

COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS

22 et 30, Avenue de Wagram - 75008 PARIS

---

COMMITTEE ON MATERIALS

COMITÉ DES MATÉRIAUX

FOR LARGE DAMS

DES GRANDS BARRAGES

---

**METHODS OF DETERMINING  
EFFECTS OF SHRINKAGE, CREEP  
AND TEMPERATURE ON  
CONCRETE FOR LARGE DAMS**

**MÉTHODES POUR DÉTERMINER  
LES EFFETS DU RETRAIT, DU FLUAGE  
ET DE LA TEMPÉRATURE SUR LES  
BÉTONS DES GRANDS BARRAGES**

---

**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.

**METHODS OF DETERMINING  
EFFECTS OF SHRINKAGE, CREEP  
AND TEMPERATURE  
ON CONCRETE  
FOR LARGE DAMS**

Report prepared by E.M. Gosschalk (Sir William Halcrow Partners) and K.M. Brook (Wimpey Laboratories Ltd) on behalf of the British National Committee for the sub-committee on Concrete of the Committee on Materials for Large Dams.

**MÉTHODES POUR DÉTERMINER  
LES EFFETS DU RETRAIT, DU FLUAGE  
ET DE LA TEMPÉRATURE  
SUR LES BÉTONS  
DES GRANDS BARRAGES**

Rapport préparé par E.M. Gosschalk (Sir William Halcrow Partners) et K.M. Brook (Wimpey Laboratories Ltd) au nom du Comité National Britannique pour le sous-comité du Béton du Comité des Matériaux des Grands Barrages.

## CONTENTS

	Pages
<b>1. Introduction</b> .....	3
<b>2. Definitions</b> .....	4
<b>3. Purpose</b> .....	6
<b>4. General</b> .....	6
4.1. Effects.....	6
4.2. In-situ observations and their interpretation.....	8
4.3. Design methods .....	12
<b>5. Shrinkage</b> .....	12
5.1. General.....	12
5.2. Observations and interpretation ..	13
5.3. Laboratory methods.....	15
5.4. Theoretical and empirical methods	16
<b>6. Creep</b> .....	18
6.1. General.....	18
6.2. Observations and interpretation.	19
6.3. Laboratory methods.....	19
6.4. Theoretical and empirical methods	22
<b>7. Temperature</b> .....	25
7.1. General.....	25
7.2. Observations and interpretation .	27
7.3. Laboratory methods.....	30
7.4. Theoretical and empirical methods	33
<b>8. Conclusions</b> .....	35
<b>References</b> .....	37

## INDEX

	Pages
<b>1. Introduction</b> .....	3
<b>2. Définitions</b> .....	4
<b>3. Objectif</b> .....	6
<b>4. Généralités</b> .....	6
4.1. Effets.....	6
4.2. Observations in-situ et leur interprétation.....	8
4.3. Méthodes d'étude.....	12
<b>5. Retrait</b> .....	12
5.1. Généralités.....	12
5.2. Observations et Interprétation ..	13
5.3. Méthodes de laboratoire.....	15
5.4. Méthodes théoriques et empiriques	16
<b>6. Fluage</b> .....	18
6.1. Généralités.....	18
6.2. Observations et interprétation...	19
6.3. Méthodes de laboratoire.....	19
6.4. Méthodes théoriques et empiriques	22
<b>7. Température</b> .....	25
7.1. Généralités.....	25
7.2. Observations et interprétation...	27
7.3. Méthodes de laboratoire.....	30
7.4. Méthodes théoriques et empiriques	33
<b>8. Conclusions</b> .....	35
<b>Références</b> .....	37

## 1. INTRODUCTION

This report presents a review of methods in use of determining the effects of shrinkage, creep and temperature on concrete for large dams. The review has been made principally by a search of the literature and reference to certain specialists. Due to limitations on the available time and cost of translation, only papers in the English language could be considered. Thousands of titles, summaries and abstracts of papers have been examined for relevant information and many papers have been reviewed in more detail. An important result of this work is the list of selected references herein included. The authors admit that the inevitable restriction of their work to papers in the English language is regrettable, since it leaves unconsidered many undoubtedly important papers published in other languages. However, they feel that a general impression of the state of the art can be given.

The subject of this report is " methods ". Nevertheless, methods of determining effects cannot be considered in isolation from both the effects themselves and their reasons. The primary effects in the present case are, in general, deformations. These may result in second-order effects, such as stresses and third-order effects, such as cracking. The reasons for the effects of shrinkage, creep and temperature are inherent in the nature of concrete itself and arise from its internal composition and external loading, including subjection to atmospheric or environmental effects.

The authors feel that it is desirable at the outset to draw attention to the ICOLD Bulletin 23 published in July, 1972 (63), which discusses instrumentation for concrete dams

## 1. INTRODUCTION

Ce rapport passe en revue les méthodes en usage pour déterminer les effets du retrait, du fluage et de la température sur les bétons des grands barrages. Cet inventaire a été fait, principalement, en recherchant la documentation et les références de certains spécialistes. En raison du peu de temps disponible et du coût de la traduction, seuls les documents rédigés en anglais ont été pris en considération. Des milliers de titres, de résumés et d'extraits de documents ont été compulsés à titre d'information et de nombreuses publications ont été examinées plus en détail. L'un des résultats importants de ce travail est la liste des références choisies contenue dans ce rapport. Les auteurs sont conscients du fait qu'il est regrettable que leur travail se soit inévitablement borné à l'étude des documents rédigés en anglais, ce qui laisse dans l'ombre beaucoup de documents certainement importants, publiés dans d'autres langues. Cependant, ils estiment qu'il est possible de donner une impression générale de l'état de la question.

Les objets de ce rapport sont « les Méthodes ». Néanmoins, les méthodes sur la détermination des effets ne peuvent pas être dissociées à la fois des effets eux-mêmes et de leurs raisons. Les premiers effets dans le cas présent sont, en général, des déformations. Il peut en résulter des effets secondaires tels que des contraintes ou des effets de troisième ordre tels que la fissuration. Les raisons des effets du retrait, du fluage et de la température sont inhérents à la nature du béton lui-même et dépendent de sa composition interne et des charges externes, y compris les effets des conditions atmosphériques et de l'environnement.

Les auteurs pensent qu'il est souhaitable, en préambule, d'attirer l'attention sur le bulletin 23 de la G.I.C.B. publié en juillet 1972 (63), qui traite des appareils à utiliser

and the application of geodetic methods to the determination of the movements of dams.

The information given concisely in the Bulletin will not be repeated here. Moreover, the Bulletin states that the following subjects will be dealt with in separate reports :

- Non-destructive checking on the internal state of materials.
- Analysis and interpretation of observation data.

It is obviously desirable to avoid unnecessary duplication but the authors are hopeful that the material which they present will complement rather than duplicate these other reports.

The report of the Sub Committee on Concrete of the ICOLD Committee on Materials on various factors affecting extensibility of concrete has also a related subject. The work of the American Concrete Institute (A.C.I.) in the field of creep, shrinkage and temperature effects (2, 5, 44), although not oriented particularly towards dams, also deserves special mention.

A measure of the vast amount of information published on shrinkage and creep in concrete is gained from two bibliographies produced on this subject by the A.C.I., the first one in 1967 and the second in 1972. These documents listed 487 and 272 papers respectively.

The authors would like to acknowledge the contribution made by all those interested persons who were good enough to consider the first draft of this report and who gave the authors the benefit of their comments.

## 2. DEFINITIONS

It must be appreciated that shrinkage and creep are inter-dependent variables, influenced by many common factors. They can seldom be completely isolated and cannot be superimposed. Temperature affects both shrinkage and creep. In addition, the determination of the effects of all three factors is complicated because the properties of concrete are not

pour les barrages en béton et de l'application des méthodes géodésiques à la détermination des mouvements des barrages.

Les renseignements donnés de manière concise dans ce Bulletin ne seront pas répétés ici. Cependant, ce bulletin précise que les sujets suivants seront traités dans des rapports séparés :

- Essais non destructifs sur l'état interne des matériaux,
- Analyse et interprétation des résultats d'observation.

Il est évidemment souhaitable d'éviter des répétitions qui ne sont pas indispensables, mais les auteurs espèrent que les éléments qu'ils présentent compléteront, plutôt qu'ils ne feront double emploi avec ces autres rapports.

Le rapport du sous-comité des Bétons du Comité des Matériaux de la C.I.G.B. sur les différents facteurs affectant l'extensibilité des bétons a également des sujets connexes. Le travail de « l'American Concrete Institute » (ACI), dans le domaine des effets du fluage, du retrait et de la température (2, 5, 44) bien que non orienté spécialement sur la construction des barrages, mérite, également, une mention spéciale.

Une idée de l'énorme quantité d'informations qui ont été publiées sur le retrait et le fluage du béton est donnée par les bibliographies qui ont été publiées sur ces sujets par l'A.C.I., la première en 1967 et la seconde en 1972. Ces documents contiennent, respectivement, 487 et 272 articles.

Les auteurs tiennent à signaler la contribution apportée par toutes les personnes intéressées qui ont été assez aimables pour examiner le premier texte de ce rapport et les ont fait bénéficier de leurs commentaires.

## 2. DÉFINITIONS

On doit considérer que le retrait et le fluage sont des variables interdépendantes qui sont influencées par de nombreux facteurs communs. Ils peuvent rarement, être complètement isolés et ne peuvent pas être, simplement, superposés. La température affecte à la fois le retrait et le fluage. En outre, la détermination des effets de ces trois facteurs

static. The properties of concrete are in a continuous time-dependent state of evolution, influenced by environmental effects, including temperature. The properties depend not only on the composition of the concrete member and its history of previous loading and environment but also on the size and shape of the member (57). It must be admitted that the behaviour of concrete is very complex and even now is not properly understood (7, 53).

For the purposes of this report the following definitions have been adopted.

- Shrinkage : a time dependent volume decrease caused by drying and chemical changes.

The above definition embraces autogenous volume changes and may include volume changes due to self-induced stresses. In practice shrinkage is normally measured as the linear deformation per unit length. Volume increase due to wetting and chemical changes would be measured as negative shrinkage. Values of shrinkage for a particular concrete are only discrete if the environmental conditions and age are fully described.

- Creep : time dependent deformation due to load.

It should be noted that creep excludes the instantaneous deformation due to the application of load.

It is not possible in practice, however, to isolate creep perfectly from the instantaneous deformation which takes place on loading because the application of load invariably takes a finite time and creep begins to take place concurrently. For the purposes of this definition, load is understood to include the effects of external restraint. In practice creep is normally measured as the linear deformation per unit length.

- Temperature : the temperature of the concrete at any time and the tempera-

est compliquée car les propriétés du béton ne sont pas statiques. Les propriétés du béton sont continuellement sous l'influence de l'état d'évolution, de l'environnement, y compris la température. Les propriétés ne dépendent pas seulement de la composition du béton et de la chronologie de sa première mise en contrainte et de son environnement, mais aussi de la taille et de la forme de ses composants (57). On doit admettre que le comportement du béton est très complexe et que, même actuellement, on ne le comprend pas de façon parfaite (7) (53).

Pour les besoins du présent rapport les définitions suivantes ont été adoptées :

- Retrait : diminution de volume dépendant du temps provoquée par le séchage et les modifications chimiques.

La définition ci-dessus comprend les variations de volume autogènes et peut inclure les variations de volume dues aux contraintes induites. En pratique, le retrait est normalement mesuré par la déformation linéaire par unité de longueur. L'augmentation de volume due à l'humidification et aux variations chimiques sera mesurée comme un retrait négatif. Les valeurs du retrait, pour un béton déterminé, ne peuvent avoir de signification que si les conditions de l'environnement et l'âge sont complètement définies.

- Fluage : déformation dépendant du temps, résultant de la charge.

On peut remarquer que le fluage exclut la déformation instantanée due à l'application de la charge.

Cependant, il n'est pas possible en pratique d'isoler parfaitement le fluage de la déformation instantanée qui se produit au moment de la charge car celle-ci, inévitablement, prend un temps fini et le fluage commence à se produire concurremment. Pour les besoins de cette définition, la charge est considérée comme comprenant les effets des contraintes externes. En pratique, le fluage est normalement mesuré comme la déformation linéaire par unité de longueur.

- Température : température du béton à n'importe quel moment et température

ture of the environment of the dam, including atmosphere, reservoir and foundation, insofar as this affects the concrete temperature.

- Methods of determining the effects of shrinkage, creep and temperature : these are taken to include : *insitu* observations and their interpretation, laboratory methods including the use of models, theoretical and empirical methods of prediction.

### 3. PURPOSE

The purpose of determining the effects of shrinkage, creep and temperature has to be considered. The purpose is two-fold. In the first place it is necessary to be able to predict the effects for the purposes of design prior to construction, so that an economical and safe design can be prepared. In the second place it is necessary to observe the effects in the structure, both during construction and after completion, to ensure that the behaviour is in accordance with the design and that no undesirable or unsafe conditions develop. These two purposes are, in fact, complementary. It is indeed useless to observe effects in the completed structure unless these can be properly interpreted and understood and unless they enable any unfavourable tendency to be foreseen. For these purposes it is usually necessary to determine the characteristics with respect to shrinkage, creep and temperature of the concrete actually used.

### 4. GENERAL

#### 4.1. Effects.

Shrinkage, creep and temperature in the concrete of a dam induce deformations in the dam which are transmitted to its foun-

de l'environnement du barrage comprenant l'atmosphère, le réservoir et ses fondations pour autant que celle-ci affecte la température du béton.

- Méthodes pour déterminer les effets du retrait, du fluage et de la température : celles-ci sont considérées comme comprenant : les observations *in situ* et leur interprétation, les méthodes de laboratoire y compris l'utilisation des modèles, les modèles théoriques et empiriques de prévision.

### 3. OBJECTIF

L'objectif de la détermination des effets du retrait, du fluage et de la température doit être examiné. Cet objectif a deux aspects :

- En premier lieu, il est nécessaire d'être capable de prévoir les effets pour les besoins du projet avant la construction afin d'étudier un projet qui soit économique et sûr.
- En deuxième lieu, il est nécessaire d'observer les effets dans la structure, à la fois pendant la construction et après son exécution pour s'assurer que son comportement est conforme au projet et que des conditions qui sont indésirables ou qui ne sont pas compatibles avec la sécurité ne se produisent pas. Ces deux objectifs sont, en fait, complémentaires. Il est en effet inutile d'observer des effets sur une structure terminée si l'on est incapable de les interpréter convenablement et de les comprendre et s'ils ne permettent pas de prévoir à l'avance une évolution gênante. Pour ces objectifs, il est habituellement nécessaire de déterminer les caractéristiques en tenant compte du retrait, du fluage et de la température du béton pratiquement utilisé.

### 4. GÉNÉRALITÉS

#### 4.1. Effets.

Le retrait, le fluage et la température du béton d'un barrage produisent des déformations dans ce barrage qui sont transmises à

dations to a greater or lesser extent according to the relative rigidity of the foundations and the type of dam. Conversely, variation in atmospheric temperature causes deformations of the valley which can, in turn, affect the dam. Thus the effects must be considered in relation both to the dam and its foundations. The latter should be considered to the limits of area and depth at which deformations become negligible. The deformations referred to result in modifications to the stress distribution in the dam and its foundations caused by the applied loads. The stresses in a dam cannot be determined adequately without evaluation of these effects.

The effects of shrinkage, creep and temperature on concrete for large dams may be determined by instruments placed in the concrete in the dam and in specimens of similar concrete in the laboratory. Measurements from the site and the laboratory are both required if the scope of the desired information is to be comprehensive. In laboratory tests there is a distinction to be made between the simplified or "standard" type of test, used primarily for comparing the properties of different concretes, and the more elaborate tests, with a greater range of variables, used for research purposes or to elucidate a particular problem.

A report on the effects of heat generation and volume change on the design and behaviour of massive reinforced concrete elements and structures has been presented by A.C.I. Committee 207 (6). This report presents data for estimating temperature and volume changes and for determining the amounts of reinforcing steel needed to control the size and spacing of cracks to specified limits under varying conditions of restraint and volume change.

It is considered that a discussion of any possible chemical changes and physical changes in the crystalline structure of concrete as a material due to shrinkage, creep

ses fondations dans une plus ou moins grande mesure suivant la rigidité relative des fondations et le type du barrage. Réciproquement, des variations de la température ambiante produisent des déformations de la vallée qui peuvent, en retour, affecter le barrage. Ainsi, ces effets doivent être considérés en relation à la fois avec le barrage et avec ses fondations. Ces dernières doivent être considérées jusqu'à la limite de la superficie et de la profondeur auxquelles les déformations deviennent négligeables. Les déformations dont il s'agit produisent des modifications dans la distribution des contraintes dans le barrage et ses fondations, contraintes résultant des charges appliquées. Les contraintes dans un barrage, ne peuvent être déterminées, valablement, sans l'estimation de ces effets.

Les effets du fluage, du retrait et de la température du béton des grands barrages peuvent être déterminés par des instruments mis en place dans le béton du barrage et dans des échantillons d'un béton analogue, en laboratoire. Les mesures sur le site et au laboratoire sont toutes deux nécessaires si l'on veut pouvoir les interpréter. Dans les essais de laboratoire il y a lieu de faire une distinction entre les essais simplifiés ou « standards » utilisés, primitivement, pour comparer les propriétés de différents bétons, et les essais plus élaborés, avec un plus grand nombre de variables, utilisés pour des recherches ou pour régler un problème particulier.

Un rapport sur les effets de la production de chaleur et des variations de volume sur l'étude et le comportement des éléments de béton armé massifs et des structures a été présenté par le Comité de l'A.C.I. 207 (6). Ce rapport fournit des données pour estimer les variations de température et de volume et pour déterminer la quantité d'acier nécessaire pour contrôler la dimension et l'espacement des fissures dans des limites, dans des conditions variables de contrainte et de variation de volume.

On admettra qu'une discussion concernant toutes les modifications possibles d'états chimiques ou physiques de la structure cristalline du béton en tant que matériau,

and temperature is beyond the scope of this report.

Similarly, a discussion of tests related to freezing and thawing phenomena has been omitted because this subject, together with related problems of durability of concrete, constitutes a special field of its own which would require separate treatment for adequate coverage.

Some of the references listed at the end of this report, however, relate to this subject (11, 16, 18, 29, 46, 48, 70, 82).

#### 4.2. Insitu observations and their interpretation.

4.2.1. *Methods.* The insitu observations made to observe the effects of shrinkage, creep and temperature are, in the main, the same. As previously stated, they consist primarily of measuring deformations of the dam, its foundations and the valley.

However, measurements of temperature and stress levels are also desirable to provide complete information on the behaviour of the concrete. It is only in the interpretation of the measurements that the effects of shrinkage, creep and temperature can sometimes be separated. Guidelines for instrumentation, including geodetic methods, are given in ICOLD bulletin No. 23 which includes examples, manufacturers' names and a bibliography (63).

The measurements of strain in concrete dams are partly required to determine the growth and magnitude of the strains themselves, but more particularly for the purpose of determining the stresses so that predicted behaviour can be compared with actual behaviour. Whilst stress gauges do exist, they do not measure tensile stresses and they are usually expensive, unreliable, or inconvenient to use. Moreover they cannot measure all the components of a state of stress at a given point. However the introduction of the optical stress plug has overcome some of these limitations but has some disadvantages such as the inconvenient direct reading tech-

résultant du retrait, du fluage et de la température, sortirait du cadre du présent rapport.

De même, nous n'avons pas parlé des phénomènes de gel et dégel car ce sujet et les problèmes de pérennité du béton qui s'y rattachent constituent un domaine particulier qui nécessiterait d'être traité séparément.

Quelques-unes des références figurant à la fin de ce rapport concernent cependant ce sujet (11, 16, 18, 29, 46, 48, 70, 82).

#### 4.2. Observations « In situ » et leur interprétation.

4.2.1. *Les méthodes.* Les observations *in situ* effectuées pour observer les effets du retrait, du fluage et de la température sont, en gros, les mêmes. Comme il a été indiqué précédemment, elles consistent, essentiellement, à mesurer les déformations du barrage, de ses fondations et de la vallée.

Cependant, les mesures de température et de niveau de contrainte sont également souhaitables pour avoir des informations complètes sur le comportement du béton. C'est seulement dans l'interprétation des mesures que les effets du retrait, du fluage et de la température peuvent, parfois, être séparés. Les directives pour l'appareillage, y compris les méthodes géodésiques, sont fournies dans le bulletin n° 23 de la C.I.G.B. qui donne des exemples, des noms de constructeurs ainsi qu'une bibliographie (63).

