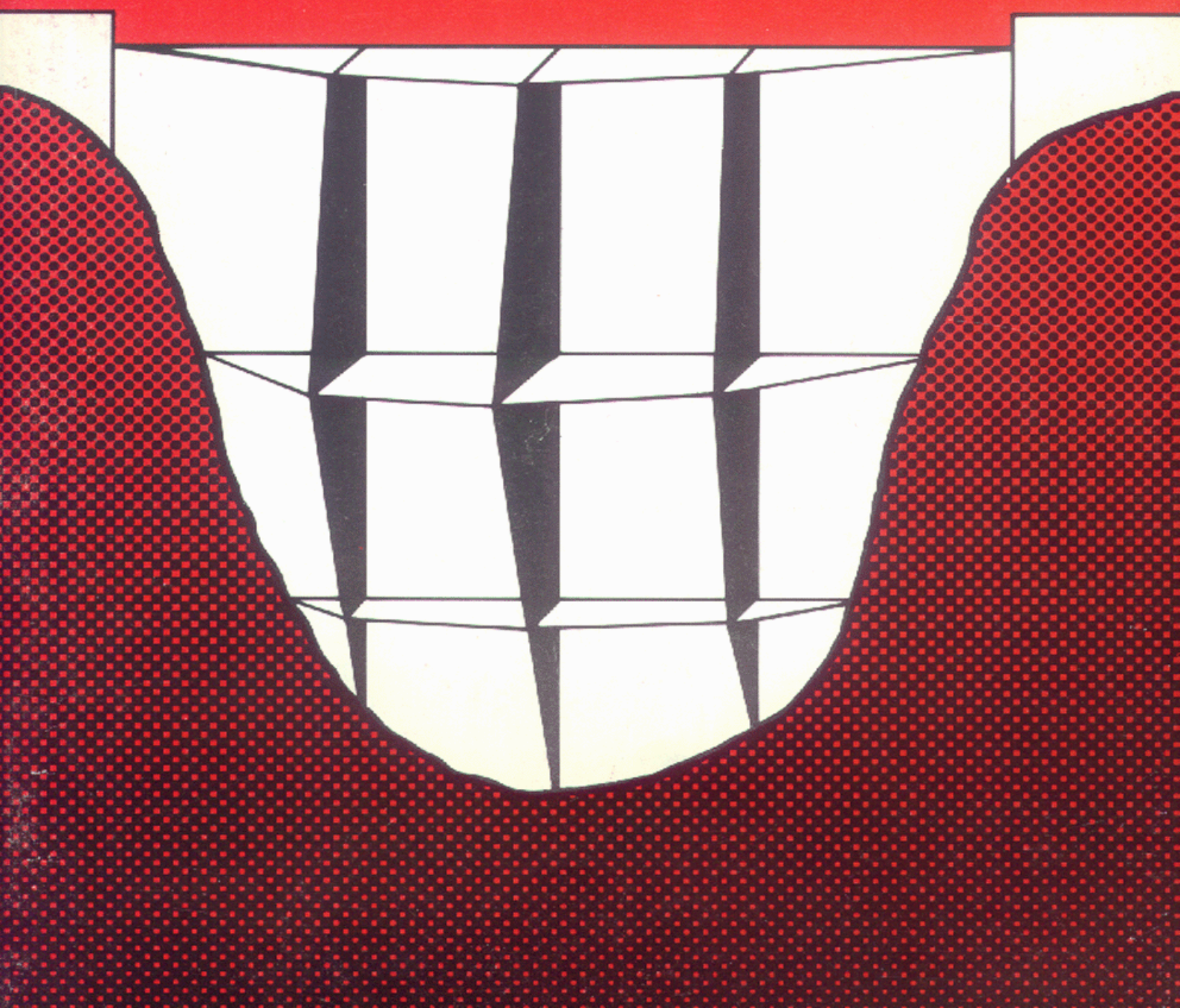
GENERAL CONSIDERATIONS

AUSCULTATION DES BARRAGES

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES



BULLETIN 60
1988



La couverture représente la déformation, en perspective,
d'une voûte mince sous l'effet de la charge d'eau totale

*The cover represents the perspective strain of
a thin arch under the total water load*

Ce bulletin est une réédition, revue et corrigée des Bulletins 21 (1969)
et 23 (1972) fondus en un seul bulletin.

Cette nouvelle présentation constitue une introduction
à un rapport plus détaillé qui sera publié début 1989.

*This Bulletin is a revised merged edition of Bulletins 21 (1969)
and 23 (1972), and forms an introduction to a more detailed
Bulletin to be published in early 1989.*

DAM MONITORING
GENERAL CONSIDERATIONS

AUSCULTATION DES BARRAGES
CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES



BULLETIN 60
1988

Commission Internationale des Grands Barrages
151, bd Haussmann, 75008 Paris - Tél. : 47 64 67 33 - Télex : 641320 F (ICOLD)

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.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE OF CONTENTS

Préambule	4/5	Foreword
Préambule du Bulletin 21	8/9	Foreword to Bulletin 21
Préambule du Bulletin 23	10/11	Foreword to Bulletin 23
1. INTRODUCTION	14/15	1. INTRODUCTION
1.1. Barrages en béton	14/15	1.1. Concrete dams
1.2. Barrages en terre et en enrochement	14/15	1.2. Earth and rockfill dams
1.3. Objet du Bulletin	14/15	1.3. Bulletin aims
2. OBJECTIFS DE L'AUSCULTATION	16/17	2. MONITORING PURPOSES
2.1. Les contrôles pendant la construction et au premier remplissage	16/17	2.1. Measurements during construction and first filling
2.2. Les contrôles en cours d'exploitation	16/17	2.2. Measurements during operation
2.3. Les recherches à but technique ou scientifique	16/17	2.3. Measurements for technical and scientific purposes
2.4. Caractéristiques générales des appareils de mesure	16/17	2.4. General characteristics of instruments
2.5. Définition du dispositif d'auscultation	18/19	2.5. Choice of instrumentation
3. CONCEPTION DU DISPOSITIF DE MESURES	20/21	3. PLANNING INSTRUMENTATION SYSTEMS
3.1. Nature des mesures	20/21	3.1. Types of measurements
3.2. Effets des tremblements de terre	20/21	3.2. Earthquake effects
3.3. Mesures spéciales	22/23	3.3. Special measurements
3.4. Considérations particulières	22/23	3.4. Special considerations
3.5. Spécifications de base	24/25	3.5. Basic requirements
4. MESURES ET APPAREILS	26/27	4. MEASUREMENTS AND INSTRUMENTS
4.1. Barrages en béton	26/27	4.1. Concrete dams
4.1.1. Les déplacements absolus en planimétrie et altimétrie	26/27	4.1.1. Absolute planimetric and altimetric displacements
4.1.2. Les déplacements différentiels	26/27	4.1.2. Differential displacements
4.1.3. Les rotations par référence à un plan horizontal	28/29	4.1.3. Rotations with reference to a horizontal plane
4.1.4. Les déformations unitaires	28/29	4.1.4. Strain measurements
4.1.5. Les mesures de contraintes	28/29	4.1.5. Stress measurements
4.1.6. Les mesures de températures	28/29	4.1.6. Temperature measurements
4.1.7. Les mesures des sous-pressions et des fuites	28/29	4.1.7. Uplift and leakage measurements
4.1.8. Les mesures des mouvements de joints	30/31	4.1.8. Joint measurements
4.2. Barrages en remblai	30/31	4.2. Embankment dams
4.2.1. Nappe phréatique et pression interstitielle	30/31	4.2.1. Groundwater and pore pressure

4.2.2. Déplacements	30/31	4.2.2. Movements	
A. Déplacements verticaux (tassements)	30/31	A. Vertical displacements (settlements)	
B. Déplacements horizontaux	30/31	B. Horizontal displacements	
4.2.3. Déformations	32/33	4.2.3. Deformations	
4.2.4. Mesures de pression totale	32/33	4.2.4. Total pressure measurements	
4.3. Barrages en béton et barrages en remblai	32/33	4.3. Concrete and embankment dams	
4.3.1. Mesures du niveau de la retenue	32/33	4.3.1. Water level measurements	
4.3.2. Mesures sismiques	32/33	4.3.2. Seismic movements	
5. MODALITÉS DE MISE EN ŒUVRE EN FONCTION DES BUTS POURSUIVIS ET DES TYPES DE BARRAGES	36/37	5. INSTALLATION ACCORDING TO PURPOSE AND DAM TYPE	
5.1. Règles générales pour les barrages en béton	36/37	5.1. General rules for concrete dams	
5.1.1. Barrages-poids	36/37	5.1.1. Gravity dams	
5.1.2. Barrages-poids élégis ou évédés	38/39	5.1.2. Hollow or cellular gravity dams	
5.1.3. Barrages à voûtes multiples et contreforts	38/39	5.1.3. Multiple arch and buttress dams	
5.1.4. Barrages poids-voûtes ou voûtes épaisses	38/39	5.1.4. Arch gravity dams and thick arch dams	
5.1.5. Barrages voûtes minces	38/39	5.1.5. Thin arch dams	
5.2. Barrages en remblai	40/41	5.2. Embankment dams	
5.3. Moyens particuliers	40/41	5.3. Particular techniques	
6. FRÉQUENCE DES MESURES	42/43	6. FREQUENCY OF MEASUREMENTS	
7. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR L'INSTALLATION DES APPAREILS DE MESURES	46/47	7. GENERAL CONSIDERATIONS ON THE INSTALLATION OF INSTRUMENTS	
7.1. Facteurs susceptibles d'altérer la précision des mesures	46/47	7.1. Factors influencing accuracy of measurements	
7.2. Validité des résultats de mesures	48/49	7.2. Reliability of measurements	
7.3. Procédés topométriques	48/49	7.3. Topographical techniques	
7.4. Mesures par référence à la verticale du lieu	48/49	7.4. Measurements with reference to the vertical	
7.5. Déformations unitaires	54/55	7.5. Deformations	
7.6. Mesures des températures	58/59	7.6. Temperature measurements	
7.7. Mesures des sous-pressions et des fuites	58/59	7.7. Uplift and leakage measurements	
7.8. Piézomètres et mesures des tassements	60/61	7.8. Piezometer and settlement measurements	
7.9. Mouvements des joints ou des fissures	60/61	7.9. Joint and crack measurements	
7.10. Contrôles dits « non destructifs »	60/61	7.10. Non-destructive tests	
ANNEXE : MÉTHODES GÉODÉSIQUES POUR LA DÉTERMINATION DES MOUVEMENTS DES BARRAGES	62/63	APPENDIX : GEODETIC METHODS FOR THE DETERMINATION OF MOVEMENTS OF DAMS	

PRÉAMBULE

Le Comité de l'Auscultation des Barrages et de leurs Fondations a été constitué à Rio de Janeiro en 1982, lors de la cinquantième Réunion Exécutive de la CIGB. L'Afrique du Sud, l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, le Brésil, l'Espagne, les États-Unis, la France, le Japon, le Mexique, le Nigeria, la Norvège, le Portugal, la Yougoslavie et la Suisse furent nommés membres, la présidence étant attribuée à l'Italie en la personne du Prof. Marazio.

L'une des tâches de ce Comité consistait à mettre à jour et refondre en une publication unique les Bulletins 21 et 23.

Après examen attentif de ces deux Bulletins, les considérations suivantes ont fait l'unanimité des membres du Comité :

- les principes servant de base à l'auscultation de barrages et la philosophie de la surveillance y sont très bien exposés et constituent un excellent point de départ pour tous les ingénieurs confrontés au problème de la surveillance des barrages;
- certains détails sur les mesures d'auscultation nécessitent des mises à jour mais peu importantes, bien que la première édition date de vingt ans;
- les développements relatifs aux techniques topographiques peuvent être en partie réduits. Dans les deux Bulletins, en effet, une large place et une profusion de détails étaient donnés à ce sujet, mais, comme aujourd'hui on fait de moins en moins appel à ces méthodes, il a semblé suffisant de rappeler quelques idées de base, en renvoyant le lecteur intéressé aux nombreuses publications spécialisées.

Ce nouveau Bulletin est né de ces considérations. Il ne prétend pas être une refonte des deux Bulletins précédents 21 et 23, mais seulement une réédition revue et corrigée.

Ainsi, tous les chapitres concernant la doctrine générale de l'auscultation sont pratiquement les mêmes que ceux des Bulletins 21 et 23. Par contre, les chapitres relatifs à la méthode topographique ont été largement réduits et les annexes donnant des exemples d'appareils de mesure ont été complètement éliminées puisqu'une description à jour de schémas réels d'appareils d'auscultation sera présentée dans un prochain Bulletin.

De plus, on a regroupé les deux Bulletins de façon à éliminer tous les chapitres qui, étant communs aux barrages en béton et aux barrages en remblai, se trouvaient nécessairement répétés dans les deux Bulletins 21 et 23.

Les additions introduites dans la présente révision apparaissent en italique.

J'ai l'espoir, sinon la certitude, que cette nouvelle publication se révélera encore d'un grand intérêt non seulement parce que les Bulletins 21 et 23 le furent, mais aussi parce qu'elle représente aujourd'hui un complément utile et nécessaire au prochain Bulletin sur l'Auscultation des Barrages et de leurs Fondations. En fait, nous avons voulu considérer la présente publication comme un document de base introductif aux problèmes traités en détail dans le prochain Bulletin de la CIGB sur l'auscultation.

Dans ce prochain Bulletin, en effet, l'accent sera mis davantage sur les expériences vécues de quelques pays que sur les principes de base et on s'étendra

FOREWORD

The Committee on Monitoring of Dams and their Foundations was set up by the fiftieth ICOLD Executive Meeting in Rio de Janeiro in 1982, with Australia, Austria, Brazil, France, Yugoslavia, Germany, Japan, Mexico, Nigeria, Norway, Portugal, Spain, United States, Switzerland and South Africa as member countries under the chairmanship of Italy, represented by Prof. Marazio.

One of the Committee's tasks was to bring Bulletins Nos. 21 and 23 up to date and merge them into a single ICOLD Bulletin.

The whole Committee agreed that :

- the underlying principles and basic philosophy were clearly and cogently stated in these earlier Bulletins and provided a good foundation for those needing to involve themselves in dam monitoring;
- some details needed revision (only minor points, considering they were first published twenty years ago);
- the sections on optical survey methods could be cut down, both Bulletins giving them much space with overabundant details. Topographic survey is now losing favour for dam monitoring purposes and it would seem sufficient simply to remind readers of a few basic ideas and refer to the abundant literature on the subject.

This new and single Bulletin has been derived from these considerations. It is not a rewriting of the two Bulletins, but only a new revised edition.

All the sections concerning the general philosophy of dam monitoring are practically the same as in Bulletins 21 and 23. The sections pertaining to topographic survey have been greatly reduced and the annexes on representative dam instrumentation systems have been deleted because an updated description of actual instrumentation schemes will be given in a forthcoming Bulletin.

In merging the two Bulletins, it has been possible to avoid duplication of those parts common to both concrete and earth dams.

New material in this new edition is shown in italics.

I am hopeful that this new publication will still stimulate great interest, not only because Bulletins 21 and 23 did so, but also because it represents a useful and necessary complement to the next Bulletin on the Monitoring of Dams and their Foundations.

This unified Bulletin has been planned to provide a basic introduction to the problems that will be dealt with in greater depth and detail in the next ICOLD Bulletin on dam monitoring.

In the forthcoming Bulletin, case histories from individual countries will be emphasized more than the basic rules, together with the topical issue of automation

davantage sur le problème de l'automatisation des systèmes de mesures, aujourd'hui d'une grande actualité et qui n'est que mentionné dans le présent document.

Je remercie tous ceux qui m'ont apporté leur expérience et ont consacré beaucoup de temps à la réalisation de ce rapport. Je forme des vœux pour que celui-ci bénéficie du même succès que les Bulletins 21 et 23, dont nous reproduisons ci-après intégralement les deux préambules.

Prof. Alfredo Marazio
Président du Comité de l'Auscultation
des Barrages et de leurs Fondations

in measurement systems which, in this Bulletin, is only mentioned briefly.

I should like to thank all those who have devoted their experience and time producing this report. I hope it will have the same success as Bulletins 21 and 23. The original Forewords are reproduced in full.

Prof. Alfredo Marazio
Chairman, Committee on Monitoring
of Dams and their Foundations

PRÉAMBULE DU BULLETIN 21

Au cours de la réunion du Comité technique de la CIGB « Observation des barrages et modèles », tenue à Lausanne (Suisse) en septembre 1965, il a été demandé à M. Bertram, membre de ce Comité et président du Comité « Mesures » de l'USCOLD, de préparer un bref rapport préliminaire sur le sujet suivant : « L'auscultation des barrages en terre et en enrochement. »

Avec sa diligence habituelle, jointe à une grande expérience, M. Bertram a préparé un texte qui a été distribué à tous les Comités Nationaux et discuté à la réunion du Comité à Rio de Janeiro (Brésil), en juin 1966. A cette occasion, il a été suggéré à M. Bertram de développer le sujet en tenant compte des remarques et suggestions présentées par différents pays. Cette deuxième rédaction a été examinée avec intérêt à la réunion du Comité à Istamboul (Turquie), en août 1967, et il fut alors demandé à M. Bertram de diffuser une dernière rédaction incluant les plus récents commentaires. Ce texte définitif a été distribué par le Bureau Central de la CIGB à tous les Comités nationaux, puis approuvé par le Comité technique dans sa réunion de Stavanger (Norvège), en juin 1968.

