Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 92 (2000)

Heft: 7-8

Artikel: Le béton des barrages suisses : expériences et synthèse = Concrete of the Swiss dams : experiences and synthesis

Autor: Hagin, Bernard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940289

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 30.09.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Le béton des barrages suisses: expériences et synthèse

Concrete of Swiss Dams: Experiences and Synthesis

- *Edité par le Comité suisse des barrages, à l'occasion du 20e congrès de la Commission internationale des grands barrages à Beijing, septembre 2000*
- *Edited by the Swiss Committee on Dams to the 20th Congress of the International Commission on Large Dams in Beijing, September 2000*

Préface

L'essor de la construction des barrages en Suisse a commencé à la fin du 19e siècle. En 1950, on en comptait déjà 60, et la période la plus intense de construction se situe entre 1950 et 1970. Plus de 150 ouvrages sont aujourd'hui répertoriés comme grands barrages. La plupart d'entre eux sont des ouvrages en béton, représentant un volume total d'environ 25 millions de m^3 de béton.

La technologie du béton de barrage dans la phase de construction est en général relativement bien connue. Toutefois à chaque nouveau projet, il faut définir une recette qui tienne compte des contraintes locales du site, des caractéristiques de l'ouvrage et des matériaux à disposition. Ces choix se révèlent non seulement fondamentaux et décisifs pour la phase de réalisation mais également pour le comportement à long terme de l'ouvrage. L'expérience suisse nous montre qu'après 30 ans d'observation, et parfois largement plus, les qualités du béton évoluent toujours et jouent un rôle fondamental sur le comportement et sur le vieillissement de l'ouvrage. Des phénomènes de déformations différées (fluage, gonflement sous l'effet des sulfates, réaction alcali-granulats) ont été mis en évidence après plus de 30 ans d'exploitation.

C'est à partir de ce constat que le Comité suisse des barrages a mis sur pied un groupe de travail intitulé «Béton de barrage» avec pour but de rassembler l'expérience suisse acquise sur la technologie générale et sur le comportement du béton dans le temps. Cette démarche doit en outre permettre de préciser les développements nécessaires dans le domaine de la recherche.

Ce rapport est la synthèse d'un dossier plus important établi par le groupe de travail du Comité suisse des barrages sous la conduite du Dr *Rudolf Biedermann.*

C'est avec grand plaisir que le Comité suisse des barrages présente cette publication à l'occasion du 20ème congrès de la CIGB à Beijing en espérant pouvoir ainsi contribuer à une discussion fructueuse sur le comportement du béton de barrage dans le temps, son influence sur le comportement général des barrages et les moyens à mettre en œuvre pour remédier aux problèmes rencontrés.

Le Comité suisse des barrages
Bernard Hagin, président

Foreword

The golden age of Swiss dam construction started at the end of the 19th century. In 1950, 60 dams had already been built, and the most intense period of construction dates back to 1950–1970. More than 150 structures are today listed as large dams. Most of these are concrete dams, and they represent a total concrete volume of approximately 25 million m^3.

The technology of concrete for dams during the construction phase is generally well known. However, for each project, a mix has to be designed, which takes into account the local constraints of the site, the structure's characteristics and the available materials. The choices made at this time are not only fundamental and decisive for the construction phase, but also for the long-term behaviour of the structure. Swiss experience shows that after 30 years of observations, and sometimes even much more, the concrete characteristics have continued to evolve and play a fundamental role in the behaviour and the ageing process of the structure. Phenomena of deferred deformations (creep, swelling under the action of sulphates, alkali-aggregate reactions), for example, have been observed after 30 years of operation.

Based on this observation, the Swiss Committee on Dams has put together a working group on "Dam Concrete", with the aim of gathering Swiss experience acquired on the general technology and the behaviour with time of concrete. The work also aims to identify more clearly and accurately areas where further research work is required in the future.

This report constitutes the synthesis of a more extensive study conducted by the working group under the leadership of Dr. *Rudolf Biedermann.*

It is with great pleasure that the Swiss Committee on Dams presents this publication for the 20th ICOLD Congress in Beijing, hoping it will contribute to fruitful discussion on the behaviour of dam concrete with time, the influence of time on the general behaviour of dams, and the measures which can be taken to remedy any problems encountered.

The Swiss Committee on dams
Bernard Hagin, chairman

Les membres du groupe de travail/The members of the working group:
Dr *Rudolf Biedermann,* Bernstrasse 24, CH-3303 Jegenstorf
Marc Balissat, Stucky Consulting Engineers Ltd., 33, rue du Lac, CH-1020 Renens
Roger Cornut, CH-1308 La Chaux
Dr *Georges Darbre,* Swiss Federal Office for Water and Geology, P.O. Box, CH-2501 Bienne
Bernard Hagin, Energie Ouest Suisse, place de la Gare 12, CH-1001 Lausanne
Dr *Jean-Gabriel Hammerschlag,* TFB, route de Champ-Colin 13, CH-1260 Nyon
Prof. *Christian Huet,* Laboratory of Construction Materials, EPFL-DMX, CH-1015 Lausanne
Dr *Harald Kreuzer,* Sandhübel 217, CH-5505 Brunegg
Daniel Loosli, Colenco Power Engineering Ltd., Mellingerstrasse 207, CH-5405 Baden
Laurent Mouvet, Laboratory of Hydraulic Constructions, EPFL-DGC, CH-1015 Lausanne
Hans Neff, chemin du Midi 8, CH-1053 Cugy
Henri Pougatsch, Swiss Federal Office for Water and Geology, P.O. Box, CH-2501 Bienne
Prof. *Richard Sinniger,* Sonnenbergstrasse 36, CH-8708 Männedorf
Walter Studer, CONTEC Ltd., Berschikerstrasse 19d, CH-8093 Zurich
Prof. *Folker Wittmann,* Institute for Building Materials, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zurich

Illustration de la page de couverture
Barrage de Luzzone, travaux de surélévation de 208 m à 225 m, 1997 (Photo: *A. Fankhauser*).

Illustration of the front page:
Luzzone dam, heightening works from 208 m to 225 m, 1997 (Photo: *A. Fankhauser*).

Table des matières

1.	**Introduction**	**208**
2.	**Technologie et évolution des bétons**	**209**
2.1	Fabrication, mise en place et cure	209
2.2	Contrôle du béton frais	209
2.3	Résistance à la compression	210
2.4	Module d'élasticité	211
2.5	Etanchéité à l'eau et résistance au gel	211
3.	**Analyse des phénomènes observés**	**211**
3.1	Généralités	211
3.2	Le gélivité	212
3.3	La fissuration	213
3.4	Le fluage et le retrait	217
3.5	Le gonflement	220
4.	**Essais de contrôle**	**223**
4.1	Généralités	223
4.2	Structure des essais	223
4.3	Facteurs affectant la représentativité des essais	225
4.4	Exploitation des résultats des essais	226
5.	**Approfondissement des connaissances**	**227**
5.1	Introduction	227
5.2	Gradients thermiques et hydriques	228
5.3	Réaction alcali-granulats, formation d'ettringite et dégradation du béton	229
5.4	Sécurité en cas de tremblement de terre	229
5.5	Caractéristiques du comportement du béton sous charge quasi-statique et dynamique	230
6.	**Recommandations pour la surveillance des barrages**	**230**
6.1	Introduction	230
6.2	Mesures et identification des phénomènes	230
6.3	Détermination périodique des propriétés du béton	231
6.4	Contrôle régulier des fissures et des suintements	232
7.	**Conclusions**	**232**
	Références	233