Les mesures de déformation du béton des barrages sont en partie nécessaires pour déterminer la croissance et la valeur des déformations elles-mêmes, mais plus particulièrement dans le but de déterminer les efforts afin de comparer le comportement prévu au comportement réel. Bien que des jauges de contrainte existent, elles ne mesurent pas les efforts de traction et elles sont habituellement coûteuses, peu fiables et difficiles à utiliser. De plus, elles ne peuvent mesurer tous les composants d'un état de contrainte en un point donné. Cependant, l'introduction d'une fiche de contrainte optique a éliminé certaines de ces limitations tout en ayant quelques incon-

nique which is required. Strain gauges on the other hand are generally reliable and convenient to use and are capable of giving accurate values of strains in the concrete.

4.2.2. *Historical Records.* Interest in measuring strains and temperature dates back at least as far as the 1920's. There are many examples in the literature where observations are described in more or less detail, but often in the past little information was given about the instruments used or how the observations were interpreted. The method of deducing stresses from deformations was frequently not given in relatively recent papers, and often apparently no allowance was made for unrestrained deformations, not producing stress. However some of the early papers describe the instruments used in some detail, and it is interesting to find that acoustic strain gauges and thermometers, including an isolated gauge, were used in the Dnieprostroi Dam as described in 1933 (98). Comprehensive investigations were also carried out at the Stevenson Creek Test Dam in California as long ago as 1928 (61).

4.2.3. *Limitations in measuring strain.* The core of massive concrete members is much more insulated than the surface from the effects of environmental changes such as fluctuations in air temperature, solar radiation, rainfall, surface evaporation, and humidity. Thus when small strains are being measured over an appreciable time interval, the strains in the heart of the mass can be evaluated with more certainty than those at the surface.

There is considerable difficulty in obtaining accurate measurements of the movements in concrete during its early life. One of these difficulties arises from limitations in the strain gauges themselves. Ideally the gauges should have an elastic and creep modulus, Poisson's ratio, thermal movement and moisture movement identical with that of the concrete but

vénients tels que la nécessité de lectures directes. Au contraire, les jauges de déformation sont généralement fiables, faciles à utiliser et capables de donner des valeurs exactes des déformations dans le béton.

4.2.2. *Historique.* L'intérêt de la mesure des déformations et de la température remonte au moins à l'année 1920. Il y a de nombreux exemples dans la littérature de descriptions, d'observations plus ou moins détaillées mais souvent, dans le passé, peu d'informations étaient données concernant les instruments utilisés et comment les observations étaient interprétées. La méthode permettant de déduire les contraintes des déformations n'était, le plus souvent, pas indiquée même dans des documents relativement récents. On n'attachait apparemment pas d'importance à des déformations de faible importance qui ne produisaient pas de contraintes. Cependant, quelques-uns des premiers documents décrivent les instruments utilisés assez en détail et il est intéressant de constater que des jauges de déformations acoustiques et des thermomètres, y compris des jauges isolées, étaient utilisées sur le barrage Dnieprostroi tel qu'il a été décrit en 1933 (98). Des investigations intéressantes ont été également effectuées sur le barrage expérimental de Stevenson Creek en Californie dès l'année 1928 (61).

4.2.3. *Limites des mesures de déformations.* Le centre des structures massives en béton est beaucoup mieux isolé que la surface des effets des modifications de l'environnement tels que les fluctuations de la température de l'air, les radiations solaires, la pluie, l'évaporation superficielle et l'humidité. Ainsi, quand de faibles déformations sont mesurées pendant une période de temps importante, les déformations dans le cœur de la masse de béton, peuvent être évaluées avec plus de certitude que celles de la surface.

Il y a des difficultés considérables pour obtenir des mesures exactes des mouvements du béton pendant le début de sa vie. L'une de ces difficultés réside dans les limitations des jauges de déformation elles-mêmes. De façon idéale, les jauges devraient posséder un module élastique et de fluage, un coefficient de Poisson, des déformations dues à la tem-

this ideal is unattainable because the concrete itself changes its properties with time. An important characteristic of strain gauges for measuring movements at early ages is the response factor which can be considered as the force per unit area applied to the gauge end platens to produce unit strain in the gauge.

Browne and McCurrich (24) have compared the shrinkage strains given by two types of vibrating wire strain gauge, one having seven times the response factor of the other, and found that in the first 1-2 days, large differences occurred in the detection of strain with time. Not until 2 1/2 days after casting were the rates of strain change, indicated by the two gauges, equal. Encapsulation of the stiffer gauge for protection at casting resulted in an even bigger difference in the delay in strain response.

4.2.4. *Interpretation of observations.* The calculation of stresses from measured strains under long-term loading is however complicated by the shrinkage and creep of the concrete, both of which occur as continuing deformations over long periods of time. In order to obtain reasonably accurate values of strain resulting from load only it is therefore necessary to determine what proportion of the total strain is due to shrinkage and creep of the concrete.

The importance must therefore not be underestimated of providing carefully designed strain gauges isolated from stress at every point in a dam where stress is to be measured by means of strain gauges. These gauges enable the proportion of strain which is not subject to restraint and hence not representative of stress to be evaluated. The gauges measure primarily shrinkage effects which would occur in the absence of restraint. It

pérature et à l'humidité, identiques à ceux du béton. Mais ces conditions idéales ne peuvent être atteintes car les propriétés du béton lui-même varient avec le temps. L'une des caractéristiques importantes des jauges de déformations pour la mesure des déformations au jeune âge est le facteur de réponse qui peut être considéré comme étant la force par unité de surface appliqué aux plaques d'extrémité de la jauge pour produire la déformation unitaire dans cette jauge.

Browne et McCurrich (24) ont comparé les efforts de retrait donnés par deux types de jauges de déformations à corde vibrante l'une ayant un facteur de réponse sept fois supérieur à l'autre et ont trouvé que, pendant les premiers un ou deux jours, des différences importantes se produisaient dans la détection des déformations avec le temps. Ce n'est pas avant deux jours et demi après le bétonnage que les modifications de déformations indiquées par les deux jauges étaient égales. La capsule prévue pour la protection de la jauge au moment du bétonnage produit elle-même une différence encore plus grande dans le délai de réponse aux efforts.

4.2.4. *Interprétation des observations.* Le calcul des déformations résultant des efforts mesurés sous une charge de longue durée est compliqué par le retrait et le fluage du béton, qui se produisent l'un et l'autre avec des déformations continues, pendant de longues périodes de temps. Afin d'obtenir des valeurs des déformations résultant de la charge seule, raisonnablement exactes il est donc nécessaire de déterminer quelle est la proportion de la déformation totale qui est imputable au retrait et au fluage du béton.

Il ne faut pas sous-estimer l'importance qu'il y a à ce que les jauges de déformations aient été soigneusement étudiées pour être isolées des contraintes en tous points d'un barrage où ces contraintes doivent être mesurées au moyen de jauges de déformations. Ces jauges permettent d'évaluer la proportion de la déformation qui est indépendante du retrait et par conséquent non représentative de l'effort. Les jauges mesurent, tout d'abord

should be noted that where the coefficient of expansion in a steel vibrating wire gauge (i.e. usually  $11-12 \times 10^{-6}$  per °C) is very similar to the coefficient of expansion of the concrete, movements due to temperature will not, in effect, be recorded. In this case, any changes in strain recorded by isolated vibrating wire gauges are therefore due to non-thermal effects only. In cases where the coefficient of expansion of the concrete differs by a significant amount from that of the gauge, allowance should be made for temperature changes. Thus the temperature changes and the temperature correction factor of the gauge will then be required.

The coefficient of thermal expansion of the concrete can be determined from the response of the isolated gauge to temperature, if the temperature coefficient of the gauge is known. It is most important that the isolating space around the gauge should be drained in order to avoid the possible build up through seepage of water load. At the same time, drying out of the surface of the concrete surrounding the gauge must be prevented. It is frequently encased in a copper sheath but an improved technique using bentonite has been suggested (53).

The recording and analysis of the various measurements from concrete dams involves a very laborious and repetitive process particularly in those cases where a large number of instruments has been installed. Data loggers and electronic computers are now being increasingly used to process the results. It is noteworthy that in the case of some of the big dams in the U.S.A. the number of strain gauges alone has, on occasion, exceeded 400. One particular impressive case of instrumentation occurs in Russia where, on the Bratsk Dam, it is reported that 1,209 strain gauges were installed in the concrete (39).

Observations can be interpreted by comparison with calculated values or by correlating observed values of displacement, strain and stress with the temperatures, time-depen-

les effets de retrait qui se produisent en l'absence de contrainte. On doit noter que lorsque le coefficient de dilatation d'une jauge à corde vibrante, en acier (c'est-à-dire, habituellement,  $11 - 12 \times 10^{-6}$  par °C) est très semblable au coefficient de dilatation du béton, les mouvements dus à la température ne seront pas, en fait, enregistrés. Dans ce cas, tous changements dans les déformations enregistrés par des jauges à corde vibrante isolées sont, par conséquent, dus seulement à des effets non thermiques. Dans les cas où le coefficient de dilatation du béton diffère d'une quantité relativement importante de celui de la jauge, il y a lieu de faire attention aux changements de température. Alors, les variations de température et le facteur de correction de température de la jauge doivent être connus.

Le coefficient de dilatation thermique du béton peut être déterminé par la réponse de la jauge isolée à la température si le coefficient de température de la jauge est connu. Il est très important que l'espace isolant autour de la jauge soit drainé pour éviter la production possible d'une charge d'eau par des fuites. En même temps, il y a lieu d'éviter le séchage de la surface du béton autour de la jauge. Elles sont fréquemment emballées dans une feuille de cuivre mais une technique perfectionnée utilisant la bentonite a été suggérée (53).

L'enregistrement et l'analyse des différentes mesures des barrages en béton implique un procédé très soigné et répétitif particulièrement dans les cas où un grand nombre d'appareils de mesure ont été installés. Des appareils analyseurs et des ordinateurs sont maintenant utilisés de plus en plus pour dépouiller les résultats. Il est utile de noter que dans le cas de quelques-uns des grands barrages des États-Unis le nombre de jauges de déformations seul a parfois dépassé 400. Un cas particulier, impressionnant, concernant le nombre des appareils de mesures concerne le barrage de Bratsk en Russie où l'on signale que l'on a installé, dans le béton, 1 209 jauges de déformations.

Les observations peuvent être interprétées par comparaison avec les valeurs calculées ou par corrélation des valeurs de déplacement observées, des tensions et déformations avec

dent deformations and water loads which are their cause. The equations so developed should be capable of use to predict the displacements, strains and stresses which would occur due to loadings higher than those previously experienced.

However, some indications have been found that such computed equations fit the observations well only over the range for which observations have been used in formulating the correlations and it appears that the usefulness of this method requires further testing (120).

#### 4.3. Design Methods.

It is considered that a discussion of design methods for concrete dams is beyond the scope of this report. Any design method capable of analysing deformations can, however, be used in determining the effects of shrinkage and temperature. The finite element method, which is capable of analysing deformations of the foundations as well as of the dam, is one example of such a method.

### 5. SHRINKAGE

#### 5.1. General

It may be said at once that shrinkage of concrete in large dams is of only secondary importance. Laboratory experiments noted have dealt only with relatively thin sections (57) but extrapolation of the results suggests that average shrinkage reduces rapidly with the thickness of member and becomes negligible for slabs approaching 1.0 m or more in thickness. Furthermore, shrinkage reduces with the rate of drying and also becomes negligible in conditions approaching 100 % humidity or when drying is prevented.

It should be noted that both shrinkage and creep depend on moisture migration within the concrete. Once shrinkage occurs, non-linear deformations are caused and, due to internal restraints, stresses and consequent creep occur. General discussions on creep

les températures, les déformations en fonction du temps et des charges d'eau qui les provoquent. Les équations ainsi mises en évidence doivent pouvoir être utilisées pour la prévision des déplacements des déformations et des contraintes qui pourraient se produire pour des charges plus importantes que celles précédemment expérimentées.

Cependant, on a mis en évidence que de telles équations ne couvrent convenablement les phénomènes que dans la zone qui a été utilisée pour établir les corrélations. Il apparaît donc que la possibilité d'utiliser ces formules doit être subordonnée à de nouvelles expérimentations (120).

#### 4.3. Méthodes d'étude.

On admet que la discussion des méthodes d'étude des bétons de barrage sort du cadre du présent rapport. Toute méthode d'étude capable d'analyser les déformations peut, cependant, être utilisée pour déterminer les effets du retrait et de la température. La méthode des éléments finis qui permet d'analyser les déformations des fondations aussi bien que celles du barrage, est un exemple d'une telle méthode.

### 5. RETRAIT

#### 5.1. Généralités.

On peut dire, avant tout, que le retrait du béton des grands barrages est seulement d'importance secondaire. Les résultats de laboratoire connus ont seulement traités de sections relativement minces (57), mais l'extrapolation des résultats suggère que le retrait moyen diminue rapidement avec l'épaisseur des structures et devient négligeable pour des poutres approchant des épaisseurs de 1 m ou plus. De plus, le retrait diminue avec la vitesse de séchage et devient également négligeable lorsque l'humidité approche de 100 % ou lorsqu'on évite la dessiccation.

On doit noter que le retrait et le fluage dépendent l'un et l'autre du cheminement de l'humidité à l'intérieur du béton. Lorsque le retrait se produit, des déformations non linéaires existent en raison des contraintes internes, et les tensions et le fluage qui en sont

and shrinkage, including the effects of temperature, are available in the literature (79, 95, 96).

## 5.2. Observations and interpretation.

5.2.1. *General comments on shrinkage measurements.* It appears that observed displacement, strain and stress due to shrinkage can be isolated from other effects by the methods referred to in some detail under Section 7.2. In addition Section 4 refers.

Shrinkage measurements can be made on concrete test specimens in the laboratory, but the results obtained are of limited value in determining the amount of shrinkage which actually takes place in the concrete in the dam. This limited value of laboratory tests is due to the fact that shrinkage is very much dependent on the size of specimen being tested and on the temperature and humidity conditions.

5.2.2. *Shrinkage measurements in the structure.* The most usual way, therefore, of determining the shrinkage of concrete in a dam is by means of so-called "no stress" strain gauges. These are gauges which are embedded in the concrete with a space on all sides, except one, to prevent stresses being carried through to the strain gauge. These isolated strain gauges are therefore intended to record deformation of the concrete due to shrinkage. It may also be necessary to take into account the differential expansion of the concrete relative to the gauge due to temperature changes.

It is necessary to position a "no-stress" gauge close to each strain gauge or group (rosette) of strain gauges in order to obtain true correspondence between the readings obtained, since shrinkage is very much affected by constructional procedures and seasonal conditions following concrete placing.

Standard designs of acoustic strain (vibrating wire) gauges are normally used for, "no-stress" gauges. With suitable choice of dimen-

la conséquence se produisent. Des discussions générales sur le fluage et le retrait, y compris les effets de température, existent dans la littérature (79, 95, 96).

## 5.2. Observations et Interprétation.

5.2.1. *Généralités sur les mesures de retrait.* Il apparaît que les déplacements observés, les déformations et les contraintes dus au retrait peuvent être isolés des autres effets par les méthodes qui sont décrites, avec quelques détails, dans la section 7.2. De plus, la section 4 traite, également, de ces problèmes.

Les mesures de retrait peuvent être effectuées sur des éprouvettes de béton en laboratoire mais les résultats obtenus ont une valeur limitée pour la détermination du retrait qui se produit réellement dans le béton du barrage. Cette valeur relative des essais de laboratoire est due au fait que le retrait dépend énormément de la taille des éprouvettes qui sont essayées et des conditions de température et d'humidité.

5.2.2. *Mesures de retrait sur les ouvrages.* Le moyen le plus utilisé, par conséquent, pour déterminer le retrait du béton d'un barrage est l'utilisation des jauges de déformations appelées « sans contrainte ». Ce sont des jauges qui sont noyées dans le béton, avec un vide de tous les côtés, sauf un, pour éviter que les contraintes ne soient transmises directement à la jauge de déformation. Ces jauges isolées sont donc supposées enregistrer les déformations du béton dues au retrait. Il peut aussi être nécessaire de prendre en compte les extensions différentielles du béton et de la jauge dues aux variations de température.

Il est nécessaire de placer une jauge « sans contrainte » tout près de chaque jauge ou groupe de jauges (rosette) dans le but d'obtenir une correspondance réelle entre les lectures obtenues car le retrait est considérablement affecté par les procédés de construction et les conditions saisonnières après la mise en place du béton.

Les modules standards de jauges acoustiques (cordes vibrantes) sont normalement utilisés pour les jauges « sans contrainte ».

sions for the isolated blocks of concrete, they enable concrete shrinkage in dams to be measured with a fair degree of accuracy. Although experience has shown that this object is often difficult to attain, the measurement of shrinkage movements using this procedure apparently worked quite well at Clywedog Dam (30). It was found here that the gauges showed very small shrinkage or swelling over a long period and that the strains were consistent with a relative humidity of almost 100 % in the dam. Since, therefore, no significant shrinkage was shown to have taken place, it was not necessary to make shrinkage corrections to the measurements of stress-induced strains.

It seems probable that, due to the large mass of concrete, relative humidity within the interior of most concrete dams approaches 100 % and that therefore shrinkage or swelling movement will be small. It is well known that drying shrinkage of concrete will only occur when it is in contact with unsaturated air and evaporation of water from the concrete can take place. On the other hand, continuing hydration when a supply of water is present leads to expansion. Another situation to consider is that where no moisture movement to or from the concrete is permitted and, in this case, a volume change known as autogenous shrinkage occurs. This situation applies to the interior of a large mass of concrete. The magnitude of the movement is between about  $40 \times 10^{-6}$  at an age of one month and about  $100 \times 10^{-6}$  after five years (measured as a linear strain) (36).

Surprisingly high shrinkage was reported at the Cruachan Dam (152) where four photo-elastic stress meters, consisting of 51 mm diameter glass cylinders faced with polarising material, were installed in one of the buttresses. Before water loads were applied, the maximum recorded stress by one of these meters was about 6,000 kPa and most of this was attributed to shrinkage of the concrete. Although these gauges ceased to function soon afterwards because the polarising

Avec un choix convenable des dimensions des blocs isolés de béton elles permettent de mesurer le retrait du béton d'un barrage avec une assez bonne exactitude. Bien que l'expérience ait montré que ce but soit souvent difficile à atteindre, la mesure des mouvements de retrait utilisant ce procédé fonctionne, apparemment, très bien au barrage de Clymedog (30). On a trouvé, là, que les jauges montraient très peu de retrait ou de gonflements pendant une longue période et que les déformations correspondaient à une humidité relative de presque 100 % dans le barrage. Par conséquent, aucun retrait significatif ne se produisait et il n'a pas été nécessaire d'effectuer des corrections de retrait aux mesures de déformations résultant des contraintes.

Il semble probable qu'en raison de la grande masse de béton, l'humidité relative à l'intérieur de la plupart des barrages approche de 100 % et que, par conséquent, les mouvements de retrait ou de gonflements sont réduits. On sait bien que le retrait par séchage du béton se produit seulement lorsqu'il est en contact avec de l'air non saturé et que l'évaporation de l'eau contenue dans le béton peut se produire. D'un autre côté, l'hydratation résultant d'un apport d'eau continu produit de l'extension. Une autre situation à considérer est celle où aucun cheminement de l'humidité vers le béton ou à partir de celui-ci n'est permis et, dans ce cas, il se produit une modification de volume qui est un retrait interne. Cette situation se produit à l'intérieur d'une masse importante de béton. L'amplitude de la déformation est comprise entre  $40 \times 10^{-6}$  à l'âge de un mois et  $100 \times 10^{-6}$  après cinq ans (mesurés en déformations linéaires) (36).

De façon surprenante, des retraits importants ont été signalés au barrage Cruachan (152) où 4 appareils de mesure de contraintes photo élastiques, consistant en cylindres de verre de 51 mm de diamètre revêtus de matière polarisante, ont été installés dans un des contreforts. Avant que la charge d'eau fut appliquée la contrainte maximum enregistrée par l'un de ces appareils était d'environ 6 000 kPa et la majeure partie de cet effort fut attribuée au retrait du béton.

material was attacked by lime, it was reported that the readings had been accurate. Whether the high value of 6,000 kPa was a localised stress, contributed to, perhaps, by the presence of the gauge itself, was not clear but it was evident from the discussion it aroused that knowledge of initial stresses in a concrete dam is far from complete.

It is relevant to note that even in the case of 127-203 mm thick concrete paving slabs, with the top surface exposed to the weather, instruments installed to measure shrinkage have in fact indicated that swelling has occurred. At the experimental concrete road at Winthorpe (73) readings taken over a period of 2-3 years from vibrating wire strain gauges placed at mid-depth in the slabs showed a maximum expansion of 150 micro-strain and a mean expansion of about 50 microstrain.

*5.2.3. Measurement of moisture conditions.* Deformations caused by the irregular change of moisture in dams have been reported from Bulgaria by Vasilev and Mihailov (148). Information is given on the use of moisture meters but it is noted that the moisture meters used were not very reliable because they were affected by other factors as well as moisture.