Le rapport présenté ici est l'aboutissement de ces rédactions et additions successives. Le titre en a été modifié de façon à faire ressortir le caractère général des informations apportées. Le terme « instrumentation » a été toutefois retenu, non seulement parce qu'il correspond au projet initial, mais aussi parce qu'il met l'accent sur le caractère très précis des observations et des mesures nécessaires au contrôle des performances des barrages tout au long de leur exploitation. Les exemples d'appareillages donnés dans le rapport ont été pris sur des grands ouvrages, parce que ce sont eux qui exigent le maximum d'observations et de mesures en complément des calculs du projet. Le texte, par ailleurs, est excellent à tous points de vue et tout à fait à jour dans les conceptions exposées.

Le Comité et moi-même adressons nos très sincères remerciements à M. Bertram, au Comité « Mesures » de l'USCOLD ainsi qu'aux Comités Nationaux et à leurs membres qui, par leurs commentaires et leurs informations, ont aidé à mener ce travail à bonne fin. Nous remercions également M. G. Willm, membre du Comité Français, pour son excellente traduction de ce rapport en langue française.

Nous souhaitons que ce document, qui apporte sur un très important sujet des informations et des renseignements des plus utiles, trouve auprès des intéressés le meilleur accueil et soit l'objet d'une approbation générale.

Professeur Guido Oberti
Président du Comité de l'Observation des Barrages
et Modèles de la CIGB (*) (Italie)

(*) Le Comité était constitué du président et de dix membres représentant les Comités Nationaux des dix pays suivants : Australie (H. H. Thomas), Canada (C. F. Ripley), France (G. Willm), Grande-Bretagne (S. R. Sparkes), Japon (Fumio Ishii), Portugal (M. Rocha), Espagne (J. Toran Pelaez), Suisse (C. Schum), USA (G. E. Bertram) et Russie (V. Semenov).

FOREWORD TO BULLETIN 21

At the Lausanne, Switzerland, meeting of the ICOLD Committee on Observations on Dams and Models, in September 1965, Committee member Mr. George E. Bertram, Chairman of the USCOLD Measurements Committee, was asked to prepare a brief preliminary report on « Instrumentation in Earth and Rockfill Dams ».

Thanks to Mr. Bertram's usual diligence and experience of the subject, the draft was promptly prepared and distributed to all National Committees and discussed at the Rio de Janeiro, Brazil, meeting of the Committee in June 1966, where Mr. Bertram was invited to enlarge upon the subject in a further report, taking into account the information and suggestions to be furnished by the various countries. The second draft report was in detail examined at the Istanbul, Turkey, Committee meeting in August 1967, and Mr. Bertram was asked to submit the final draft comprising the new comments that had been made. This final draft, distributed by ICOLD Central Office to all National Committees, was then approved by the Committee at its meeting in Stavanger, Norway, in June 1968.

The report presented herein is the result of all the above elaborations and additions. The title has been modified to indicate the general character of the information it contains. The term « instrumentation » has been retained, however, not only because of its association with the draft report but also because it connotes the precise character of the observations and measurements needed to monitor the performance of dams for their operation lifetime. The examples of instrumentation given in the report have been selected from high dams because these are the structures in greatest need of observations and measurements to supplement their design studies. The text, then, is excellent in every respect and contains the latest accepted practice.

The Committee's and my personal sincere thanks are due to Mr. Bertram, the USCOLD Measurements Committee and all the members and National Committees who, through information and comment, helped to bring the report about. Gratitude is also expressed to the Committee member from France, Mr. G. Willm, for a fine translation of the report into the French language.

It is hoped that the report, presenting the information and knowledge available at present on this all-important subject, will meet with general approval and consent.

Prof. Guido Oberti,
Chairman, ICOLD Committee on Observations
on Dams and Models (*) (Italy)

(*) The Committee consisted of the Chairman and ten members representing the National Committees of the following ten countries : Australia (H. H. Thomas), Canada (C. F. Ripley), France (G. Willm), Great Britain (S. R. Sparkes), Japan (Fumio Ishii), Portugal (M. Rocha), Spain (J. Toran Pelaez), Switzerland (C. Schum), USA (G. E. Bertram) and USSR (V. Semenov).

PRÉAMBULE DU BULLETIN 23

A l'occasion du VII^e Congrès de la CIGB, à Rome en 1961, un rapport intitulé « Critères généraux pour les mesures des barrages », préparé par le Sous-Comité italien pour les mesures des barrages sous la direction du soussigné, avait été distribué à tous les participants. Plus tard, en mai 1964, à la réunion du Comité de l'Observation des Barrages et Modèles, durant le VIII^e Congrès à Edimbourg, le Professeur Tonini (alors président du Sous-Comité italien) fut invité à rédiger un rapport préliminaire sur les « Critères généraux pour l'auscultation des barrages en béton » sur la base du rapport précité.

Par conséquent, un premier rapport préparé par le Comité italien fut distribué, en 1966, à tous les Comités Nationaux par le Bureau Central de la CIGB. Ce rapport préliminaire fut discuté, la même année, à la réunion de Rio de Janeiro. Il fut décidé que le rapport serait revu, prenant en considération les contenus du fascicule « Standards sur les mesures des barrages au Japon » présenté par le Comité national japonais, et les « recommandations du Comité national suisse des Grands Barrages ».

La même année, la 34^e Réunion exécutive de la CIGB restructura le Comité de l'observation des barrages et modèles, toujours sous la présidence du soussigné. Le nouveau Comité reprit en examen le rapport initial avec l'assistance efficiente de chacun de ses membres, spécialement de M. Willm, France.

On prêta une spéciale considération aux nombreuses observations, quelquefois malheureusement en conflit, avancées par les divers groupes nationaux, auxquels le secrétaire général de la CIGB avait envoyé en avril 1967 le premier rapport Tonini. Un nouveau projet du rapport intitulé « Recommandations générales pour les mesures des barrages en béton » fut pourtant présenté par le Comité national français à la réunion de Stavanger le 5 juin 1968. Ce projet différait sur quelques points du rapport initial, déjà traduit en anglais avec quelques modifications par M. Bertram, membre du Comité des États-Unis. En outre, à la même réunion, il fut décidé de revoir le premier rapport, de façon à le présenter comme un « rapport technique » plutôt que comme une « recommandation », comme il avait été programmé au début, et de le limiter à l'analyse des mesures des barrages en béton. Cette tâche fut confiée au Professeur Tonini, à M. Willm et à M. Rebaudi, nouveau président du Sous-comité national italien. Le texte final fut préparé principalement par M. Willm, pour ce qui concerne la version française. Il fut complété en avril 1970, et traduit à temps en anglais pour être présenté à la réunion du Comité à Montréal en juin 1970. Après une discussion, à cette réunion, il fut décidé que chaque membre du Comité soumettrait au soussigné, en tant que président du Comité même, son approbation finale du rapport, au plus tard au mois d'octobre 1970, avec l'adjonction d'éléments (relatifs à son pays), concernant les deux chapitres « Types et construction de l'équipement » et « Bibliographie » qui manquent encore dans le texte.

Les membres devaient aussi envoyer au soussigné des dessins et des croquis relatifs aux installations de mesure sur quelques-uns des barrages les plus importants de leur pays.

FOREWORD TO BULLETIN 23

On the occasion of the VIIth Congress of ICOLD in Rome in 1961 a report entitled " General Criteria for Measurements on Dams ", prepared by the Italian Subcommittee on Dam Measurements under the direction of the writer, had been distributed to all the participants at the Congress. Later, at the May 1964 meeting of the International Committee on Observation on Dams and Models during the VIIIth Congress in Edinburgh, Prof. Tonini (then Chairman of the Italian Subcommittee) was invited to prepare a preliminary report on the " General Criteria for the Measurements of Concrete Dam Movement " based on the above-mentioned report.

Consequently, a first report prepared by the Italian Committee was distributed to all the National Committees by the Central Office of ICOLD in 1966. This preliminary report was discussed at the Rio de Janeiro meeting the same year. It was decided that the report should be revised taking into consideration the contents of the pamphlet " Standards on Measurements of Dams in Japan ", presented by the Japanese National Committee, and of the " Recommendations of the Swiss National Committee on Large Dams ".

In the same year, the 34th Executive Meeting of ICOLD restored the Committee on Observation on Dams and Models, again under the chairmanship of the writer. The new Committee kept on updating the initial report with the efficient assistance of some of its members, particularly of Mr. Willm, of France. Special consideration was given to the numerous and unfortunately sometimes conflicting remarks made by various national groups, to whom the General Secretary of ICOLD forwarded the updated first report in April 1967. A new draft of the report, entitled " General Recommendations for Concrete Dam Measurements ", was submitted by the French National Committee at the meeting in Stavanger on June 5, 1968. This draft somewhat differed from the original report already translated into English with a few modifications by Mr. Bertram, the Committee member from the USA. Moreover, at the same meeting it was decided to revise the first report once more so as to present it as a " Technical report " rather than as a " Recommendation ", as had originally been planned, and to confine it to the analysis of concrete dam measurements. This task was assigned to Prof. Tonini, Mr. Willm and Mr. Rebaudi, the new Chairman of the Italian National Subcommittee. The final text of the report was prepared principally by Mr. Willm as regards to the French version and was completed in April 1970 and translated into English in time to submit it at the Committee meeting in Montreal in June 1970.

After a discussion at that meeting it was decided that each Committee member should submit to the writer, as Chairman of the Committee itself, his final approval of the report not later than October 1970 with the addition of the elements (referring to his country) relating to the two chapters " Types and Construction of Equipment " and " Bibliography " still missing in the text.

The members also were to forward to the writer drawings and sketches relevant to measurement installations on one or more of the most significant dams in their countries.

Sur la base des documents reçus et avec l'assistance du Comité italien, un rapport final a été préparé et le président, en mai 1971, l'envoya au Bureau central de la CIGB.

Professeur Guido Oberti
Président du Comité de l'Observation des Barrages
et Modèles de la CIGB (*) (Italie)

(*) Les rapporteurs du Bulletin 23 étaient : D. Tonini, G. Willm, A. Rebaudi pour « Considérations générales sur l'auscultation des barrages en béton » et G. Willm, M. Schum pour « Note sur l'application des méthodes géodésiques à la détermination des mouvements des barrages ».

On the basis of the material received and with the assistance of the Italian National Committee a final report has been prepared in May 1971 and the Chairman forwarded it to the Central Office of ICOLD.

Prof. Guido Oberti,
Chairman, ICOLD Committee on Observations
on Dams and Models (*) (Italy)

(*) The reporters of Bulletin 23 were : D. Tonini, G. Willm, A. Rebaudi, for " General considerations on instrumentation for concrete dams " and G. Willm, M. Schum, for " Note on the application of geodetic methods to the determination of the movements of dams ".

1. INTRODUCTION

1.1. BARRAGES EN BÉTON

Au début de ce siècle, l'auscultation des barrages en béton était limitée aux mouvements planimétriques obtenus à partir des réseaux topographiques.

Avec l'augmentation progressive de la hauteur des structures et la diminution de leur épaisseur, la technique des mesures prit une telle extension qu'elle devint une partie essentielle du projet ainsi qu'un facteur déterminant de sa sécurité.

L'auscultation qui, au début, était purement limitée à la structure, a été étendue au barrage et aux fondations considérés comme un seul tout.

1.2. BARRAGES EN TERRE ET EN ENROCHEMENT

Depuis de nombreuses années, on utilise des appareils pour mesurer les mouvements et la pression interstitielle dans les barrages en terre et en enrochement. Les premiers piézomètres étaient des tubes ouverts et étaient installés de façon à mesurer l'altitude de la nappe phréatique en différents points de la recharge. On faisait également des mesures du taux de percolation. Les premières jauges de tassement étaient des plaques généralement situées au niveau des fondations. La détermination par sondage de l'altitude de la plaque pendant et après la construction de la recharge permettait le calcul du taux de consolidation et la connaissance du tassement total de la recharge et des fondations. Ces simples appareils donnaient des informations pleines d'intérêt, à un moment où était abordée l'étude théorique des débits de percolation et des phénomènes de consolidation et où l'on commençait à mettre en pratique les essais de compactage et à utiliser un matériel de chantier adapté à cette technique. Les premiers barrages n'étaient encore que d'une hauteur faible ou modérée; de ce fait, beaucoup de problèmes liés à cette caractéristique étaient encore inconnus. Avec l'augmentation progressive de la hauteur des ouvrages, le besoin de recueillir des informations complémentaires contribua beaucoup à développer la pratique des mesures.

En outre, des accidents survenus dans différentes parties du monde stimulèrent largement l'intérêt pour l'auscultation considérée comme un des moyens d'assurer la sécurité des barrages en exploitation.

1.3. OBJET DU BULLETIN

1. Mettre en évidence les raisons de l'installation des dispositifs de mesures.
2. Présenter les éléments à considérer dans l'élaboration du projet d'auscultation.
3. Analyser les causes d'altération de la précision des diverses mesures.
4. Discuter de la validité des résultats de mesures.

1. INTRODUCTION

1.1. CONCRETE DAMS

At the beginning of the present century concrete dam measurements were limited to topographic surveys of displacements in plan.

Then, as the height of the structures increased and their thickness decreased, measurement techniques developed and became an essential part of the project as well as a factor for determining its safety.

The measurements, which were originally confined to the mere structure, have now been extended to the dam and the foundation rock as a unit.

1.2. EARTH AND ROCKFILL DAMS

Instruments for measuring movements and pore pressures in earth and rockfill dams have been used for many years. Early piezometers were of the open tube type and were installed to measure the development of the phreatic line in various zones of an embankment. Measurements were also made of the rate of seepage. The first settlement gauges were plates usually located at the foundation level. Determination by soundings of the elevation of the plate during and after construction of the fill permitted computation of the rate of consolidation and of the total settlement of the fill and the foundation. Useful information was provided by these simple instruments at a time when theoretical studies of seepage flow and consolidation were being started and when compaction control tests and field compaction equipment were beginning to be used. Early dams were of low to moderate height. Therefore, many problems that have come to be associated with high dams had not yet been encountered. With the construction of increasingly higher dams, the use of instrumentation has greatly increased because of the need for additional design information.

Moreover, recent dam failures in various parts of the world have greatly stimulated interest in measurements as a means for ensuring the safety of dams during operation.

1.3. BULLETIN AIMS

The aims of this report are to :

1. outline reasons for installing instruments;
2. describe basic considerations in planning an instrumentation system;
3. examine the factors affecting the accuracy of various measurements, and
4. discuss the reliability of measurements.

2. OBJECTIFS DE L'AUSCULTATION

Il convient de distinguer, en fonction du but poursuivi, trois catégories principales d'investigations dans les programmes de mesures :

2.1. LES CONTROLES PENDANT LA CONSTRUCTION ET AU PREMIER REMPLISSAGE

Ces contrôles répondent, en premier lieu, à un souci de sécurité immédiate. Ils révèlent aussi, pour la première fois, des particularités du comportement de l'ensemble barrage-fondations plus ou moins conditionné par les facteurs complexes et parfois mal connus, imparfaitement pris en compte dans le projet.

Les mesures au premier remplissage constituent enfin un point de départ pour juger ultérieurement de l'importance ou de la gravité des évolutions éventuelles.

2.2. LES CONTROLES EN COURS D'EXPLOITATION

Les mesures faites en cours d'exploitation doivent pouvoir fournir des éléments immédiatement utilisables dans le sens du comportement de l'ouvrage, soit dans son ensemble, soit en des points particulièrement choisis.

La partie la plus significative de ces mesures doit résider dans les possibilités de mise en évidence d'évolutions, dont les unes peuvent être favorables et dont les autres, lorsqu'elles se manifestent sous forme de dérive, constituent des signes préoccupants.

2.3. LES RECHERCHES A BUT TECHNIQUE OU SCIENTIFIQUE

Ces recherches peuvent intervenir à tout moment et sont orientées vers des problèmes bien délimités mais d'une portée susceptible de déborder largement le cadre de l'ouvrage considéré. Il faut noter, à ce propos, que la vérification de la validité des hypothèses du projet, qui constitue un des aspects les plus féconds de telles recherches, ne peut guère intervenir qu'après quelques années d'exploitation et la disparition (ou la prise en compte) des phénomènes primitifs de fluage ou d'adaptation.

2.4. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES APPAREILS DE MESURES

Ces trois objectifs mettent en œuvre souvent des moyens de mesure communs, bien que les performances souhaitables puissent différer suivant les cas. Mais les phénomènes à contrôler étant généralement caractérisés par leur faible amplitude, et l'ambiance dans laquelle doivent fonctionner les appareils de mesure peu favo-

2. MONITORING PURPOSES

With regard to the purposes, measurements can be grouped as follows :

2.1. MEASUREMENTS DURING CONSTRUCTION AND FIRST FILLING

The primary purpose of these measurements is immediate safety. Yet, they may also bring out some interesting details in the overall behaviour of the dam and its foundations due to complex factors, sometimes hardly known or scarcely considered in the design.

Moreover, measurements carried out during the first fillings can provide a starting point for evaluating the importance and severity of any variations in the behaviour of the dam and its foundations.

2.2. MEASUREMENTS DURING OPERATION

These measurements should provide useful information on the behaviour of the structure both as a whole and at some particular points.

Their main purpose is to offer a reliable picture of all evolutions, some of which may be favourable while others such as drift may give grounds for concern.