Contents

1.	**Introduction**	**208**
2.	**Concrete technology and evolution**	**209**
2.1	Processing, placing and curing	209
2.2	Assessing fresh concrete	210
2.3	Compressive strength	210
2.4	Modulus of elasticity	211
2.5	Water-tightness and frost resistance	211
3.	**Analysis of observed phenomena**	**211**
3.1	Overview	211
3.2	Frost resistance	212
3.3	Cracking	214
3.4	Creep and shrinkage	217
3.5	Swelling	221
4.	**Control testing**	**224**
4.1	General	224
4.2	Programme of testing	224
4.3	The tests' effectiveness in representing reality	226
4.4	Using the tests results	227
5.	**Improving knowledge**	**228**
5.1	Introduction	228
5.2	Temperature and moisture gradients	228
5.3	Alkali-aggregate reaction, sulpho-aluminate formation and concrete degradation	229
5.4	Safety in the case of seismic action	230
5.5	Characteristics of the concrete behaviour under quasi-static and dynamic loads	230
6.	**Recommendations for dam monitoring**	**230**
6.1	Introduction	230
6.2	Measurements and identification of the phenomena	231
6.3	Periodic determination of concrete properties	231
6.4	Regular control of cracks and efflorescences	232
7.	**Conclusions**	**232**
	References	233

Les barrages en béton occupent une place prépondérante dans le parc des barrages suisses. La plupart ont été construits entre 1950 et 1970. Au seuil de l'an 2000, le Comité suisse des barrages a voulu dresser un bilan des expériences acquises et identifier les besoins de travaux de recherche pour parfaire les connaissances du comportement du béton de barrage et du barrage lui-même.
L'accent a tout d'abord été mis sur l'évolution de la qualité du béton grâce en particulier au développement des moyens de fabrication et de mise en place. Les progrès réalisés dans le domaine des appareils de mesure et le fait de disposer de longues séries de résultats ont permis de mieux appréhender le comportement global des barrages et de mettre en évidence certains phénomènes. A ce titre, des phénomènes tels que la gélivité, la fissuration, le fluage, le gonflement sont fréquemment observés. Le rapport s'attache à décrire leur processus de développement et leur incidence sur l'aptitude au service des ouvrages.
La mise en place d'un dispositif d'auscultation pour le suivi du comportement global des barrages et de leur fondation, les contrôles visuels et les essais périodiques des bétons sont les moyens les plus adéquats pour détecter et expliquer les phénomènes observés.
Finalement, il ressort de cette analyse un besoin pressant d'approfondissement des connaissances dans quatre directions particulières (qui sont exposées au chapitre 5). Il s'agit notamment de mieux comprendre les mécanismes qui régissent le comportement interne du béton de masse.

Concrete dams play a leading role among Switzerland's dams. Most were built between 1950 and 1970. At the beginning of 2000, the Swiss Committee on Dams has decided to compile an overview of experience gained, and to identify needs for further research work aimed at improving knowledge of the behaviour of dam concrete and of dams themselves.
The paper begins by focusing on developments in the quality of concrete which have been achieved as a result of improvements in mixing and placing techniques. Progress in the field of measuring devices and the fact that we now have long-term records available have enabled the overall behaviour of dams to be better understood, and some particular phenomena have been identified. For example, frost sensitivity, cracking, creep, swelling are often observed. This report describes their development processes, and their influence on dams.
The installation of monitoring systems to observe the global behaviour of the dams and their foundations, visual controls, and periodic concrete tests are the most effective ways of detecting and explaining observed phenomena.
Finally, it can be seen from this analysis that there is a need for a tremendous improvement in knowledge concerning four specific topics (which are listed in chapter 5). Above all, the mechanisms governing the internal behaviour of mass concrete need to be better understood.

1. Introduction

Plus de 150 grands barrages en béton, selon les critères définis par la CIGB, sont répertoriés en Suisse et soumis au contrôle de la Confédération. Ensemble, ils représentent un volume de béton mis en place d'environ 25 mio de m^3.

Les plus anciens datent d'une centaine d'années environ. Plus de 60 de ces barrages ont été construits entre 1950 et 1970 et représentent à eux seuls environ 80% du volume total de béton. Sept des huit barrages suisses d'une hauteur supérieure à 150 m sont en béton. Leurs volumes sont compris entre 0,3 et 6 mio de m^3. La figure 1 donne l'évolution dans le temps de la construction de barrages et des volumes mis en place [1], [2]. On constate que la moitié des barrages en béton a aujourd'hui un âge compris entre 30 et 50 ans.

Les techniques de fabrication et de mise en place du béton ont fortement évolué au cours du temps. Le béton a toujours fait l'objet de contrôles divers afin de pouvoir juger de sa qualité: de nombreux résultats d'essais (analyses granulométriques, essais de résistance mécanique, de résistance au gel, de perméabilité), datant de toutes les périodes de construction, sont disponibles.

Par la suite, divers essais ont été effectués sur des ouvrages en place à l'occasion d'examens particuliers ou dans le cadre de projets de transformation. Ces essais ont permis de connaître quelle a été l'évolution des caractéristiques des bétons. De nouveaux types d'essais ont aussi fait leur apparition (essai par fendage).

Les barrages en béton ont été dotés de dispositifs d'auscultation permettant de suivre leur comportement ainsi que celui de leur fondation. Il faut aussi relever que grâce aux progrès réalisés dans le domaine de la technique de mesure, les résultats sont toujours plus précis et plus fiables. Les nombreux résultats de mesures de déformation disponibles sur des périodes relativement longues offrent la possibilité d'analyser dans le détail l'évolution du comportement d'ensemble des ouvrages et en particulier du béton. Les analyses font aussi appel à des méthodes de calcul appropriées, permettant de juger du comportement à long terme. Dans de nombreux cas, des phénomènes inhérents au béton (fluage, gonflement) ont pu être mis en évidence.

Il a donc paru intéressant, au seuil de l'an 2000, de tirer un bilan des expériences acquises et d'identifier les besoins de travaux de recherche nécessaires à parfaire nos connaissances. Le présent document s'adresse donc aux ingénieurs, aux propriétaires et exploitants de barrages, ainsi qu'aux instituts universitaires.

Le rapport décrit tout d'abord, au chapitre 2, divers aspects de la technologie des bétons et de son évolution. Il aborde ensuite, dans le chapitre 3, les différents phénomènes observés affectant les bétons. Le chapitre 4 est consacré aux essais de contrôle de qualité des bétons. Le chapitre 5 traite de l'approfondissement des connaissances. Enfin, des éléments de synthèse pour la surveillance des barrages sont énoncés dans le chapitre 6.

1. Introduction

More than 150 concrete large dams, according to the ICOLD definition, have been built in Switzerland and are now under the Confederation's control. Together, they represent a concrete volume of approximately 25 million m^3.

The oldest ones date from the late 19th century. More than 60 of these dams were built between 1950 and 1970, and represent approximately 80% of the total concrete volume. Seven out of eight Swiss dams higher than 150 m are concrete structures. Their volumes range between 0.3 and 6 million m^3. Figure 1 shows the time evolution of the dams construction and of the volumes put in place [1], [2]. One can see that half of the concrete dams are between 30 and 50 years old.

The concrete processing and placing techniques have evolved considerably over the years. Concrete has always undergone various controls to assess its quality: numerous test results, dating from the construction periods, are available (for example particle size analyses, mechanical strength tests, frost resistance, permeability).

Subsequently, various tests have been carried out on structures in operation during particular studies or transformation projects. These tests have made it possible to learn about the evolution of concrete characteristics. New types of tests have also been developed (e.g. splitting tensile tests).

Monitoring systems have been installed in concrete dams to follow their behaviour, as well as the behaviour of their foundations. Monitoring results are improving and are becoming more and more accurate and reliable due to the progress made in the field of measuring techniques. The numerous results of deformation measurements available over quite long periods of time provide the opportunity to analyse in detail the evolution of the overall behaviour of the structures, and in particular of the concrete. The analyses are also based on appropriate computation methods, which enable one to assess long-term behaviour. In many cases, concrete-related phenomena (such as creep and swelling) have been recognised.

It therefore seemed interesting, at the beginning of 2000, to compile a resumé of the experience gained, and identify the needs for further research work aimed at improving our knowledge. This document is thus addressed to dam engineers, owners and operating staff, as well as to academic institutes.