The use of different designs of hygrometers for measuring humidity in concrete has been reported on dams in Portugal (114) but it appears the results were not reliable.

### 5.3. Laboratory methods.

A.S.T.M. No. C 157-69 T " Method of test for length change of cement mortar and concrete " describes a procedure for measuring length changes of a test specimen due to causes other than externally applied forces and temperature changes. The method covers storage either in water or in air at controlled temperature and humidity. A.S.T.M. No. C 341-71 T " Method of test for length change of drilled or sawed specimens of

Bien que ces jauges aient cessé de fonctionner peu après, en raison de l'attaque des matériaux polarisant par la chaux, on a noté que les lectures avaient été précises. Que la valeur élevée de 6 000 kPa soit une contrainte locale influencée peut être par la présence de la jauge, n'a pas été clairement défini mais il a été évident, à la suite de la discussion qui a suivi, que la connaissance des conditions initiales de contraintes du béton d'un barrage est loin d'être complète.

Il est important de noter que, même dans le cas de dalles de béton de revêtement de 127 à 203 mm d'épaisseur, avec la surface supérieure exposée aux intempéries, les instruments mis en place pour mesurer le retrait ont indiqué, en fait, qu'il s'est produit un gonflement. Sur le béton expérimental de la route de Winthorpe (73), les lectures recouvrant une période de deux à trois ans des jauges de déformations à cordes vibrantes, placées à mi-épaisseur des dalles ont montré une extension maximum de 150  $\mu$  et une extension moyenne d'environ 50  $\mu$ .

*5.2.3. Mesure des conditions d'humidité.* Les déformations provoquées par les modifications irrégulières d'humidité des barrages ont été rapportées par Vasilev et Mihailov de Bulgarie (148). Des informations sont données sur l'utilisation d'appareils de mesure d'humidité mais on note que ces appareils ne sont pas très exacts car ils sont affectés par d'autres facteurs que l'humidité.

L'utilisation de différents types d'hygromètres pour mesurer l'humidité du béton a été rapportée pour des barrages du Portugal (114) mais il semble que les résultats ne soient pas valables.

### 5.3. Méthodes de laboratoire.

La norme A.S.T.M. n° C 157-69 T « Méthodes d'essais concernant les variations de longueur des mortiers de ciment et des bétons », décrit un procédé pour mesurer les variations de longueur d'un échantillon résultant d'autres influences que les forces extérieures appliquées ou les variations de température. La méthode comporte la conservation dans l'eau ou dans l'air à température et humidité contrôlée. La norme A.S.T.M.

cement mortar and concrete " provides for similar procedures in the case of specimens obtained from a structure.

The results of a survey on testing methods used by laboratories for the measurement of shrinkage of concrete have been summarised in R.I.L.E.M. Bulletin No. 21 (10). Answers were received from 19 countries and 10 differing specifications were reported.

Houk and others have described studies of autogenous volume change (59). Cylindrical specimens were sealed in butyl rubber membranes clamped at top and bottom to steel baseplates. The specimens were made with differing cementing materials and were stored at temperatures of 10, 21 and 38 °C. The intention was to compare the effects of different cementing materials and aggregate gradings on volume changes, not caused by temperature differential, moisture change, external loading or other external effects. In practice it is not certain that the test method could entirely exclude effects due to temperature differential or moisture change. It was found that increase in storage temperature increased both the rate and total magnitude of autogenous shrinkage. This shrinkage was also increased by an increase in cement content, by an increase in pozzolana content from 30 to 50 %, and usually, by an increase in the fineness of the pozzolanas. The highest autogenous shrinkage was shown by concretes containing calcined shale, pumicite and opaline slag.

No information appears to be given in the available literature on the use of laboratory models to determine the effects of shrinkage on concrete.

#### 5.4. Theoretical and empirical methods.

Although in general it is desirable to conduct shrinkage tests for a period of at least 28 days (90) and preferably for not less than

n° C 341-71 T « Méthodes d'essais concernant les variations de longueur des échantillons de mortier de ciment et béton découpés à la sondeuse ou sciés » indique des procédures similaires dans le cas d'échantillons prélevés sur un ouvrage.

Les résultats d'un examen des méthodes d'essais utilisées par des laboratoires pour les mesures de retrait du béton ont été résumés dans le bulletin n° 21 de la R.I.L.E.M. (10). Des réponses ont été reçues de dix-neuf pays et dix spécifications différentes ont été décrites.

Houk et d'autres ont décrit des études sur des modifications intrinsèques de volume (59). Des échantillons cylindriques ont été scellés dans des membranes de caoutchouc au butyl fixés au sommet et à la base de plaques d'acier. Les éprouvettes étaient constituées de matériaux de cimentation différents et étaient stockées à des températures de 10, 21 et 38 °C. L'intention était de comparer les effets de différents matériaux de cimentation et des granulométries des granulats sur des modifications de volume ne résultant pas de différence de température, de modification d'humidité, de charges ou d'autres effets externes. En pratique, il n'est pas certain que la méthode d'essai puisse exclure entièrement les effets résultant de différences de température ou de modifications d'humidité. Il a été constaté que l'augmentation de la température de conservation augmente à la fois la rapidité et l'amplitude totale du retrait propre. Ce retrait est aussi augmenté par une augmentation du dosage en ciment, par une augmentation du dosage en Pouzzolane de 30 à 50 % et, habituellement, par une augmentation de la finesse des Pouzzolane. Le retrait propre, le plus important, s'est produit pour des ciments contenant des chaux calcinées, de la pumicite, et des laitiers d'opaline.

Aucune information n'existe dans la littérature disponible, concernant l'utilisation de modèles de laboratoire, pour déterminer les effets du retrait du béton.

#### 5.4. Méthodes théoriques et empiriques.

Bien que, en général, il soit souhaitable de poursuivre les essais de retrait pendant des périodes d'au moins vingt-huit jours (90) et

60 days (4, 95), the shrinkage characteristics of concrete can be predicted empirically on the basis of standard curves or equations. The information thus obtained must be adjusted to account for factors which affect the results, such as :

- Age at commencement of measurements.
- Relative humidity.
- Minimum thickness of member.
- Cement content.
- Workability.
- Proportion of fine aggregate.
- Air content.
- Area of longitudinal steel (if any).

Recommendations issued by the Comité Européen du Béton (C.E.B.) and Fédération Internationale de la Précontrainte (F.I.P.) (45) state that the shrinkage deformation at any instant may be determined from the product of the following five partial coefficients :

$$\varepsilon_c k_b k_e k_p k_t,$$

where  $\varepsilon_c$  depends on the environment;

$k_b$  depends on the composition of the concrete;

$k_e$  depends on the theoretical thickness of the member;

$k_p$  depends on the percentage of reinforcement in the cross-sectional area of the member;

$k_t$  defines the development of shrinkage as a function of time.

Diagrams are presented which give values of these coefficients over a range of varying conditions. It is emphasised that the coefficients derived in this way are valid only for Portland cement concretes of normal quality, hardening under normal conditions and subject to working stresses at the most equal to 40 % of their rupture stress.

Another example of a standard expression for the shrinkage strain at any time,  $t$  (days) is :

$$\frac{t^e}{f + t^e} \cdot \varepsilon_{su},$$

where  $\varepsilon_{su}$  is the ultimate shrinkage, and  $e$  and  $f$  are empirical constants.  $e$  normally varies only between 0.9 and 1.1. The value

mieux au moins de soixante jours (4, 95), les caractéristiques de retrait du béton peuvent être prévues empiriquement sur la base de courbes standards ou d'équations. Les informations ainsi obtenues doivent être ajustées pour tenir compte des facteurs qui affectent les résultats tels que :

- Age au début des mesures.
- Humidité relative.
- Épaisseur minimum de la structure.
- Dosage en ciment.
- Ouvrabilité.
- Proportion des granulats fins.
- Teneur en air.
- Surface des aciers longitudinaux (s'il en existe).

Les recommandations publiées par le Comité Européen du Béton (C.E.B.) et la Fédération Internationale de la Précontrainte (F.I.P.) (45) précisent que les déformations de retrait à tout instant peuvent être déterminées par le produit des cinq coefficients partiels suivants :

$$\varepsilon_c k_b k_e k_p k_t,$$

où  $\varepsilon_c$  dépend de l'environnement;

$k_b$  dépend de la composition du béton;

$k_e$  dépend de l'épaisseur théorique de la structure;

$k_p$  dépend du pourcentage d'armatures dans la section transversale de la structure;

$k_t$  définit le développement du retrait en fonction du temps.

Les diagrammes présentés donnent la valeur de ces coefficients pour une série de conditions variables. On insiste sur le fait que les coefficients établis de cette façon sont seulement valables pour des bétons de ciment Portland de qualité normale, durcissant dans des conditions normales et soumises à des contraintes de travail au plus égale à 40 % de leur contrainte de rupture.

Un autre exemple d'une expression standard pour les déformations de retrait à n'importe quel âge de temps  $t$  (jours) est :

$$\frac{t^e}{f + t^e} \cdot \varepsilon_{su},$$

ou  $\varepsilon_{su}$  est le retrait final et  $e$  et  $f$  sont des constantes empiriques, « $e$ » varie normalement seulement entre 0,9 et 1,1. La valeur de

of  $f$  varies quite widely and apparently depends on curing conditions as well as on the characteristics of the concrete with respect to shrinkage. Correction factors have to be applied where relevant for factors such as those indicated above (90). It has been found that  $f$  is a function of the volume/surface ratio of the concrete member (57). If the volume/surface ratio is introduced in this way, it should not of course be necessary to introduce any other correction for the thickness of member. Otherwise a factor to correct the estimated shrinkage according to the minimum thickness of member,  $T$  mm, has been found to approximate to  $(1.17-0.00114 T)$  for the ultimate shrinkage (90).

Campbell-Allen and Holford have described apparatus and test procedures leading to the calculation of stress in concrete arising from linear-elastic restraint to shrinkage, such as that caused by reinforcement. The usual restraint of embedded reinforcement was conveniently replaced by the application of restraint by an external rig. This avoided some of the unknown initial stresses and allowed the ultimate strength of the specimens to be determined. Calculations were performed by the rate-of-creep method, by finite steps (27).

## 6. CREEP

### 6.1. General.

Creep has been defined as time dependent deformation due to load. Since this deformation can be several times as large as the immediate deformation on loading, creep is of considerable importance. For the purpose of analysis, it follows that :

total creep strain = total strain, less immediate strain on loading (elastic strain), less the strains due to shrinkage and temperature change.

To determine the magnitude of the stress in the concrete from the strains at any point, it is therefore necessary to take into account the magnitude of the strain due to creep.

«  $f$  » varie assez largement et dépend, semble-t-il, des conditions de cure ainsi que des caractéristiques du béton en ce qui concerne le retrait. Des facteurs de correction doivent être appliqués aux facteurs tels que ceux indiqués ci-dessus (90). On a trouvé que «  $f$  » est une fonction du rapport de la surface au volume de la structure de béton (57). Si ce rapport est introduit de cette façon il est nécessaire, naturellement, d'introduire d'autres corrections sur l'épaisseur de la structure. Par ailleurs, un facteur de correction relatif au retrait suivant l'épaisseur minimum d'une structure, «  $T$  » mm, a été trouvé voisin de  $(1,17-0,0014 T)$  pour le retrait final (90).

Campbell-Allen et Holford ont décrit l'appareillage et les procédés d'essais permettant le calcul des contraintes du béton résultant des efforts s'opposant au retrait tels que ceux qui sont introduits par les armatures. Les contraintes habituelles, dues aux armatures, sont remplacées conventionnellement par une contrainte résultant d'un élément externe. Ceci évite de tenir compte de certaines contraintes initiales inconnues et permet de déterminer la résistance finale de l'éprouvette. Les calculs ont été conduits par la méthode de la vitesse de fluage en utilisant des variations finies (27).

## 6. FLUAGE.

### 6.1. Généralités.

Le fluage a été défini comme la déformation avec le temps résultant d'une charge. Étant donné que cette déformation peut être plusieurs fois supérieure à la déformation immédiate due à la charge, le fluage a une importance considérable. Pour la présente analyse, il est précisé que :

Déformation totale de fluage = déformation totale, moins déformation immédiate due à la charge (déformation élastique), moins déformations dues au retrait et à la température.

Pour déterminer l'importance des contraintes dans le béton résultant des déformations en tous points il est donc nécessaire de tenir compte de l'importance des déformations dues au fluage.

Rocha and Da Silveira (97) in assessing the results of measurements on Portuguese dams reported that studies on creep phenomena in the concrete of dams show that after one year's age, length changes due to creep are very small.

In the absence of mortar cracks, it has been found that creep will not produce failure after prolonged loading. On the other hand, if the initial load is high enough to produce mortar cracks immediately, creep under sustained loading will propagate these cracks and failure may result with time; this applies only at stress-strength ratios in excess of 0.7 (95).

As mentioned in Section 5.1. the general effects of creep have been discussed elsewhere (79, 95, 96).

Information on the creep of concrete under two-dimensional stressing is scarce (124).

Illston and Jordaan have reported on three dimensional creep measurements in young concrete (68).

Counto has published work on the effect of the elastic modulus of the aggregate on the creep and creep recovery of concrete (32).

#### 6.2. Observations and interpretation.

The effects of creep can be isolated from other effects by introducing a suitable term to account for time-dependent changes in the regression equations relating observed displacement, strain and stress with load parameters (92, 120). The method is referred to in more detail under Section 7.2. The creep strains due to self-weight are built up in small increments over a long period and are consequently difficult to isolate.

#### 6.3. Laboratory methods.

Stresses and displacements arising from creep can be predicted with the aid of long-term control tests.

The method normally employed in attempting to measure creep is based on the appli-

Rocha et Da Silveira (97) en utilisant les résultats des mesures faites sur des barrages au Portugal rapportent que les études sur les phénomènes de fluage dans les bétons de barrage montrent qu'après une année, les modifications dues au fluage sont extrêmement faibles.

En l'absence de fissuration du mortier, on a trouvé que le fluage ne produit pas de désordre après une charge prolongée. D'autre part, si la charge initiale est suffisamment élevée pour produire immédiatement la fissuration du mortier, le fluage, sous une charge permanente, propagera ces fissures et causera des désordres avec le temps; ceci est seulement valable pour des rapports « contrainte/résistance à la rupture » dépassant 0,7 (95).

Comme il est mentionné dans la section 5.1, les effets généraux du fluage ont été discutés par ailleurs (79, 95, 96).

Les informations sur le fluage du béton sous des contraintes bi-dimensionnelles sont rares (124).

Illston et Jordaan ont fait un rapport sur les mesures de fluage tri-dimensionnelles du béton jeune (68).

Counto a publié un travail sur l'effet du module élastique des granulats sur le fluage et le fluage de retour à l'équilibre du béton (32).

#### 6.2. Observations et interprétation.

Les effets du fluage peuvent être isolés des autres effets en introduisant un terme convenable pour rendre compte des modifications dépendant du temps dans les équations relatives aux déplacements observés, aux déformations et contraintes avec les paramètres relatifs à la charge (92, 120). La méthode est expliquée plus en détail dans la section 7.2. Les déformations de fluage dues au poids propre augmentent, faiblement, sur une période très longue et sont, par conséquent, difficiles à isoler.

#### 6.3. Méthodes de laboratoire.

Les contraintes et les déplacements résultant du fluage peuvent être prévus à l'aide d'essais de contrôle de longue durée.

Les méthodes normalement utilisées dans le but de mesurer le fluage sont basées sur

cation of a constant load to concrete cylinders or prisms placed in a loading frame. The constant load, which may be applied for several months or even years, can be maintained by application through loaded springs or hydraulic systems. Loads may be applied at different ages and can be decreased or removed when desired to investigate creep recovery. The strains can be measured periodically by means of internal strain gauges or by demountable mechanical extension gauges applied to the external faces of the prism. Where it is necessary to determine the value of Poisson's ratio, the strains should be measured in the lateral direction as well as the longitudinal direction. The transverse strains are small and it is usually best to employ internal strain gauges for this purpose.

Tests of this type must be carried out in the laboratory. It is not possible to measure creep strains directly in the dam concrete itself because of the changing stress situation.

Since the amount of creep is susceptible to humidity and temperature, it follows that creep tests should be carried out in conditions appropriate to those existing in the dam. It is clearly not possible to reproduce these conditions exactly, particularly in the case of the temperature which will vary. As regards the humidity conditions, it is generally considered appropriate to carry out the test in a high humidity laboratory or else to provide the specimens with an impermeable coating to prevent moisture loss from the concrete. In some cases prisms submitted to constant loads have been enclosed in watertight copper casings.

The strain measurements obtained in these tests must be processed to take account of the immediate elastic strain due to loading and of the shrinkage strain. Creep and shrinkage are difficult to separate in measurements of deformation during testing because they are inter-related. The usual approach is to

l'application d'une charge constante à des cylindres de béton ou à des prismes placés dans un appareil de chargement. La charge constante, qui peut être appliquée pendant plusieurs mois ou même des années, peut être maintenue de façon convenable en étant appliquée par l'intermédiaire de ressorts ou de systèmes hydrauliques. Les charges peuvent être appliquées à différents âges et peuvent être diminuées ou supprimées quand on le désire pour étudier le fluage de retour à l'équilibre. Les déformations peuvent être mesurées périodiquement par l'intermédiaire de jauges de déformations internes ou par des jauges d'extension mécaniques démontables fixées sur les faces externes du prisme. Lorsqu'il est nécessaire de déterminer la valeur du coefficient de Poisson les déformations doivent être mesurées dans les directions latérales aussi bien que dans la direction longitudinale. Les déformations transversales sont faibles et il est habituellement préférable d'employer des jauges de déformations internes dans ce but.

Les essais de ce type doivent être effectués au laboratoire. Il n'est pas possible de mesurer les déformations de fluage directement dans le béton du barrage lui-même en raison des modifications de l'état de contraintes.

Étant donné que l'importance du fluage dépend de l'humidité et de la température, il s'ensuit que les essais de fluage doivent être effectués dans des conditions qui correspondent à celles existant dans le barrage. Il n'est évidemment pas possible de reproduire, exactement, ces conditions en particulier pour la température qui variera. En ce qui concerne les conditions d'humidité on admet, généralement, qu'il est convenable d'effectuer les essais dans un laboratoire à humidité élevée ou de munir les éprouvettes d'un revêtement étanche pour éviter la perte d'humidité du béton. Dans quelques cas, les prismes soumis aux charges constantes ont été enfermés dans des boîtiers de cuivre étanches.

Les mesures des déformations effectuées au cours de ces essais doivent être conduites de façon à prendre en compte les déformations élastiques immédiates dues à la charge et les déformations de retrait. Le fluage et le retrait sont difficile à séparer dans les mesures de déformation durant les essais parce qu'ils sont

determine the latter by making a parallel set of concrete cylinders or prisms which are kept in the same environment as the creep test prisms but which remain unloaded. In this way, strains resulting purely from shrinkage are measured directly.

A.S.T.M. testing method No. C 512-69 prescribes tests for creep of concrete in compression. It is applicable to moulded cylinders with maximum aggregate size not exceeding 51 mm. A spring, hydraulic capsule or ram is used as a load-maintaining element. The specimens are 152 mm in diameter, and minimum 292 mm in length. Curing conditions corresponding to " standard " and " mass " are prescribed. " Other " curing conditions are provided for, in which the ambient conditions are varied to suit specific applications.

Meyers and Pauw (91) have described apparatus and instruments for creep and shrinkage studies, generally in line with A.S.T.M. procedures. They have described the development of a hydraulic loading system, intended to load six racks, each accommodating specimens up to 1520 mm in length. A spring loading system was developed to load specimens in the field. Both clip-on strain meters and extensometers were used, employing a flexural strain measuring device. The strain-sensing elements were bridge circuits using strain gauges read by a single strain indicator.

Illston has described load cells for concrete creep testing (66) and a loading system has been described by the U.S.B.R. Concrete and Structural Branch Laboratory (143). Ferreira and others have described a testing method and apparatus used for measuring creep at temperature of 45 °C (44). Hannant has described equipment for measurement under multi-axial stress (55).

interdépendants. L'approche habituelle consiste à effectuer une série de cylindres ou prismes de béton utilisés comme témoins et qui sont maintenus dans la même ambiance que les éprouvettes pour l'essai de fluage mais qui ne sont pas chargés. De cette manière, les déformations résultant uniquement du retrait sont mesurées directement.

La méthode d'essais n° C 512-69 de l'A.S.T.M. prescrit les essais de fluage du béton à la compression. Elle est valable pour des éprouvettes cylindriques avec une dimension maximale des granulats ne dépassant pas 51 mm. Un ressort, une capsule hydraulique ou un piston est utilisé pour le maintien d'une charge constante. Les échantillons ont un diamètre de 152 mm et une longueur minimale de 0 292 m. Les conditions de cure prescrites correspondent aux conditions de béton « standard » et de « masse ». « D'autres » conditions de cure sont prévues dans lesquelles les conditions ambiantes sont variables pour être conformes aux conditions spécifiées.