2.3. MEASUREMENTS FOR TECHNICAL AND SCIENTIFIC PURPOSES

These measurements can be carried out at any time in order to solve definite problems which, however, may exceed the limits of the structure considered. One of their principal purposes is to test the validity of the design assumptions, which can be done only after a few years' operation, when the early creep and settlement phenomena have ceased (or have been taken into consideration).

2.4. GENERAL CHARACTERISTICS OF INSTRUMENTS

The above three purposes can be fulfilled by use of normal instruments, the technique varying according to need. Yet, as the phenomena to be examined are generally characterized by their small dimension and the environment in which the instruments are to work is often unfavourable, the instruments should be highly

table, ceux-ci doivent généralement présenter des hautes performances dans le domaine de la sensibilité, de la fidélité et de la fiabilité.

Par ailleurs, la rusticité ou la solidité des appareils et la simplicité d'emploi sont à rechercher au maximum, de façon à permettre chaque fois qu'il est possible une mise en œuvre par le personnel local qui, en exploitation courante, peut n'être que d'une qualification modeste.

Cependant, l'absence de personnel, ou la nécessité parfois de loger des moyens de mesures en des emplacements peu accessibles ou au cœur du matériau peut conduire à des technologies particulières ou à des dispositifs d'auscultation automatique éventuellement très élaborés.

2.5. DÉFINITION DU DISPOSITIF D'AUSCULTATION

Pour chaque ouvrage, la définition en fonction d'une idée directrice d'ordre expérimental du dispositif d'auscultation (c'est-à-dire de la nature des moyens d'investigation, de leur densité et de leur répartition dans l'ouvrage et à l'extérieur de celui-ci) puis leur mise en place doivent être assurées par des spécialistes très avertis, car une rectification *a posteriori* est souvent impossible et des résultats inexploitable ou décevants sont presque toujours le fait d'erreurs de conception ou de montage.

sensitive and reliable. Moreover they should be simple in design, solid and easy to operate so as to be used by moderately qualified local staff.

Where personnel were absent or the instruments are located in hardly accessible places or in the concrete, recourse can be had to special techniques or automatic devices even of a very complex type.

2.5. CHOICE OF THE INSTRUMENTATION

For each structure the choice of the instrumentation based on an experimental principle (type of gauges, their density and distribution inside and outside the structure) and its installation should be entrusted to highly specialized engineers. Rectification after installation is often impossible, and in most cases useless or misleading results are due to mistakes in the design or in the setting up of the instruments.

3. CONCEPTION DU DISPOSITIF DE MESURES

Une très grande attention doit être portée à la conception du dispositif d'auscultation, afin qu'aussi bien pendant la période de construction que pendant la vie de la structure, les informations souhaitées puissent être effectivement recueillies. Les objectifs de l'auscultation et les procédures à mettre en œuvre pour l'analyse des observations doivent être exactement formulés, et le choix des moyens ainsi que leur localisation doivent répondre à ces besoins.

Les mesures concernent en principe tant l'ouvrage lui-même que ses fondations et ses abords, les différents points à contrôler étant l'état intrinsèque des matériaux et les déformations sous l'effet des différents facteurs naturels (charge hydraulique, poids propre, température, pressions interstitielles, altérations physico-chimiques lentes...).

Pour faciliter la définition du dispositif optimal, quelques considérations élémentaires sont évoquées ci-dessous.

3.1. NATURE DES MESURES

Le dispositif d'auscultation est défini en fonction du genre d'information souhaitée. On trouvera ci-dessous énumérés les différents domaines dans lesquels des mesures *in situ* sont généralement mises en œuvre pour connaître le comportement des barrages.

1. Mouvements verticaux et horizontaux.
2. Déformations dans différentes directions.
3. Rotations (pour les barrages en béton).
4. Contraintes dans des plans diversement orientés.
5. Pressions interstitielles (pour les digues en terre) et sous-pressions (pour les barrages en béton).
6. Observation des piézomètres.
7. Percolations ou fuites à travers le barrage, les fondations et les appuis, y compris la proportion de matières solides en suspension.
8. Températures (pour les barrages en béton).
9. Mouvements des joints (pour les barrages en béton).

3.2. EFFETS DES TREMBLEMENTS DE TERRE

Ces données doivent comporter au minimum les trois composantes des accélérations et le déplacement résultant à plusieurs cotes dans le corps du barrage.

3. PLANNING INSTRUMENTATION SYSTEMS

Careful attention must be given to planning an instrumentation system to ensure that required information will be obtained, both during the construction period and the life of the structure. The requirements of the system and the procedures to be used for analyzing the observations should be formulated in detail and selection of the measuring devices and their location chosen to meet those requirements.

In principle, measurements should cover not only the dam but also its foundation and abutments. Their purpose should be to determine the internal state of materials and any deformations due to various natural factors (hydrostatic load, dead load, temperature, pore pressure, slow physical-chemical alterations, ...).

As an aid in planning an appropriate system, several basic considerations are presented in the following paragraphs.

3.1. TYPES OF MEASUREMENTS

Requirements for instrumentation depend on the type of information desired. Following is a list of the types of field measurements often needed to evaluate the performance of dams :

1. Horizontal and vertical movements.
2. Strains in various directions.
3. Rotations (for concrete dams).
4. Stresses on planes inclined in various directions.
5. Neutral (pore water) stresses (for embankments) and uplift (for concrete dams).
6. Piezometer observations.
7. Seepage or leakage measurements; through the dam, the foundation, and the abutments, including percent of solids discharged.
8. Temperatures (for concrete dams).
9. Joint movements (for concrete dams).

3.2. EARTHQUAKE EFFECTS

These data should include, as a minimum, the three components of transient acceleration and the resulting permanent displacements at different elevations on the body of the dam.

3.3. MESURES SPÉCIALES

Elles font appel à des techniques souvent très modernes et en évolution et, à ce titre, il ne peut être question de les énumérer. On peut, cependant, citer certaines méthodes dites de « contrôle non destructif », maintenant bien entrées dans la pratique :

- les examens en gammagraphie ou rayons X des structures minces ferraillées ou précontraintes;
- les mesures de vitesse de propagation des ébranlements mécaniques, dont les résultats permettent de porter un jugement qualitatif sur la santé des matériaux en place;
- émission acoustique.

3.4. CONSIDÉRATIONS PARTICULIÈRES

Les principales contingences qui conditionnent le choix des appareils de mesures et leurs performances sont :

1. Le personnel. — L'efficacité d'un dispositif de mesures dépend, au premier chef, de l'expérience tant des hommes qui l'ont projeté que de ceux qui l'ont installé. Trop souvent, la conception du dispositif d'auscultation, aussi bien que sa mise en place, sont laissées aux soins d'un personnel inexpérimenté. Une telle installation doit être placée sous la surveillance constante d'un responsable désigné.
2. Les risques de dommages durant la construction. — Au cours de cette période, l'exécution même des travaux peut être une cause d'endommagement ou de destruction des appareils de mesures. Heureusement, les entrepreneurs prennent de plus en plus conscience de l'importance de cet appareillage et de la nécessité de le protéger de tout dommage. Dans cet ordre d'idées, des clauses sévères peuvent avantageusement figurer au contrat. Il est également nécessaire que l'équipement soit suffisamment robuste pour supporter sans dommages les manipulations qui interviennent au cours de la mise en place dans des conditions souvent sévères.
3. Des conditions d'ambiance sévères. — Certains appareils de mesures doivent être enterrés, et bien souvent à une cote inférieure à celle de la nappe phréatique; leur fonctionnement est cependant appelé à se poursuivre pendant un temps non limité, toute possibilité de réparation ou de remplacement étant exclue.
4. Les influences extérieures. — De graves tendances évolutives à long terme sont souvent cachées par des phénomènes parasites : variations de la température ou du niveau de la retenue, erreurs accidentelles ou dérives dans les mesures, etc.
5. L'examen des données. — Les données fournies par les appareils doivent être analysées dans un esprit critique, les enregistrements encombrants doivent être condensés, les mesures notoirement aberrantes rejetées, et une réflexion approfondie doit présider aux interprétations. La présentation graphique des données doit être simple et d'une compréhension immédiate.

On a réalisé récemment de grands progrès dans le traitement des données. En particulier, il est possible de comparer le comportement effectif du barrage avec celui prévu par des modèles mathématiques (voir Bull. CIGB 41, § 3.4).

3.3. SPECIAL MEASUREMENTS

These measurements are often associated with very modern techniques and cannot be listed in this paper. Mention should be made, however, of some non-destructive checking methods that are now often employed :

- gammagraphic or x-ray examination of thin reinforced or prestressed structures;
- measurement of the propagation velocity of mechanical shocks whose results can help to form a qualitative judgment of the state of material;
- acoustic emission.

3.4. SPECIAL CONSIDERATIONS

The more important considerations associated with the design and performance of instrumentation are :

1. Personnel. — Success of an instrumentation system depends vitally on the experience of the men who plan the system as well as on the men who carry out the installation. All too often planning and installation of instrumentation is left to inexperienced personnel. The installation should be made under the constant surveillance of a qualified responsible individual.
2. Risk of damage during construction. — During construction instruments may be damaged or destroyed by the construction operations. Fortunately there is growing awareness by contractors of the necessity to protect vital instrumentation from damage. It is also necessary that the equipment be rugged enough to withstand without damage handling at the time of installation, which is often made under severe conditions. Stronger protective clauses in Contract specifications can serve to enhance that awareness.
3. Severe environment. — Certain instruments must be buried underground, quite often below the water table, yet must function for an indefinite period of time without the possibility of repair or replacement.
4. Extraneous influences. — Important long term trends are often overshadowed by other effects such as temperature variations, changes in pool elevations, and random errors in measurements involving small changes.
5. Evaluation of data. — Data must be critically evaluated, bulky records must be summarized, erroneous readings rejected, and judgment exercised in interpretation. Graphical presentation of data must be simple and readily understood.

Great progress has been achieved recently in data processing; in particular, it is possible to compare the actual dam behaviour with that forecast by numerical models (see ICOLD Bulletin 41, para. 3.4.).

6. Les repères de référence. — La plupart des mesures de déplacement n'ont qu'un caractère relatif. C'est seulement par rapport à un point fixe que l'on peut reconnaître la valeur absolue d'un mouvement. Le rocher de fondation lui-même se déforme sous les charges qui lui sont appliquées; les références sont donc à situer en dehors de la zone d'influence des charges.

3.5. SPÉCIFICATIONS DE BASE

Les particularités propres aux mesures à réaliser, jointes aux considérations ci-dessus, conduisent, en ce qui concerne la réalisation de l'appareillage de mesures, au respect des caractéristiques suivantes :

1. Il doit être robuste, sûr et fidèle.
2. Il doit être simple dans son principe, comporter le minimum de pièces mobiles.
3. Il doit pouvoir être facilement réparé et entretenu s'il est accessible : cette condition est satisfaite dans le cas d'une sonde amovible, mais non d'un instrument enterré.
4. Les lectures doivent être faciles et leur exécution ne doit nécessiter que le minimum de contraintes. La collecte des données doit pouvoir se poursuivre pendant de nombreuses années, une majoration de l'investissement initial peut se traduire par des économies ultérieures.

Des considérations légèrement différentes seraient faites si l'appareil en question devait être automatique ou automatisé (intégré dans un système de surveillance automatique). Par exemple, en dehors de la nécessité de fournir un signal automatique, la facilité de lecture ou la stabilité dans le temps (ce qui peut, dans certaines limites, être corrigé automatiquement) ne seraient plus essentielles, tandis qu'une certaine importance doit être attribuée au temps nécessaire à l'appareil pour fournir l'indication ou à la facilité (ou la possibilité) de le doter d'un équipement d'autocontrôle efficace.

Le choix de la solution automatique, néanmoins, comporte bien d'autres aspects qui sont amplement développés par ailleurs. Ici, il suffira de noter que les caractéristiques essentielles citées plus haut pour la réalisation d'un « bon appareillage » restent presque toutes valables également pour un appareil automatique.

Enfin, il faut signaler le rôle irremplaçable de la surveillance visuelle du barrage et de ses abords, effectuée par des personnes connaissant bien l'ouvrage, en vue de déceler des anomalies qui ne seraient détectées par aucun dispositif de mesure aussi complet et sensible qu'il soit : fissures, fuites, dégradation du matériau, etc.

6. Reference datum. — Most measurements are relative between two points. Unless one point is stable, the absolute movement cannot be established. Bedrock will deform under the applied loads; reference datums should be outside the zone of influence of the load.

3.5. BASIC REQUIREMENTS

The types of desired measurements coupled with the special considerations listed above lead to the following requirements for instrumentation :

1. It must be rugged, reliable, and stable.
2. It must be simple in design, with a minimum of moving parts.
3. It must be easily repaired and maintained if accessible. This is possible if a probe is used which can be removed, but may not be feasible for a buried unit.
4. The data must be easy to obtain with a minimum of effort. Data gathering will extend over many years and higher initial investment to reduce later costs is worthwhile.

Slightly different criteria apply if the instrument is automatic or automated (as part of an automatic monitoring system). For example, while an electrical output signal is still necessary, of course, it would no longer be essential to provide for ease of reading or very small zero drift (which can to some extent be corrected for automatically), but some importance must be attached to the time necessary for the instrument to transmit its information and the possibility of incorporating an effective self-test facility.

Automation involves a number of other considerations amply discussed elsewhere. It need only be mentioned that the above requirements for efficient, reliable instruments nearly all apply equally well to automatic and automated instruments.

Lastly, it is necessary to stress the essential role of visual inspection of the dam and its environment. This inspection should be effected by persons with a thorough knowledge of the installation, with a view to detecting those anomalies — cracks, seepage losses, material degradation, etc. — that could not be revealed by any measuring instrument or system, however sophisticated.

4. MESURES ET APPAREILS

4.1. BARRAGES EN BÉTON

Les moyens de mesures le plus souvent employés et donnant les informations le plus généralement recherchées concernent :

4.1.1. Les déplacements absolus en planimétrie et altimétrie

Ces mesures qui font appel aux techniques de la topographie de précision, avec quelques particularités de conception tenant au caractère de l'objectif poursuivi, c'est-à-dire essentiellement la recherche de très petits déplacements (1), concernent un certain nombre de points caractéristiques du comportement du barrage, de ses fondations et de ses abords.

L'erreur moyenne que permettent dans des conditions normales les techniques actuelles au théodolite est de l'ordre de $\pm 2''$ (2) dans le plan horizontal et $\pm 4''$ en zénithal (3).

Ce type de mesures est encore parfois utilisé (avec une fréquence d'une fois par an) dans le but de réaliser une mesure globale et absolue de l'ensemble de l'ouvrage.

Aujourd'hui, cette technique de mesure est de plus en plus abandonnée, soit en raison de la difficulté intrinsèque de la méthode de mesure, soit à cause du temps nécessaire à l'exécution d'une série complète, soit enfin du fait de la haute spécialisation requise de la part des opérateurs.

4.1.2. Les déplacements différentiels

Il s'agit du contrôle différentiel de la géométrie de la structure :

A. Soit par référence à une verticale, le moyen le plus courant étant le « pendule » ou « fil à plomb »; ces appareils sont pendus dans des puits ménagés à la construction, parfois forés *a posteriori*. L'erreur moyenne le plus couramment recherchée est de 0,1 mm, mais peut être réduite en cas de besoin. On utilise aussi des « pendules inversés » ou « fil à flotteur » dont le fil ancré à sa partie inférieure au fond d'un puits ou d'un forage est tendu non plus par un poids, mais par un flotteur;

B. Soit par référence à un simple alignement, souvent matérialisé par un fil tendu; entrent dans cette catégorie les « fils de fondation », dont une extrémité est scellée au fond d'un forage réalisé dans les appuis du barrage, l'autre étant solidaire d'un point de la structure — l'erreur moyenne des mesures est de l'ordre de 0,1 mm (4).

(1) A noter des tentatives d'application de procédés photographiques ou électro-optiques.

(2) Pour un angle mesuré avec quatre répétitions ($1'' = 1$ seconde centésimale).

(3) En nivellement géométrique, l'erreur moyenne est de l'ordre de ± 1 mm/km.

(4) Un pendule comportant sur sa longueur plusieurs étages de points de lecture répond aux deux définitions ci-dessus.

4. MEASUREMENTS AND INSTRUMENTS

4.1. CONCRETE DAMS

The instruments are generally used to obtain information on :

4.1.1. Absolute planimetric and altimetric displacements

These measurements, which are closely associated with the technique of precision topography, being particularly intended to determine very small displacements, involve a certain number of points representative of the behaviour of the dam, its foundation and abutments (1).

Under normal conditions the average error obtainable by a theodolite is in the order of $\pm 2''$ in a horizontal plane (2) and $\pm 4''$ in a vertical plane (3).

This kind of measurement technique is still sometimes used (with a frequency of about once per year) for the purpose of taking global and absolute measurements of the dam and its immediate surroundings.

Nowadays, optical survey has fallen in disuse, as far as the determination of regular relative displacements is concerned. The main reasons being the difficulties involved in the measurement, the time necessary to carry out an entire survey and the highly skilled personnel required.

4.1.2. Differential displacements

The geometry of the structure is checked by measuring small differences :

A. With reference to a vertical : the most common instrument in this case is the pendulum or plumb line. Pendulums are installed in shafts built either during construction or after. The average error is generally 0.1 mm but it may be reduced if necessary. Also inverted pendulums can be used; in this case the lower end of the wire is fixed to the bottom of a borehole and the wire is kept taut by a float at the other end;

B. With reference to a simple alignment : this is generally achieved by a stretched wire; in the case of " foundation wires " one end of the wire is fixed to the bottom of a borehole drilled in the dam base and the other to a point in the structure; the average error is about 0.1 mm (4).