The report first describes, in chapter 2, various aspects of concrete technology and its evolution. It then discusses, in chapter 3, the various phenomena observed, which affect the concrete. Chapter 4 is devoted to concrete quality control tests. Chapter 5 deals with improvements in knowledge. Finally, some recommendations are put forward in chapter 6 regarding dam monitoring.

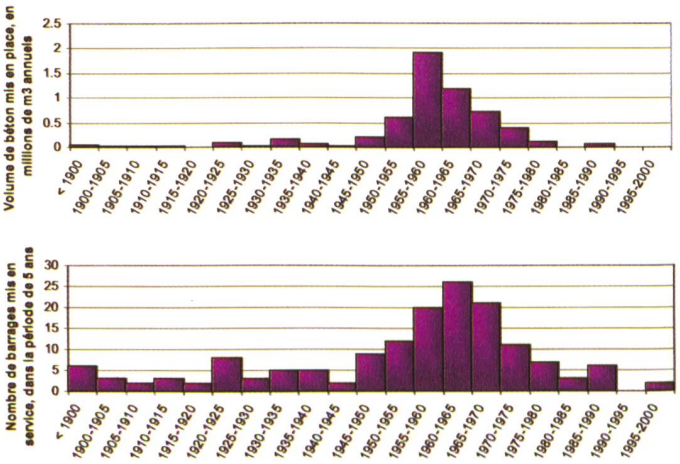

Figure 1. ***a) Volume de béton mis en place, en mio de m^3 annuels.***
b) Nombre de barrages mis en service, par période de cinq ans.

Figure 1. ***a) Dam concrete volume placed during a five-years period.***
b) Number of dams commissioned during a five-years period.

2. Technologie et évolution des bétons

En Suisse, des normes spécifiques à la construction de barrages en béton n'ont jamais été édictées. Toutefois, les anciennes normes suisses de béton mentionnaient que certaines indications pouvaient être reprises dans des domaines autres que leur champ d'application tout en gardant leur validité. Par ailleurs, il faut préciser que des règles ont été fixées dans le cadre de la législation concernant la sécurité des barrages.

2.1 Fabrication, mise en place et cure

La mise au point de la composition du béton dans la construction des barrages suit pratiquement toujours la même procédure.

Le choix des granulats est l'élément essentiel. La plupart du temps, les gisement locaux de matériaux meubles ont été exploités pour minimiser les transports.

Dans les années 20, la confection des bétons dits «coulés» a suivi des procédures particulières. En ce temps-là, le but recherché a été d'obtenir un béton capable d'être coulé avec la plus faible ségrégation possible. La fluidité a été atteinte avec un fort supplément d'eau, donnant un rapport eau/ciment élevé (>1,0). Il en est résulté des problèmes de durabilité (par exemple le barrage de Schräh). Avec l'introduction des pervibrateurs et des adjuvants, le béton coulé ne sera plus employé.

Une courbe granulométrique idéale a été établie permettant un dosage en ciment aussi peu élevé que possible tout en assurant une bonne ouvrabilité. Les exigences relatives à l'ouvrabilité ne varient pas beaucoup car le béton est transporté en benne et compacté par couche de 0,5 à 0,6 m d'épaisseur à l'aide de pervibrateurs. Des rendements de béton allant jusqu'à 5000 m^3 par jour ont été atteints, grâce à une efficacité optimale des mélangeurs, des grues, des blondins et des pervibrateurs.

Pour réduire la chaleur d'hydratation, un ciment spécial a été choisi dans certains cas. Pour les plus grands barrages, il a été possible de diminuer les conséquences de la chaleur d'hydratation dégagée par un système de réfrigération artificielle au moyen de tubes noyés dans la masse de béton. La température maximale atteinte par le béton après quelques jours n'a été réduite que de quelques °C, mais le système de refroidissement a permis de réduire considérablement le temps nécessaire pour atteindre la température environnante.

Les informations disponibles relatives au traitement ultérieur de la surface libre du béton indiquent que la surface est rendue rugueuse le plus souvent au moyen de jets d'eau sous pression, et ceci immédiatement après la mise en place du béton. Dans quelques cas, l'eau excédentaire est soigneusement évacuée et la surface ensuite arrosée. Le but est avant tout d'assurer une bonne reprise entre les étapes de bétonnage, c'est-à-dire obtenir des joints de travail étanches. Dans ce sens, on a généralement eu recours à une couche de quelques centimètres de béton à granulométrie plus fine ou de mortier mis en place juste avant la poursuite du bétonnage.

2.2 Contrôle du béton frais

L'ouvrabilité du béton a été de tout temps un facteur déterminant pour le béton dans la construction de barrages. Elle devait toujours répondre à des critères donnés pour garantir l'avancement des travaux. Ainsi, sur la base d'innombrables essais préliminaires, la composition du béton était déterminée. Cette composition devait ensuite être respectée le plus exactement possible lors de l'exécution.

Depuis l'introduction des entraîneurs d'air, on a aussi déterminé la teneur en vide du béton frais. Toutefois, pour la mesure, les granulats supérieurs à 30 mm ont été retirés et les teneurs en air occlus ont été calculées pour le volume total. D'après [4], la valeur moyenne de la teneur en vide d'un béton 0/30 mm est d'environ 3,5 % du vo-

2. Concrete technology and evolution

In Switzerland, no specific guidelines relating to concrete dam construction have been published. However, some past Swiss concrete guidelines have mentioned that some information could be used beyond its usual application, and will still be valid. Moreover, it should be mentioned that rules have been edicted within the legal framework regarding dam safety.

2.1 Processing, placing and curing

Determination of the concrete mix for the construction of a dam is almost always based on the same procedure.

The selection of aggregates is the essential step. Most of the time, local deposits of gravel have been used, to minimise transportation requirements.

Chute-placed concrete from the 1920s, in turn, followed a different procedure. At that time, the aim was to produce a mix that could be put in place with the least possible segregation. Fluidity was reached with a high water content, and thus a high water/cement ratio (>1.0). Durability problems resulted (e.g. Schräh dam). With the introduction of vibrating needles and admixtures, chute-placed concrete was no longer used.

An ideal particle size curve was established, which enabled a mix to be produced with the least possible cement content, while ensuring a good workability. Workability requirements do not vary much, since the concrete mix is carried with buckets and compacted in 0.5–0.6 m layers with vibrating needles. Rates of up to 5000 m^3 per day have been achieved by exploiting the optimal efficiency of concrete plants, cranes and vibrating needles.

To reduce the heat of hydration, special cement was selected in some cases. For the largest dams, it was possible to mitigate the consequences of the hydration heat by using an artificial cooling system comprising tubes placed within the concrete mass. The maximum temperature at the centre of the mass was only lowered by a few degrees, but the cooling system was able to reduce the time needed to reach the ambient temperature considerably.

Available information describing the treatment of the fresh concrete surface indicates that most of the time the surface is roughened with high pressure water jets immediately after the concrete has been placed. In some cases, excess water is carefully evacuated and the surface is then sprayed. The primary goal is to ensure a clean surface between the concrete stages, i.e, to obtain impervious construction joints. Generally a layer of concrete a few centimetres thick with a finer particle size or a mortar layer is placed prior to resuming mass concreting.

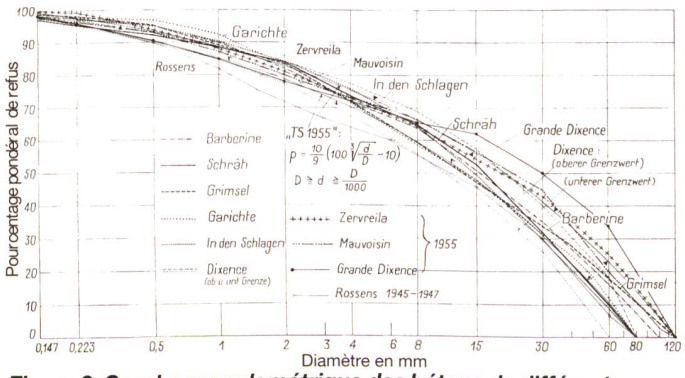

Figure 2. Courbe granulométrique des bétons de différents barrages [3].