Meyers et Pauw (91) ont décrit l'appareillage et les instruments nécessaires pour les études de fluage et de retrait qui sont généralement conformes aux procédés de l'A.S.T.M. Ils ont décrit un système de charge hydraulique capable d'appliquer une charge sur six dispositifs, chacun pouvant recevoir des éprouvettes allant jusqu'à 1,52 m de longueur. Un dispositif de chargement à ressort a été prévu pour effectuer la charge d'éprouvettes sur chantier. On utilise à la fois des appareils de mesure des déformations et des extensomètres comprenant un dispositif de mesure des déformations de flexion. L'élément sensible est constitué par un pont électrique comportant des jauges de déformations, avec lecture sur un simple indicateur de déformations.

Illston a décrit des cellules pour les essais de fluage du béton (66) et un dispositif de charge a été décrit par le Concrete and Structural Branch Laboratory (U.S.B.R.) (143). Ferreira et d'autres ont décrit une méthode d'essais et un appareillage utilisés pour la mesure du fluage à des températures de 45 °C (44). Hannant a décrit un équipement pour effectuer des mesures sous contraintes multi-axiales (55).

It has been found that relative humidity can be controlled within  $\pm 2\%$  for the purpose of laboratory tests, by passing the air over a solution of a suitable salt with the solid phase present. It is desirable to remove carbon dioxide from the circulating air because it may cause carbonation shrinkage at the surface of the specimen. Sodium hydroxide can be used to control both carbon dioxide and relative humidity (95).

Electrical resistance strain gauges are not considered generally suitable for long term measurements in dams unless specially stabilised, because of the danger of zero drift (95).

No information appears to be given in the available literature on the use of laboratory models to determine the effects of creep on concrete.

#### 6.4. Theoretical and empirical methods.

6.4.1. *Empirical prediction of creep strain.* Although in general it is desirable to conduct laboratory tests for at least 28 days (90) and preferably for not less than 60 days (95), the characteristics of concrete with respect to creep can be predicted empirically on the basis of standard curves or equations. The information thus obtained must be adjusted to account for factors which affect the results, such as :

- Stress.
- Time under load.
- Size of member.
- Age at loading.
- Relative humidity.
- Water cement ratio.
- Type of aggregate.
- Air content.
- Percentage of fines.
- Cement content.
- Type of cement.

Recommendations issued by the Comité Européen du Béton (C.E.B.) and Fédération Internationale de la Précontrainte (F.I.P.) (45) state that in order to evaluate the order of magnitude of deferred deformations due to creep, use may be made of the theory of linear creep. For a constant stress  $\sigma_b$  this

On a constaté que l'humidité relative peut être contrôlée à plus ou moins 2 % pour les besoins des essais de laboratoire en faisant passer l'air sur une solution de sel convenable en présence de la phase solide. Il est souhaitable d'éliminer l'oxyde de carbone de l'air en circulation parce qu'il pourrait provoquer un retrait de carbonatation à la surface de l'échantillon. L'oxyde de sodium peut être utilisé pour contrôler à la fois l'oxyde de carbone et l'humidité relative (95).

Des jauges de déformations à résistances électriques sont généralement considérées comme n'étant pas satisfaisantes à moins qu'elles n'aient été spécialement stabilisées, en raison du danger de décalage du zéro (95).

Aucune information n'est donnée dans la littérature disponible sur l'utilisation de modèles de laboratoires pour déterminer les effets du fluage du béton.

#### 6.4. Méthodes théoriques et empiriques.

6.4.1. *Prévision empirique des déformations de fluage.* Bien qu'il soit, en général, désirable de poursuivre les essais de laboratoire au moins pendant vingt-huit jours (90), et mieux, au moins pendant soixante jours (95), les caractéristiques du béton en ce qui concerne le fluage peuvent être prévues empiriquement d'après des courbes standards ou des équations. Les informations ainsi obtenues doivent être ajustées pour tenir compte de facteurs qui affectent les résultats tels que :

- Contraintes.
- Temps sous la charge.
- Dimension de la structure.
- Age au moment du chargement.
- Humidité relative.
- Rapport eau/ciment.
- Type de granulats.
- Teneur en air.
- Pourcentage de fines.
- Dosage en ciment.
- Type de ciment.

Les recommandations publiées par le Comité Européen du Béton (C.E.B.) et la Fédération Internationale de la Précontrainte (F.I.P.) (45) précise que, pour évaluer l'ordre de grandeur des déformations dues au fluage, on doit utiliser la théorie du fluage linéaire. Pour une contrainte constante  $\sigma_b$ , cette

theory leads to a calculation of the final creep deformation from the formula :

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_b}{E_{b\ 28}} \cdot \varnothing_t,$$

where  $E_{b\ 28}$  is the value of the secant modulus of the concrete at an age of 28 days and  $\varnothing_t$  is a coefficient covering the conditions. This coefficient is determined from the product of the following five partial coefficients :

$$k_c \cdot k_d \cdot k_b \cdot k_e \cdot k_t,$$

where  $k_c$  depends on the environmental conditions;

$k_d$  depends on the degree of hardening of the concrete at the age of loading;

$k_b$  depends on the composition of the concrete;

$k_e$  depends on the theoretical thickness of the member;

$k_t$  covers the development of the deferred deformation with time.

Diagrams are presented which give values of these coefficients over a range of varying conditions. As in the case of the C.E.B./F.I.P. recommendations for evaluating shrinkage, it is emphasised that the coefficients derived in this way are valid only for Portland cement concretes of normal quality, hardening under normal conditions and subject to working stresses at the most equal to 40 % of their rupture stress.

Another example of a standard expression is that for the creep coefficient, defined as the ratio of creep at time  $t$  to initial strain :

$$\frac{t^c}{d + t^c} \cdot C_u,$$

where  $C_u$  is the ultimate creep coefficient and  $c$  and  $d$  are empirical constants.  $c$  normally varies between 0.4 and 0.8 (90). No guidance has been found on criteria for determining the initial strain and this omission could affect the usefulness of the method; the initial strain must depend on the rate of loading and hence can include an element of early creep. Correction factors are applied

théorie conduit à un calcul de la déformation finale de fluage par la formule :

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_b}{E_{b\ 28}} \cdot \varnothing_t,$$

où  $E_{b\ 28}$  est la valeur du module sécant du béton à vingt-huit jours, et  $\varnothing_t$  est un coefficient tenant compte des conditions. Ce coefficient est déterminé par le produit des cinq coefficients partiels suivants :

$$k_c \cdot k_d \cdot k_b \cdot k_e \cdot k_t,$$

ou  $k_c$  dépend des conditions ambiantes;

$k_d$  dépend du degré de durcissement du béton et de l'âge de la charge;

$k_b$  dépend de la composition du béton;

$k_e$  dépend de l'épaisseur théorique de la structure;

$k_t$  tient compte des déformations se produisant avec le temps.

Des diagrammes sont fournis donnant les valeurs de ces coefficients pour toute une gamme de conditions variables. Comme dans le cas des recommandations du C.E.B.-F.I.P. pour l'évaluation du retrait, il est indiqué que les coefficients déterminés de cette façon ne sont valables que pour les bétons de ciment Portland de qualité normale, durcissant sous des conditions normales et soumis à des efforts de travail au plus égaux à 40 % des efforts de rupture.

Un autre exemple d'expression standard est celui correspondant au coefficient de fluage défini comme le rapport du fluage au temps «  $t$  » à la déformation initiale :

$$\frac{t^c}{d + t^c} \cdot C_u,$$

où  $C_u$  est le coefficient final de fluage et «  $c$  et  $d$  » sont des constantes empiriques. «  $c$  » varie, normalement entre 0,4 et 0,8 (90). Aucune indication n'a été trouvée sur les critères propres à la détermination des déformations initiales et cette lacune peut être gênante pour l'utilisation de la méthode; la déformation initiale peut dépendre de la vitesse d'application de la charge et, par consé-

to the expression, where relevant, for factors such as those indicated above.

In other investigations a similar expression was found for creep strain  $\varepsilon_c$  in terms of the ultimate creep strain  $\varepsilon_{c\infty}$ :

$$\varepsilon_c = \frac{t}{t + N_c} \cdot \varepsilon_{c\infty}$$

$N_c$  was found to be a function of the volume/surface ratio and, if this is used, no other correction for thickness of member should be necessary. It was found that the size and shape of member affected the rate of creep only during the first three months (57).

6.4.2. *Interpretation of strain in terms of stress.* There are four basic methods for calculating stresses from long-term strains which can be used alternatively for predicting long-term strains from calculated stresses :

- The effective modulus method (106);
- The rate of flow method (41);
- The method of superposition (54, 72);
- The simulation of field conditions on controlled specimens (140).

These methods can be adapted for prediction under multiaxial stress conditions and good agreement with observed values under test has been found using the rate of flow method (67). Long-term control tests are desirable in order to establish the creep parameters to be used.

Bazant has described an age-adjusted effective modulus method which is claimed to be remarkably simple and superior to the usual effective modulus method. Strain reversals cannot, however, be accounted for (14).

Research work by the Transport and Road Research Laboratory in U.K. on concrete bridges has shown that the prediction of movements due to elastic strain, creep and shrinkage in full-sized structures can be assisted by the use of a light portable creep

quent, peut comprendre un élément de fluage initial. Des facteurs de correction sont appliqués à l'expression, lorsque cela est nécessaire, pour les facteurs tels que ceux qui sont indiqués ci-dessus.

Dans d'autres recherches, une expression semblable a été trouvée pour la déformation de fluage  $\varepsilon_c$  en fonction de la déformation de fluage finale  $\varepsilon_{c\infty}$  :

$$\varepsilon_c = \frac{t}{t + N_c} \cdot \varepsilon_{c\infty}$$

$N_c$  est une fonction du rapport de la surface au volume et, en l'utilisant, il n'est pas nécessaire d'effectuer une autre correction pour l'épaisseur de la pièce. On a trouvé que la dimension et la forme de la structure interviennent sur la vitesse du fluage seulement pendant les trois premiers mois (57).

6.4.2. *Interprétation des déformations en termes de contraintes.* Il y a quatre méthodes de base pour calculer les contraintes résultant de déformations de longue durée que l'on peut utiliser inversement pour prévoir les déformations à long terme en partant des contraintes calculées :

- la méthode du module réel (106);
- la méthode de la vitesse de variation (41);
- la méthode de superposition (54, 72);
- la simulation des conditions de chantiers sur des éprouvettes de contrôle. (140).

Ces méthodes peuvent être adaptées pour des prévisions sous contraintes multi-axiales et l'on a trouvé une bonne correspondance avec les valeurs observées au cours des essais en utilisant la méthode de vitesse de variation (67). Des essais de contrôle de longue durée sont souhaitables pour déterminer les paramètres de fluage à utiliser.

Bazant a décrit une méthode du module réel en fonction de l'âge, qui est considérée comme remarquablement simple et supérieure à la méthode habituelle du module réel. Elle ne permet cependant pas de prendre en compte les inversions de déformations (14).

Les travaux de recherches effectués par le Transport and Road Research Laboratory au Royaume-Uni sur des ponts en béton ont montré que la prévision des mouvements dus aux déformations élastiques, au fluage et au retrait dans les structures de dimensions réelles

rig (140, 141). This rig is transported to a bridge site in order to load  $508 \times 102 \times 102$  mm concrete prisms under the same conditions of exposure as the bridge structures. The loads on the prisms are correlated with the strains at the centre of the prisms, which are determined by a single acoustic gauge in each case. The values of strains so obtained are used in the interpretation of the strain values derived from the main structure.

## 7. TEMPERATURE

### 7.1. General.

7.1.1. *Effect of variations in temperature.* Temperature has a very important effect on the behaviour of concrete dams. Thermal conditions are, unfortunately, complex and difficult to compute (116, 120). The complexities are increased by possible variation in concrete properties due to varying temperature.

It has been found that thermal contraction or expansion of rock can cause deformation of a valley independently of the effects of the dam (26).

It is generally considered that the coefficient of expansion for concrete is the same as the coefficient of contraction but Lofquist found, interestingly, that the coefficient of expansion was higher than the coefficient of contraction (81).

The annual surface temperature cycles for the downstream faces of several mass concrete gravity dams in the U.S.A. have indicated that the average monthly concrete surface temperature values exceed the mean monthly air temperatures during much of the year, indicating that heat input to the structure from solar heat absorption is a significant item (108). A portion of this added heat finds its way through the structure into the water at the upstream face, the amount depending upon the mean annual temperature gradient established within the concrete structure and the thermal properties of the concrete. This temperature gradient and its variation through an annual cycle significantly affects the behaviour of the structure.

peuvent être facilitées par l'utilisation d'un appareil léger portatif pour le fluage (140, 141). Cet appareil est transporté sur le site d'un pont en vue d'effectuer la mise en charge d'un prisme de béton de  $508 \times 102 \times 102$  mm dans les mêmes conditions de situation que les structures du pont. Les charges sur les éprouvettes sont rapprochées des déformations au centre des prismes, déterminés par une simple jauge acoustique dans chaque cas. Les valeurs des déformations ainsi obtenues sont utilisées pour interpréter les valeurs des déformations existant dans la structure principale.

## 7. TEMPÉRATURE.

### 7.1. Généralités.

7.1.1. *Effets des variations de température.* La température a un effet très important sur le comportement d'un barrage en béton. Les conditions thermiques sont, malheureusement, complexes et difficiles à prévoir (116, 120). La complexité est augmentée par les variations possibles des propriétés du béton dues aux variations de température.

On a constaté que des contractions ou dilatation thermiques du rocher peuvent provoquer la déformation d'une vallée indépendamment des effets du barrage (26).

On considère, généralement, que le coefficient de dilatation d'un béton est le même que le coefficient de contraction, mais Lofquist a trouvé, de façon intéressante, que le coefficient d'extension est supérieur au coefficient de contraction (81).

Les cycles annuels de températures superficielles des parements aval de plusieurs barrages poids en béton aux États-Unis ont montré que les températures moyennes mensuelles du béton de surface sont supérieures à la température moyenne mensuelle de l'air durant la plus grande partie de l'année, ceci montrant que l'apport de chaleur à la structure par le soleil est un élément important (108). Une partie de cette chaleur ajoutée chemine à travers l'ouvrage jusqu'à l'eau du parement amont, cette quantité dépendant du gradient de température moyen annuel dans le béton et des propriétés thermiques du béton. Ce gradient de température et ses variations au cours d'un cycle annuel modifient de façon importante le comportement de l'ouvrage.

The reaction between cement and water and hence the rate of development of the heat of hydration are strongly influenced by temperature.

The temperature conditions within a dam arise from :

- Development of heat of hydration of the cement and its subsequent dissipation.
- Incorporation of substances in the concrete mix to control heat development.
- Measures, if any, for pre-cooling concrete materials.
- Measures, if any, for post-cooling concrete internally, or externally.
  
- Methods and sequence of placing concrete.
- Atmospheric temperature effects on exposed faces.
- Reservoir or tail-water temperature effects on submerged faces.

Various investigations have shown that the strength development of concrete may be greater if placed at low temperature than at high temperature.

Ferreira and others have investigated the influence of temperature on the creep of mass concrete (44) and found a similar influence for both creep and creep recovery which was more marked in concretes with a higher water cement ratio. They concluded that strains measured in a structure cannot be converted into stresses unless the deformability characteristics of concrete are determined at temperatures not very different from those in the structure.

Geymayer, in reviewing the literature (47) on the effect of elevated temperatures on creep of concrete, concluded that creep at elevated temperatures follows the same general pattern as creep at room temperatures i.e. it is approximately an exponential function of the time under load. The effect of elevated temperatures up to 50 °C is to increase creep. At 50 °C creep is approximately two to three times as great as creep at room temperature.

La réaction entre le ciment et l'eau et par conséquent la cadence de production de la chaleur d'hydratation sont fortement influencées par la température.

Les conditions de température à l'intérieur d'un barrage résultent des éléments suivants :

- le développement de la chaleur d'hydratation du ciment et sa dissipation;
- l'incorporation de substances dans le béton pour contrôler le développement de chaleur;
- les mesures prises, s'il y a lieu, pour le pré-refroidissement des matériaux;
- les mesures prises, s'il y a lieu, pour refroidir le béton après coulées, soit intérieurement, soit extérieurement;
- les méthodes et les cadences de mise en place du béton;
- les effets de la température ambiante sur les faces exposées;
- les effets de la température de l'eau du réservoir ou du bassin aval sur les faces immergées.

Différentes recherches ont montré que le développement de la résistance du béton peut être plus grand s'il est mis en œuvre à basse température qu'à haute température.

Ferreira et d'autres ont cherché l'influence de la température sur le fluage du béton de masse (44) et trouvé une influence semblable à la fois pour le fluage et pour le fluage de retour à l'équilibre qui était plus nette pour les bétons ayant un rapport eau/ciment élevé. Ils en concluent que les déformations mesurées dans une structure ne peuvent pas être converties en contrainte tant que les caractéristiques de déformabilité du béton n'ont pas été déterminées pour des températures peu différentes de celles de la structure.

Geymayer, en faisant l'examen de la littérature (46) sur les effets des températures élevées sur le fluage du béton conclut que le fluage aux températures élevées suit les mêmes règles générales que le fluage aux températures des habitations, c'est-à-dire qu'il varie exponentiellement avec le temps sous la charge. L'effet de températures atteignant jusqu'à 50 °C est d'augmenter le fluage. A 50 °C, il est de deux à trois fois supérieur au fluage à la température des habitations.

Lec has also discussed the effects of temperature on creep (79) and also reported an investigation into the occurrence of cracking and its nature in terms of temperature (80). Cracking of concrete due to temperature effects has been reported on a number of concrete dams. At the Orlik Dam, surface cracks opened gradually in the early life of the concrete, attaining in some cases a width of as much as 3 mm. Some of these cracks were found to extend as deep as 2 m below the surface of the respective blocks (133). At the Bratsk Dam, cracks formed at some of the strain gauge positions and this enabled an evaluation to be made of the conditions of the crack formation (39).

Crosthwaite et al (34) have reported detailed temperature measurements at the Nant-y-Moch and Stwlan Dams in Wales which indicated that as a general rule, steeper temperature gradients occur during cooling than during the initial heating period. Strains caused by cooling would thus appear to be more severe in effect since they are tensile and are both derived from steeper temperature gradients and experienced by an older, more rigid material.

## 7.2. Observations and interpretation.

7.2.1. *Methods of measurement.* Perhaps due to its importance, as well as the ease and simplicity of its measurement, temperature is the parameter most frequently measured in dams. However, relatively little has been written about the interpretation and use to which the measurements are put.

Temperatures of the concrete may be measured by electrical resistance thermometers, thermistors or thermocouples (109, 120, 121).

Thermistors are said to provide an inexpensive method provided a data logger and computer are already being used or are readily available, since the calibration is non-linear. They give a rapid response and

Lec a également discuté des effets de la température sur le fluage (79) et a également rapporté les recherches faites sur l'existence de fissures et leur nature en fonction de la température (80). La fissuration du béton due à la température fait l'objet de rapports pour un grand nombre de barrages en béton. Au barrage d'Orlik des fissures superficielles se sont produites graduellement au début de la vie du béton atteignant, quelquefois, des largeurs de 3 mm. Quelques-unes de ces fissures avaient une profondeur atteignant 2 m depuis la surface des plots considérés (133). Au barrage de Bratsk des fissures se sont produites aux emplacements de quelques jauges de déformations et cela a permis d'étudier les conditions de formation de ces fissures (39).

Grosthwaite (34) a fait un rapport sur les mesures détaillées de températures effectuées au barrage de Nant-y-Moch et de Stwlan en pays de Galles qui montre que, d'une façon générale, les gradients de température pendant le refroidissement étaient plus importants que pendant la période initiale d'élévation de température. Les efforts causés par le refroidissement apparaissent, ainsi avoir une influence d'autant plus grave que ce sont des tractions et qu'ils sont à la fois le résultat de gradients de température plus élevés et qu'ils affectent un matériau plus ancien et plus rigide.

## 7.2. Observations et interprétation.

7.2.1. *Méthodes de mesure.* Peut-être, en raison de son importance ainsi que de la facilité et de la simplicité de sa mesure, la température est le paramètre qui est le plus fréquemment mesuré dans les barrages. Cependant, on n'a pas beaucoup écrit sur l'interprétation et l'utilisation que peuvent avoir ces mesures.

Les températures du béton peuvent être mesurées par des jauges électriques à résistances, des thermistors ou des thermocouples (109, 120, 121).

On dit que les thermistors donnent une méthode économique pour obtenir des données à condition que l'on dispose d'un ordinateur, car l'étalonnage n'est pas linéaire. Ils donnent une réponse rapide et leurs

their small physical size minimises interference with strain measurement (84, 99, 102).