(1) Some attempts have been made to apply photographic or electro-optical techniques in these investigations.

(2) For an angle measured by four reiterations (1 cc = 1 centesimal second).

(3) For geometric levelling, the average error is in the order of ± 1 mm/km.

(4) A pendulum with several reading stations along its length satisfies both requirements.

On doit aussi mentionner les extensomètres et les plus récents micromètres coulissants. Les premiers surtout sont devenus des appareils importants pour mesurer les déplacements différentiels des fondations.

4.1.3. Les rotations par référence à un plan horizontal

Elles sont mesurées au moyen de clinomètres ou de clinographes ou de systèmes de nivellement parfois très sensibles, installés souvent dans les galeries inférieures des ouvrages. L'erreur moyenne d'une observation est de $\pm 10^{-5}$ rad dans le cas des clinomètres et de 1/100 mm sur 10 m de base dans le cas des systèmes de nivellement.

4.1.4. Les déformations unitaires

Leur mesure met en œuvre les techniques classiques de l'extensométrie. Les appareils peuvent être :

- de préférence noyés dans le béton au moment de la construction, l'objectif le plus habituellement recherché étant la définition de l'état de contrainte dans un plan parallèle aux parements extérieurs de l'ouvrage. L'erreur moyenne peut être de $\pm 10^{-6}$ en $\Delta L/L$, bien que l'interprétation des lectures à mieux que 10^{-5} soit difficile et hasardeuse, à cause du nombre des paramètres susceptibles d'influencer les mesures;
- soit placés *a posteriori* sur les parements extérieurs de la structure, ce qui exige des précautions supplémentaires et augmente notablement les causes de dispersion en raison surtout des phénomènes thermiques et des difficultés d'interprétation;
- on peut installer enfin des extensomètres scellés dans des forages en fondation.

4.1.5. Les mesures de contraintes

Certains appareils sont conçus pour la mesure directe de la contrainte, sans intervention du module d'élasticité. Cependant, il faut considérer qu'en matière de barrage et surtout du point de vue de la sécurité, les déformations sont, en tout cas, les éléments essentiels à partir desquels on peut toujours obtenir les contraintes au moins approchées. Les appareils de mesure directe de contrainte (« pressiomètres » ou extensomètres noyés dans des « éprouvettes calibrées ») sont plutôt réservés à l'obtention d'informations immédiates pour la comparaison avec les éléments du projet.

4.1.6. Les mesures de températures

Elles donnent des informations sur :

- l'état thermique du barrage en béton, au moyen de téléthermomètres placés en des points représentatifs à l'intérieur de l'ouvrage;
- la température de l'eau à une ou plusieurs profondeurs sous la surface;
- la température extérieure (maximale et minimale, ou mieux, enregistrement).

4.1.7. Les mesures des sous-pressions et des fuites

Ces mesures primordiales ne mettent souvent en œuvre qu'un appareillage non spécifique (manomètres, déversoirs, capacités tarées). Cependant, la mesure des pressions hydrauliques internes dans le rocher peut exiger des dispositifs un peu plus élaborés.

Extensometers and, to a lesser extent, the more recent sliding micrometer have now become important instruments for measuring differential foundation movements.

4.1.3. Rotations with reference to a horizontal plane

They are measured by clinometers or clinographs or levelling systems, sometimes highly sensitive and often set up in galleries. The average error is $\pm 10^{-5}$ rad in the case of clinometers and 1/100 mm for a length of 10 m in the case of levelling systems.

4.1.4. Strain measurements

- They are measured by the traditional methods using strain gauges which are :
- preferably embedded in the concrete during construction, the principal purpose being to determine the state of stress in a plane parallel to the external face of the structure. The average error may be in the order of $\pm 10^{-6}$ ($\Delta L/L$) though an interpretation at less than 10^{-5} is difficult and hazardous on account of the number of parameters that may affect the measurements;
 - installed on the faces of the dam after completion; in this case particular precautions are required and the causes of error increase chiefly owing to thermal phenomena and difficulty in the interpretation;
 - or even embedded in foundation boreholes.

4.1.5. Stress measurements

Some instruments are designed for the direct measurement of stresses, without resorting to the modulus of elasticity. It should be noted, however, that as far as dams and their safety are concerned, deformations are in any case the essential elements from which stresses — either precise or approximate — can always be obtained. Thus, direct stress gauges (pressure gauges or strain gauges embedded in calibrated concrete blocks) should rather be used for getting information, to be compared with the design data.

4.1.6. Temperature measurements

- They should provide information on :
- thermal state of the concrete measured by telethermometers installed in the dam body;
 - water temperature at various levels;
 - atmospheric temperature (maximum and minimum, or preferably recorded).

4.1.7. Uplift and leakage measurements

These measurements are generally carried out by non-specific instruments (pressure gauges, weir, graduated tanks). More elaborate devices may, however, be required to measure hydraulic pressure inside the rock.

Pour les mesures des fuites, il faut souligner la nécessité d'associer un système efficace de drainage à ces instruments.

4.1.8. Les mesures de mouvements de joints

Elles ne sont généralement justifiées que pour le contrôle des joints séparant deux structures non clavées (plots de barrages-poids rectilignes et évidés par exemple) ou dans le cas d'une voûte ou d'un barrage poids-voûte pour surveiller l'opération d'injection des joints.

Les mesures d'ouverture de fissures mettent en œuvre les mêmes procédés mais avec des appareils installés en surface.

4.2. BARRAGES EN REMBLAI

Les types d'appareils les plus largement utilisés dans les barrages en remblai pour la mesure des pressions interstitielles et des différentes sortes de déplacements sont répertoriés ci-après.

4.2.1. Nappe phréatique et pression interstitielle

Pour la mesure des niveaux de la nappe à l'intérieur du remblai ou dans les terrains de fondation, on peut généralement recourir à des appareils de type simple, comme le piézomètre à tube ouvert, à condition qu'il ne s'agisse pas de matériaux à grains fins. Dans ce cas, une information plus rapide peut être obtenue avec des dispositifs plus sophistiqués, cellules piézométriques hydrauliques type Casagrande ou Bishop, ou capteurs de type électrique, électro-acoustique ou électro-pneumatique. Ces derniers, même s'ils sont plus délicats, se prêtent toutefois très bien aux systèmes de télétransmission et d'automatisation.

4.2.2. Déplacements

Il est opportun de faire la distinction, non seulement entre les composantes verticale et horizontale des déplacements, mais aussi entre l'accessibilité plus ou moins facile des points soumis à contrôle. Sont à considérer accessibles non seulement les points de la surface extérieure de l'ouvrage (couronnement, parements, banquettes) ou des ouvrages annexes (conduites), mais aussi ceux inclus dans des parties d'ouvrage accessibles (galeries, drains).

A. Déplacements verticaux (tassements)

Pour ceux relatifs aux points accessibles, on a recours d'habitude à des nivellements géométriques ou hydrostatiques.

Les tassements des fondations ou des parties internes d'ouvrage et non accessibles (écrans internes, base de l'ouvrage) sont mesurés par des jauges de tassement.

B. Déplacements horizontaux

Les déplacements du couronnement et d'autres points significatifs des parements (risbermes, ...) peuvent être mesurés, mieux qu'avec les traditionnelles méthodes géodésiques, en utilisant la collimation optique ou bien les appareils les plus sophistiqués du type à émission. Il est également possible de relever les déplacements horizontaux de points à l'intérieur de l'ouvrage au moyen d'inclinomètres.

For leakage measurements it is important to combine an effective drainage system with these instruments.

4.1.8. Joint measurements

Measurements are justified only in the case of joints separating two unsealed structures (e.g., blocks of gravity and hollow dams) or to check grouting in dome or arch-gravity dams.

Cracks are measured by the same methods, the instruments being installed on the surface.

4.2. EMBANKMENT DAMS

Representative types of instruments which have been widely used for measuring pore pressures and movements of various kinds in embankment dams are described in the following.

4.2.1. Groundwater and pore pressure

For the measurement of groundwater and pore pressure levels inside embankments or foundations, it is generally possible to make use of simple instruments like open-pipe piezometers, provided the materials are not fine grained. In that case, a quicker response can be obtained by using more sophisticated devices, like Casagrande or Bishop hydraulic piezometric cells, or electrical, electro-acoustic or electro-pneumatic transducers. The latter, although more delicate, lend themselves very well to teletransmission and automation systems.

4.2.2. Movements

It is advisable to make a distinction not only between the vertical and horizontal components of displacements, but also on the basis of the accessibility of the points monitored. Not only the points of the outer surface of the embankment (crest, facings, platforms) or of ancillary works (pipelines) are to be considered accessible, but also the points that are situated inside accessible structures (tunnels, drain pipes).

A. Vertical displacements (settlements)

For those occurring in accessible places, geometric or hydrostatic levelling systems are customarily used.

The settlements of the foundation or of interior structural parts which are not accessible (cores, foundation contact) are detected through settlement gauges.

B. Horizontal displacements

The planimetric displacements of the crest and of other important points of the embankment (berms, etc.) can be measured better than with geodetic methods by means of optical collimation or more sophisticated emission instruments. It is also possible to detect horizontal displacements of points inside the embankment by means of inclinometers.

4.2.3. Déformations

Les tassements de chaque couche du remblai sont mesurés grâce à des tubes altimétriques à plaque ou à sonde (cross-arms, type USBR, ou magnétiques).

Dans les terrains de fondation, on peut utiliser encore les tassomètres magnétiques ou de type mécanique (à barres multiples, chacune munie d'un ancrage de fixation inférieur).

On peut également utiliser le nivellement hydraulique continu (niveau à eau mobile dans un tube horizontal déformable, dispositif appelé « furet hydraulique »).

4.2.4. Mesures de pression totale

Il peut être intéressant, à certains moments, de contrôler les pressions totales à l'intérieur du remblai, ou celles aux contacts entre le remblai lui-même et les fondations ou des ouvrages adjacents. Les cellules de pression sont généralement basées sur les mêmes principes de mesure adoptés pour les manomètres de type électrique, électro-acoustique, électro-pneumatique ou hydraulique.

4.3. BARRAGES EN BÉTON ET BARRAGES EN REMBLAI

4.3.1. Mesures du niveau de la retenue

Une des principales charges agissant sur le barrage est la charge hydrostatique dont le niveau est en temps opportun et attentivement mesuré, soit pour des raisons évidentes d'exploitation, soit pour l'influence qu'il a sur les conditions statiques du barrage.

L'appareil normalement utilisé est la balance hydrostatique, qui possède des caractéristiques de précision élevées et fournit un signal électrique apte à l'enregistrement et à la transmission à distance. Des observations analogues peuvent être faites pour les appareils de pression à membrane et les jauges de contrainte.

On utilise aussi parfois des appareils de type pneumatique; eux aussi peuvent produire un signal électrique.

Les systèmes à flotteur peuvent fournir des mesures sensiblement moins fiables et souffrent d'hystérésis.

Les systèmes à mire graduée ne sont adaptés qu'à la lecture visuelle.

Dans tous les cas, on doit porter une particulière attention aux exigences de précision en relation avec la plage de variation des niveaux; souvent, il est demandé de disposer d'une plus grande précision pour la zone des niveaux proches du maximum, ce qui peut entraîner l'adoption d'appareils supplémentaires ou de solutions plus élaborées.

4.3.2. Mesures sismiques

Les installations de mesure et de surveillance sismique incluent des appareillages qui dépendent des caractéristiques sismiques du site du barrage.

Le projet d'une telle installation couvre en général les phases suivantes :

- *choix du nombre et de la position des appareils de mesure à installer, en relation avec le type de barrage et ses formes modales (si elles sont connues);*

4.2.3. Deformations

The settlements of individual layers of the embankment are detected through settlement-detecting tubes or casings with detector plates or probes (cross-arms, USBR type, or magnetic).

In foundations, it is possible to use magnetic or mechanical settlement-detectors (multiple rods, each anchored at the bottom).

The "hydraulic ferret" is a levelling system consisting of a water-filled level inside a deformable horizontal tube.

4.2.4. Total pressure measurements

It is sometimes necessary to check the total pressures inside the embankment or between the embankment and the foundation or adjacent structures. The pressure cells are generally based on the same principles used for other electric-, electro-acoustic, electro-pneumatic or hydraulic pressure cells.

4.3. CONCRETE AND EMBANKMENT DAMS

4.3.1. Water level measurements

One of the main loads acting on the dam is hydrostatic load, whose level must be suitably and carefully measured both because of obvious operational reasons and because of the influence it has on the dam's static condition.

The instrument that is normally used is the hydrostatic balance, a high precision instrument which provides an electric signal suitable for recording and for teletransmission. Similar considerations can apply for diaphragm pressure transducers and strain gauges.

Sometimes pneumatic level gauges are also used; they too can provide an electric signal.

Float systems may be distinctly less reliable and suffer from hysteresis.

Stadia rod systems are suitable only for visual reading.

In any case, particular attention should be paid to the needs for precision in relation to the level variation range; very often it is desirable to have a higher precision for the range of levels nearest to maximum : this can imply the use of more than one instrument or more elaborate arrangements.

4.3.2. Seismic movements

Seismic measurement and surveillance installations include devices that depend on the seismic characteristics of the dam site.

Designing a seismic measurement and surveillance installation generally covers the following phases :

- choosing the number and position of the sensors to be installed, in relation to the type of dam and its modal shapes (if known);*

- *choix du type d'appareils en relation avec les caractéristiques sismologiques du site et avec le type de barrage;*
- *choix du type et des caractéristiques du système d'enregistrement (et de traitement en ligne des signaux, le cas échéant).*

Les fréquences à considérer pour le choix des appareils sont :

- *les fréquences du mouvement du sol, pour les appareils à installer dans les fondations; on emploie normalement des accéléromètres du type « strong-motion » à seuil de 0,01 g et échelle comprise entre 0,5 et 2 g;*
- *les fréquences correspondant aux pics du spectre de réponse de la structure, pour les appareils à installer dans le barrage lui-même.*

- *choosing the type of sensors in relation to both the seismologic features of the site and the type of dam;*
- *choosing the type and characteristics of the data recording system (and of on-line processing, if provided for).*

The frequencies to consider for choosing the instruments are :

- *the ground motion frequencies, for instruments to be installed in the foundation; normally used are " strong-motion " type accelerographs offering 0.01 g threshold and full-scale between 0.5 and 2 g;*
- *those corresponding to the response spectrum peaks of the structure, for the instruments to be installed on the dam itself.*

5. MODALITÉS DE MISE EN ŒUVRE EN FONCTION DES BUTS POURSUIVIS ET DES TYPES DE BARRAGE

5.1. RÈGLES GÉNÉRALES POUR LES BARRAGES EN BÉTON

Les déformations des barrages en béton résultant pour une large part des phénomènes thermiques, la technique des mesures doit être dominée par le souci de s'en abstraire, soit en les éliminant par un artifice opératoire, soit en définissant parfaitement la loi de ces effets perturbateurs.

D'autre part, un barrage en béton peut se déformer, localement ou dans son ensemble, assez rapidement d'une façon sensible : un autre impératif est donc d'exécuter les mesures assez rapidement pour que les mouvements éventuels pendant la durée de l'opération restent inférieurs à la précision escomptée des mesures.

Certaines de ces règles conviennent dans l'hypothèse où l'on ne veut ou ne peut tenir compte des facteurs thermiques. Dans le cas contraire, à condition de connaître les variations journalières aux points critiques, les règles générales énoncées ci-dessus peuvent être négligées.

Le nombre et le type des dispositifs de mesure à mettre en œuvre dépendent essentiellement du type d'ouvrage. Sauf préoccupations particulières, il est recommandé d'adopter, à l'origine, au minimum les dispositifs et appareils suivants :

5.1.1. Barrages-poids :

- mesures des sous-pressions et contrôle du drainage des fondations; on peut poser, en principe, que chaque plot de l'ouvrage doit comporter ses moyens de contrôle;
- pendules directs et inversés installés dans les puits de drainage ou des forages;
- mesures des rotations à la base de l'ouvrage : on peut admettre un point de mesure au centre pour un petit ouvrage, trois au minimum pour un ouvrage relativement important;
- des pendules d'une longueur réduite peuvent éventuellement remplir les mêmes fonctions que les clinomètres, à condition de n'intéresser que les parties basses et rigides des plots (éviter les points de suspension proches de la crête) (1);
- des mesures topographiques sont nécessaires si les dispositions internes de l'ouvrage ne permettent ni clinomètre, ni pendule.

Dans le cas des barrages rectilignes non clavés, des appareils de contrôle tridirectionnels des joints sont, en outre, utiles.

(1) Pour obtenir la même précision que le clinomètre, il est toutefois nécessaire que la longueur du pendule soit au moins de l'ordre de 1 m.

Il existe cependant des clinomètres fonctionnant sur le principe des pendules très courts avec une lecture de très grande précision. Ces appareils sont souvent utilisés en géophysique.

5. INSTALLATION ACCORDING TO PURPOSE AND DAM TYPE

5.1. GENERAL RULES FOR CONCRETE DAMS

As everybody knows, concrete dam deformations are generally conditioned by thermal phenomena. Therefore, when measurements are made these phenomena should either be eliminated by a computation device or be taken into account by defining the laws of their disturbing effects.

Moreover, as local or overall deformations in concrete dams may be rapid, readings should be so quick that the movements occurring in the meantime cannot exceed the expected accuracy.

Some of these concepts remain valid if the thermal factor is not or cannot be taken into account. For the remainder, provided that the daily variations at critical points are known, they can be ignored.