Figure 2. Aggregate size curve from various concrete dams [3].

lume, ce qui correspond pour un D_{max} = 80 à 150 mm à une teneur en air occlus de 1,8 à 2,3 % du volume.

2.3 Résistance à la compression

Dans la construction de barrages, la résistance à la compression a été le paramètre le plus fréquemment contrôlé sur le béton durci. Les dimensions des échantillons sont plus grandes que celles des bétons de construction habituels en raison du diamètre du plus gros granulat: cylindre Ø = 300 mm, l = 450 mm; cube a = 200 à 400 mm.

L'essai s'effectue dans la plupart des cas dans un laboratoire de chantier après 7, 28, 90 et 365 jours. Quelques éprouvettes sont conservées pour des essais à un âge plus avancé; dans ce cas, les échantillons ne sont plus stockés au laboratoire, mais dans le barrage lui-même. Contrairement au béton de construction usuel, l'essai à 90 jours est considéré comme une règle normale.

Comme on a toujours recherché une ouvrabilité optimale avec une granulométrie plus ou moins constante, une relation relativement étroite a pu être établie entre le dosage en ciment et la résistance. Cette relation fut appliquée aux bétons à dosage en ciment élevé dans des zones fortement sollicitées du barrage.

Pour illustrer l'influence de la construction des barrages sur la technologie du béton, on peut mentionner que Bolomey a déduit sa formule pour le calcul de la résistance à la compression du rapport *E/C* des résultats des essais préliminaires effectués pour le barrage de Barberine [5].

Sur la figure 3, les résistances à la compression à 90 jours de huit différents barrages sont reportées en fonction de la teneur en ciment. Le plus ancien a été achevé en 1936, le plus récent en 1968. Les valeurs pour le béton coulé du barrage de Schräh de 1924 sont également reportées.

En moyenne, la résistance augmente d'environ 1 N/mm^2 lorsque la teneur en ciment augmente de 10 kg/m^3, ce qui confirme la relation linéaire entre la valeur *E/C* et la résistance dans l'hypothèse d'une teneur en eau constante (consistance environ constante):

$$fc(90) = 72 - 60 \cdot E/C, \quad \text{exprimé en N/mm}^2.$$

L'augmentation de la résistance est moins forte que celle trouvée pour un béton fabriqué avec des granulats concassés pour une teneur en ciment constante et une consistance invariable:

$$fc(90) = 84 - 72 \cdot E/C, \quad \text{exprimé en N/mm}^2.$$

Pour le béton coulé, l'influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression est considérablement plus grande: elle est de l'ordre de 2,5 N/mm^2 pour 10 kg/m^3 de ciment.

L'utilisation d'une fonction logarithmique donne de bons résultats pour décrire analytiquement l'évolution de la résistance à la compression du béton de construction en fonction du temps. On admet que le développement de résistance commence lors de la prise du béton (après 2 à 3 heures).

La résistance à la compression à 90 jours *fc(90)* est utilisée comme grandeur de référence compte tenu de la fréquence de cet âge d'essai. La figure 4 regroupe des valeurs *fc(x)/fc(90)* de dix barrages différents construits entre 1924 et 1985 et représentant au total 25 types de béton, ainsi que la relation théorique:

$$fc(x)/fc(90) = 0{,}34 \cdot (\log x + 1), \quad \text{où } x \text{ est l'âge exprimé en jours.}$$

L'utilisation d'une relation logarithmique pour représenter l'accroissement de la résistance à la compression en fonction de l'âge semble ainsi justifiée. Toutefois, dans des cas isolés, la dispersion

2.2 Assessing fresh concrete

Workability has always been a crucial factor for dam concrete. It has always had to meet certain criteria to ensure the desired rate of construction progress. Thus, the concrete mix is selected based on numerous preliminary tests. This mix should be followed as accurately as possible during construction.

Since air-entraining agents have been introduced, the void content of fresh concrete has also been determined. However, for that measurement, aggregates larger than 30 mm have been removed and the porosity has been computed with respect to the total volume. According to [4], the mean value for a 0/30 mm concrete is approximately 3.5% of the total volume, which corresponds for D_{max} = 80–150 mm to a porosity of approximately 1.8–2.3% of the volume.

2.3 Compressive strength

In dam construction, compressive strength has been the parameter most often monitored on hardened concrete. The dimensions of the samples are larger than those of traditional construction concrete due to the diameter of the largest aggregate: cylinder Ø = 300 mm, l = 450 mm; cube a = 200–400 mm.

Testing is usually carried out in a site laboratory after 7, 28, 90 and 365 days. Some samples are tested after they have been kept for a longer period of time; in this case, they are not kept in the laboratory, but within the dam itself. In contrast to traditional construction concrete, the testing of 90-day-old samples is considered as standard.

Since optimal workability with constant particle size has always been sought, a relatively accurate relationship between cement content and strength could be established. This relationship has been applied to design high strength concrete to be placed in highly stressed areas of the dam.

As an illustration of the influence of concrete technology on dam construction, Bolomey derived his equation for compressive strength from results of early *W/C* ratio determinations at the Barberine dam [5].

In figure 3, 90 day compressive strengths from eight dams are plotted as a function of the cement content. The oldest one was completed in 1936, and the most recent in 1968. The values for the chute-placed concrete at Schräh dam are also shown.

On average, strength increases by approximately 1 N/mm^2 for every additional 10 kg/m^3, of cement content, which confirms the linear relationship between the *W/C* ratio and strength, assuming constant water content (thus constant consistency):

$$fc(90) = 72 - 60 \cdot W/C, \quad \text{in N/mm}^2.$$

The strength increase is not as high as for a concrete made of crushed aggregates, with a constant cement content and constant consistency:

$$fc(90) = 84 - 72 \cdot W/C, \quad \text{in N/mm}^2.$$

For chute-placed concrete, the influence of the cement content on compressive strength is much higher: it is an increase of approximately 2.5 N/mm^2 every additional 10 kg/m^3 of cement content.

The use of a logarithmic relationship to describe the evolution with time of the construction concrete strength gives good results. One assumes that strength builds up when the concrete starts hardening (after 2–3 hours).

With respect to the most frequent test age, 90 days is often considered as a reference value for compressive strength. In figure 4, values of *fc(x)/fc(90)* are plotted for ten dams built between 1924 and

reste importante. A cet égard le béton de barrage ne diffère pas du béton de construction usuel.

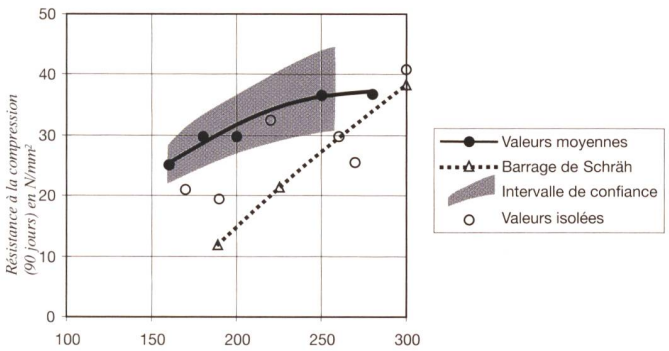

Figure 3. Résistance à la compression à 90 jours, en fonction de la teneur en ciment.
Figure 3. 90 day compressive strength, as a function of the cement content.

2.4 Module d'élasticité

Les informations concernant le module d'élasticité du béton de barrage ne sont pas nombreuses. Il ressort toutefois que la relation entre le module d'élasticité E et la résistance à la compression varie dans un large domaine. Ainsi, les modules d'élasticité E des barrages de Sambuco et de Robiei atteignent à peine la moitié de celui du barrage de In der Schlagen pour une même résistance. Cette variation est essentiellement dictée par la nature des agrégats. De telles variations sont aussi relevées sur les bétons de construction usuels [6].