*7.2.2. Location of temperature measurements.* Care is needed in selection of the position of the measuring points in order to obtain readings from those areas of the concrete where the temperature variations are most significant. In addition, unless required for special purposes, concrete temperature should not be measured at depths smaller than 400 mm because surface conditions may give a misleading impression of the temperature conditions within the mass of the concrete.

Generally temperature measuring instruments are installed during construction and covered by concrete. In some cases holes are left in the concrete and the instruments inserted later when required. For example in the case of the Clywedog Dam (30) deep temperature sensing holes were left in the buttress for the insertion of an independent resistance thermometer element attached to 12 m of pyrotex cable.

If required, measurements of equivalent surface temperatures of mass concrete structures can be accomplished indirectly by observing a time-temperature history at one or more interior points near the exposed surface and deriving the surface temperature variations, from theoretical considerations and the known concrete thermal properties (108). Temperature histories should be selected which are free of the effects of any heat generation resulting from cement hydration during the time period considered.

*7.2.3. Temperature variations in the early life of concrete.* There is a large amount of information on the increase in concrete temperature in the first few days following placing of the concrete in large pours. The gradual reduction in temperature to equilibrium with ambient temperatures during the subsequent period causes the concrete to contract with a consequent risk of cracking where, as is usually the case, the concrete is restrained.

faibles dimensions réduisent l'interférence avec les mesures de déformations (84, 99, 102).

*7.2.2. Emplacement des appareils de mesure des températures.* Il faut prendre beaucoup de soins en choisissant la position des points de mesure si l'on veut obtenir des lectures sur des zones de béton dont les variations de température sont les plus significatives. D'autre part, à moins que cela soit nécessaire pour un but particulier, la température du béton ne doit pas être mesurée à une profondeur inférieure à 400 mm, car les conditions de surface peuvent donner une impression erronée des conditions de température à l'intérieur du béton.

Généralement, les appareils de mesure de température sont installés pendant la période de construction et sont recouverts de béton. Dans quelques cas, on laisse dans le béton des trous à l'intérieur desquels on vient placer, plus tard, les instruments lorsque cela est nécessaire. Par exemple, dans le cas du barrage de Clywedog (30), des trous profonds pour la mesure des températures ont été laissés dans les contreforts afin d'y placer des thermomètres à résistance indépendants reliés à des câbles Pyrotex de 12 m.

Si nécessaire, les mesures des températures superficielles d'ouvrages massifs en béton peuvent être effectuées indirectement en observant l'évolution, avec le temps, de la température en un ou plusieurs points de l'intérieur, près de la surface en question, et en déduisant les variations de température de surface à partir de considérations théoriques et des propriétés thermiques connues du béton (108). Il est nécessaire de choisir une évolution de température qui soit indépendante des effets de la production de chaleur résultant de l'hydratation du ciment pendant la période considérée.

*7.2.3. Variations de température au début de la vie du béton.* Il existe une grande quantité d'informations sur l'augmentation de température du béton, dans les premiers jours, après la mise en place du béton avec des cadences importantes. Le rapprochement progressif de la température du béton de la température ambiante pendant la période suivante produit des contractions du béton avec risque de fissuration si, comme c'est

It is therefore essential that the temperature rise is kept within suitable limits. Temperature measurements in this respect have a very important role to play.

Shortly after construction, steep temperature gradients can occur in large concrete monoliths and may cause cracks beginning at the surfaces. The modification of these temperature gradients by the provision of surface insulation has been investigated by the U.S. Army Corps of Engineers (108). The investigation covered temperature measurements in lines normal to the exposed concrete surfaces to obtain actual temperature gradients and to establish guides for the amount and times of insulation application for optimum benefits. Correlations were also established between thermal strains and the presence or absence of cracks.

During construction of the Karadj arch dam in Iran, a special heat flow study was conducted for one of the lifts (149). Computed and measured temperatures were compared, and a heat flow balance was established between the heat generated by hydration and that carried off by pipe cooling and through the exposed surfaces of the block. The agreement between the computed curve for the average temperature of the block and the temperature measurements was very good.

It was evident that the temperature history of each block, from the time of its placement until it reached an "average annual" condition had a major effect on the measured stresses in this dam. It was concluded that in order to explain the differences between measured and computed stresses, more effort should be placed on analysing temperature changes in the dam, rather than more refined application of the trial-load method.

généralement le cas, le béton est contraint. Il est donc essentiel que les élévations de température soient maintenues à l'intérieur de limites convenables. Les mesures de température ont, à ce sujet, un rôle très important à jouer.

Peu de temps après la construction, des gradients de température élevés peuvent se produire dans les importants ouvrages monolithiques de béton et peuvent provoquer des fissures se produisant au voisinage des surfaces. La modification de ces gradients de température par des dispositifs propres à isoler la surface ont été expérimentés par le U.S. Army Corps of Engineers (108). Les études effectuées ont consisté en mesures de température sur une ligne perpendiculaire aux surfaces de béton exposées pour obtenir les gradients de température en vue de donner des indications sur l'importance et le temps de l'isolation à réaliser pour obtenir les meilleurs résultats. Des corrélations ont également été établies entre les déformations dues aux températures et la présence ou l'absence de fissures.

Pendant la construction du barrage de Karadj en Iran une étude spéciale du dégagement de chaleur a été effectuée pour l'une des levées (149). Les températures prévues et mesurées ont été comparées et un bilan thermique a été établi entre la chaleur produite par l'hydratation et celle éliminée par des tuyaux de refroidissement et celles transitées par les surfaces du plot. La concordance entre la courbe prévue pour la température moyenne du plot et les températures mesurées a été bonne.

Il est évident que l'évolution de la température de chaque plot, depuis le moment de la mise en place du béton jusqu'au moment où il atteint des conditions « annuelles moyennes », a un effet important sur les contraintes mesurées dans le barrage. Il a été indiqué, dans les conclusions, que dans le but d'expliquer les différences entre les contraintes mesurées et prévues, il serait souhaitable d'effectuer des recherches plus poussées pour analyser les variations de température dans le barrage plutôt que de rechercher une application plus fine de la Trial-load méthode.

7.2.4. *Effect of temperature on concrete displacements.* Rocha and others, Xerez and Lamas, and Mizukoshi have analysed the contributions made to observed displacement, strain and stress by temperature and water load (92, 117, 120, 151).

Rocha and others represented thermal conditions by a constant linear variation in temperature across each of a limited number of horizontal planes and introduced a term to account for time dependent deformations. There were indications that the computed values fitted the observations well only when the intervals between computation and correlation were short. No report of an explanation for this phenomenon has been found.

Xerez and Lamas used as a temperature parameter the mean value of the air temperature for a number of days preceding the related observation. They found 28 days to be an appropriate period. Correlation between displacement and temperature and displacement and water load were determined graphically.

### 7.3. Laboratory methods, including use of models.

7.3.1. *Laboratory tests.* The stresses and strains caused by temperature changes are influenced by the coefficient of expansion of the concrete which is normally determined in the laboratory by axial measurements on sheathed concrete specimens in temperature-controlled baths. The thermal expansion coefficient is affected to a large degree by the thermal expansion coefficient of the aggregate since the latter generally occupies 65-80 % of the volume of concrete and its rigidity is greater than that of the hardened cement paste component. The thermal coefficient of expansion of concrete can range from 4.1 microstrain/°C (with marble aggregate) to 14.6 microstrain/°C (with quartzite aggregate) (23).

The heat of hydration of the cement will affect the temperature changes and corresponding stresses and strains in the concrete during the initial period after casting. Standard

7.2.4. *Effets de la température sur les déformations du béton.* Rocha et d'autres, Xerez, Lamas et Mizukoshi ont analysé l'influence des températures et de la charge d'eau sur les déplacements observés, les déformations et les contraintes (92, 117, 120, 157).

Rocha et d'autres représentent les conditions thermiques par une variation linéaire constante de la température à travers un nombre limité de plans horizontaux et introduisent un terme correctif pour tenir compte des déformations en fonction du temps. On indique que les valeurs calculées ne sont conformes aux observations que lorsque les intervalles entre les valeurs calculées et les corrélations sont courts. Aucune explication de ce phénomène n'a été trouvée.

Xerez et Lamas utilisent, comme paramètre de température, la valeur moyenne de température de l'air pour un certain nombre de jours précédant les observations en question. Ils ont constaté que vingt-huit jours paraît être une durée convenable. La corrélation entre déplacement et température et déplacement et charge d'eau a été déterminée graphiquement.

### 7.3. Méthodes de laboratoire, y compris utilisation de modèles.

7.3.1. *Essais de laboratoire.* Les déformations et les contraintes provoquées par les variations de température sont influencés par le coefficient de dilatation du béton qui est normalement déterminé en laboratoire par des mesures axiales sur des éprouvettes de béton, enrobées, maintenues dans des bacs à température contrôlée. Le coefficient de dilatation thermique est affecté, dans une large mesure, par le coefficient de dilatation des granulats car ceux-ci occupent, généralement, 65 à 80 % du volume du béton et leur rigidité est plus grande que celle de la pâte de ciment durcie. Le coefficient thermique de dilatation du béton peut varier de 4,1  $\mu$ /°C (avec des granulats de marbre) à 14,6  $\mu$ /°C (avec des granulats de quartzite) (23).

La chaleur d'hydratation du ciment modifiera les variations de température et les contraintes et déformations correspondantes du béton, pendant la période initiale, après le

laboratory procedures exist for determining the heat of hydration of cement by the heat of solution method (21).

A collection of data on the thermal properties of concrete used for dam construction has been reported under the headings (31) :

- Definition of concrete on which thermal properties are determined.
- Concrete specimens used for tests on thermal properties.
- Test conditions and results.
- Thermal properties of aggregate materials.

7.3.2. *Use of models.* Because of the complexity of the states of stress due to non-uniform temperature variations, thermal studies by models have been carried out (116).

Massinilla and others used a model of slightly tamped sawdust bounded by aluminium sheets. The faces were heated by ducted air. It was reported that temperatures in the model compared satisfactorily with those measured in the dam (86).

Rocha and Serafim found that the materials with the best characteristics for use as models were mortar, perspex and bronze. They adopted a sinusoidal representation of annual temperature variation and of the temperature evolution over a 15 day period, appropriate to Portuguese conditions. Non-uniform effects due to solar radiation were regarded as equivalent to a change in temperature. The method proposed was to study the annual, daily and non-uniform effects separately and then to superimpose the results. Temperature cycles were proposed either by using oil baths with temperature control by heating and cooling coils or by radiant heating and air cooling (116, 128).

Rocha and Da Silveira pointed out that, although their models were an advance over

coulage. Il existe un procédé de laboratoire standard pour déterminer la chaleur d'hydratation du ciment par la méthode de la chaleur de solution (21).

Une quantité de données sur les propriétés thermiques du béton utilisées pour la construction des barrages a été mentionnée sous les titres (31) :

- Définition du béton pour lequel les propriétés thermiques sont fixées.
- Échantillons de béton utilisés pour les essais sur les propriétés thermiques.
- Conditions d'essais et résultats.
- Propriétés thermiques des granulats.

7.3.2. *Utilisation des modèles.* En raison de la complexité des états de contraintes résultant des variations de température non uniformes, des études thermiques, sur modèles, ont été effectuées (116).

Massinilla et d'autres ont utilisé un modèle réalisé en sciure de bois légèrement compactée, incluse entre deux feuilles d'aluminium. Les faces étaient chauffées par air pulsé. Il a été indiqué que la concordance des températures du modèle avec celles mesurées dans le barrage a été satisfaisante (85).

Rocha et Serafim ont trouvé que les matériaux qui ont les meilleures caractéristiques pour l'utilisation comme modèle sont le mortier, le perspex et le bronze. Ils ont adopté une représentation sinusoïdale des variations de températures annuelles et de l'évolution de température sur une période de quinze jours, valable pour les conditions au Portugal. Les effets non uniformes résultant du rayonnement solaire ont été considérés comme étant équivalents à une variation de température. La méthode proposée consistait à étudier, séparément, les effets annuels, journaliers, et non uniformes et de superposer les résultats. Les cycles de température étaient réalisés soit en utilisant des bains d'huile, avec contrôle de température au moyen de serpentins chauffants ou refroidissants, soit par un chauffage par radiations et refroidissement par air (116, 128).

Rocha et Da Silveira soulignent que, bien que leurs modèles constituent un progrès sur

analytical methods for the determination of thermal stress, they were not able to represent the effects of temperature on creep or the effect of the generation and dissipation of heat of hydration during the early life of the concrete.

Disadvantages of the materials chosen for models were noted as follows.

The great thermal diffusivity of metals reduces time scales and makes it difficult to reproduce short period waves. Plastics (polyethylene, polyester and acrylic) have properties which vary with temperature and have high Poisson's ratio. Strain gauges to measure temperature strains in plastics were not available. Micro-concrete needs accurate moulds, gives a rather small time scale for linear scales below 1/200 and requires a somewhat large temperature range (113).

It was found that one day and fifteen day period temperature effects were very difficult to reproduce. Plaster diatomite was eventually chosen as a model material. The models were coated in cold vulcanisable rubber and temperature control was obtained by using water baths with hot and cold water circulating in coils. The mechanical and thermal properties of the material of the models were determined by tests and hence the principal stresses were calculated from the measurements of strain and temperature (115).

Mori chose epoxy resin as a suitable material for models since its modulus of elasticity does not change appreciably at temperatures below about 50 °C. Thermal diffusivity is fairly small resulting in reasonable time scales. The coefficient of expansion is very large so that little variation of temperature need be applied to the model. The effect of foundation restraint was studied by cementing epoxy resin models to steel foundation blocks. The frozen stress technique was attempted in order to determine 3-dimensional stress conditions.

les méthodes analytiques pour la détermination des efforts thermiques, ils n'étaient pas capables de représenter les effets de la température sur le fluage ou les effets de la production et dissipation de chaleur d'hydratation pendant le début de vie du béton.

Les inconvénients des matériaux choisis pour les modèles sont les suivants.

La grande conduction thermique des matériaux réduit l'échelle de temps et rend difficile la production de variations de courtes périodes. Les plastiques (polyéthylène, polyester et résine acrylique) ont des propriétés qui varient avec la température et ont un coefficient de Poisson élevé. Des jauges de déformation pour mesurer des contraintes de températures dans les plastiques n'existent pas. Les micro-bétons nécessitent des moules précis et donnent des échelles de temps plutôt réduites pour des échelles linéaires inférieures à 1/200 et nécessitent des éventails de températures plutôt élevés (113).

On a constaté qu'il était très difficile de reproduire les effets de température de périodes de un à quinze jours. Du plâtre de diatomite a été parfois choisi comme matériaux pour modèle. Les modèles ont été enrobés de caoutchouc vulcanisé à froid et les contrôles de température effectués en utilisant des bains d'eau chauffés ou refroidis par des serpentins. Les propriétés mécaniques et thermiques des matériaux des modèles ont été déterminées par des essais et les principaux efforts ont été calculés en partant des mesures de déformation et de température (115).

Mori a choisi des résines époxy qu'il considère comme matériau convenable pour des modèles car leur module d'élasticité ne varie pas de façon notable avec les températures au-dessous de 50 °C. La diffusion thermique est plutôt faibles ce qui donne des échelles de temps raisonnables. Le coefficient de dilatation est très élevé, si bien qu'il suffit d'appliquer au modèle de faibles variations de température. Les effets de contraintes des fondations ont été étudiés en cimentant les modèles en résine époxy sur des blocs de fondations en acier. La technique des mesures de contraintes au gel a été utilisée pour la détermination des conditions de contraintes tri-dimensionnelles.

Stresses due to thermal shock in a model of a gravity dam were analysed. In this case the upstream and downstream faces of the epoxy resin were cased in a thin copper plate and the temperature of each was controlled independently by water circulation. Models were tested of which the sides were alternatively exposed to the air or insulated. The results of photoelastic tests were confirmed by testing a similar model instrumented with resistance strain gauges and thermocouples. In this case oil instead of water was circulated for temperature control. Temperature corrections for measured strains were fairly large. Investigations showed that the accuracy of stresses obtained was satisfactory (94).

Lauletta reported on models of pumice concrete, which also gives fairly convenient scales, used to determine the effects of seasonal temperature changes, including those of the reservoir. Heating was achieved by rectangular resistance warming pads in horizontal strips on the two faces of the model, controlled by a set of auto-transformers. Temperature was controlled and measured by thermocouples. Displacements were measured and stresses were calculated from the difference between the free thermal strains and the strains observed in the models. It was considered necessary that discontinuities introduced by joints should be represented in the models, since these sometimes "cut" the thermal stresses and also that all loads should be simulated simultaneously with temperature, although this was not attempted in the tests reported (77).

#### 7.4. Theoretical and empirical methods.

Browne has published values for the effects of volume of aggregate, silica content, moisture state and aggregate expansion on the thermal movement of the concrete (22). Data on the thermal properties of concrete used

Les contraintes résultant du choc thermique sur le modèle d'un barrage poids ont été analysées. Pour cette étude, les faces amont et aval de la résine époxy ont été revêtues d'une mince plaque de cuivre et les températures de chacune de ces plaques ont été contrôlées, indépendamment, par circulation d'eau. Des modèles ont été utilisés dont les faces étaient alternativement exposées à l'air ou isolées. Les résultats des essais photoélastiques ont été confirmés par les essais d'un modèle semblable équipé de jauges de déformation à résistances et de thermocouples. Dans ce cas, on a utilisé, comme fluide de contrôle de température, de l'huile à la place d'eau. Les corrections de température pour les déformations mesurées étaient assez importantes. Les études montrent que l'exactitude des contraintes obtenues était satisfaisante (94).

Lauletta a fait un rapport sur des modèles en béton de ponce, qui donnent également des échelles assez convenables, qui ont été utilisés pour déterminer les effets de variations de températures saisonnières, y compris celles du réservoir. Le chauffage était réalisé au moyen de résistances rectangulaires, chauffant des éléments en couches horizontales, sur les deux faces du modèle contrôlé par un jeu d'autotransformateurs. Les températures étaient contrôlées et mesurées par thermocouples. Les déplacements étaient mesurés et les contraintes calculées en partant des différences entre les déformations thermiques naturelles et les déformations observées dans le modèle. On a constaté qu'il était nécessaire de tenir compte, dans le modèle, des discontinuités introduites par les joints, car, quelquefois, elles « coupent » les contraintes thermiques. On a trouvé, également que toutes les charges doivent être simulées en même temps que la température bien que ce ne soit pas le cas dans les essais rapportés (77).

#### 7.4. Méthodes théoriques et empiriques

Browne a publié des valeurs pour les effets du volume des granulats, de la teneur en Silice, de l'état d'humidité et de la dilatation des granulats sur les mouvements thermiques du béton (22). Des données sur les propriétés

for dam construction have been published, as noted in Section 7.3. above (31).

Babuska and Majzlik have described the analysis of thermal stresses in gravity dams in relation to height of lifts and heat of hydration of cement, allowing for variable air temperature and mixing temperature and time-dependence of the modulus of elasticity. The calculated temperatures and stresses were compared with the observed results (13).

Ribeiro studied the temperature rise due to hydration of cement followed by cooling. The method of Schmidt was employed for the study of heating and the theory of heat transmission in solids for cooling (109).

Variations of temperature within the concrete of a dam can be calculated by the theory published by Bourgin (19), allowing for the effect of diffusivity and the thermal inertia of the concrete.

Glover has published a method of calculating the average temperature of the concrete assuming that both faces are at equal temperatures at all times. This assumption can sometimes be accepted without serious error (49).

Various empirical expressions have been developed for estimating the annual variation in average temperature of concrete above or below the mean as a function of the thickness of concrete, for example the U.S. Bureau of Reclamation suggested :

$$\frac{50}{1 + 0.9 t} \text{ } ^\circ\text{F},$$

where  $t$  is the thickness of section in feet, which converts to

$$\frac{27.8}{1 + 2.952 t'} \text{ } ^\circ\text{C}$$

with  $t'$  in metres.

However, the actual conditions of exposure of the dam should always be taken into account where possible for calculations of any degree of refinement (146).

thermiques du béton utilisé pour la construction des barrages, ont été publiées comme il est indiqué dans la section 7.3., ci-dessus (31).

Babuska et Majzlik ont décrit l'analyse des contraintes thermiques de barrages poids en fonction de la hauteur des levées et de la chaleur d'hydratation du ciment, tenant compte des variations de température de l'air, de la température de gâchage du béton et de la variation, avec le temps, du module d'élasticité. Les températures et contraintes calculées ont été comparées aux résultats pratiques observés (13).

Ribeiro a étudié les élévations de températures dues à l'hydratation du ciment suivies du refroidissement. La méthode de Schmidt a été utilisée pour l'étude de l'échauffement et la théorie de la transmission de chaleur dans les solides pour le refroidissement (109).