The number and type of instruments to be used depend chiefly on the type of dam. Except for particular situations, use of at least the following instruments is recommended at the beginning :

5.1.1. Gravity dams :

- uplift measurements and checking on foundation drainage; in principle, each dam block should be fitted with its own instruments;
- direct and inverted pendulum installed in drainage shaft or special shaft;
- rotation measurements at dam base; for small structures one measuring point at the center should be enough, while for larger structures not less than three measuring points are required;
- short pendulums can be used in place of clinometers, provided they operate only in the lower, more rigid part of the dam block (suspension points near the crest should be avoided) (1);
- topographic measurements are necessary when the shape of the structure makes the use of clinometers and pendulums impossible.

In the case of rectilinear dams with unsealed joints, these should be subjected to three-dimensional checking by special instruments.

(1) To attain the accuracy of a clinometer, a pendulum should have a length of 1 meter at least. There exist, however, some clinometers based on the principle of very short pendulums, with very accurate readings. They are often used in geophysics.

Un alignement optique en crête peut suppléer à l'insuffisance du nombre de pendules ou de clinomètres, et donner des renseignements sur les déplacements de l'ensemble structure-fondations.

5.1.2. Barrages-poids élégis ou évidés

Outre les mesures ci-dessus, il est bon de prévoir un dispositif de contrôle en nivellement à la base des plots.

5.1.3. Barrages à voûtes multiples et contreforts

On recommandera :

- un dispositif topométrique assez développé, permettant au minimum un contrôle en planimétrie de la tête et du pied aval de chaque contrefort. L'emploi de pendules, s'il est possible, permet d'alléger sensiblement le dispositif topographique qui, à la limite, peut alors se résumer en un alignement en crête;
- pour les ouvrages à contreforts massifs et grandes voûtes, une attention plus particulière est à porter aux fondations des contreforts : nivellement des bases et, éventuellement, fils scellés dans les forages profonds. Les voûtes de grande portée doivent être assimilées aux voûtes pures et auscultées comme telles (extensométrie notamment);
- lorsque les contreforts comportent des joints de construction, il est bon de surveiller le comportement de ces joints, notamment au point de vue de la transmission des efforts (extensométrie, contrôle de mouvements relatifs);
- d'une façon très générale, réseau de drainage, contrôle des fuites et mesures du niveau des nappes.

5.1.4. Barrages poids-voûtes ou voûtes épaisses

En tout état de cause, les points essentiels à contrôler sont :

- les déplacements absolus du pied et des appuis de l'ouvrage par pendules inversés (de préférence), fils de fondation ou topométrie;
- les déformations du plot de clef, par pendules (de préférence) ou topométrie (si les deux moyens sont utilisés conjointement, à chaque point caractéristique des pendules doit correspondre sur le parement aval un repère topographique); suivant l'importance de l'ouvrage, d'autres plots peuvent être auscultés;
- le mouvement des joints;
- les sous-pressions sous l'ouvrage et dans le terrain aval par piézomètres ou tubes piézométriques, et les débits des fuites;
- les températures des arcs.

5.1.5. Barrages-voûtes minces

Même disposition que pour les barrages poids-voûtes et en plus :

- contrôle des déplacements de la crête en planimétrie et altimétrie;
- contrôle des déformations unitaires du béton par extensomètres noyés à la construction.

Compte tenu de progrès réalisés, au cours de ces dernières années, dans les méthodes de calcul des barrages-voûtes (Méthode des éléments finis), l'auscultation extensométrique est de moins en moins utilisée.

An optical crest alignment can make up for a deficiency in the number of pendulums or clinometers available and provide useful information on any overall displacements in the dam and its foundation.

5.1.2. Hollow or cellular gravity dams

Besides the instruments mentioned above, a checking device should be provided for levelling at the base of the voussoirs.

5.1.3. Multiple-arch and buttress dams

The following instrumentation is recommended :

- a topometric system allowing checking in plan of the head and downstream toe of each buttress. If pendulums can be installed, the topometric system can be reduced even to a crest alignment;
- in the case of massive buttresses and large arches, special attention should be paid to the foundations of buttresses; the use of base levelling and wires fixed in deep boreholes is recommended. Large arches should be assimilated to pure arches and treated accordingly (extensometry);
- if the buttresses are traversed by construction joints, the behaviour of the joints should be observed with special regard to the transmission of loads (strain gauges and checking on relative movements);
- in general, drainage systems should be provided, leakages should be checked and measurements should be made of the water table level.

5.1.4. Arch-gravity dams and thick arch dams

In any case, measurements should be made of :

- absolute displacements of the dam toe and abutments by inverted pendulums preferably, foundation wires or topometry;
- deformations of the central block by pendulums preferably or topometry (if both techniques are used simultaneously, a survey point should be set up on the downstream face of the dam for each characteristic point of the pendulums); for large structures the measure of other blocks deformations is required;
- joint opening;
- uplift under the dam and downstream of it by piezometric tubes, and seepage flow;
- temperatures in the arches.

5.1.5. Thin arch dams

The following measurements should be carried out in addition to those listed for arch-gravity dams :

- measurements of crest displacements in plan and in elevation;
- measurement of concrete strains by strain gauges embedded during construction.

Because of the progress achieved in recent years in the computational methods for arch dams (Finite Element Method), strain-gauge monitoring is becoming less common.

Les appareils devront au minimum permettre de connaître les déformations principales en grandeur et direction dans les zones suivantes de l'ouvrage :

- a) console de clef;
- b) retombées des arcs;
- c) contrôle de la déformation du rocher d'appui par extensomètres scellés dans des forages.

Toute singularité de structure dans un ouvrage à fort taux de travail devra être contrôlée au moins au premier remplissage par un dispositif d'extensométrie.

5.2. BARRAGES EN REMBLAI

Les mesures à effectuer sur les barrages en remblai sont décrites dans les paragraphes 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 et 4.2.4. En général, il n'y a pas de différence substantielle dans la conception des systèmes de mesures pour barrages en remblai avec masque amont imperméable ou avec noyau central d'étanchéité. Il faut seulement observer que pour ces derniers le contrôle des pressions interstitielles dans le remblai et surtout dans le noyau en terre revêt une grande importance.

5.3. MOYENS PARTICULIERS

On peut être appelé à mettre en œuvre, soit dès la mise en eau, soit en exploitation, des moyens supplémentaires parfois très élaborés, mais dont il n'est pas possible de donner un aperçu ici.

Une place à part doit cependant être faite aux moyens géosismiques et aussi aux moyens non destructifs de contrôle de l'état interne des bétons, qui peuvent se révéler précieux principalement dans le cas d'ouvrages anciens à fort taux de travail : gammagraphie ou radiographie (praticables actuellement seulement sur des structures minces ferrillées ou précontraintes), vitesses de propagation d'ondes élastiques dans des zones suspectes d'altération (gel, attaque par des eaux agressives, réaction alcali-agrégat, etc.). Ces moyens sont essentiellement appelés à rendre des services dans le domaine de la mise en évidence d'évolutions à longue échéance.

Instruments should at least permit the determination of the principal deformations in the following zones of the dam :

- a) central cantilever;
- b) abutments;
- c) abutment rock (by extensometers installed in special holes).

Every structural detail in a dam subjected to heavy working loads should be checked at least during the first filling by means of strain gauges.

5.2. EMBANKMENT DAMS

The measurements to be carried out on embankment dams are described in paragraphs 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 and 4.2.4. There is no substantial difference in the design of monitoring systems for embankment dams with upstream facings or central core, except that pore pressure monitoring in the shoulders, and particularly in the earth core, is very important in the latter type.

5.3. PARTICULAR TECHNIQUES

The use of supplementary gauging techniques, sometimes very sophisticated, may become necessary both after the first filling and during operation.

These techniques cannot be described in this report but mention should be made of the geoseismic methods and of the nondestructive methods of checking the internal state of concrete which may prove very valuable especially in the case of old structures subjected to heavy working loads : gammagraphy or radiography (applicable only to thin reinforced or prestressed structures), propagation velocity of the elastic waves in affected zones (frost, aggressive water, alkaline reaction of aggregates, etc.). These methods are particularly fit to determine long-term evolutions.

6. FRÉQUENCE DES MESURES

A défaut d'enregistrement qui n'est pas toujours possible, la fréquence des mesures est un problème d'espèce, qui ne peut être résolu que par les responsables de l'ouvrage, compte tenu des particularités de celui-ci. D'ailleurs, même en présence d'enregistrements, l'examen critique de l'état d'un ouvrage doit reposer sur l'ensemble des résultats obtenus, relatif à un instant donné : ce qui repose la question de fréquence.

Dans le cas où l'on dispose d'un système d'acquisition automatique des mesures, le problème de leur fréquence se pose en termes très rationnels, puisqu'elle n'est pas assujettie aux difficultés logistiques ou humaines (voir le chapitre sur l'automatisation du système de mesures dans le Bulletin CIGB sur l'auscultation ou dans le Bulletin CIGB 41).

On pourra dans ce domaine se guider sur les indications générales suivantes :

A. Dès avant la construction de l'ouvrage, il peut être intéressant d'exécuter certaines mesures topographiques, piézométriques et sismiques sur les appuis.

B. Pour un premier remplissage : toutes les mesures devront être exécutées dès avant la mise en eau (opération d'origine); les dates d'exécution des mesures ultérieures seront conditionnées par la hauteur du plan d'eau au-dessus du fond et d'autant plus rapprochées que le plan d'eau se rapprochera de la cote de retenue normale. Ainsi, par exemple, en appelant « campagne » l'ensemble de toutes les mesures sur la totalité des dispositifs prévus, on exécutera :

- une campagne au premier quart de la hauteur totale;
- une campagne au deuxième quart de la hauteur totale;
- une campagne à chaque dixième de la hauteur totale pour le troisième quart;
- une campagne tous les 2 m de variation de cote du plan d'eau pour le quatrième quart;
- en outre, deux campagnes de mesures ne devront pas être séparées de plus d'un mois jusqu'au remplissage complet.

Si possible, des paliers de quelques jours dans le programme de la montée du plan d'eau coïncideront avec les dates des campagnes; des mesures seront alors faites au début et à la fin du palier.

En outre, certains contrôles simples : observations visuelles des abords et du parement, fuites, résurgences à l'aval, pendules, drains, pourront être exécutés quotidiennement.

Pour que ces dispositions puissent être appliquées dans de bonnes conditions et efficacement, il est nécessaire que l'ensemble des opérations sur un même barrage soit placé sous la responsabilité d'un technicien très qualifié dont l'action personnelle compétente doit être immédiate et constante, et qui aura sous ses ordres directs les spécialistes chargés des différentes tâches de contrôle.

C. En exploitation : les mesures devront être plus resserrées pendant les premières années suivant la mise en eau, qui constituent généralement une période d'adaptation active. En l'absence d'exigences ou de dispositions particulières, les cadences suivantes paraissent souhaitables :

6. FREQUENCY OF MEASUREMENTS

Where recording is not possible (e.g., theodolite measurements) the frequency of measurements can be decided only by those who are responsible for the project considering its particular features. On the other hand, even where recording is possible, the critical examination of the state of a structure should be based on the whole of the results relating to a given time; hence the problem of frequency arises again.

In the case of an automatic measurement system the frequency of measurements, no longer influenced by human or logistic difficulties (see the chapter on automation of the methods of measurements in the ICOLD Bulletin on monitoring, or ICOLD Bulletin 41), must be decided on a rational basis.

The following recommendations might apply :

A. Before construction, it may be useful to carry out some topographic, piezometric and seismic measurements of the abutments.

B. First filling : all measurements should be made before filling is started (initial operation). The dates of the successive measurements will depend on the level the water has reached in the reservoir : the closer the water is to the top level, the shorter will be the interval between the measurements. For example, if we call “ survey ” a series of measurements carried out with the proper instruments, measurements may comprise :

- one survey when the water reaches 1/4 of the total height;
- another survey when the water reaches mid-height;
- one survey every tenth of the total height for the third quarter;
- one survey every 2 m of variation for the fourth quarter;
- moreover, the interval between two successive surveys should never exceed a month till filling is completed.

If possible, the few days' interruptions in the filling program will coincide with the dates of the surveys; measurements will be made at the beginning and at the end of these periods.

In addition to that, some simple measurements can be carried out daily : visual examination of dam faces and abutments, leakages, downstream resurgent springs, pendulums, drainages.

To obtain satisfactory results the execution of the whole measurement program should be entrusted to a highly qualified technician directing personally the operators responsible for the various measurements.

C. During operation : measurements should be more frequent in the years immediately following the first filling, when active settlement is in progress. In the absence of particular requirements, the following might apply :

1) Période d'adaptation :

- topométrie : quatre campagnes annuelles;
- pendules, clinomètres : mesures hebdomadaires;
- extensométrie : mesures bimensuelles;
- piézomètres : mesures hebdomadaires;
- fuites, drains : mesures quotidiennes.

Si l'on dispose d'un système automatique, les fréquences de mesures peuvent être bien supérieures (plusieurs mesures par jour) et permettre de disposer d'une grande quantité d'informations utiles pour la bonne appréciation du comportement réel de l'ouvrage.

2) Période d'exploitation courante (après stabilisation des phénomènes d'adaptation) :

- *Les rythmes ci-dessus peuvent être réduits de moitié. Non seulement les fréquences de lecture, mais aussi le nombre d'instruments lus peuvent être réduits sur la base de l'expérience des premières années d'exploitation.*

Cependant, ces indications ne peuvent être, en aucun cas, considérées comme des règles; comme pour l'opération de première mise en eau, la prise en considération de circonstances particulières ou de dispositions réglementaires sont susceptibles de les modifier profondément.

1) Settlement period :

- topometry : four surveys every year;
- pendulums, clinometers : weekly measurements;
- strain gauges : twice weekly measurements;
- piezometers : weekly measurements;
- leakage, drainage : daily measurements.

If an automatic method of measurement is available, the measurements can be frequent (even several a day) to provide a large number of useful data for the understanding of the actual behaviour of the structure.

2) Normal operation (after stabilization of settlement) :

- *The above frequencies can be reduced by half. Not only the frequencies of measurement, but also the number of instruments read can be reduced according to what is learned during the first years of operation.*

These indications should not be regarded as fixed rules; as for the first filling, they may be largely modified in view of particular circumstances or standing regulations.

7. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR L'INSTALLATION DES APPAREILS DE MESURES

7.1. FACTEURS SUSCEPTIBLES D'ALTÉRER LA PRÉCISION DES MESURES

La précision des mesures ne dépend pas uniquement du savoir-faire du personnel qui en a la charge, mais aussi de la méthode employée. Par exemple, une mesure de longueur entre repères peut n'être qu'une opération simple justiciable de corrections mineures liées à la tension du ruban de mesure ou à la température, étant entendu que les piliers eux-mêmes sont réalisés de façon à éliminer les erreurs liées aux mouvements saisonniers de la surface du sol. Cependant, pour les barrages comportant une crête arquée, il faut mettre en œuvre également des méthodes topographiques faisant intervenir les erreurs propres à la triangulation. Dans quelques cas, la localisation précise de repères topographiques peut exiger un très long cheminement jusqu'aux stations de base fondées hors de l'action des contraintes, d'où augmentation des probabilités d'erreurs. Certaines mesures comportant des visées topométriques peuvent être gravement faussées par les gradients de température dans l'air ambiant et les réfractions qui en résultent.

Ces considérations imposent dans la pratique certaines règles d'exécution des mesures qui doivent, en outre, tenir compte du fait que le problème ne se présente pas de la même façon pour un premier remplissage et en exploitation courante.

Les mesures sur les points les plus thermiquement sensibles de l'ouvrage doivent être effectuées en évitant dans la journée les moments de températures extrêmes ou de forte insolation. Le début de la journée est de toute façon préférable à l'après-midi; pour les mesures qui normalement demandent une assez longue durée d'exécution (mesures topographiques), les visées sur les points sensibles doivent se grouper dans un temps aussi court que possible et toujours au cours de la même période de la journée.

Dans les contrées à très forte insolation, on peut être amené à opérer au lever du soleil.

Si un barrage est le siège de plusieurs types de mesures, il y a lieu d'effectuer au même moment, et éventuellement pendant la même heure, toutes celles dont les résultats sont comparables (exemple : topographie, topométrie, pendules, clinomètres).

Si en exploitation le programme des mesures géodésiques ne prévoit leur exécution, comme c'est souvent le cas, qu'une ou deux fois par an, il faut toujours choisir les mêmes périodes de l'année (de préférence en saison moyenne) et les mêmes conditions météorologiques et de remplissage; si, au contraire, en vue d'une connaissance plus fine du comportement de l'ouvrage, le programme prévoit plusieurs mesures annuelles, il est préférable de les répartir de façon à réaliser le maximum de combinaisons de température et de remplissage.

7. GENERAL CONSIDERATIONS ON THE INSTALLATION OF INSTRUMENTS

7.1. FACTORS INFLUENCING ACCURACY OF MEASUREMENTS

The degree of accuracy obtained from measurements depends not only on the skill of the personnel making the measurements but also on the type of instrumentation. For example, obtaining measurements from surface monuments may be a simple procedure subject to minor corrections associated with the stretch of the measuring tape, or temperature variations provided that the monuments are so designed as to avoid errors due to seasonal ground surface movements. For dams with a curved crest, surveying methods must also be used and errors inherent in triangulation enter into the measurements. In some instances the location of reliable benchmarks located in areas free from strains requires levelling over considerable distances to the location of surface settlement monuments which increases the possibility of an error in measurement. Topometric measurements may be greatly affected by temperature variations in the air near the dam and the ensuing refractions.