2.5 Etanchéité à l'eau et résistance au gel

Très tôt dans la construction des barrages en béton, on a cherché à évaluer le comportement à long terme du béton. La perméabilité et la résistance au gel sont des paramètres significatifs. Des procédés d'analyse ont été développés pour les évaluer.

La quantité d'eau qui traverse un échantillon d'une longueur donnée dans un temps donné pour une différence de pression donnée caractérise la perméabilité. Des exigences concernant la perte en eau moyenne ont été fixées. En général, de fortes dispersions sont relevées.

La variation du module d'élasticité E ou de la résistance à la compression, suite à une série de cycles gel/dégel (200) a permis d'évaluer la résistance au gel.

La résistance au gel n'a plus été un problème après l'abandon du béton coulé et l'emploi d'adjuvants entraîneurs d'air. Les essais sur des carottes prélevées dans les barrages ont permis de le vérifier [2], [7].

3. Analyse des phénomènes observés

3.1 Généralités

Divers phénomènes directement liés à la qualité des bétons de masse et de parement sont fréquemment rencontrés. Quelques-uns, tels que le fluage et le retrait, engendrent des déformations sans conséquence si des dispositions adéquates sont prises (joints de construction). D'autres par contre, comme le gonflement, peuvent conduire à un endommagement pouvant intéresser le corps de l'ouvrage et porter atteinte à son intégrité et à sa sécurité. D'autres enfin, comme la gélivité, touchent plutôt à l'aspect esthétique en provoquant des dégâts superficiels qui n'affectent pas la sécurité.

1985 and representing 25 concrete types; the following theoretical relationship is also plotted:

$$fc(x)/fc(90) = 0.34 \cdot (\log x+1), \quad \text{where } x \text{ is the age, in days.}$$

As a result, the logarithmic relationship for the evolution with time of compressive strength provides a good indication. However, large deviations can be observed in isolated cases. In this respect, dam concrete does not differ from traditional construction concrete.

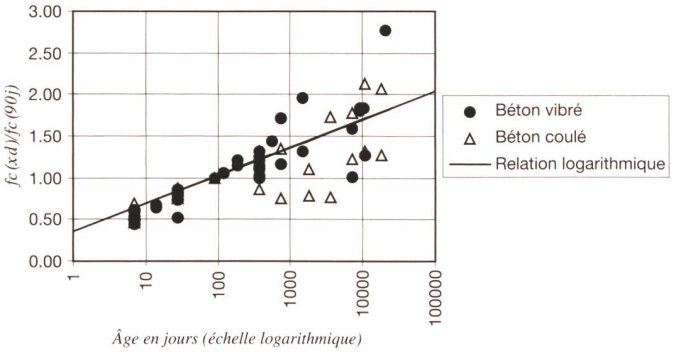

Figure 4. Développement de la résistance à la compression.
Figure 4. Time evolution of the compressive strength.

2.4 Modulus of elasticity

Information relating to the modulus of elasticity of dam concrete is rare. It appears, however, that the relationship between the modulus of elasticity E and the compressive strength varies within quite wide a range. Thus, the moduli of elasticity of the Sambuco and Robiei dams barely reach half of the modulus for the In der Schlagen dam, while these dams have the same strength. The main reason for this is the variation in the modulus of elasticity of the aggregates. Such variations are also encountered with traditional construction concrete [6].

2.5 Water-tightness and frost resistance

Since the early ages of concrete dam construction, attempts have been made to assess the concrete's long-term behaviour. Permeability and frost resistance are significant parameters, and testing procedures have been developed to assess them.

The amount of water flowing through a sample of a given length, in a given time and for a given water head defines the permeability. Requirements relating to mean water losses have been defined. Generally wide variations are observed.

A drop in the modulus of elasticity E or the resistance following a certain number of freeze-thaw cycles (200) was used to assess frost resistance.

Frost resistance ceased to be an issue as chute-placed concrete was discontinued and air-entraining agents began to be used. Tests run on cores taken from dams have enabled this to be verified [2], [7].

3. Analysis of observed phenomena

3.1 Overview

Various phenomena directly related to the quality of mass and face concrete are often encountered. Some of these, such as creep and shrinkage, result in additional deformations without any particular consequence. In contrast others, such as swelling, can lead to damage affecting the dam's body and threatening its integrity and safety. Finally some, such as frost, only affect the structure's appearance, but not its safety, by inducing superficial damage.

Il faut aussi souligner que le comportement d'ensemble de l'ouvrage est aussi sensible à l'évolution des propriétés du matériau au cours du temps. Le changement des propriétés est généralement irréversible. Il peut être lent, mais régulier, ou, au contraire, s'accentuer après avoir été imperceptible pendant plusieurs années. C'est donc par l'observation d'un ouvrage que l'on peut être amené à suspecter un changement de comportement du béton.

Le but de ce chapitre est de présenter quelques phénomènes choisis pouvant se produire dans le matériau béton et de décrire leurs causes probables, ainsi que leur incidence sur le comportement d'ensemble d'un ouvrage.

3.2 La gélivité

Les dégâts dus au gel se manifestent seulement de manière isolée par des éclatements de surface, le plus souvent dans les zones de marnage. Ils se développent très lentement et ne sont pas significatifs pour la sécurité et la pérennité du barrage (les barrages à voûtes multiples peuvent constituer l'exception).

Le béton saturé d'eau est toujours sensible au gel. La technologie moderne de la fabrication du béton a permis d'obtenir un matériau non gélif, résistant aux conditions climatiques locales (par exemple par l'utilisation d'un entraîneur d'air, par imprégnation avec un hydrofuge ou par réduction du rapport eau/ciment). Dans le cas des barrages alpins situés à des altitudes élevées, les températures sont nettement plus basses que dans les régions de plaine habitables. Les technologies courantes doivent être adaptées de manière appropriée. On constate de plus un nombre de cycles gel/dégel assez important au cours de l'année.

En règle générale, la température du béton de masse reste assez stable et ne descend pas suffisamment pour provoquer des dégâts de gel. Les zones superficielles, par contre, sont soumises à des cycles de température journaliers et annuels et peuvent de plus se resaturer d'eau périodiquement.

Le comportement du béton au gel dépend des caractéristiques de la pâte de ciment et des granulats, principalement de leur porosité et de la distribution de la taille des pores. La sensibilité au gel est nettement plus marquée pour les bétons anciens moins compacts, et de plus fabriqués sans entraîneur d'air.

Selon la zone du barrage considérée, les conséquences de l'action du gel ne sont pas les mêmes:

- sur le parement amont, les dégâts sont habituellement limités à la zone de marnage. La vitesse de désintégration du béton est très variable. Alors que pour un béton non gélif elle est pratiquement nulle, elle peut atteindre plusieurs millimètres, voire des centimètres par an, sur des bétons sensibles au gel (par exemple les anciens bétons coulés);
- sur le parement aval, une attaque du béton due au gel est très fréquente, car on y trouve aussi bien de l'eau de percolation que de l'eau d'origine atmosphérique. L'eau de percolation peut entraîner une saturation complète du béton, tandis que l'eau de ruissellement tend à pénétrer depuis la surface du parement, mais son effet reste superficiel.

Bien qu'une surface de béton abîmée par le gel présente souvent un aspect peu engageant, il y a lieu de rappeler que l'épaisseur des dégradations est de l'ordre de quelques centimètres (parfois elle peut atteindre 20 cm) et que le béton de masse ne s'en trouve pas affecté.

De nombreux parements de barrage ont été dégradés par l'effet du gel; certains ont été réparés. A titre d'exemple, le cas du barrage de Cleuson est présenté ci-après (figures 5, 6).

45 ans après la fin de la construction du barrage (1950), les deux parements révèlent d'importantes altérations. Ces dernières sont particulièrement marquées sur le parement amont. Les cycles

The overall behaviour of the structure is sensitive to the evolution with time of the material properties. Changes in these properties are usually irreversible. They can be slow and steady, or can suddenly accelerate after being imperceptible for years. Thus, it is only by observation of a dam that one can suspect changes in the behaviour of the concrete.