Les variations de température à l'intérieur du béton d'un barrage peuvent être calculées par la théorie publiée par Bourgin (19), tenant compte des effets de diffusivité et d'inertie thermique du béton.

Glover a publié une méthode pour calculer la température moyenne du béton, en supposant que les deux faces sont à la même température, à n'importe quel moment. Cette hypothèse peut, parfois, être admise sans erreurs sérieuses (49).

Différentes expressions empiriques ont été données pour estimer les variations annuelles de la température moyenne du béton au-dessus et au-dessous de la moyenne en fonction de l'épaisseur du béton. Par exemple, l'U.S. Bureau of Reclamation suggère :

$$\frac{50}{1 + 0.9 t} \text{ } ^\circ\text{F},$$

où  $t$  est l'épaisseur de la section en pieds, ce qui conduit à

$$\frac{27,8}{1 + 2,952 t'} \text{ } ^\circ\text{C},$$

où  $t'$  est exprimé en mètres.

Cependant, les conditions pratiques d'exposition du barrage doivent toujours être prises en compte si l'on veut effectuer un calcul avec quelque précision (146).

## 8. CONCLUSIONS

The following are tentative conclusions drawn from this report.

### 8.1.

It is evident that a large number of test procedures have been developed to measure the effects of shrinkage, creep and temperature on concrete. Whilst many of these tests have proved satisfactory, there is a clear need for the further development of improved methods to determine the response of concrete to load and environmental changes.

### 8.2.

The determination of absolute stresses from strain measurements in a large body of concrete is generally influenced by many factors, notably a varying two or three dimensional stress system, volume changes due to variations in temperature and moisture conditions, and autogenous volume changes. The behaviour of the concrete under all these varying factors cannot be predicted accurately in the present state of knowledge and it is therefore not possible to determine precisely the resulting absolute stresses. As a consequence, it is unrealistic to expect good agreement between design, model test results and observations of the behaviour of the dam insitu.

### 8.3.

A great deal of research is still required to discover the manner in which stresses are established due to internal or external restraint on the concrete, in the first few months after placing. During this early period, the volume changes in each lift of concrete are considerably influenced by the effects of concrete placed in surrounding lifts.

## 8. CONCLUSIONS

Les conclusions suivantes sont celles que l'on peut proposer pour ce rapport.

### 8.1.

Il est évident qu'un grand nombre de procédés ont été utilisés pour mesurer les effets du retrait, du fluage et de la température du béton. Bien que plusieurs de ces essais se soient montrés satisfaisants, il y a un besoin évident de nouvelles méthodes améliorées pour déterminer les réactions du béton à la charge et aux changements de conditions ambiantes.

### 8.2.

La détermination de la valeur absolue des contraintes à partir des mesures de déformations dans un ouvrage important en béton est généralement influencée par de nombreux facteurs, notamment la variation d'un système de contraintes bi ou tri-dimensionnelles, les variations de volume dues aux variations de température et d'humidité et les variations de volume intrinsèques. Le comportement du béton sous l'influence des variations de tous ces facteurs ne peut être prévu de façon exacte dans l'état actuel de nos connaissances, et il est, par conséquent, impossible de déterminer avec précision les contraintes résultantes absolues. En conséquence, il ne serait pas réaliste d'attendre une bonne concordance entre les études, les résultats des essais sur modèle et les observations sur le comportement du barrage in situ.

### 8.3.

De nombreuses recherches sont encore nécessaires pour découvrir la façon dont les efforts dus aux contraintes internes ou externes du béton se développent dans les premiers mois après le bétonnage. Pendant cette période, les variations de volume dans chaque levée de béton sont considérablement influencées par l'effet du béton des levées voisines.

#### 8.4.

Given the great interest in determining stresses independently of the relationship between stresses and strains, the need is acknowledged of further studies with a view to improving the present methods of direct determination of stresses in concrete or to developing new methods.

#### 8.5.

It is considered that further study is required to establish methods of separating observed strains, stresses and displacements into their components due to water load, temperature, shrinkage, creep and possibly other causes, and to extend such methods to predict strains, stresses and displacements under the most severe conditions of water load, temperature, shrinkage and creep which might occur.

#### 8.4.

Étant donné le grand intérêt qu'il y a à déterminer les contraintes indépendamment des relations existantes entre contraintes et déformations, le besoin se fait sentir d'effectuer de nouvelles études en vue d'améliorer les méthodes existantes de détermination directe des contraintes dans le béton, ou de découvrir d'autres méthodes.

#### 8.5.

On considère qu'il est nécessaire d'effectuer de nouvelles études pour définir les méthodes propres à séparer les déformations, les contraintes et les déplacements observés dans leurs principaux composants en fonction de la charge d'eau, de la température, du retrait, du fluage et des autres causes possibles et pour étendre de telles méthodes à la prévision des déformations, des contraintes et des déplacements, sous les conditions les plus dures de charge d'eau, de température, de retrait et de fluage qui peuvent se produire.

## References

1. A.C.I. Committee 207, " Mass concrete for dams and other massive concrete structures ", A.C.I. Journal, Proc. V. 67, No 4, April, 1970, pp. 273-309.
2. A.C.I. Publication S.P.-27, " Designing for the effects of creep, shrinkage, temperature in concrete structures ".
3. A.C.I. Committee 209 report, " Effects of concrete constituents, environment and stress on creep and shrinkage of concrete ", A.C.I. Publication S.P.-27.
4. *Ibid.*, " Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures ", A.C.I. Publication S.P.-27.
5. A.C.I. Publication S.P.-6, Symposium on Mass Concrete, 1963.
6. A.C.I. Committee 207, " Effect of restraint, volume change, and reinforcement on cracking of massive concrete ", A.C.I. Journal, July, 1973, pp. 445-470.
7. ALI I. and KESLER C.E., " Mechanisms of creep in concrete ", A.C.I. Publication S.P.-9, Symposium on Creep of Concrete, 1964.
8. ALLEN D.W., " The calculation of temperature stresses ", Concrete and Constructional Engineering, September 1962, March 1963.
9. ALVAREZ A. and PEREZ-CABO M., R 31, " Control system of the La Barea Dam ", 10th International Congress on Large Dams, Question No 38, 1970.
10. Anonymous, " Testing methods used by laboratories for shrinkage of concrete ", R.I.L.E.M. Bulletin No 21, December, 1963, pp. 59-63.
11. ARREDI F., " Frost action on concrete permeability and determination of freezability by permeability measurement ", Final

## Références

1. Comité 207 de l'A.C.I., « Béton de masse pour les barrages et autres ouvrages massifs en béton ». Journal A.C.I. Proc. V.67 n° 4, avril 1970, pp. 273-309.
2. Publication S.P.-27 de l'A.C.I., « Étude des effets du fluage, du retrait et de la température dans les ouvrages en béton ».
3. Comité 209 de l'A.C.I., rapport, « Effets des constituants du béton de l'environnement et des efforts sur le fluage et le retrait du béton ». Publication S.P.-27 de l'A.C.I.
4. « Prédiction des effets du fluage, du retrait et de la température sur les ouvrages en béton ». Publication S.P.-27 de l'A.C.I.
5. Publication S.P.-6 de l'A.C.I., Symposium sur les bétons massifs, 1963.
6. Comité 207 de l'A.C.I., « Effets des contraintes des changements de volume et des armatures sur la fissuration des bétons de masse ». Journal de l'A.C.I., juillet 1973, p. 445-470.
7. ALI I. et KESLER C.E., « Mécanismes du fluage du béton ». Publication S.P.-9 de l'A.C.I. Symposium sur le fluage du béton, 1964.
8. ALLEN D.W., « Calcul des contraintes de température ». Concrete and Constructional Engineering, septembre 1972, mars 1963.
9. ALVAREZ A. et PEREZ-CABO M., R 31, « Dispositif de contrôle du barrage de LA BAREA » 10<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 38, 1970.
10. Anonyme, « Méthodes d'essais utilisés par les laboratoires pour le retrait du béton » Bulletin n° 21 de la R.I.L.E.M., décembre 1963, pp. 59-63.
11. ARREDI F., « Action du gel sur la perméabilité du béton et détermination de la gélivité par la mesure de la perméabilité ».

- Report of the International Symposium 1961 on Durability of Concrete, R.I.L.E.M., 1961.
12. A.S.C.E.-U.S.C.O.L.D. Joint Committee, "Current U.S. practice in the design and construction of arch dams, embankment dams, concrete gravity dams", A.S.C.E., 1967.
13. BABUSKA I. and MEJZLIK L., R 59, "Calculation and measurement of thermal stresses in gravity dams", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.
14. BAZANT Z.P., "Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus", A.C.I. Journal, April, 1972.
15. BERES L., "Physical and chemical causes of creep and shrinkage in concrete", R.I.L.E.M. March/April 1969, No. 8, pp. 103-162.
16. BERGSTROM S.G., R 70, "Comparison of non-destructive methods of observation used in freezing and thawing tests of concrete", Report of Sub-Committee on Concrete of I.C.O.L.D. on "Frost resistance of concrete and on the definition of concrete mixes", paper No. 2, 5th International Congress on Large Dams, 1955.
17. BEST C.H., PIRTZ D. and POLIVKA M., "A loading system for creep studies of concrete", A.S.T.M. Bulletin N° 244, September, 1957, pp. 44-47.
18. BOHMER H. and WOGGRIN A., R 50, "Concrete with low cement content", 5th International Congress on Large Dams, Question No. 19, 1955.
19. BOURGIN A., "Design of Dams", Paris, 1948, translated by Fergusson.
20. BRANSON D.E. and CHRISTIASON M.L., "Time dependent concrete properties related to design strength and elastic properties, creep and shrinkage", A.C.I. Publication S.P.-27.
21. British Standard B.S. 1370 : 1958. Low heat Portland cement.
- Rapport final du Symposium international de 1961 sur la pérennité du béton, R.I.L.E.M. 1961.
12. Comité groupé A.S.C.E.-U.S.C.O.L.D., « Pratique courante aux États-Unis pour l'étude et la construction des barrages voutes, des digues et des barrages poids en béton ». A.S.C.E., 1967.
13. BABUSKA I. et MEJZLIK L., R 59, « Calcul et mesure des contraintes thermiques dans les barrages poids ». 6<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 21, 1958.
14. BAZANT Z.P., « Prévision des effets du fluage du béton par la méthode du module réel ajusté avec le temps ». Journal A.C.I., avril 1972.
15. BERES L. « Causes physiques et chimiques du retrait du béton », R.I.L.E.M. mars/avril 1969, n° 8, pp. 103-162.
16. BERGSTROM S.G., R 70, « Comparaison des méthodes d'observation non destructives pour les essais de gel et dégel du béton ». Rapport du sous-comité du béton de la C.I.G.B. sur « la résistance au gel du béton et la définition des mélanges du béton ». Document n° 2, 5<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, 1955.
17. BEST C.H., PIRTZ D. et POLIVKA, « Un dispositif de mise en charge pour les études du fluage du béton ». Bulletin A.S.T.M., n° 244, septembre 1957, p. 44-47.
18. BOHMER H. et WOGGRIN A., R 50, « Béton à faible dosage en ciment ». 5<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 19, 1955.
19. BOURGIN A., « Projets des barrages », Paris 1948, traduit en anglais par Fergusson.
20. BRANSON D.E. et CHRISTIASON M.L., « Les propriétés du béton fonction du temps dans l'étude de la résistance, des propriétés élastiques, du fluage et du retrait ». Publication A.C.I., S.P.-27.
21. British Standard B.S. 1370 : 1958, « Ciment Portland à faible chaleur d'hydratation ».

22. BROWNE R.D., " Thermal movement of concrete ", Current Practice Sheets on Properties of Concrete, Concrete, November, 1972, Vol. 6, No. 11.
23. BROWNE R.D., " Properties of concrete in reactor vessels ", Institution of Civil Engineers, London, 1968.
24. BROWNE R.D. and McCURRICH L.H., " Measurement of strain in concrete pressure vessels ", Prestressed Concrete Pressure Vessels, paper 52, I.C.E. Conference, March, 1967, pp. 615-625.
25. BUETTNER D.R. and HOLLRAH R.L., " Creep recovery of plain concrete ", A.C.I. Journal, Proc. V. 65, No. 6, June, 1968, pp. 452-461.
26. CALOI P. and SPADEA M. C., R 76, " Geophysical interpretations of the first series of triangulations carried out at the Pieve di Cadore Dam ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.
27. CAMPBELL-ALLEN D. and HOLFORD J.-G., " Stress and cracking in concrete due to shrinkage ", Civil Eng. Trans. Australia, C.E.12, No 1, April, 1970, pp. 33-39.
28. CARLSON R.W. and PIRTZ D., " Development of a device for the direct measurement of compressive stress ", A.C.I. Journal, Vol. 24, Proc. V. 49, No. 3, November, 1952.
29. CHUJO K., EITAKA T. and KONDO M., R 23, " The influences of cement finess and content in concrete of dam on permeability and frost resistance ", 5th International Congress on Large Dams, Question No. 19, 1955.
30. C.I.R.I.A. Technical Note 9, " Instrumentation investigations at Clywedog Dam ", April, 1970.
31. " Communication by International Subcommittee on Concrete for Large Dams ", C. 24 (Thermal properties of concrete), 6th International Congress on Large Dams, 1958.
32. COUNTO U.J., " The effect of the elastic modulus of the aggregate on the
22. BROWNE R.D., « Mouvements thermiques du béton », documents sur la pratique courante sur les propriétés du béton, novembre 1972, vol. 6, n° 11.
23. BROWNE R.D. « Propriétés du béton des réacteurs », institution of Civil Engineers, Londres, 1968.
24. BROWNE R.D. et McCURRICH L.H., « Mesure des contraintes du béton des enceintes sous pression », enceintes en béton précontraint, document 52, conférence de l'I.C.E., mars 1967, pp. 615-625.
25. BUETTNER D.R. et HOLLRAH R.L., « Remise en état d'équilibre par fluage du béton ordinaire », journal A.C.I., brochure V. 65, n° 6, juin 1968 pp. 542-461.
26. CALOI P. et SPADEA M.C., R 76, « Interprétations géophysiques des premières séries de triangulation effectuées au barrage de Pieve di Cadore », 6<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 21, 1958.
27. CAMPBELL-ALLEN D. et HOLFORD J.G., « Contraintes et fissures du béton résultant du retrait », Civil Eng. Trans. Australie, C.D. 12, n° 1, avril 1970, pp. 33-39.
28. CARLSON R.W. et PIRTZ D., « Mise au point d'un dispositif pour la mesure directe des efforts de compression », journal A.C.I., vol. 24, brochure V. 49, n° 3, novembre 1952.
29. CHUJO K., EITAKA T. et KONDO M., R 23, « Influence de la finesse et du dosage du ciment des bétons des barrages sur la perméabilité et la résistance au gel », 5<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 19, 1955.
30. CIRIA, note technique 9, « Observations au moyen d'appareils sur le barrage de Clywedog », avril 1970.
31. « Communication du Sous-comité international sur le béton des barrages », C 24 (propriétés thermiques du béton), 6<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, 1958.
32. COUNTO U.J., « Les effets du module élastique des granulats sur le module

- elastic modulus, creep and creep recovery of concrete », Mag. Conc. Research, Sept., 1964, V. 16, No. 48, pp. 129-138.
33. COX F.B., « Small-scale models for studying effects of creep and shrinkage on long-term deflection of reinforced concrete slabs », A.S.T.I.A. Document, U.S. Defense Documentation Centre, July, 1972.
34. CROSTHWAITE C.D., LONGERGAN J. and CAMPBELL D.F., R 8, « On concrete gravity dams. Measurements of strains and temperature in the Nant-y-Moch and Stwlan buttress dams, North Wales », 8th International Congress on Large Dams, Question No. 29, 1964.
35. CURTIS G.R. and PROVAN A.D.H., R 50, « Supervision and management of hydro-electric reservoirs in the North of Scotland », 10th International Congress on Large Dams, Question No. 38, 1970.
36. DAVIS H.E., « Autogenous volume changes of concrete », Proc. A.S.T.M. 40, pp. 1103-1110 (1940).
37. « Determination of the thermoelastic properties of concrete and gravels used in the construction of dams » (translated from Russian), Hydrotechnical Construction, No. 4, April 1967, pp. 326-329.
38. DOLGOPOLOV V. V. « Investigation of the thermal conditions and thermal stress in a buttress dam during fluctuating reservoir level » (translated from Russian), Hydrotechnical Construction, No. 6, June 1969, pp. 736-740.
39. EIDELMAN S. YA and VEDENEEV B.E., R 32, « Measurement of deformations and stresses on the Bratsk Dam on the Angara River », 9th International Congress on Large Dams, Question No. 34, 1967.
40. ELVERY R.H., « Problems associated with the field measurement of stresses in concrete structures. Stresses in Service », I.C.E. Conference, London, March, 1966, pp. 43-55.
41. ENGLAND G.L. and ILLSTON J.M., « Methods of computing stress in concrete élastique, le fluage et le fluage de retour à l'équilibre du béton », Mag. Conc. Research, septembre 1964, V. 16, n° 48, pp. 129-138.
33. COX F.B., « Modèles à échelles réduites pour l'étude des effets du fluage et du retrait à long terme sur les flèches des poutres en béton précontraint », document A.S.T.I.A., U.S. Défense Documentation Center, juillet 1972.
34. CROSTHWAITE C.D., LONGERGAN J. et CAMPBELL D.F., R 8, « Sur les barrages poids en béton, mesure des déformations et des températures sur les barrages à contreforts de Nant-y-Moch et de Stwlan, au Nord de l'Écosse », 8<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 29, 1964.
35. CURTIS G.T. et PROVAN A.D.H., R 50, « Contrôle et exploitation des réservoirs hydroélectriques du Nord de l'Écosse » 10<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 38, 1970.
36. DAVIS H.E., « Changements de volume intrinsèques du béton », Proc. A.S.T.M. 40, pp. 1103-70 (1940).
37. « Détermination des propriétés thermoélastiques du béton et des graviers utilisés pour la construction des barrages » (traduit du Russe), hydrotechnical construction, n° 4, avril 1967, pp. 326-329.
38. DOLGOPOLOV V.V., « Recherche des conditions thermiques et des contraintes thermiques dans un barrage à contreforts au cours des variations de niveau du réservoir » (traduit du Russe), hydrotechnical construction, n° 6, juin 1969, pp. 736-740.
39. EIDELMAN S. YA et VEDENEEV B.E., R 32, « Mesure des déformations et des contraintes sur le barrage de Bratsk sur la rivière Angara », 9<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 34, 1967.
40. ELVERY R.H., « Problèmes connexes des mesures sur chantier des contraintes des ouvrages en béton, contraintes en service », conférence I.C.E. Londres, mars 1966, pp. 43-55.
41. ENGLAND G.L. et ILLSTON J.M., « Méthodes de prévision des contraintes du

- from a history of measured strain ", Civil Engineering and Public Works Review, April, May and June, 1965.
42. ENGLAND G.L. and ROSS A.D., " Reinforced concrete under thermal gradients ", Magazine of Concrete Research, Vol. 14, No. 40, March, 1962.
43. EVANS E.P. and HUGHES B.P., " Shrinkage and thermal cracking in a reinforced concrete retaining wall ", Proc. Instn. Civ. Engrs., 1968, 39 (January), pp. 111-125.
44. DA SILVEIRA A. and FLORENTINO C.A., " Influence of temperature on the creep of mass concrete ", A.C.I. Publication SP.-25, Temperature and Concrete.
45. F.I.P. Sixth Congress, " International recommendations for the design and construction of concrete structures ", C.E.B.-F.I.P., June, 1970, Prague.
46. FRITSCH J., R 70, " Research for laws for the resistance to freezing and thawing of concrete mixtures ", Report of Sub-Committee on Concrete of I.C.O.L.D. on " Frost resistance of concrete and on the definition of concrete mixes ", Paper N° 10, 5th International Congress on Large Dams 1955.
47. GEYMAYER H.G., " Effect of temperature on creep of concrete; a literature review ", A.C.I. Publication S.P.-34, " Concrete for nuclear reactors ", 1972.
48. GILBERT J.R. and STEELE B.W., R 8, " Selection of cement content for large dams ", 5th International Congress on Large Dams, Question No. 19, 1955.
49. GLOVER R.E., " Flow of heat in dams ", Proc. A.C.I., Vol. 31, 1935, pp. 113-124.
50. GOPALAKRISHNAN K. S., NEVILLE A.M. and GHALI A., " Creep Poisson's ratio under multiaxial compression ", A.C.I. Journal, Proc. V-66, No. 12, December, 1969, pp. 1008-1020.
51. GOPALAKRISHNAN K.S., NEVILLE A.M. and GHALI A., " A hypothesis on mechanism of creep ", A.C.I. Journal, V. 67, N° 3, January, 1970, pp. 29-35.
- béton à partir de l'évolution des contraintes mesurées », civil Engineering and Public Works Review, avril, mai et juin 1965.
42. ENGLAND G.L. et ROSS A.D., « Le béton armé soumis à des gradients de température », Magazine of Concrete Research, vol. 14, n° 40, mars 1962.
43. EVANS E.P. et HUGHES B.P., « Fissuration thermique et de retrait dans un mur de soutènement en béton armé », proc. Instn. Civ. Engrs. 1968, 39 (janvier), pp. 111-125.
44. Da SILVEIRA A. et FLORENTINO C.A., « Influence de la température sur les bétons de masse », publication S.P.-25 A.C.I., température et béton.
45. 5<sup>e</sup> Congrès F.I.P., « Recommandations internationales pour l'étude et la construction des ouvrages en béton », C.E.B.-F.I.P., juin 1970, Prague.
46. FRITSCH J., R 70, « Recherche des lois de résistance au gel et dégel des bétons », rapport du sous-comité du béton de la C.I.G.B. sur « la résistance au gel du béton et la définition des bétons », document n° 10, 5<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, 1955.
47. GEYMAYER H.G., « Effet de la température sur le fluage du béton; analyse de la documentation », publication S.P.-34 de l'A.C.I., « Bétons pour réacteurs nucléaires », 1972.
48. GILBERT J.R. et STEELE B.W R. 8, « Choix des dosages de ciment pour les grands barrages », 5<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 19, 1955.
49. GLOVER R.E., « Circulation de la chaleur à l'intérieur des barrages », Proc. A.C.I. vol. 31, 1935, pp. 113-124.
50. GOPALAKRISHNAN K.S., NEVILLE A.M. et CHALI A., « Coefficient de Poisson de fluage sous une compression multiaxiale », journal A.C.I., n° 12, décembre 1969, pp. 1008-1020.
51. GOPALAKRISHNAN K. S., NEVILLE A.M. et GHALI A., « Une hypothèse sur le mécanisme du fluage », journal A.C.I., V. 67, n° 3, janvier 1970, pp. 29-35.