These considerations should lead to the adoption of some general rules, bearing in mind, however, that the situation during the first filling is not the same as during ordinary operation.

At thermally sensitive points, measurements should not be carried out when temperature is very high or very low or when the sun is shining too brightly. Early morning is preferable to afternoon. When measurements are protracted (topography), operations at the most sensitive points should be carried out as quickly as possible and in the same period of the day.

In countries where there is very strong sunshine, measurements are preferably carried out at sunrise.

If several types of measurements are to be carried out on the same dam, the measurements whose results are comparable (e.g. : topographic and topometric measurements, pendulums, clinometers) should be simultaneous, or made within sixty minutes.

If geodetic measurements are to be carried out once or twice a year, as often is the case, care should be taken that they are carried out in the same period of the year (preferably in the intermediate seasons) and under the same weather and filling conditions. If, on the other hand, the behaviour of the dam is to be investigated by several measurements in the course of the year, these should be grouped so as to obtain the largest possible number of combinations with regard to temperature and filling conditions.

7.2. VALIDITÉ DES RÉSULTATS DE MESURES

La validité des mesures ne dépend pas seulement des qualités de l'appareil et du soin apporté à l'exécution de chaque mesure en particulier, mais aussi du nombre de mesures de même nature, intéressant une même partie d'ouvrage. Par exemple, dans le cas d'un barrage en remblai, une mesure isolée est de peu d'intérêt pratique même si son résultat apparaît logique, car elle ne peut donner une image fidèle de la pression ou de la déformation dans la situation considérée. Si l'on dispose, par contre, de plusieurs mesures provenant d'appareils différents mais effectuées dans les mêmes conditions, on peut obtenir une moyenne plus sûre et éliminer les données aberrantes. Il est important de pouvoir identifier très tôt les appareils qui donnent des indications erronées de façon à pouvoir si possible les remplacer. Cependant, dans le cas particulier des cellules de pression totale, les lectures aberrantes sont plutôt observées en présence de pressions faibles; elles seraient dues à l'apparition d'arcs de décharge dans le remblai. Ce phénomène ne doit toutefois pas être confondu avec celui qui peut résulter d'une installation incorrecte.

En plus de l'intérêt de disposer de suffisamment d'appareils d'un type donné en vue d'augmenter la validité des mesures, il est souvent possible de se ménager la possibilité d'un contrôle des résultats en disposant les appareils de façon à autoriser des recoupements. Par exemple, dans un barrage en remblai, l'emplacement d'un dispositif de contrôle de tassements peut être choisi de façon à permettre des recoupements avec une installation de contrôle de mouvements horizontaux qui comporte un contrôle, par niveau d'eau, des tassements verticaux. Ainsi, l'emploi de deux méthodes différentes permet un recoupement des mesures de tassements au point d'intersection. Il faut prendre soin également de recueillir des données en surnombre, en vue de faciliter l'interprétation des résultats relatifs à un type donné d'appareil. C'est ainsi, par exemple, que des piézomètres devraient être installés à proximité des cellules de pression de façon à pouvoir appliquer à celles-ci des corrections de pression interstitielle. Lorsque des mesures présentent un caractère primordial dans le domaine du contrôle de la sécurité du barrage, il serait justifié d'utiliser au moins deux types d'appareils, par exemple deux types différents de piézomètres.

Enfin, il faut retenir que les appareils mesurés depuis la surface à travers des sondages assurent une meilleure qualité de mesures sur une longue période. Il faut considérer que les appareils complètement enterrés ont une durée de vie plus courte.

7.3. PROCÉDÉS TOPOMÉTRIQUES

Les informations recherchées étant à la limite de la précision des appareils et des méthodes, les mesures topométriques doivent faire l'objet de précautions toutes particulières, et leur exécution exige un personnel hautement qualifié (voir Annexe 1).

7.4. MESURES PAR RÉFÉRENCE À LA VERTICALE DU LIEU

7.4.1. La verticale du lieu constitue une direction de référence remarquablement sûre et stable. Les perturbations que peuvent y apporter le voisinage et la masse

7.2. RELIABILITY OF MEASUREMENTS

The reliability of measurements depends not only on the type of instrument and the care used in making individual measurements, but also on the number of measurements of the same type in a similar relative location within the dam. For example, in an embankment dam, a single unrelated measurement is of little practical value even if the reading obtained appears to be reasonable, as it may not reflect the pressure or strain for the particular situation. If measurements are available from several instruments taken under the same governing conditions, useful average data can be obtained and erratic values discounted. It is important that instruments which are performing erratically be identified early in the measurement program so that they can be replaced if such action is feasible. However, in the case of pressure cells, erratic readings are more likely to be observed under low pressures because of arching within the fill. This arching within the fill is not to be confused with localized arching due to faulty installation.

In addition to providing enough instruments of a particular type to permit obtaining reliable measurements, it is often possible to obtain verification of measurements by locating instruments so that the lines of measurement intersect. For example, in an embankment dam, a vertical settlement device can be located to intersect a horizontal movement device of the type in which vertical settlement can be determined by water level measurements. Thus, measurements for the settlement of the point of intersection may be checked by two different methods. Care should also be taken to obtain supplementary measurements which will be useful in interpreting data from a particular type of instrument. Piezometers should, for example, be located adjacent to pressure cells in order that pore pressure corrections can be made for cell readings. For measurements which are vital for control of safety of the dam, at least two different types of instruments should be used, for example, two different types of piezometers.

In conclusion, it should be noted that greater reliability over a long period of time can be obtained from those instruments for which measurements can be made from the surface by means of sounding devices or probes. Instruments which are completely buried in the embankment can be expected to have a shorter useful life.

7.3. TOPOGRAPHICAL TECHNIQUES

As the information required lies at the limit of accuracy of instruments and methods, topographical measurements should be carried out with the greatest care and entrusted to highly qualified personnel (see Appendix 1).

7.4. MEASUREMENTS WITH REFERENCE TO THE VERTICAL

7.4.1. The local vertical provides a fairly safe and stable reference direction. The effects of the great body of water and its vicinity (from 1 to 2×10^{-6} , at most) and

d'eau ($1 \text{ à } 2 \times 10^{-6}$ au maximum) et l'influence conjuguée de la lune et du soleil (environ 100 fois moins) sont en tout état de cause trop faibles pour qu'il soit nécessaire, dans la pratique, de les prendre en considération.

7.4.2. Contrôle des composantes horizontales des déplacements différentiels

A. Pendule ou fil à plomb

Le fil à plomb constitue une matérialisation fidèle de la verticale du lieu, appelée à servir de référence pour mesurer les déformations relatives de l'ouvrage dans un plan vertical. L'appareil, très simple dans son principe, comporte un fil ancré à sa partie supérieure et centré de façon parfaitement définie par rapport à l'ouvrage par une pièce dite : « centrage supérieur » ; le fil porte à sa partie inférieure un poids en relation avec la résistance mécanique du fil, plongeant dans un liquide amortisseur. Un dispositif (coordimètre, table de mesure, etc.), solidaire du barrage ou du rocher, permet de mesurer les déplacements relatifs du fil, c'est-à-dire du point de centrage supérieur par rapport au plan où le dispositif est placé, suivant des composantes choisies généralement radiales et tangentielles.

La conception et la réalisation de l'appareil doivent être telles qu'un incident mécanique ou la détérioration d'un de ses éléments ne perturbe pas la continuité des mesures dont le raccordement doit toujours pouvoir être assuré.

La longueur du pendule doit être suffisante pour donner lieu à des déviations facilement mesurables par des moyens simples, et pas trop grande pour éviter une trop grande sensibilité aux courants d'air ou aux courants de densité dans le pot d'amortissement. A ce titre, une longueur de l'ordre de 50 m donne de bons résultats ; de toute façon, pour des barrages atteignant ou dépassant 100 m, il y a intérêt à fractionner les longueurs du pendule (cette disposition est souvent impérative pour les barrages à double courbure).

Dans le cas d'installations à l'extérieur du barrage, le fil devra passer dans un tuyau vertical le protégeant du vent et dont le diamètre intérieur ne devra pas être inférieur à 150 mm.

Le point supérieur de suspension sera placé quelques mètres plus bas que le couronnement pour éviter les mouvements thermiques rapides qui affectent la crête des barrages.

Le point de mesure inférieur doit être placé le plus bas possible, éventuellement au fond d'un puits approprié, creusé dans le rocher de fondation. Il devient alors solidaire des couches profondes du terrain de fondation et pourrait à la limite avec un puits suffisamment profond être considéré comme pratiquement fixe.

B. Le pendule inversé remplit les mêmes fonctions que le pendule direct avec cet avantage que le point d'ancrage du fil peut être scellé au fond d'un forage. Dans ce cas, et si le forage est assez profond, ce qui dépend des contraintes transmises par le barrage au rocher et des caractéristiques géologiques, on peut admettre que l'appareil indique des mouvements absolus.

Un tel forage constitue une certaine sujétion car il doit être suffisamment vertical et rectiligne pour que le fil ne risque pas d'en toucher les parois : étant donné les aléas de ce travail, une précaution élémentaire est d'adopter un diamètre de forage assez grand et en relation avec la profondeur.

Le contrôle de la verticalité et de la section utilisable du trou réalisé est

of the joint action of the moon and the sun (about 100 times less) are too weak to be taken into account.

7.4.2. Determination of the horizontal components of differential displacements

A. Pendulum or plumb line

The pendulum is a faithful representation of the local vertical which is used as a reference when measuring the relative displacements of a structure in the vertical plane. The instrument, which is very simple in design, consists of a wire anchored in its upper portion and kept in position by an "upper centering" device; the weight attached to its lower end is proportional to the mechanical strength of the wire and is submerged in a liquid damper. A special device (coordinometer, measuring table, etc.) fixed to the dam and the foundation rock allows the relative displacements of the wire and of the upper centered point to be measured with reference to the plane of the device according to some radial and tangential components.

The instruments should be designed and constructed in such a way that continuity of measurement is ensured even in the case of mechanical failures or deterioration of one or more of their parts.

The pendulum should be long enough to permit deviations which should be easy to measure by simple means. Also it should not be too large to avoid excessive sensitivity to draughts or to density currents in the damper basin. For example, a length of about 50 m is quite satisfactory. If the dam is higher than 100 m, the length of the pendulum should be subdivided (this is often necessary for double-curvature dams).

If the pendulum is installed outside the dam, a vertical pipe of no less than 150 mm in inner diameter should be used to protect the wire from the wind.

The highest hanging point should be a few meters below the dam crest to avoid the rapid thermal changes occurring in that zone.

The lowest measuring point should be as low down as possible or at the bottom of a special shaft in the foundation rock. In this case, if the shaft is sufficiently deep, being attached to the deeper layer of the foundation rock, the point may be regarded as practically fixed.

B. An inverted pendulum fulfils the same function as an ordinary pendulum; but it is more convenient in that the lower end of the wire can be anchored at the bottom of a hole. In this case, if the hole is sufficiently deep, which depends on the stresses the dam transmits to the rock and on geological features, it can be said that the pendulum indicates absolute movements.

The drilling of the hole entails some difficulty as the cavity should be rectilinear and vertical enough for the wire not to touch the wall; in any case a fairly large diameter proportional to the depth is recommended.

The verticality and the utilizable section of the hole should be checked using well known techniques.

absolument nécessaire. On n'évoquera pas ici les techniques permettant cette vérification.

Le récipient dans lequel est immergé le flotteur est ordinairement rempli d'eau, additionnée éventuellement d'antigel. Le volume du flotteur lui-même doit être tel qu'il entraîne une traction suffisante sur le fil (par exemple, 20 kg pour un fil de 1 mm de diamètre).

Les conditions d'emploi du pendule inversé ne diffèrent pas sensiblement de celles d'un pendule direct. Il est simplement indiqué que des mouvements de convection s'amorcent facilement dans le liquide de la cuve à la faveur de gradients thermiques et risquent de fausser très sensiblement les mesures; de ce fait, il peut devenir nécessaire, dans certains cas, d'isoler thermiquement toute la cuve.

C. Les moyens de lecture des déplacements des fils de pendule direct ou inversé obéissent aux mêmes impératifs et sont notamment conditionnés par le fait que le fil peut être dévié de sa position d'équilibre par une force transversale très faible; un calcul élémentaire montre que tout frottement parasite dans un dispositif de lecture de position du fil peut engendrer des erreurs supérieures à la précision souhaitée, généralement de l'ordre de 0,1 mm, mais souvent supérieure.

Les moyens de lecture les plus sensibles sont optiques : palpeur optique ou électro-optique, ou lunette de visée si l'on recherche une très grande finesse; mais certains dispositifs de lecture à l'œil nu donnent facilement mieux que 0,1 mm.

Les coordimètres mécaniques sont commodes, mais leur construction doit être très soignée pour éviter les frottements.

Des appareils à lecture électrique peuvent permettre une grande finesse de mesure, mais leur principe doit être tel qu'aucune réaction électro-mécanique ne s'exerce entre l'appareil et l'équipage mobile.

Enfin, il existe des appareils à palpeur optique et lecture digitale, qui constituent sans doute l'optimum dans le sens de la fidélité, de la précision et de l'aptitude à la télétransmission.

D. Pendule optique

Lorsque les dispositions locales ne permettent pas l'emploi d'un pendule à fil, on peut avoir recours à une lunette spécialement adaptée aux visées verticales. Ce procédé qui se rattache aux méthodes de la géodésie peut rendre service, mais sa précision est en principe inférieure à celle du pendule mécanique.

7.4.3. Mesure locale de l'angle de rotation d'un ouvrage en béton dans un plan vertical : que ce plan soit orienté dans le sens amont-aval ou dans le sens perpendiculaire, cette mesure se réfère également à la verticale du lieu.

L'appareil peut être un niveau à bulle comportant une fiole de grand rayon (par exemple 30 ou 40 m), il est alors généralement amovible; ou un pendule court vertical ou horizontal équipé d'un moyen de lecture électrique ou micrométrique, susceptible d'être installé à demeure et de comporter une possibilité de télétransmission.

L'information diffère de celle que peut donner un pendule long, du fait que le clinomètre donne une indication locale, alors que le pendule intègre sur toute sa hauteur un ensemble de déplacements élémentaires (rotations ou cisaillements).

Il est souvent intéressant de prévoir des cheminements clinométriques avec chevauchement des bases successives.

The tank containing the float is generally filled with water to which some anti-freeze can be added. The volume of the float should be such as to exert sufficient traction on the wire (e.g., 20 kg for a wire having a diameter of 1 mm).

The use of an inverted pendulum does not differ very much from that of an ordinary pendulum. It should be noted, however, that in a float tank convection displacements may easily develop in consequence of thermal gradients which may affect measurements to a considerable extent; hence the necessity, in some cases, of insulating the whole tank thermally.

C. For both types of pendulums the devices showing the movements of the wire should fulfil the same requirements. They are conditioned by the fact that the position of the wire may be affected by a very moderate transversal force. An elementary analysis will show that parasitic friction on such devices may cause an error exceeding the accuracy required (0.1 mm or more).

The most sensitive reading devices are optical instruments, e.g. optical or electro-optical coordinometers or sighting lenses (if extra accuracy is desired). With some direct (naked eye) reading instruments accuracy may be greater than 0.1 mm. Mechanical coordinometers are quite handy but their construction should be very accurate to avoid friction. Electrical instruments are more precise but care must be taken that no electro-mechanical reaction occurs between the instrument and the mobile equipment.

Finally, there are instruments consisting of an optical coordinometer and a digital reading device which are precise, reliable and suitable for teletransmission.

D. Optical pendulum

Where local conditions do not allow the use of a plumb line, a vertical sight optical instrument can be used. The technique, which is connected with geodetic methods, can be useful but accuracy is less than that of a mechanical pendulum.

7.4.3. Local measurement of the angle of rotation of a concrete structure in a vertical plane : whether the direction of the plane is upstream-downstream or is perpendicular, the measurement is always referred to the local vertical.

The instrument may be an airbubble level with a long-radius (e.g. 30-40 m) glass tube, which is generally removable, or a short vertical or horizontal pendulum fitted with an electrical or micrometrical reading system which can be installed on the spot and used for teletransmission.

Information may differ from that given by a long pendulum, as a clinometer gives local indications while a pendulum integrates a succession of elementary displacements (rotation or shearing) all along its length.

In some cases, it may be advantageous to use clinometer chains with superimposed successive bases.

En ce qui concerne plus spécialement les clinomètres amovibles (1), une bonne conception du siège est très importante. La base de mesure ne doit pas être inférieure à 0,10 m, les touches sur lesquelles reposera le clinomètre doivent définir sans ambiguïté le plan dont on mesure les variations d'inclinaison, l'embase ne doit pas être montée sur un socle en béton rapporté mais doit être scellée directement au contact du béton d'origine, en radier de galerie ou dans une niche et, de toute façon, dans un lieu où les variations de température sont très atténuées.

Les clinomètres amovibles sont généralement installés dans une singularité de la structure, telle qu'une galerie, et du fait du caractère très local de la mesure on constate souvent que l'angle de rotation ainsi relevé ne coïncide pas avec l'angle qui peut résulter de la prise en considération d'autres mesures, par exemple les variations de pente locale des déformées tracées à partir des indications des mesures topographiques ou des pendules.

Les inconvénients propres aux clinomètres amovibles sont compensés par le fait qu'ils permettent, grâce à la pratique du retournement à 180°, une mesure absolue de la pente, ce qui exclut toute erreur due à une dérive de l'appareil.