This chapter presents some selected phenomena which can affect the concrete material, and describes likely causes and their effect on the overall behaviour of a dam.

3.2 Frost resistance

Frost damage only occurs locally, with surface spalling usually taking place in the fluctuation zone of the water level. Such damage develops very slowly, and is not significant for the structure's safety and durability (multiple arch dams could constitute the exception).

Water-saturated concrete is always more sensitive to frost action. Modern concrete technology has made it possible to produce concrete which is not sensitive to frost and which is able to resist to local climatic conditions (e.g. by using air-entraining agents or microballs, by applying water-repellent agents, or by modifying the water/cement ratio). In the case of alpine dams located at high altitudes, the temperature is significantly lower than in inhabited areas. Current technologies have to be applied in an appropriate way. Moreover, numerous frost-thaw cycles are recorded over one year.

Generally, the temperature within the mass concrete stays approximately stable and is never low enough to trigger frost damage. In

Figure 5. Dégâts dus au gel, barrage de Cleuson, parement amont.
Figure 5. Frost damage, Cleuson dam, upstream face.

Figure 6. Barrage de Cleuson, vue du parement amont avant réfection.
Figure 6. Cleuson dam, upstream face before repair.

gel/dégel en présence d'eau provoquent une altération du fait du manque de particules fines dans le béton, ce qui le rend poreux. Ce défaut dans la granulométrie avait déjà été constaté durant la construction. La rétention d'eau dans les pores, associée au gel, fait éclater le béton, en particulier dans les irrégularités que constituent les joints verticaux de construction et les arrêts de bétonnage. Le parement amont du barrage étant orienté au sud, les cycles de gel/dégel se produisent pratiquement quotidiennement de novembre à mars, à la faveur du soleil de la mi-journée.

En 1988, des études très complètes ont été menées. Elles ont notamment compris le prélèvement de 37 carottes, lesquelles ont été soumises à des essais de laboratoire et à une étude thermique. Les résultats sont résumés dans le tableau 1.

Module d'élasticité	24 100 N/mm^2
Résistance à la traction	1,74 N/mm^2
Résistance à la compression	31,3 N/mm^2
Absorption capillaire	160 g/m^2
Essai de gel JPD	Résistance faible à très faible
Masse volumique	2,49 kg/dm^3
Analyse pétrographique	Pas d'alcali-réaction

Tableau 1. Barrage de Cleuson, résultats d'essais.

L'assainissement décidé en 1993 consiste en l'enlèvement du béton dégradé et en l'application d'une nouvelle peau, résistante au gel et adhérant aussi bien que possible au béton existant. L'enlèvement de la surface dégradée s'est effectuée par hydro-démolition, soit la projection d'un jet d'eau à très haute pression (1500 bar, 2 l/s). La profondeur d'action de ce jet a atteint 6 cm, soit l'épaisseur moyenne de la dégradation superficielle. Une nouvelle peau constituée de 12 à 18 cm de béton projeté a été mise en place en deux phases et par voie humide. La fixation de cette peau s'est faite à l'aide de goujons d'ancrage façonnés en forme de champignon.

3.3 La fissuration

La fissuration du béton est un processus complexe, lié d'une part aux propriétés mêmes du matériau, d'autre part à la géométrie de l'ouvrage ou partie d'ouvrage. Il y a lieu de distinguer l'origine des fissures et leur propagation.

On sait que l'origine des fissures provient de la microfissuration causée dans le béton par le retrait contrarié de la pâte de ciment. Des gradients thermiques et hydriques induisent par la suite des fissures macroscopiques. Il s'agit ici de l'effet des auto-contraintes. Mais, si pour un gradient thermique, le processus de fissuration peut être raisonnablement prévu, il n'en va pas de même pour les gradients hydriques.

Lors du bétonnage, des gradients thermiques se développent dans les éléments massifs. Ceux-ci engendrent des fissures si des mesures préventives adéquates ne sont pas prises. Les fissures de ce type se manifestent dans les premiers jours, voire semaines, après le bétonnage. Ce sont en général des fissures de surface, se propageant souvent dans un plan vertical ou perpendiculaire à la fondation.

Lors de l'exploitation de l'ouvrage, des variations importantes de température ambiante peuvent également provoquer des gradients thermiques entraînant des fissures, en particulier pour des parties d'ouvrage de faible section (par exemple contreforts).

Le béton perd une partie de l'eau de gâchage après le décoffrage. Un gradient hydrique s'installe alors. Si le retrait qui en résulte est excessif, l'apparition de fissures est à craindre. Dans des éléments massifs, l'auto-dessiccation peut aussi créer un état de contraintes pouvant engendrer des fissures internes d'orientation aléatoire.

contrast, superficial zones undergo daily and yearly temperature cycles, and can be periodically re-saturated with water.

The frost behaviour of concrete depends on the characteristics of the cement paste and the aggregates. For the latter, porosity and pore size distribution are the main influential parameters. Frost sensitivity is much higher in old, less compact concrete, which has been mixed without an air-entraining agent.

Depending on the dam zone under consideration, the consequences of frost action differ:

- On the upstream face, damage is usually limited to the fluctuation zone of the water level. The disintegration speed of the concrete is very variable. While it is practically zero for a concrete which is not sensitive to frost action, it can reach several millimetres per year for a frost-sensitive concrete (e.g. in the case of old chute-placed concrete).
- On the downstream face, frost damage is very frequent, since both seepage water and water of atmospheric origin are present. Seepage water can induce complete saturation of the concrete, whereas runoff water tends to penetrate from the surface, but with only superficial effects.

Although a concrete face damaged by frost is often not aesthetically very appealing, it should be remembered that the damaged zone is only a few centimetres thick (sometimes up to 20 cm) and mass concrete is not affected.

Numerous dam faces have been subjected to frost effects; some have been repaired. As an example, the case of the Cleuson dam is described below (figures 5, 6).

Forty-five years after the dam's completion (1950), both faces revealed considerable damage. This was especially serious on the upstream face. Frost-thaw cycles in the presence of water induced damage in the concrete, which was porous due to the lack of fine particles. This defect in the grading curve had already been pointed out during construction. Water storage in the pores, combined with frost, induces spalling of the concrete, especially in the vicinity of irregularities such as vertical and construction joints. Since the upstream face is oriented towards the South, the frost-thaw cycles take place practically every day between November and March, when the sun is up.

In 1988, very thorough studies were conducted, which comprised sampling of 37 concrete cores, which underwent laboratory tests, and a thermal analysis. The results are summarised in table 1.

Modulus of elasticity	24 100 N/mm^2
Tensile strength	1.74 N/mm^2
Compressive strength	31.3 N/mm^2
Capillary absorption	160 g/m^2
JPD frost test	Low to very low resistance
Unit mass	2.49 kg/dm^3
Petrographic analysis	No alkali-reaction

Table 1. Cleuson dam, test results.

The remedial procedure which went ahead in 1993 consisted of removing the damaged concrete and placing a new frost-resistant skin, which adheres as well as possible to the existing concrete. Removal of the damaged surface was done using high pressure water jets (1500 bars, 2 l/s). The first 6 cm of concrete could be removed this way, which corresponded to the average thickness of the superficial damage. A new skin made of 12 to 18 cm of shotcrete was placed (using the wet method) in two stages. This skin was fixed in place using mushroom-shaped nails.

Se pose alors la question de savoir si une fissure qui s'est développée est stable, c'est-à-dire reste de longueur constante, ou, au contraire, continue de croître. La théorie de la mécanique élastique linéaire de la rupture peut permettre de répondre à cette question, et ceci d'autant mieux que les barrages présentent de grandes dimensions par rapport à la zone de fissuration. Cette théorie fait intervenir le concept de facteur d'intensité de contrainte à la pointe de la fissure, et compare celui-ci à la fragilité ou résistance à la fissuration du béton. Bien que l'on dispose de toujours plus de résultats d'essais, cette approche est encore insuffisamment développée pour les bétons de barrage.