52. GOPALAKRISHNAN K.S., NEVILLE A.M. and GHALI A., " Elastic and time-dependent effects of aggregate-matrix interaction ", *Materials and Structures*, V. 3, No. 16, July/August, 1970, pp. 225-236.
53. GOSSCHALK E.M., " Problems of measuring stress in massive concrete structures ", *Water Power*, May/June, 1970.
54. GOSSCHALK E.M. and ADAM R.J., " Calculation of principal stresses in concrete from measured strains ", *The Engineer*, 25th December. 1964.
55. HANNANT D.J., " Equipment for the measurement of creep of concrete under multi-axial stress ", *R.I.L.E.M.*, Bulletin No. 33, 1966, pp. 421-422.
56. HANSON J.A., " A 10-year study of creep properties of concrete ", *U.S.B.R. Concrete Lab. Report No. S.P.-38*, July 28, 1953.
57. HANSEN T.C. and MATTOCK A.H., " Influence of size and shape of member on the shrinkage and creep of concrete ", *A.C.I. Journal*, Proc. V. 63, No 2, February, 1966.
58. HOUGHTON D.L., " Measures being taken for prevention of cracks in mass concrete at Dworshak and Libby Dams ", *10th International Congress on Large Dams*, Question No. 39, 1970, pp. 241-271.
59. HOUK I.E., BORGE O.E. and HOUGHTON D.L., " Studies of autogenous volume changes in concrete for Dworshak Dam ", *A.C.I. Journal*, Proc. V. 66, No. 7, July, 1969, pp. 560-568.
60. HOUK I.E., PAXTON J.A. and HOUGHTON D.L., " Prediction of thermal stresses and strain capacity of concrete by tests on small beams ", *A.C.I. Journal*, Proc. V. 67, No. 3, March. 1970, pp. 253-261.
61. HOUK I.E. and STEELE B.W., R 43, " Internal temperature and deformation of masonry dams ", *1st International Congress on Large Dams*. Question N° 1 b, 1933.
52. GOPALAKRISHNAN K.S., NEVILLE A.M. et GHALI A., « Effets élastiques et en fonction du temps de l'interaction des granulats », *matériaux and structures*, V. 3, n° 16, juillet-août 1970, pp. 225-236.
53. GOSSCHALK E.M., « Le problème de la mesure des contraintes dans les ouvrages massifs en béton », *Water Power*, mai-juin 1970.
54. GOSSCHALK E.M. et ADAM R.J., « Calcul des contraintes principales du béton à partir des efforts mesurés », *The Engineer*, 25 décembre 1964.
55. HANNANT D.J., « Matériel pour la mesure du fluage du béton sous contraintes multiaxiales », *bulletin R.I.L.E.M.*, n° 33, 1966, pp. 421-422.
56. HANSON J.A., « 10 ans d'étude des propriétés du fluage du béton », *U.S.B.R. Concrete Laboratory, Rapport n° S.P.-38*, 28 juillet 1953.
57. HANSEN T.C. et MATTOCK A.H., « Influence de la taille et de la forme des éléments sur le retrait et le fluage du béton », *journal A.C.I. Proc. V. 63, n° 2, février 1966*.
58. HOUGHTON D.L., « Mesures prises pour éviter la fissuration du béton de masse des barrages de Dworshak et de Libby 3, 10<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 39, 1970, pp. 241-271.
59. HOUK I.E., BORGE O.E. et HOUGHTON D.L., « Études des variations de volume intrinsèques du béton du barrage de Dworshak », *journal A.C.I., Proc. V. 66, n° 7, juillet 1969, pp. 560-568*.
60. HOUK I.E., PAXTON J.A. et HOUGHTON D.L., « Prévion des contraintes thermiques et de la capacité de résistance aux déformations du béton par des essais sur des petites poutres », *journal A.C.I., Proc. V. 67, mars 1970, pp. 253-261*.
61. HOUK I.E. et STEELE B.W., R 43, « Températures internes et déformation des barrages en maçonnerie », *1<sup>er</sup> congrès international des grands barrages, question n° 1 b, 1933*.

62. HUGHES B.P. and MILLER M.M., " Thermal cracking and movement in reinforced concrete walls ", Proc. Instn. Civ. Engrs., 1970, Supplement (iii).
63. I.C.O.L.D. Report of the Committee on Observation on Dams and Models :  
I " General Considerations on Instrumentation for Concrete Dams ".  
II " Note on the Application of Geodetic Methods to the Determination of the Movements of Dams ".  
Bulletin No. 23, July, 1972.
64. *Ibid* :  
— Non-destructive checking on the internal state of materials.  
— Analysis and interpretation of observation data (in preparation).
65. I.C.O.L.D. Report of the Sub-Committee on Concrete on " Frost resistance of concrete and on the definition of concrete mixes ", 5th International Congress on Large Dams, 1955.
66. ILLSTON J.M., " Load cells for concrete creep testing ", Eng. London, V. 195, No. 5054, March, 1963, pp. 318-319.
67. ILLSTON J.M. and JORDAAN I.J., " Creep prediction for concrete under multiaxial stress ", A.C.I. Journal, March, 1972.
68. ILLSTON J.M. and JORDAAN I.J., " Three-dimensional creep measurements in young concrete ", Materials and Structures, Research and Testing, R.I.L.E.M., 1971, No. 24.
69. Japanese National Committee on Large Dams, R 25, " Present status of measurement of structural behaviour of dams in Japan ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.
70. JONES F.E. and LEA F.M., R 70, " Methods of carrying out freezing and thawing tests on concrete ", Report of Sub-Committee on Concrete of I.C.O.L.D. on " Frost resistance of concrete and on the definition of concrete mixes", Paper No. 1, 5th International Congress on Large Dams, 1955.
62. HUGHES B.P. et MILLER M.M., « Fissures thermiques et mouvement des murs en béton armé », Proc. Instn. Civ. Engrs. 1970, supplement (iii).
63. C.I.G.B., Rapport du Comité d'observation des barrages et modèles :  
I — « Considérations générales sur l'appareillage pour les barrages en béton ».  
II — « Note sur l'application des mesures géodésiques à la détermination des mouvements des barrages », bulletin n° 23, juillet 1972.
64. *Idem* :  
— Essais non destructifs de l'état interne des matériaux.  
— Analyse et interprétation des observations (en préparation).
65. C.I.G.B., rapport du sous-comité des bétons sur « La résistance au gel du béton et la définition des bétons », 3<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, 1955.
66. ILLSTON J.M., « Cellules de charge pour la mesure du fluage du béton », Eng. Londres, V. 195, n° 5054, mars 1963, pp. 318-319.
67. ILLSTON J.M. et JORDAAN I.J., « Prévision du fluage du béton sous contraintes multiaxiales », journal A.C.I., mars 1972.
68. ILLSTON J.M. et JORDAAN I.J., « Mesures du fluage triaxial du béton jeune », Matériaux et Constructions, Recherches et Essais, R.I.L.E.M. 1971, n° 24.
69. Comité National Japonais des grands barrages, R 25, « État actuel des mesures du comportement des barrages au Japon », 6<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 21, 1958.
70. JONES F.E. et LEA F.M., R 70, « Méthode de conduite des essais au gel et dégel du béton », rapport du sous-comité des bétons de la C.I.B.G. sur la « résistance au gel du béton et la définition du béton », document n° 1, 5<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, 1955.

71. JONES K., " Restraint of structures attached to mass concrete ", Proc. A.S.C.E., J. Structural Div., December, 1961.
72. JONES K., " Calculation of stresses from strain in concrete ", U.S. Bureau of Reclamation, Technical Memorandum No. 653, Denver, February, 1955.
73. KIDD R.A. and STOTT J.P., " The construction of an experimental prestressed road at Winthorpe, Nottinghamshire ", Proc. Instn. Civ. Engrs., 1967, 36 (March), pp. 473-498. Also Discussion, Proc. Instn. Civ. Engrs., 1968, 39 (January), pp. 137-146.
74. KORDINA K., " Experiments on the influence of the mineralogical character of aggregates on the creep of concrete ", R.I.L.E.M. Bulletin, New Series, No. 6, March 1960, pp. 7-22.
75. KRUML F., " The study of long term strains in concrete ", Proc. R.I.L.E.M. Symposium on Field Testing of Concrete, Trondheim, 1964, pp. 119-213.
76. LAROCHE C., ZAPPI U. R 46, " The impounding survey at Kariba Dam ", 8th International Congress on Large Dams, Question No. 29, 1964.
77. LAULETTA E., " Thermoelastic tests on arch dam models ", Paper No. 4, Symposium on Concrete Dam Models, L.N.E.C., Lisbon, 1963.
78. LEA F.M. and LEE C.R., " Shrinkage and creep in concrete ", Shrinkage and Cracking in Cementive Materials, The Soc. of Chemical Industry, 1947, pp. 7-17.
79. LEE C.R., R 46, " Creep and shrinkage in restrained concrete ", 4th International Congress on Large Dams, Question No. 15, 1951.
80. LEE C.R., R 10, " Temperature and other factors influencing the cracking of concrete in a dam ", 8th International Congress on Large Dams, Question N° 30, 1964.
81. LOFQUIST B., R 20, " Comparison between a low-heat and a standard cement ",
71. JONES K., « Contraintes des ouvrages liés aux bétons massifs », Proc. A.S.C.E., Structural Div., décembre 1961.
72. JONES K., « Calcul de contraintes à partir des déformations dans le béton ». U.S. Bureau of reclamation, Technical Memorandum, n° 653, Denver, février 1955.
73. KIDD R.A. et STOTT J.P., « Construction de la route expérimentale en béton précontraint à Winthorpe, Nottinghamshire », Proc. Instn. Civ. Engrs. 1967, 36 (mars) pp. 473-498 et Discussion, Proc. Instn. Civ. Engrs. 1968, 38 (janvier), pp. 137-146.
74. KORDINA K., « Expériences sur l'influence du caractère minéralogique des granulats sur le fluage du béton », bulletin R.I.L.E.M. nouvelle série n° 6, mars 1960, pp. 7-22.
75. KRUML F., « Étude des déformations à long terme dans le béton », R.I.L.E.M., Symposium sur les essais de chantier du béton, Trondheim, 1964, pp. 119-213.
76. LAROCHE C., ZAPPI U., R 46, « Contrôle lors de la mise en eau du barrage de Kariba », 8° congrès international des grands barrages, question n° 26, 1964.
77. LAULETTA E., « Essais thermoélastiques sur les modèles de barrages voûte », doc. n° 4, Symposium sur les modèles de barrages en béton, I.N.E.C., Lisbonne, 1963.
78. LEA F.M. et LEE C.R., « Retrait et fluage du béton », retrait et fissuration des matériaux à base de ciment, The Soc. of Chemical Industry, 1947, pp. 7-17.
79. LEE C.R., R 46, « Fluage et retrait du béton sous contrainte », 4° congrès international des grands barrages, question n° 15, 1951.
80. LEE C.R., R 10, « Température et autres facteurs influençant la fissuration des barrages en béton », 8° congrès international des grands barrages, question n° 30, 1964.
81. LOFQUIST B., R 20, « Comparaison d'un ciment à faible chaleur d'hydratation

3rd Interantional Congress on Large Dams, Question No. 11, 1948.

82. LOFQUIST B., R 34, " Notes on Swedish experience of concrete performance in hydraulic structures ", 5th International Congress on Large Dams, Question No. 19, 1955.

83. MAITY K., " The effect of loading history on the creep and creep recovery of sealed and unsealed concrete specimens ", Dissertation Abstracts, V. 32.3 (b) PhD thesis, Univ. of Iowa Microfilms Order No. 71-22, 059, p. 263.

84. MARSHALL A.L., " Temperature measurement in concrete using thermistors ", Civil Engineering and Public Works Review, Vol. 67, No. 796, November, 1972.

85. MARTIN M., " Effect of environmental conditions on thermal variations and shrinkage of concrete structures in the United States ", A.C.I. Publication S.P.-27.

86. MASSINILLA L., ASTARITA G. and GAMBINO A., R 74, " A thermal study of a dam by means of a model ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.

87. McCOY E.E. Jr., THORNTON H.T. and ALLGOOD J.K. " Concrete laboratory studies Dworshak (Bruce's Eddy) Dam, North Fork, Clearwater River near Orofino, Idaho, Creep Tests ", Miscellaneous Paper No. 6-613, Report 2, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, December, 1964.

88. MEAD A.R., " Temperature-instrumentation observations at Pine Flat and Fobson Dams ", A.C.I. Publication S.P.-6, Symposium on Mass Concrete, 1963, pp. 151-178.

89. MEYERS B.L. and BRANSON D.E., " Design aid for predicting creep and shrinkage properties of concrete ", A.C.I. Journal, Proc. V. 69, No. 9, September, 1972.

90. MEYERS B.L., BRANSON D.E. and SCHUMANN C.G., " Prediction of creep

avec un ciment ordinaire », 3<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 11, 1948.

82. LOFQUIST B., R 34, « Note sur l'expérience suédoise sur les performances du béton des ouvrages hydrauliques », 5<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 19, 1955.

83. MAITY K., « Effet du déroulement de la mise en charge sur le fluage et le fluage de retour à l'équilibre d'échantillons de béton cachetés ou non », Dissertation Abstracts, V. 23.3 (b) PhD thesis., univ. of I.O.W.A. Microfilms Order n° 71-22,059, p. 263.

84. MARSHALL A.L., « Mesure des températures dans le béton par utilisation de thermistors », Civil Engineering and Public Work Review, Vol. 67, n° 796, novembre 1972.

85. MARTIN M., « Effet des conditions ambiantes sur les variations thermiques et le retrait des ouvrages en béton aux États-Unis », publications A.C.I., S.P.-27.

86. MASSINILLA L., ASTARITA G. et GAMBINO A., R 74, « Étude thermique d'un barrage au moyen de modèle », 6<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 21, 1958.

87. McCOY E.E., Jr., THORNTON H.T. et ALLGOOD J.K., « Études en laboratoire des essais de fluage des bétons des barrages sur la rivière de Dworshak (Bruce's Eddy), North Fork, Clearwater près d'Orofino, Idaho », différents documents n° 6-613, rapport 2, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, décembre 1964.

88. MEAD A.R., « Appareils de mesure des températures sur les barrages de Pine Flat et Fobson », publication A.C.I., S.P. 6, Symposium sur les bétons de masse, 1963, pp. 151-178.

89. MEYERS B.L. et BRANSON D.E., « Contribution aux études pour prévoir les propriétés de fluage et retrait du béton », journal A.C.I. Proc. n° 9, V. 69, septembre 1972.

90. MEYERS B.L., BRANSON D.E. et SCHUMANN C.G., « Prévission du compor-

- and shrinkage behaviour for design from short term tests », *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol. 17, No. 3, May-June, 1972.
91. MEYERS B.L. and PAUW A. "Apparatus and instrumentation for creep and shrinkage studies ", *Highway Research Board* No. 34, October, 1963.
92. MIZUKOSHI T., "Report on the structural behaviour of the concrete dams due to temperature change ", *Tokyo Electric Power Co. Inc.*, 1970.
93. MIZUKOSHI T. and FUJII T. R 26, "Measurements of the behaviour of Sudagai Dam ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.
94. MORI C., "Experimental determination of thermal stresses in concrete dam models ", Paper No. 1, *Symposium on Concrete Dam Models*, L.N.E.C., Lisbon, 1963.
95. NEVILLE A.M., "Creep of concrete : plain, reinforced and prestressed ", *North-Holland*, 1970.
96. NEVILLE A.M., "Properties of concrete ", London, 1963 (Pitman).
97. NICOL T.B., "Warragamba Dam ", *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, 1964, 27 (March), pp. 491-545.
98. NIELAENDER G.A., R 44, "An investigation of strains and of temperature in the concrete of the Dnieprostroi Dam ", 1st International Congress on Large Dams, Question No. 1b, 1933.
99. NEILSEN K.E.C. and SCHILL I., "Temperature measurement with thermistors in concrete ", *R.I.L.E.M. Symposium on Observation of Structures*, Lisbon, V. 2, 1955, pp. 228-247.
100. ODMAN S., "Crack formation due to shrinkage of reinforced concrete ", *R.I.L.E.M. Bulletin New Series*, No. 9, December, 1960, pp. 100-109.
101. OLESON C.C., "Measurement of volume changes of concrete in service ", *Highway Research Board Special Report*, No. 106, 1970, pp. 41-43.
- tement au fluage et retrait pour les études, à partir d'essais à court terme », *Journal of the Prestressed concrete Institute*, Vol. 17, n° 3, mai-juin 1972.
91. MEYERS B.L. et PAUW A., « Appareillage et instruments pour les études de fluage et de retrait », *Highway Research Board* n° 34, octobre 1963.
92. MIZUKOSHI T., « Rapport sur le comportement intrinsèque du béton des barrages sous les variations de température », *Tokyo Electric Power Co. Inc.*, 1970.
93. MIZUKOSHI T. et FUJII T., R 26, « Mesures du comportement du barrage de Sudagai », 6<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 21, 1958.
94. MORI C., « Détermination expérimentale des efforts thermiques dans les modèles de barrages en béton », *Doc. n° 1, Symposium sur les modèles de barrages en béton* I.N.E.C., Lisbonne, 1963.
95. NEVILLE A.M., « Fluage du béton : ordinaire, armé et précontraint », *Hollande du Nord*, 1970.
96. NEVILLE A.M., « Propriétés du béton », *Londres* 1963 (Pitman).
97. NICOL T.B., « Le barrage de Warragamba », *Proc. Inst. Civ. Engrs.* 1964, 27 mars, pp. 491-545.
98. NIELAENDER C.A., R 44, « L'étude des déformations et des températures du béton du barrage Dnieprostroi », 1<sup>er</sup> congrès international des grands barrages, question n° 1 b, 1933.
99. NIELSEN K.E.C. et SCHILL I., « Mesure des températures du béton thermistors » *R.I.E.L.M., Symposium sur les observations des ouvrages*, Lisbonne, v. 2, 1955, pp. 228-247.
100. ODMANS., « Formation de fissures dues au retrait du béton armé », *R.I.L.E.M., bulletin nouvelle série*, n° 9, décembre 1960, pp. 100-109.
101. OLESON C.C., « Mesure des variations de volume du béton en service », *Highway Research Board, rapport spécial* n° 106, 1970, pp. 141-43.