7.5. DÉFORMATIONS UNITAIRES

Dans la technologie des moyens de mesure des déformations unitaires des barrages en béton, il faut distinguer les moyens mis en place à la construction, c'est-à-dire noyés dans le béton d'origine, et les moyens installés *a posteriori*.

7.5.1. Appareils mis en place à la construction

A. Il s'agit d'extensomètres dont la base est généralement choisie de l'ordre de 20 cm (si cette longueur est plus faible, il faut prendre des précautions spéciales pour le béton d'enrobage, notamment exclure les gros éléments).

Ces appareils sont le plus souvent destinés à l'analyse d'un état de contraintes dans un plan parallèle à un parement; il est conseillé d'adopter une distance de ce plan au parement considéré égale ou supérieure à 0,50 m si l'épaisseur de l'ouvrage le permet, de façon à atténuer les effets de surface (faïençage, imbibition, température, etc.) tout en ayant une bonne présomption d'un état de contraintes effectivement plan et parallèle au parement. Les appareils sont souvent groupés en rosette (trois appareils ou plus) de façon à permettre la connaissance des déformations principales en grandeur et direction. Les orientations choisies dans le cas de trois appareils sont : l'horizontale pour un des appareils, les deux autres pouvant être à 60° de celui-ci ou à 45° et 90°.

Il est bon de disposer un appareil supplémentaire suivant une orientation intermédiaire pour s'assurer contre une détérioration accidentelle.

Les plus grands soins doivent être apportés, pendant la mise en place, au respect rigoureux de l'orientation choisie pour chaque appareil. Les montures en acier qui aident à définir cette géométrie doivent être disposées de façon à ne pas perturber

(1) *Ce type de clinomètre est aujourd'hui abandonné : taille trop réduite de la base de mesure rendant la mesure non représentative du comportement d'ensemble de l'ouvrage — problèmes de scellement des plaques d'embase.*

With regard to removable clinometers (1), which are often employed, great care should be used in planning their seat. The measuring base should not be less than 0.10 m. The extension support on which the clinometer is to rest should define very clearly the plane whose variations of inclination are being measured. The supporting plane must not be made anew but hollowed out in the original concrete, on heading walls or in shallow recesses, where temperature variations are very moderate. Since removable clinometers are generally installed in particular structures such as headings, and measurements are localized, the angle of rotation they indicate does not always coincide with the angle that can be obtained from other measurements, like the variation of local inclination of the deformed lines based on topographic or pendulum data.

The disadvantages of removable clinometers are, however, offset by the fact that, being subjected to a rotation of 180°, they allow an absolute measurement of inclination with the exclusion of all errors due to drift.

7.5. DEFORMATIONS

In the technology of instruments measuring deformations of concrete dams, a distinction should be made between the instruments that are installed during construction, i.e. embedded in the original concrete, and those that are installed after completion.

7.5.1. Instruments installed during construction

A. These are generally strain gauges with a base of about 20 cm (in the case of shorter bases, special precautions should be taken when mixing the covering concrete so that coarse aggregates are left out).

These instruments are principally designed for the analysis of a state of stress on a plane parallel to a dam face. The distance from this plane to the dam face should be 0.50 m or more, where the thickness of the dam allows it, so as to attenuate surface effects (hair cracks, imbibition, temperature, etc.), and the stresses should be assumed to be plane and parallel to the dam face. Instruments are often grouped in rosettes (3 or more instruments) so as to determine the principal deformations with regard to size and direction. The orientations generally selected (in the case of 3 instruments) are : the horizontal for one of the instruments while the other two may be set at 60, 45 or 90 degrees from it.

As a precaution, an extra instrument should be added with an intermediate orientation.

The orientation chosen for each instrument must be maintained during installation. The steel frameworks that help to define this geometry should be arranged so as not to interfere with the stress field.

(1) *This type of clinometer is nowadays no longer used; the measuring base is too small so that the measurement is not representative of the overall behaviour of the structure; besides, the sealing of basement plates can pose problems.*

par la suite le champ de contraintes, l'identification de chaque appareil (qui n'est plus révisable après coulée du béton) devra être définie sans ambiguïté.

L'installation d'un dispositif de mesures extensométriques doit être, en principe, réservée aux ouvrages en béton qui travaillent à plus de 10 bars.

Enfin, pour suivre le travail des fondations, il est souvent indiqué de disposer des extensomètres dans des forages plus ou moins profonds. Ces appareils doivent de préférence comporter une plus longue base de mesure que pour le béton; une difficulté réside dans un ancrage convenable de l'appareil aux parois du trou : le scellement au mortier est loin de constituer une bonne solution, une liaison par anneaux extensibles est préférable.

De toute façon, les appareils visés à ce paragraphe ne peuvent permettre, sans autre artifice, l'évaluation de l'état absolu de contraintes, mais uniquement de ses variations.

Les principes sur lesquels sont, dans la pratique, basées les mesures extensométriques sont :

- la corde vibrante;
- la variation de résistance;
- la variation d'inductance;
- la variation de capacité.

Les différents types d'appareils sont conçus de façon à pouvoir permettre la mesure des températures du béton; en outre, ils ont généralement par construction une réponse thermique propre voisine du coefficient de dilatation du béton, ce qui facilite les corrections dans ce domaine.

Il faut mettre plus particulièrement au crédit des appareils à corde vibrante le fait que leur exactitude ne peut être altérée par les imperfections de la ligne, telles que résistance électrique, isolement.

B. Les appareils dits « correcteurs » sont des extensomètres identiques aux extensomètres actifs, mais, bien que montés au voisinage de ceux-ci, ils sont inclus dans une éprouvette de béton isolée du champ de contraintes. Leur but est de donner une image des déformations du béton autres que celles dues aux contraintes, c'est-à-dire de celles dues à la température, à l'hygrométrie, au vieillissement, etc.

L'expérience semble montrer que cet objectif, séduisant en théorie, n'est, dans la pratique, qu'imparfaitement atteint. De ce point de vue, le dimensionnement des éprouvettes a une grande importance.

Du fait que les extensomètres noyés dans le béton sont toujours consultés par voie électrique, il est facile de grouper les arrivées de câbles sur des tableaux centraliseurs ou même sur un seul tableau situé dans un local unique, réalisant ainsi une véritable centrale de mesures, équipée de façon à faciliter le travail des opérateurs.

Pour des informations plus détaillées, on se reportera aux notices des constructeurs et aux publications.

7.5.2. Appareils mis en place *a posteriori*

Sauf exception, ces appareils sont installés à l'extérieur du béton et leurs indications peuvent être faussées par les phénomènes de surface : température, dessiccation et faïençage du béton, etc. Il est donc recommandé d'adopter un type

The identification of each instrument, which becomes unrevisable after concrete placing, should be defined very clearly.

As a rule, the installation of a strain gauge system should be confined to concrete structures operating at more than 10 bars.

Finally, strain gauges, installed in boreholes of various depth, can be used also for checking foundation work. In this case the measuring base should be longer than in the concrete. The anchorage of the instrument to the borehole wall is rather difficult; the use of extensible rings is preferable to sealing with mortar which is far from being satisfactory.

In any case, the instruments considered in this paragraph cannot be used also for determining the absolute state of stress; they only give indications on its variations.

The principles on which strain gauge measurements are based are the following :

- vibrating wire;
- resistance variation;
- inductance variation;
- capacitance variation.

All the types of instruments are designed for the measurement of temperature in the concrete; moreover their thermal response nears the expansion coefficient of concrete, which facilitates corrections in this respect.

An advantage of vibrating wire instruments is that their precision cannot be affected by faults in the electrical equipment such as insulation or resistance.

B. The so-called “ no stress ” or isolated strain gauges are instruments similar to active strain gauges; though installed near them, they are embedded in small concrete blocks isolated from the field of stress. Their purpose is to offer a picture of the deformation of the concrete other than that due to stress (e.g. due to temperature, humidity, ageing, etc.). Experience has shown that in practice this object is difficult to attain. The choice of dimensions for the isolated blocks is very important.

Since the strain gauges embedded in the concrete are always read by an electrical system, cables can easily be grouped on centralized boards, or a single board, thus creating a control room to facilitate the work of the operators.

For detailed information reference should be made to manufacturers' news and technical literature.

7.5.2. Instruments installed after construction

With a few exceptions, these instruments are installed outside the concrete and their indications may be affected by surface phenomena, as temperature, dessication, hair cracks in the concrete, etc. Therefore it is advisable to use a type of instrument

d'appareil parfaitement corrigé des dilatations thermiques et comportant une base de mesure suffisamment longue pour que la répartition des singularités de surface (microfissures) soit statistique — à ce titre, 1 m est un minimum; on peut indiquer que des barres d'invar de bonne qualité, de 2 à 4 m de longueur, équipées de comparateurs mécaniques au 1/100 donnent de bons résultats.

Les pattes qui solidarissent au béton les parties actives de l'appareil doivent être particulièrement rigides; la profondeur du scellement, très soigné, doit être au minimum de 0,30 m.

Ces mesures doivent s'accompagner d'une bonne connaissance de la température du béton; celui-ci de plus doit, dans la mesure du possible, être mis à l'abri des influences météorologiques dans la zone intéressée.

7.6. MESURES DES TEMPÉRATURES

La technologie des procédés de mesure des températures est suffisamment classique pour qu'il soit inutile de s'y attarder. En ce qui concerne la mesure des températures du béton, l'aspect délicat est plutôt le choix des points de mesure les plus représentatifs et les mieux capables de rendre compte des déformations thermiques de l'ouvrage; mais c'est là un problème d'espèce.

On indiquera simplement ici que, pour une voûte mince, la température moyenne des arcs supérieurs est particulièrement représentative, tandis que le gradient de température entre l'amont et l'aval prend relativement d'autant plus d'importance que l'on considère des ouvrages plus épais. Sauf cas d'espèce, il est peu indiqué de prendre les températures du béton à une profondeur plus faible que 40 cm. Ces mesures doivent être exécutées (comme toutes les autres mesures d'ailleurs) toujours au même moment de la journée, c'est-à-dire au début de la matinée, avant insolation; ces indications sont valables dans le cas où l'on veut éviter l'effet thermique journalier.

Dans le cas où l'on dispose de moyens de calcul appropriés, il est possible de déduire la distribution thermique dans l'ouvrage entier à partir de la connaissance des températures superficielles des parements fournies par un certain nombre de thermomètres mis en place à proximité des surfaces externes (à 5-15 cm de l'extérieur), ou bien grâce aux plus récentes techniques thermographiques à l'infrarouge. Avec cette technique, il est possible d'obtenir une information « continue » dans l'espace et (même si à ce jour elle est encore à l'état de théorie) dans le temps.

De la connaissance de la situation thermique de toute la masse de l'ouvrage en béton il est possible de passer à la connaissance de l'état de déformation de la structure.

Il est évident que plus les mesures de température sont fréquentes et détaillées, plus l'analyse thermique et ensuite celle de la structure seront précises.

7.7. MESURES DES SOUS-PRESSIONS ET DES FUITES

Pour les barrages en béton, le schéma du réseau de drainage des fondations doit tenir compte, dans la mesure du possible, de la géologie. En outre, chaque plot doit être équipé de ses forages piézométriques ou de contrôle de sous-pressions, indépendants du réseau de drainage. Dans le cas d'un barrage-poids, on devra s'attacher

perfectly corrected for thermal expansion, with a measuring base long enough for surface features (microfissures) to be distributed statistically (minimum 1 m). Invar bars of good quality, 2-4 m long, fitted with 1/100 mechanical comparators can be used with satisfactory results.

The stakes by which the active parts of the instrument are fixed to the concrete should be very rigid; anchorage should be very accurate and have a depth of at least 0.30 m.

These measurements should be supplemented by a good knowledge of the temperature in the concrete which should be protected, if possible, from meteorological influence.

7.6. TEMPERATURE MEASUREMENTS

The technology of temperature measurements is sufficiently known and need not be described in this paper. With regard to the measurement of temperature in the concrete, a delicate question is the choice of the best measuring points indicative of thermal deformations in the structure; but this problem is a specific one.

What we can note here is that in a thin arch dam the temperature in the upper arches is particularly important; the upstream-downstream temperature gradient, on the other hand, is important in structures of greater thickness.

Except for particular cases, concrete temperature should never be measured at smaller depths than 40 cm.

Like all the other measurements described in the previous paragraphs, these measurements should always be carried out at the same time, preferably early in the morning before the sun shines on the dam. These indications are valid if the daily thermal effect is disregarded.

In situations where appropriate numerical methods are available, the thermal distribution can be obtained in the whole structure starting with the knowledge of the surface temperatures on dam facings which can be measured either by means of a certain number of thermometers set in the proximity of the outer surfaces (the distance from the outside being 5 to 15 cm) or by means of the more recent infra-red thermography techniques. With this technique it is possible to obtain information which is "continuous" in space and (even if only theoretically nowadays) time.

In this way, from these, the thermal state of the entire concrete structure can be obtained and from this the deformed state due to stress of the same structure.

It is obvious that the more detailed and frequent are the temperature measurements, the more accurate the thermal and structural analysis will be.

7.7. UPLIFT AND LEAKAGE MEASUREMENTS

For concrete dams, the drainage system in the foundation should be designed taking into account the geological conditions. Each block should be provided with piezometric or uplift control boreholes independent of the drainage system. In the case of a gravity dam, there should be several measuring points across the width of

à réaliser quelques points de mesure par plot, répartis d'amont en aval, le plus en amont étant placé immédiatement à l'aval du rideau d'étanchéité.

Il est rappelé que les mesures de sous-pressions et de fuites à travers les fondations constituent le contrôle de sécurité le plus immédiat, et le plus significatif. Dans le cas des barrages-poids, ces mesures sont primordiales.

Certains constructeurs ont mis au point des dispositifs qui permettent la mesure ponctuelle des pressions internes dans le rocher sans perturbation du régime d'écoulement (piézomètres électro-acoustiques).

7.8. PIÉZOMÈTRES ET MESURES DES TASSEMENTS

Les piézomètres à tubes ouverts et les dispositifs verticaux de mesure de tassements du type « crossarm » des barrages en remblai nécessitent les mêmes précautions que des simples chaînages entre repères de surface, c'est-à-dire des corrections de tension du ruban et de température. Lorsque l'on souhaite connaître les valeurs de la pression interstitielle en des points inaccessibles par tubes verticaux, on utilise des transmissions hydrauliques ou pneumatiques associées à des capteurs de pressions interstitielles. La précision de tels systèmes est conditionnée par les limitations du capteur de pression particulier utilisé en l'occurrence. La même remarque s'applique à d'autres types de cellule de pression utilisant des capteurs de mesure.

7.9. MOUVEMENTS DES JOINTS OU DES FISSURES

Il faut distinguer les joints ou les fissures débouchant à l'amont, donc généralement immergés, et ceux accessibles depuis l'aval.

Dans le premier cas, les appareils les plus simples et les mieux adaptés sont du type potentiométrique étanche.

Dans le deuxième cas, on peut se contenter de mesurer au comparateur ou pied à coulisse l'écartement de touches scellées sur le béton. Souvent, ces touches sont conçues de façon à permettre des mesures tridirectionnelles.

Pour les mesures des joints de construction, sont généralement employés des dilatomètres à variation de fréquence (électro-acoustiques), ou à variation de résistance, placés à l'intérieur du barrage pendant la construction.

7.10. CONTROLES DITS « NON DESTRUCTIFS »

Il faut entendre par méthode de contrôle non destructif tout procédé d'investigation permettant, par le jeu de phénomènes physiques, d'accéder à la connaissance de certaines caractéristiques ou particularités intrinsèques du matériau dans des zones inaccessibles, en liaison avec ses qualités mécaniques ou éventuellement son état de contrainte, et ceci sans altération de son intégrité matérielle. Il s'agit là d'un sujet très vaste qui, à moins d'être traité trop superficiellement, ne peut prendre place dans le cadre de ce rapport.

the dam, the points being located partly upstream and partly downstream; points upstream should be situated immediately downstream of the grout curtain.

As everybody knows, uplift and leakage measurements in the foundation are the most immediate and significant safety measure. If the dam is of the gravity type, these measurements are of primary importance.

Some constructors have now set up particular devices for the immediate measurement of pressures in the rock without disturbing the flow regime (vibrating wire piezometers).

7.8. PIEZOMETER AND SETTLEMENT MEASUREMENTS

Open pipe piezometers and vertical settlement devices of the crossarm type of embankment dams are subject to the same limitations as simple measurements between surface markers; namely tape stretch and temperature corrections. Because pore pressure readings are desired at points which cannot be reached by vertical standpipe installations, hydraulic or air systems are used with pore pressure gauges. The accuracy of such systems is governed by the limitations of the particular pressure gauge employed in the system. This same comment applies to other types of pressure cells employing gauges as the measuring device.

7.9. JOINT AND CRACK MEASUREMENTS

A distinction should be made between the joints and cracks on the upstream face and generally submerged and those accessible from the downstream face.

In the first case, the simplest and most suitable instruments are watertight potentiometric gauges.

In the second case, it may be sufficient to measure the spacing of stakes fixed to the concrete by means of a comparator or sliding gauge. The arrangement of the stakes is often such that measurements can be carried out in three directions.

For the measurement of construction joints frequency-variation (electro-acoustical) or resistance-variation dilatometers are generally used which are installed in the dam during construction.