Il en est de même de la connaissance de la vitesse de propagation des fissures.

Deux cas distincts se présentent pour les fissures remplies d'eau sous pression (cas de la fissuration du parement amont d'un barrage):

- la fissure s'ouvre lentement et la pression hydrostatique agit comme un coin écartant les lèvres de la fissure;
- la fissure s'ouvre à une vitesse telle que l'eau ne peut plus suivre et la dépression qui apparaît tend à retenir les lèvres de la fissure, dont elle freine la propagation.

L'ouverture des fissures est identifiée par rapport à trois mécanismes fondamentaux: ouverture normale des lèvres (mode I), ouverture en cisaillement dans le plan de la fissure (mode II) et ouverture de déchirement par cisaillement anti-plan (mode III).

A ce propos, des progrès substantiels et prometteurs ont été enregistrés durant cette dernière décennie dans la modélisation de la fissuration, par la mise en œuvre de modèles de fissures discrètes dans le domaine bidimensionnel (modèles de déformation plane).

Concernant le comportement d'ensemble de la structure, des actions extérieures, relevant soit d'une exploitation normale, soit de type accidentel, peuvent conduire à une fissuration de certaines parties de l'ouvrage.

En exploitation normale, les actions considérées sont celles de la charge hydrostatique et de la température. Sur les ouvrages massifs, tels les barrages-poids, l'effet prépondérant est celui de poussée d'eau, alors que sur les ouvrages plus minces (voûtes et barrages à contreforts) les variations thermiques jouent aussi un rôle important.

Les raisons d'une fissuration en exploitation normale peuvent être de diverses origines: géométrie peu favorable, reprise de bétonnage mal exécutée, état thermique du barrage en fin de construction/au moment du clavage des joints/à sa mise en eau, mouvement de la fondation, etc. La fissuration du béton apparaît souvent dès la phase de construction, puis se développe dans le temps, son influence sur le comportement du barrage ne devenant significative qu'après des années. Bien que d'origine différente, cette fissuration peut se combiner avec celle issue du retrait du béton.

Selon le type de barrage, on peut observer les comportements suivants:

a) Barrages-poids

Les sollicitations les plus importantes sont d'origine hydrostatique; elles peuvent engendrer des contraintes de traction près du parement amont, dépassant éventuellement la résistance du matériau, et entraîner une fissuration horizontale ou l'ouverture de reprises de bétonnage. Le marnage de la retenue tend à aggraver la fissuration et à favoriser l'augmentation des débits de fuite.

b) Barrages-voûte

Vu le haut degré d'hyperstaticité des barrages-voûtes, leur fissuration n'est pas réellement dangereuse, même si l'on y rencontre des fissures de types très variés (fissures horizontales aux arrêts de bé-

3.3 Cracking

Concrete cracking is a very complex process; on the one hand it is related to the properties of the concrete itself, and on the other to the geometry of the structure or of parts of the structure. It is necessary to distinguish the origin of the cracks and their propagation.

It is known that the origin of the cracks is micro-cracking caused by the prevented shrinkage of the cement paste in the concrete mass. Temperature and moisture gradients then induce microscopic cracks. This is the effect of so-called self-stressing. Whereas for a temperature gradient the cracking process can be reasonably well predicted, difficulties remain in predicting the effects of moisture gradients, especially on an experimental level.

During concrete placement, temperature gradients develop in massive elements. These induce cracks if adequate preventive measures are not taken. This type of cracking occurs within days, or sometimes weeks, after the concrete has been placed. In general, these are surface cracks, which often propagate in a vertical plane.

During operation of the dam, large air temperature fluctuations can also induce gradients leading to crack formation, especially in thin structural elements (e.g. buttresses).

Concrete loses some of the mixing water after removal of the framework. A water content gradient then develops. If the resulting shrinkage is excessive, cracking can be expected. In massive elements, desiccation can also create a state of stress which may lead to internal cracks of random orientation.

It then has to be determined whether a formed crack is stable, i.e. its length remains constant, or in contrast it keeps on increasing. The theory of elastic linear fracture mechanics should be applicable to dams due to their large dimensions with respect to the cracking zone. This theory involves the concept of stress intensity factor at the tip of the crack, and compares this to the concrete's fragility or resistance to cracking. Although more test results are progressively becoming available, this approach is still insufficiently developed for dam concrete.

This is also the case for knowledge regarding crack propagation rate.

There are two distinctive cases as regularly cracks filled with water under pressure:

- the crack opens slowly and hydrostatic pressure acts as a wedge, splitting the two crack faces apart; or
- the propagation rate of the crack is such that the water flow cannot follow it and the negative pressure tends to keep the faces together; propagation is then slowed down.

Crack opening can be classified on the basis of three fundamental mechanisms: normal opening of the faces (mode I), shear opening parallel to the crack plan (mode II), and tearing shear opening (mode III).

Substantial advances have been made with regard to cracking modelling, either with "smeared crack" models or with bi-dimensional models of discrete cracks (plane deformation models).

As for the overall behaviour of the dam, external actions produced either by normal operation or by exceptional events can lead to cracking of some parts of the structure.

During normal operation, actions to be considered are hydraulic load and temperature. For massive structures like gravity dams, the most influential action is the hydraulic load, whereas for thinner structures (arch and buttress dams), temperature fluctuations also play an important role.

Cracking during normal operation can have various causes: unfavourable geometry, poorly executed construction joints, temperature distributions within the dam at the end of construction, at closure time, or during impounding, and so on. Concrete cracking often be-

tonnage, fissures perpendiculaires à la fondation au droit des appuis aval, fissures parallèles à la fondation au pied amont).

c) Barrages à contreforts

La fissuration de ces ouvrages, qu'ils comportent des contreforts massifs ou évidés, est courante. Elle est tout d'abord liée à la dissipation de la chaleur d'hydratation, puis au retrait du béton. Durant la phase d'exploitation, les cycles hydrostatiques et thermiques provoquent des contraintes de flexion élevées dans les contreforts, conduisant à une aggravation de la fissuration; mais ce sont surtout les variations de température qui influencent l'évolution des fissures.

On a fréquemment constaté la présence de fissures lors de l'inspection des galeries. Cette constatation concerne le plus souvent les galeries supérieures. Certaines fissures ont déjà été relevées au début de l'exploitation, d'autres ont été remarquées plus tard. Il s'agit de fissures verticales ou sub-verticales prenant naissance en calotte ou de fissures horizontales, voire inclinées, se situant sur les côtés de la galerie. Ces fissures peuvent être quasi fermées, mais parfois franchement ouvertes. Parfois, l'origine de ces fissures est due à un effet thermique. En effet, leur développement peut être lié au processus d'hydratation du béton. L'abaissement de température qui suit peut atteindre 20 °C ou plus, ce qui peut engendrer localement d'importantes tractions. La fissuration peut aussi être causée par les gradients de température en relation avec les conditions extérieures. Une combinaison des deux causes est aussi possible. Notons enfin que dans certains cas, la naissance de ces fissures peut être associée à un phénomène de gonflement.

L'étude menée sur le barrage nord du Lago Bianco a permis de mettre en évidence l'origine thermique de la fissuration apparue sur le parement aval. Cette étude est résumée ci-après.

La retenue du Lago Bianco est située sur le col de la Bernina. Elle est fermée par les deux barrages nord et sud. Ces deux ouvrages en maçonnerie ont été érigés de 1910 à 1912. Ils ont ensuite été surélevés en 1941/1942 jusqu'à la cote actuelle de 2237,00 m s. m. Cette surélévation a été réalisée en béton. Le volume utile de la retenue s'élève à 18,6 mio m^3 (figure 7).

Le barrage nord a une hauteur de 15 m sur fondation pour une longueur de couronnement de 280 m. En plan, il est constitué de trois arcs avec des rayons variant de 150 à 250 m. Du fait que la hauteur du barrage est faible par rapport à la longueur de chacun de ces trois arcs, les forces extérieures sont transmises directement aux fondations de sorte que le mur travaille comme un barrage-poids. Quant aux efforts d'origine thermique, ils sont reportés aux appuis par l'intermédiaire des arcs.