102. PINFOLD G.M., " Thermistors for temperature measurement in concrete ", Civil Eng. and Public Works Review, London, V. 60, No. 709, August, 1955, p. 1180.
103. POLIVKA M., PIRTZ D. and ADAMS R.F., " Studies of creep in mass concrete ", A.C.I. Publication S.P.-6, Symposium on Mass Concrete, 1963, pp. 257-286.
104. PIRTZ D., " Creep characteristics of mass concrete for Dworshak Dam ", University of California, Report No. 65-2, October 1968.
105. PIRTZ D. and CARLSON R.W., " Tests of strain meters and stress meters under simulated field conditions ", A.C.I. Publication S.P.-6, Symposium on Mass Concrete, 1963, pp. 287-308.
106. RAPHAEL J.M., R 54, " Determination of stress from measurements in concrete dams ", 3rd International Congress on Large Dams, Question No. 9, 1948.
107. RAPHAEL J.M., " The development of stress in Shasta Dam ", Trans. A.S.C.E., Vol. 118, 1953, Paper No. 2547.
108. RHODES J.A., R 7, " Structural behaviour measurements on concrete gravity dams ", 8th International Congress on Large Dams, Question No. 29, 1964.
109. RIBEIRO A.A., C 11, " Study, estimate and observation of the thermal behaviour of Picote Dam ", 6th International Congress on Large Dams, 1958.
110. R.I.L.E.M. Symposium, Prague, 1961, " The effect of surface temperatures on the durability of concrete ", Final Report, pp. 133-153.
111. ROBERTS C.M., " A note on the measuring devices installed in the Mullardoch and Cluanie Dams ", R.I.L.E.M. Symposium on Observations of Structures, Lisbon, 1955, V. 2, pp. 806-823.
112. ROBERTS C.M., WILSON E.B. and WILTSHIRE J.G., " Design aspects of
- 102 PINFOLD G.M., « Les thermistors pour la mesure des températures du béton », Civil Eng. and Public Works Review, Londres, V. 60, n° 709, 1955, p. 1180.
103. POLIVKA M., PIRTZ D. et ADAMS R.F., « Études du fluage du béton de masse », pp. 257-286, publication A.C.I. S.P. 6, symposium sur le béton de masse, 1963.
104. PIRTZ D., « Caractéristiques du fluage du béton de masse du barrage de Dworshak », université de Californie, rapport n° 65-2, octobre 1968.
105. PIRTZ D. et CARLSON R.W., « Essais des appareils de mesure des déformations et contraintes sous des conditions de chantier simulées », publication A.C.I., S.P.-6, symposium sur des bétons de masse, 1963, pp. 287-308.
106. RAPHAEL J.M., R 54, « Détermination des contraintes à partir des mesures effectuées sur les barrages en béton », 3<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 9, 1948.
107. RAPHAEL J.M., « Développement des contraintes dans le barrage de Shasta », trans. A.S.C.E., vol. 118, 1953, doc. n° 2547.
108. RHODES J.A., R 7 « Mesures du comportement des barrages poids en béton », 8<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, question n° 29, 1964.
109. RIBEIRO A.A., C. 11, « Étude prévision, et observation du comportement thermique du barrage de Picote », 6<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, 1958.
110. Symposium R.I.L.E.M., Prague 1961, « Effet des températures de surface sur la pérennité du béton », rapport final, pp. 133-153.
111. ROBERTS C.M., « Note sur l'appareillage de mesure installé dans les barrages de Mullardoch et Cluanie », R.I.L.E.M., Symposium sur l'observation des ouvrages, Lisbonne, 1955, V. 2, pp. 806-823.
112. ROBERTS C.M., WILSON E.B. et WILTSHIRE J.G., « Les projets d'amé-

the Strathfarrar and Kilmorack hydro-electric scheme », Proc. Instn. Civ. Engrs., 1965, 30 (March), pp. 449-487. Also Discussion, Proc. Instn. Civ. Engrs., 1966, 35 (September), pp. 121-144.

113. ROCHA M. and DA SILVEIRA A. F., " The use of models to determine temperature stresses in concrete arch dams ", Paper No. 23, Symposium on Concrete Dam Models ,L.N.E.C., Lisbon, 1963.

114. ROCHA M. and DA SILVEIRA A.F., R 42, " Assessment of observation techniques used in Portuguese concrete dams ", 8th International Congress on Large Dams, Question No. 29, 1964.

115. ROCHA M. and DA SILVEIRA A.F., " Determination of thermal stresses in concrete dams by means of model tests ", A.C.I. Publication S.P.-24, " Models for concrete structures ", 1970.

116. ROCHA M. and SERAFIM J.L., C 17, " Determination of thermal stresses in arch dams by means of models ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.

117. ROCHA M., SERAFIM J.L. and DA SILVEIRA A.F., R 36, " A method of quantitative interpretation of the results obtained in the observations of dams ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.

118. ROCHA M., SERAFIM J.L. and DA SILVEIRA A.F., " Observation of dams, methods and apparatus used in Portugal ", Lisbon, 1955, V. 2, pp. 560-587.

119. ROCHA M., SERAFIM J.L., DA SILVEIRA A.F. and DE CAMPOSE MATOS M.E., R 84, " Model tests and observations Bouca Dam ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.

120. ROCHA M., SERAFIM J.L., DA SILVEIRA A.F. and GUERREIRO M.Q., R 83, " Observations of concrete dams. Results obtained in Cabril Dam ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.

nagement hydro-électriques de Strathfarrar et de Kilmorack », Proc. Inst. Civ. 1965, 30 (mars) p. 449-487. Et discussion, Proc. Inst. Civ. Eng. 1966, 35 (septembre) pp. 121-144.

113. ROCHA M. et DA SILVEIRA A.F., « Utilisation des modèles pour la détermination des contraintes thermiques dans les barrages voûte en béton », doc. n° 23, symposium sur les modèles de barrages voûte, L.N.E.C., Lisbonne, 1963.

114. ROCHA M. et DA SILVEIRA A.F., R 42, « Techniques d'observation utilisées dans les barrages en béton au Portugal », 8<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages question n° 29, 1964.

115. ROCHA M. et DA SILVEIRA A.F., « Détermination des contraintes thermiques dans les barrages en béton au moyen d'essais sur modèles », publication A.C.I. S.P. 24, « Modèles pour ouvrages en béton », 1970.

116. ROCHA M. et SERAFIM J.L., C 17, « Détermination des contraintes thermiques dans les barrages voûte au moyen de modèles », 6<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, question n° 21, 1958.

117. ROCHA M., SERAFIM J.L. et DA SILVEIRA A.F., R 36, « Méthode d'interprétation quantitative des résultats obtenus dans l'observation des barrages », 6<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, question n° 21, 1958.

118. ROCHA M., SERAFIM J.L. et DA SILVEIRA A.F., « Observation des barrages, méthodes et appareillage utilisés au Portugal », Lisbonne 1955, V. 2, p. 560-587.

119. ROCHA M. SERAFIM J.L., DA SILVEIRA A.F. et DE CQMPPOSE MATOS M.P., R 84, « Essais sur modèle et observations du barrage de Vouca », 6<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, question n° 21, 1958.

120. ROCHA M., SERAFIM J.L., DA SILVEIRA A.F. et GUERREIRO M.Q., R 83, « Observations des barrages en Cabril », 6<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, question n° 21, 1958.

121. ROCHA M., SERAFIM J.L., DA SILVEIRA A.F. and RODRIGUES O.V., C 33, " The observation of the behaviour of the Portuguese concrete dams ", 5th International Congress on Large Dams, 1955.
122. ROPER H. and COX J.E., " Petrographic studies on concrete containing shrinking aggregate ", J. Port. Cem. Ass., Vol. 6, No. 3, September, 1964.
123. ROSS A.D., " The creep of Portland Blast Furnace Cement Concrete ", I.C.E. Journal, February, 1938.
124. ROSS A.D., " Experiments on the creep of concrete under two-dimensional stressing ", Magazine of Concrete Research, No. 16, June, 1954.
125. ROSS A.D., " Creep and shrinkage in plain, R.C. and pre-stressed concrete. A general method of calculation ", Journal I.C.E., November, 1943.
126. ROSS A.D., " Creep of concrete under variable stress ", A.C.I. journal, Vol. 29, No. 9, 1958, pp. 739-758.
127. ROSS A.D., " The elasticity, creep and shrinkage of concrete ", conference on " Mechanical properties of non-metallic brittle materials ", April 1958, Butterworths.
128. SERAFIM J.L., " Experimental determination of thermal stress by models ", Discussion on Question No. 21, 6th International Congress on Large Dams, Vol. 2, 1958, pp. 26-28.
129. SERAFIM J.L., " Measurement of strains in the Portuguese concrete dams ", R.I.L.E.M. Symposium on the Observation of structures, Lisbon, 1955, V. 2, pp. 617-648.
130. SERAFIM J.L. and GUERREIRO M., " Some rules used for the observations of concrete dams ", Water Power, May/June, 1970.
131. SIMONDS A.W. and RICHARDSON J.T., R 122, " Observed structural performance of large concrete dams of the Bureau of Reclamation ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.
121. ROCHA M., SERAFIM J.L., DA SILVEIRA A.F. et RODRIGUES O.V., C 33, « L'observation du comportement des barrages en béton portugais », 5<sup>e</sup> congrès international des grands barrages, 1955.
122. ROPER H. et COX J.E. « Études pétrographiques de bétons comportant des granulats ayant du retrait », J. Port. Cem. Ass. Vol. 6, n° 3 septembre 1964.
123. ROSS A.D., « Le fluage du béton au ciment Portland de haut fourneau », journal I.C.E., février 1938.
124. ROSS A.D., « Expériences sur le fluage du béton sous des contraintes bidimensionnelles », Magazine of Concrete Research, n° 16, juin 1954.
125. ROSS A.D., « Fluage et retrait du béton ordinaire, armé et précontraint. Méthode générale de calcul », journal I.C.E., novembre 1943.
126. ROSS A.D., « Fluage du béton sous contraintes variables », journal A.C.I. vol. 29, n° 9, 1958, pp. 739-758.
127. ROSS A.D., « Élasticité, fluage et retrait du béton », conférence sur « les propriétés mécaniques des matériaux fragiles non métalliques », avril 1958, Butterworths.
128. SERAFIM J.L., « Détermination expérimentale des contraintes thermiques sur modèles », Discussion sur la question n° 21, 6<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, vol. 11, 1958, pp. 26-28.
129. SERAFIM J. L., « Mesure des déformations dans les barrages en béton portugais » R.I.L.E.M., symposium sur l'observation des ouvrages, Lisbonne 1955, V. 2, pp. 617-648.
130. SERAFIM J.L. et GUERREIRO M., « Quelques règles utilisées pour l'observation des barrages en béton » Water Power, mai-juin 1970.
131. SIMONDS A.W. et RICHARDSON J.T., R 122, « Observation du comportement des grands barrages en béton du Bureau of Reclamation », 6<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, question n° 21, 1958.

132. SIMS F.W., RHODES J.A. and CLOUGH R.W., " Cracking in Norfolk Dam ", A.C.I., Journal, Vol. 61, No. 3, March, 1964, pp. 265-285.
133. STADNIK V., R 21, " Measurements of the thermal effects and properties of the insitu concrete of the Orlik gravity dam ", 8th International Congress on Large Dams, Question No. 30, 1964.
134. STODOLA P.R., O'ROUKE J.E. and SCHOON H.G., " Concrete core block for Oroville Dam ", A.C.I. Journal, Vol. 62, No. 6, June, 1965, pp. 617-635.
135. " Stresses in the Krasnoyarsk Dam during construction and during operation " (translated from Russian), Hydrotechnical Construction, No. 4, April, 1971, pp. 326-333.
136. TAKANO S., C 11, " Study on the effect of placing temperature upon the strength of mass concrete ", 5th International Congress on Large Dams, 1955.
137. TASHIRO N. and KIMISHIMA H., R 24, " A review on measured results and computed estimations in the analysis of Kamishiba arch dam ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.
138. TERRACINI C., R 7, " Behaviour of Alpe Gera gravity dam in its early operational stages. Comparison between the measurements insitu and analytical and experimental results ", 10th International Congress on Large Dams, Question No. 39, 1970.
139. TROXELL G.A., RAPHAEL J.M. and DAVIS R.E., " Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete ", A.S.T.M. Proceedings, Vol. 58, 1958, pp. 1101-1120.
140. TYLER R.G., " Determining stress in concrete structures ", Civil Engineering and Public Works Review, June and July 1969.
141. TYLER R.G., " Developments in the measurement of strain and stress in concrete bridge structures ", Ministry of
132. SIMS F.M., RHODES J.A. et CLOUGH R.W., « Fissuration du barrage de Norfolk », journal A.C.I., vol. 61, n° 3, mars 1964, pp. 264-285.
133. STADNIK V., R 21, « Mesures in situ des effets thermiques et des propriétés du béton du barrage poids d'Orlik », 8<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, question n° 30, 1964.
134. STODOLA P.R., O'ROUKE J.E. et SCHOON H.G., « Plots de béton du noyau pour le barrage d'Oroville », journal A.C.I., vol. 62, n° 6, juin 1965, pp. 617-635.
135. « Contraintes dans le barrage de Krasnoyarsk pendant la construction et pendant l'exploitation » (traduit du russe) Hydrotechnical Construction, n° 4, avril 1971, pp. 326-333.
136. TAKANO S., C 11, « Étude de l'effet de la température au moment de la mise en place sur la résistance du béton de masse ». 5<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, 1955.
137. TASHIRO N. et KIMISHIMA H., R 24, « Synthèse des résultats de mesure et des prévisions dans l'analyse du barrage voûte de Kamishiba », 6<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, question n° 21, 1958.
138. TERRACINI C., R 7, « Comportement du barrage poids d'Alpe Gera au début de son exploitation, comparaison des mesures in situ avec les résultats analytiques et expérimentaux », 10<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, question n° 39, 1970.
139. TROXELL G.E., RAPHAEL J.M. et DAVIS R.E., « Essais de fluage et de retrait à long terme du béton ordinaire et armé », A.S.T.M. Proceedings, vol. 58, 1958, pp. 1101-1120.
140. TYLER R.G., « Détermination des contraintes dans les ouvrages en béton », Civil Engineering and public works review, juin et juillet 1969.
141. TYLER R.G., « Progrès dans la mesure des déformations et des contraintes dans les éléments de pont en béton », Ministry of

- Transport, R.R.L. Report No. 189, Crowthorne, 1968 (Road Research Laboratory).
142. U.S. Bureau of Reclamation Concrete Laboratory Report, No. C-787 (16.3.55), " Investigations of creep characteristics of Ross Dam concrete ".
143. U.S. Bureau of Reclamation Concrete and Structural Branch Laboratory Report No. C-1033, " A loading system for compression creep studies on concrete cylinders ", Denver (22.6.62), pp. 16 et seq.
144. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Kortes Dam and Powerplant. Technical record of design and construction, December, 1959.
145. U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Monticello Dam. Technical record of design and construction. March, 1959.
146. U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Treatise on Dams, Chapter 10, Arch Dams, pp. 40-41, 524-530.
147. VAN WYK H.F., " Aspects of thermal stresses in R.C. structures subjected to differential temperature change ", R.I.L.E.M. Symposium on Concreting in Hot Countries, Haifa, V. 2, 1960.
148. VASILEV S. and MIHAILOV M., R 27, " Deformations owing to the irregular change of the moisture in the dams ", 8th International Congress on Large Dams, Question No. 30, 1964.
149. VELTROP J.A., WENGLER R.P. and AZRI S., R 6, " Structural behaviour of Karadj arch dam ", 8th International Congress on Large Dams, Question No. 29, 1964.
150. VOGT F., R 41, " Temperature straining in thick concrete dams ", 1st International Congress on Large Dams, Question No. 1b, 1933.
151. XEREZ A.C. and LAMAS J.F., R 39, " Methods of analysis of arch dam behaviour ", 6th International Congress on Large Dams, Question No. 21, 1958.
- transport, R.R.L. rapport n° 189, Crowthorne 1968 (Road Research Laboratory).
142. Rapport du laboratoire de l'U.S. Bureau of Reclamation, n° C-787 (16.3.55), « Recherche des caractéristiques de fluage du barrage en béton de Ross ».
143. Rapport n° C 1033 de l'U.S. Bureau of Reclamation Concrete and Structural Branch Laboratory, « Un dispositif de charge pour les études de fluage à la compression de cylindres en béton », Denver (22.6.62), pp. 16 et suivantes.
144. US Department of the Interior Bureau of reclamation, « Le barrage de Kortes et son usine, caractéristiques techniques d'étude et de construction » décembre 1959.
145. U.S. Department of the Interior Bureau of reclamation, « Barrage de Monticello, caractéristiques techniques d'étude et de construction », mars 1959.
146. U.S. Department of the Interior Bureau of reclamation, « Traité sur les barrages, chap. 10, barrages voûte », pp. 40-41, 524-530.
147. VAN WYK H.F., « Aspects des contraintes thermiques des ouvrages en béton armé soumis à des variations de température », R.I.L.E.M. Symposium sur le bétonnage dans les pays chauds, Haifa, V. 2, 1960.
148. VASILEV S. et MIHAILOV M., R 27, Déformations dues aux variations irrégulières de l'humidité dans les barrages », 8<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages question n° 30, 1964.
149. VELTROP J.A., WENGLER R.P. et AZRIS S., R 6, « Comportement de la structure du barrage voûte de Karadj », 8<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages question n° 29, 1964.
150. VOGT F., R 41, « Déformation de température dans les barrages épais en béton », 1<sup>er</sup> Congrès International des Grands Barrages, question n° 1 b, 1933.
151. XEREZ A.C. et LAMAS J.F., R 39, « Méthodes d'analyse du comportement des barrages voûtes », 6<sup>e</sup> Congrès International des Grands Barrages, question n° 21, 1958.

152. YOUNG W. and FALKINER R.H., "Some design and construction features of the Cruachan pumped storage project", Proc. Instn. Civ. Engrs., 1966, 35 (November), pp. 407-450. Also Discussion, Proc. Instn. Civ. Engrs., 1967, 37 (August), pp. 651-684.
153. ZIENKIEWICZ O.C., "Analysis of visco-elastic behaviour of concrete structures with particular reference to thermal stresses", A.C.I. Journal, October 1961, pp. 383-394.
154. ZIENKIEWICZ O.C., "The influence of creep on the behaviour of massive concrete structures", Indian Journal of Power and River Valley Development. Hydraulic Structures Special Number, date not known.
152. NGY OUW. et FALKINER R.H., « Quelques caractéristiques du projet et de la construction de l'aménagement de pompage de Cruachan », Proc. Inst. Civ. Eng. 1966, 35 (novembre) pp. 407-450, et discussion, Proc. Inst. Civ. Engrs. 1967, 37 (août), pp. 651-684.
153. ZIENKIEWICZ O.C., « Analyse du comportement visco-élastique des ouvrages en béton spécialement fonction des contraintes thermiques », journal A.C.I., octobre 1961, pp. 383-394.
154. ZIENKIEWICZ O.C., « Influence du fluage sur le comportement des ouvrages en béton massif », Indian journal of Power and River Valley Development, n° spécial sur les ouvrages hydrauliques, date inconnue.

This is one of a series of Reports and Guides issued by the Committee on Concrete and the Committee on Materials of the International Commission on Large Dams as follows :

Report on frost resistance of concrete and on the definition of concrete mixes. Extract from the proceedings of the 5th Congress on Large Dams, Paris, 1955.

Bulletin No. 12, 1958, " A contribution to the analysis of arch dams ", by Nikola Hajdin, Yugoslavia.

Bulletin No. 15, 1960, " Frost resistance of concrete ", by Marcel Mary and Jules Chapelle, France.

Bulletin No. 18, 1965, " Guide and recommendations on aggregates for concrete for large dams ".

Bulletin No. 20, 1968, " Guide and recommendations for tests on surface - active admixtures for concrete for large dams ".

Bulletin No. 22, 1972, " Guide and recommendations on pozzolanas and slags for use in concrete for large dams ".

Bulletin No. 24, 1973, " Guide and recommendations for accelerating and retarding admixtures for use in concrete for large dams ".

Bulletin No. 25, 1975, " Report on effects of various factors on the extensibility of concrete for large dams ".

Ce rapport fait partie d'une série de rapports préparés par le Comité du Béton et le Comité des Matériaux de la Commission Internationale des Grands Barrages et qui sont :

Rapport sur la gelivité des bétons et sur la définition de la composition des bétons. Extrait des comptes rendus du 5<sup>e</sup> Congrès des Grands Barrages, Paris 1955.

Bulletin n° 12, 1958, « Contribution au calcul des barrages voûtes », par Nikola Hajdin, Yougoslavie.

Bulletin n° 15, 1960, « Résistance des bétons au gel », par Marcel Mary et Jules Chapelle, France.

Bulletin n° 18, 1965, « Guide et recommandations concernant les granulats pour les bétons des Grands Barrages ».

Bulletin n° 20, 1968, « Guide et recommandations pour les essais sur les adjuvants tensio-actifs pour les bétons des Grands Barrages ».

Bulletin n° 22, 1972, « Guide et recommandations sur les pouzzolanes et les laitiers pour utilisation dans les bétons des Grands Barrages ».

Bulletin n° 24, 1973, « Guide et recommandations sur les adjuvants accélérateurs et retardateurs de prise pour utilisation dans le béton des Grands Barrages ».

Bulletin n° 25, 1975, « Rapport sur les effets de différents facteurs sur l'extensibilité des bétons pour grands barrages ».

**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>*