7.10. NON-DESTRUCTIVE TESTS

By non-destructive checks we mean a technique for determining, on the basis of physical phenomena, some characteristics or internal features of the material in inaccessible zones and also its mechanical qualities and possibly its state of stress without altering its original integrity.

The subject is very wide and cannot be dealt with in this report.

ANNEXE MÉTHODES GÉODÉSIQUES POUR LA DÉTERMINATION DES MOUVEMENTS DES BARRAGES

Les méthodes géodésiques ont été les premières adoptées systématiquement dans la détermination des déplacements (horizontaux et verticaux; relatifs ou absolus) d'un barrage dans le but de vérifier sa sécurité.

Il y a quelques décennies, quand le problème de la sécurité des barrages en même temps que celui du contrôle et du perfectionnement de leur projet, a commencé à venir au premier plan, les méthodes géodésiques, grâce à leur adaptabilité à toutes les conditions d'environnement, ont été proposées immédiatement pour répondre au plus vite à ces exigences; ces méthodes, en fait, avec leurs instruments spécifiques de grande précision, avec des bases théoriques très solides et de nombreuses années d'application, se sont trouvées suffisamment au point, à ce moment-là, pour résoudre les problèmes de sécurité et de perfectionnement des méthodes de projet. La littérature existante, très vaste, peut confirmer cette thèse.

Par la suite, les méthodes et les procédures ont été davantage affinées pour les adapter à ces objectifs (systèmes de centrages des instruments et des repères; forme et éclairage des repères; introduction du concept de variation à la place des différences entre valeurs absolues, soit dans le relevé, soit dans les calculs inhérents, etc.).

Outre les opérations de triangulation géodésique classique, s'insèrent dans les méthodes géodésiques les mesures de longueurs, la polygonaion, la collimation, le pendule, le nivellement topographique et hydrostatique, les clinomètres; en un mot, toutes ces méthodes qui non seulement appartiennent à la géodésie opérationnelle, mais surtout basent leur référence absolue dans le champ de la gravité, c'est-à-dire sur la direction de la verticale.

On doit prendre en considération maintenant et souligner une différence fondamentale entre l'application des méthodes à des fins proprement « géodésiques » et leur application à la détermination des déplacements d'un barrage. La première a pour but de déterminer la position absolue de certains points appartenant à la surface terrestre de référence; la seconde au contraire doit déterminer les variations de position de points appartenant à une surface de dimensions très réduites.

L'aspect différentiel de l'opération doit donc être souligné.

On peut, par conséquent, affirmer que de telles méthodes ont été ou peuvent être encore aujourd'hui adoptées pour les raisons suivantes :

- 1. elles s'adaptent facilement à des situations d'environnement et de mesure les plus variées;*
- 2. elles permettent de relier des points très éloignés, et/ou à des intervalles de temps très longs;*
- 3. il est toujours possible d'adopter des programmes d'opérations qui permettent d'avoir un nombre de mesures surabondant;*

APPENDIX GEODETIC METHODS FOR THE DETERMINATION OF MOVEMENTS OF DAMS

Geodetic methods were the first methods to be systematically adopted for determination of the displacements (both for horizontal and vertical; both relative and absolute) of a dam in order to check its safety.

Some decades ago, when the problem of dam safety together with the control and improvement of its project became evident, geodetic methods were proposed right away to give a quick answer to such problems, thanks to their adaptability to all environment conditions. Such methods, using high precision instruments, and a very solid theoretical basis with many years application, were advanced enough at that time to solve the problems of safety and improvement of the developing methods. The very extensive amount of literature can confirm this assumption.

Afterwards, methods and procedures were further refined in order to make them more suitable for these purposes (instruments and signal centering systems, signal form and illumination, introduction of the concept of variation instead of differences between absolute values both in surveying and in the relevant calculation, etc.).

Besides the classic geodetic triangulation survey, the following belong to geodetic methods : distance measurements, traversing, collimation, pendulum, geodetic and hydrostatic levelling, clinometers; in a word, all those methods that not only belong to operative geodesy, but above all base their absolute reference on the gravitational field, that is on the vertical.

It is now necessary to consider and underline a fundamental difference between the application of the methods with strict " geodetic " purposes and their application for the determination of dam displacements. The former is aimed to determine the absolute position of some points belonging to the reference area of the earth's crust, the latter to determine the changes in the position of certain points belonging to a plane having very small dimensions. The variometric peculiarity of the operation is therefore to be underlined.

It is therefore possible to state that such methods have been, and can still be, adopted in these operative fields because :

- 1. they are characterized by a great adaptability to the various environmental and meteorological situations;*
- 2. they make the connection of very distant points and/or at very long time intervals;*
- 3. it is always possible to adopt operation schemes which allow to have a large number of superabundant measurements;*

4. elles bénéficient d'une expérimentation très vaste en matière de traitement des erreurs;
5. elles ont une méthodologie élaborée de calculs et d'évaluation des résultats.

Au moins pour les opérations fondamentales, qui sont représentées par la triangulation avec les intersections correspondantes, et pour la polygonation, on doit souligner quelques faiblesses qui, en tenant compte du perfectionnement des autres méthodes de mesure, de la nécessité d'obtenir des résultats « en ligne » etc., ont conduit de nos jours à une limitation de leur emploi en les réservant à des cas tout à fait spéciaux (1). Cette limitation dépend de :

1. la complexité de l'étude et de la préparation des installations, qui exige une expérience et une compétence notables;
2. la haute technicité des mesures, qui exige des opérateurs très qualifiés;
3. la durée des opérations sur les lieux, les résultats étant altérés par les mouvements que le barrage subit au cours de la mesure si celle-ci est très longue.

Il ne faut pas croire qu'on n'a pas essayé de trouver des solutions à ces problèmes : adoption du théodolite enregistreur, relevés nocturnes, mesures automatiques de variations de longueurs, introduction des pendules inversés; mais de rapides progrès dans d'autres appareils et d'autres méthodologies ont définitivement réduit l'emploi de la triangulation, en la réservant, comme déjà dit, à des cas spéciaux.

D'autres appareils et méthodes se sont de plus en plus imposés, grâce exclusivement à leurs simplicité et aptitude à l'enregistrement des résultats, en particulier les pendules (fils à plomb), les clinomètres et le nivellement hydrostatique.

En ce qui concerne les pendules, la solution des pendules inversés (1958) a permis d'atteindre en profondeur des couches rocheuses stables et d'obtenir, de ce fait, des références fixes; cette possibilité, en même temps que la facilité d'enregistrement, ont amené le pendule à être l'instrument de mesure directe le plus adapté aux déplacements horizontaux.

La méthode de nivellement hydrostatique présente un intérêt croissant, parce qu'elle évite l'emploi d'opérateurs et l'usage de niveaux et de mires. De plus, elle a déjà été employée sur de nombreux ouvrages comme clinomètre et, étant donné les nouveaux systèmes d'enregistrement de grande précision, comme clinographe sur longue base.

Un rendez-vous pour le proche avenir est pris avec la collimation automatique, avec enregistrement des résultats. Une première solution a été déjà réalisée et d'autres sont en cours d'étude ou d'expérimentation.

On parlera de ces sujets, de façon plus approfondie, dans le prochain Bulletin CIGB, rédigé par le même Comité de l'auscultation des barrages et de leurs fondations, qui s'est chargé aussi de la réédition de cette note sur les mesures géodésiques.

Cependant, étant donné que le contrôle des barrages — en particulier, des barrages anciens — continuera de faire appel aux mesures géodésiques, il est souhaitable dans le présent document de donner quelques recommandations sans lesquelles ces mesures

(1) Cependant, les méthodes géodésiques sont les seules qui soient aptes à déterminer les mouvements des flancs de la vallée, dus par exemple aux variations de la nappe phréatique ou de la charge hydrostatique de la retenue. Les appareils modernes donnent une très grande précision pour les mesures de distance, qui devraient être exécutées chaque année pour les niveaux et les températures de l'air les plus hauts et les plus bas.

4. *they have a very wide range of experimentations pertinent to errors and their treatment;*
5. *they have an elaborate methodology of calculation and results evaluation.*

At least for the fundamental operation, that is triangulation with its intersections, and for traversing, some deficiencies must be pointed out which, considering the improvement of other surveying methods and the necessity of obtaining " on-line " results, etc., have nowadays resulted in their limited use, principally for absolutely special cases (1). This limitation is due to :

1. *the complexity of the planning and preparation of the installations, which needs considerable experience and competence;*
2. *the " delicacy " of measurements, which requires highly qualified operators;*
3. *the duration of in-situ operations because the results are affected by the movements of the dam during an excessively long survey.*

It must not be thought that solutions to deficiencies were not tried. The solutions included the use of theodolotic recorders, night surveys, automatic length variation detectors, introduction of inverted pendulums. But fast advances in other instruments and in other methodologies have definitely compromised the use of triangulation, limiting it, as it has already been said, for special cases.

Other instruments and geodetic methods however, have had better luck mainly due to ease and disposition of the same in recording the results, namely the pendulums (plumb lines), clinometers and hydrostatic levels.

As far as plumb lines are concerned, the choice of inverted pendulum devices (1958) has enabled to reach the layers of stable rock and thus to have absolute references; this characteristic, together with the facility of recording, has made the pendulum the safest and aptest measurement device for horizontal displacements.

The hydrostatic levelling method is of increasing interest because the use of operators, levels and other types of gauges can be avoided. Furthermore, it has already been used in numerous installations as a clinometer, and, given the new recording methods of high precision, as an integral clinograph on long term basis.

The next step is the automatic collimation and recording of the results, for which a solution has already been achieved while others are being studied and tested.

The Committee on Monitoring of Dams and their Foundations, which has drawn up the present up-to-date re-issue of this note on geodetic measurements, will treat this subject in greater depth in its next ICOLD Bulletin.

Therefore, keeping in mind that the dam monitoring — especially for old dams — still uses geodetic measurement systems, it is important to supply basic advice so as to avoid possible defeat. The advice regards project, installation, surveys and computations.

(1) However, geodetic methods are the only ones to determine movements of the valley flanks, i.e. due to variation of the ground water level or the reservoir load. Modern instruments enable a very high accuracy for distance measurements, which should be executed every year at highest and lowest water level and air temperature.

risquent de connaître l'échec; ces recommandations concernent le projet, l'installation, les relevés et les calculs.

En ce qui concerne le projet, il importe que :

1. *il n'existe pas de grandes différences de longueurs entre les côtés du réseau de mesures; il faut éviter les visées longues, trop inclinées, rasantes;*
2. *les angles des triangles et quadrilatères et ceux des intersections sur les repères du barrage ne soient pas (si possible) inférieurs à 30°;*
3. *les mesures soient suffisamment nombreuses, même au prix de la prolongation du temps des opérations;*
4. *il soit possible de faire intervenir un pendule inversé qui atteigne les couches plus profondes et plus stables, et qui corresponde à un sommet de la triangulation. Ce sommet sera choisi ensuite comme origine des coordonnées;*
5. *il soit possible de faire correspondre au même sommet un repère très éloigné et stable, qui permette l'orientation absolue du réseau;*
6. *il soit réalisé la mesure directe de la longueur — ou de ses variations — d'un côté du réseau (base) au moyen d'un ruban invar ou d'un dispositif approprié. Ceci est très important, puisque la base doit être mesurée à chaque campagne de façon à éliminer les dangereuses erreurs systématiques de similitude.*

Pour ce qui a trait à la construction des réseaux, il est nécessaire que :

1. *le pilier qui matérialise le sommet soit très stable;*
2. *le socle sur lequel est fondé le pilier permette à l'opérateur la liberté de mouvement maximale et la plus grande sécurité;*
3. *le pilier ait un revêtement isolant qui le protège des rayons solaires;*
4. *le massif de fondation du pilier soit muni d'un dispositif de contrôle de ses éventuelles inclinaisons;*
5. *les accessoires pour poser, centrer et fixer le théodolite et les repères soient établis avec une bonne précision mécanique.*
6. *la forme des repères, leur couleur ou le contraste des couleurs, leurs éclairage et visibilité soient particulièrement étudiés parce qu'ils représentent des éléments fondamentaux pour la bonne réussite de l'opération.*

En ce qui concerne les relevés, il est évident qu'on devra opérer dans des conditions météorologiques presque idéales (absence de forts gradients de température dans l'atmosphère conduisant à des réfractions, absence de brume de chaleur, de contre-jour, de pluie battante, etc.), étant entendu que, du fait de la nature évolutive des mesures, les erreurs systématiques peuvent être éliminées, au moins en grande partie, par la répétition des observations toujours dans les mêmes conditions. Il sera indispensable :

1. *d'opérer toujours en observant la même séquence des opérations et les mêmes règles de visée et de lecture angulaire;*
2. *de répéter au moins trois fois les mesures angulaires, en contrôlant la longueur de la base et les rotations du pilier de référence pendant toute la durée des opérations;*
3. *de conduire les calculs avec la même méthode.*

En ce qui concerne la détermination des déplacements, les appareils modernes et les méthodes mises à disposition par les ordinateurs permettent aujourd'hui de surmonter très facilement l'obstacle de la lenteur qui constituait autrefois la principale

As regard the project of the " network ", it requires that :

- 1. there must not be great differences in the lengths of the sides of the " network ";*
- 2. the angles of the triangles, quadrilaterals and of the intersections at the points on the dam must not (if possible) be less than 30°;*
- 3. the measurements should be numerous even if it entails longer duration to take these;*
- 4. it must be possible to set up an inverted pendulum reaching the deepest and most stable layers and corresponding to the vertex of the triangle. The vertex will be chosen as the starting point for the datum-axes;*
- 5. it should be possible to coincide from the same vertex a datum-point stable and far away so that it allows the absolute orientation of the " network ";*
- 6. the direct measurement of the length or of its variations of one side of the network (base) must be taken by a tape " invar " or by an appropriate fixed basimeter. This is extremely important since the " base " must be measured at each series of measurements in order to eliminate the very serious systematic errors of similitude.*

As regard the establishing of the " network ", it is necessary that :

- 1. the pillar that materializes the vertex must be very steady;*
- 2. the site on which the pillar lies allows the operator freedom of movement and the utmost safety;*
- 3. the pillar must have an insulating coating against the sun;*
- 4. the foundation plinth of the pillar must have a special gauge to check eventual inclinations;*
- 5. the supporting, centering and fastening accessories of the theodolite and of the signals be worked with good mechanical precision;*
- 6. the form of the signals, their colour contrast and their lighting be particularly taken care of, because they represent fundamental elements for the good success of the operations.*

As far as surveying is concerned, granted that it will be necessary to work under practically perfect environment conditions (absence of variations in air refraction, absence of haze, of counterlight, of heavy rain, etc.) and granted that, given the changing nature of the measurements, systematic errors can be largely eliminated by repeating surveys always in the same conditions, it will be indispensable to do as follows :

- 1. carry out measurements following always the same course of operations and the same rules in pointing and in angular reading with the instrument;*
- 2. repeat angular measurements at least three times, keeping under control the length of the base and the rotation of the reference pillar throughout the duration of the operations;*
- 3. always follow the same process in making calculations.*

As far as the determination of displacements is concerned, modern instruments and the methods made available by computers today easily overcome the slowness that once represented the biggest difficulty in obtaining the final result quickly. The mathematical

difficulté pour atteindre rapidement le résultat final. Le traitement mathématique peut aujourd'hui être exécuté très rapidement en permettant de réduire beaucoup la durée des calculs.

D'autres méthodes de mesures, qui se rattachent toujours au domaine de la géodésie, seront décrites dans les rapports d'une dizaine de Comités nationaux de la CIGB qui s'appuieront sur des applications déjà expérimentées et sur des résultats obtenus. Ces contributions seront regroupées dans un Bulletin qui constituera le document final sur les travaux du Comité de l'auscultation des barrages et de leurs fondations, depuis 1983, et qui comportera des commentaires sur ces diverses contributions.

Ces rapports comprendront aussi des applications et des résultats, non seulement ceux obtenus à partir des méthodes géodésiques traditionnelles, mais également ceux tenant compte des progrès de la géodésie moderne opérationnelle. Y seront ainsi mentionnés : les réseaux de trilatération, les mesures directes de distances par des appareils électro-optiques, les relevés de niveaux hydrostatiques par des appareils électroniques, les applications modernes de la photogrammétrie, ainsi que l'emploi des satellites dans l'étude de détail des mouvements absolus de la croûte terrestre.

process can nowadays be effected very quickly, thus allowing to speed up the computation time to obtain final results.

Other measurement methods, also originating from operative geodesy, will be described in the contributions from the ICOLD National Committees of about ten countries, who will report about the applications already tried and the results obtained. Those contributions will be collected in a Bulletin that will be the final Bulletin on the works of the Committee on Monitoring of Dams and their Foundations carried out since 1983, and will include a comment on the contributions developed by the countries' members together.

Those contributions will also include applications and results, not only those obtained through traditional geodetic methods, but they will also take into account the developments of modern operative geodesy, including tri-lateration nets, optic-electronic direct distance measurements, hydrostatic-electronic levels, modern applications of photogrammetry and the use of satellites in studying details of the absolute movements of the earth's crust.

Imprimerie de Montligeon
61400 La Chapelle Montligeon
Dépôt légal : février 1988
N° 13677
ISSN 0534-8293
Couverture : TILT

Copyright © ICOLD - CIGB

Archives informatisées en ligne



Computerized Archives on line

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



**International Commission on Large Dams
Commission Internationale des Grands Barrages
151 Bd Haussmann -PARIS -75008**
<http://www.icold-cigb.net> ; <http://www.icold-cigb.org>