Figure 7. Barrage nord du Lago Bianco.
Figure 7. Lago Bianco North dam.

gins during the construction phase, and then develops; its influence on the overall behaviour of the dam only becomes significant after several years. In spite of its different origin, this type of cracking can be combined with that which is induced by concrete shrinkage.

Depending on the type of dam, one can observe the following types of behaviour:

a) Gravity dams

The most major action is the water thrust; this can induce tensile stresses on the upstream face, possibly exceeding the material tensile strength, and can lead to horizontal cracking or opening of construction joints. Fluctuations in the water level tend to extend the cracked region and to increase the seepage flow.

b) Arch dams

Arch dams have a high degree of inherent compressive strength, and cracking is consequently not really dangerous, even though various types of cracks can be observed (horizontal cracks along construction joints, cracks perpendicular to the foundation near the abutments, superficial crazing).

c) Buttress dams

Cracking of these structures, whether they comprise massive or hollow buttresses, is common. It is first of all related to dissipation of the hydration heat, and then to concrete shrinkage. During the operating phase, hydrostatic and seasonal fluctuations induce high flexural stresses within the buttresses, which can increase the cracking process; however, temperature fluctuations primarily influence crack propagation.

Cracking has often been observed during gallery inspection, especially in the upper galleries. Some cracks are identified immediately after the start of operation, while others are noticed later on. They are either vertical cracks which are initiated on the gallery roof, or horizontal or inclined ones located on the side of the galleries. These cracks can be almost closed or fairly open, and their origin can sometimes be explained by temperature effects. Their formation can actually be related to the hydration process of the concrete (the temperature increase can reach 20 °C or more, which can induce large tensile stress locally). It can also be related to temperature gradients induced by external conditions. A combination of both these effects can also be a possible cause. Finally it should be noted that the initiation of these cracks can be associated with a swelling process.

A study carried out for the Lago Bianco North dam has made it possible to demonstrate the temperature effects as the origin of the cracks on the downstream face. This study is summarized below.

The Lago Bianco lake is located on the Bernina pass. It is formed by two dams, known as the North and the South dams. These two masonry structures were constructed in 1910 and 1912. They were then heightened in 1941/1942 up to el. 2237 m. The heightening was done using concrete (figure 7).

The North dam is 15 m high above its foundation, with a crest length of 280 m. The operating volume of the lake is 18.6 million m^3. In

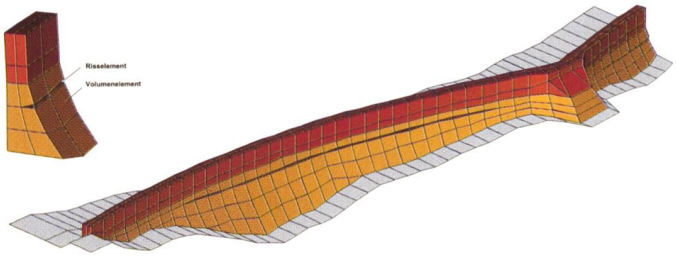

Figure 8. Barrage nord du Lago Bianco, modélisation de la géométrie.
Figure 8. Lago Bianco North dam, modelling of the geometry.

En 1992, en plus de l'augmentation générale des déformations permanentes, la présence d'une fissure horizontale longitudinale sur le parement aval a été constatée (voir figure 8). Il a été établi que la fissure s'étend sur toute la largeur de la section du mur et se traduit, du côté amont, par une trace humide sur le béton projeté qui avait été mis en place pour tenter de la sceller. Immédiatement après la découverte de cette fissure, le barrage a été équipé d'instruments de surveillance supplémentaires afin de contrôler exactement le comportement de la fissure.

Bien que la stabilité du barrage soit garantie même avec une fissure continue, cet état n'est pas satisfaisant. Il a été décidé en 1996 d'analyser la situation au moyen d'un modèle par éléments finis.

L'analyse du comportement du barrage pendant un cycle annuel a été effectuée par des mesures exactes au moyen d'extensomètres, de collimateurs, de thermomètres ainsi que par des mesures géodésiques de contrôle (GPS). Le comportement à long terme a pu être estimé uniquement par des mesures au collimateur, car les autres instruments n'ont été installés qu'après la découverte de la fissure horizontale.

Il ressort des mesures que la fissure sur le parement aval s'ouvre lors d'un réchauffement et se referme sous l'action combinée de la pression de l'eau et d'une baisse de température de l'air et de l'eau. La plus grande amplitude de l'ouverture se mesure au centre des arcs et l'ouverture diminue vers les appuis.

Il est clairement établi que les déformations, et par conséquent le comportement de l'ensemble de l'ouvrage, dépendent étroitement des températures. Le dépouillement des mesures a montré, par ailleurs, qu'il est aussi très probable, que la formation des fissures est en relation avec les variations de températures. Il en résulte que les cas de charges comportant des variations de température doivent être simulés au moyen du modèle mathématique.

Les études ont été effectuées par éléments finis sur la base d'un calcul statique à trois dimensions compte tenu de caractéristiques non linéaires des matériaux (voir figure 8).

Il a pu être démontré que la formation et le développement de la fissure dans le barrage nord du Lago Bianco est due, premièrement à la géométrie complexe de l'ouvrage, ensuite à la forte sollicitation par les variations de température et enfin à la réaction alcali-granulats. L'effet de la pression de l'eau est négligeable. La fissure sur le parement aval existe certainement depuis longtemps. Elle s'est cependant agrandie constamment et s'est propagée au cours des ans vers l'amont ainsi qu'en direction des appuis. On peut admettre, avec une grande probabilité, que la fissure dans sa forme actuelle traverse de part en part la section dans la zone centrale. Le développement de la fissure entraîne un affaiblissement des arcs. Ceci se traduit chaque année par une augmentation des déformations. En raison de l'état du barrage et des percolations observées, un assainissement de l'ouvrage est planifié.

Au titre d'action accidentelle provoquant la formation de fissures, on peut mentionner un tassement non prévisible d'un des appuis, un mouvement subit des flancs du barrage sous l'effet d'un désordre tectonique ou de nature hydrogéologique (comme ce fut le cas pour le barrage de Zeuzier, figure 9), l'action d'un séisme de forte intensité ou, enfin, une surcharge hydraulique pouvant aller jusqu'à un débordement de la retenue par-dessus le couronnement de l'ouvrage, en cas de blocage des passes d'évacuation.

plan view, it comprises three arches with 150 to 250 m radii (see figure 8). Since the height-to-crest length ratio is low, the external forces are directly transmitted to the foundation so that the wall functions as a gravity dam. The internal forces are transmitted to the abutments through the arches.

In 1992, in addition to a general increase in permanent deformations, the presence of a horizontal, longitudinal crack on the downstream face was noticed at two different levels (figure 8). The crack is likely to extend farther down (on the west side), but the level of the downstream fill prevents accurate observation. Furthermore, it has been established that the crack extends through the whole wall section, which induces a wet spot on the shotcrete on the upstream face. As soon as this crack was discovered, the structure was equipped with additional monitoring devices to assess the exact behaviour of the crack.

Although the stability of the dam is ensured even with a continuous crack, this condition is not satisfactory. It was thus decided in 1996 to analyse the structure with a finite element model.

The behaviour analysis of the dam during a yearly cycle was carried out using accurate measurements from extensometers, collimators, thermometers and geodetic measurements (GPS). The long-term behaviour could only be assessed using collimator measurements, since the other devices were only installed after the crack had been discovered.

The measurements showed that the crack along the downstream face opens when the concrete warms up, and closes under the combined action of water pressure, and a decrease in the air and water temperatures. The largest opening amplitude is at the centre of the arches, and it decreases near the abutments.

It has been clearly established that the deformations, and thus the overall behaviour of the structure, closely depend on the temperatures. Analysis of the measurements has also shown that crack formation is very likely to be linked to temperature variations. As a consequence, the load cases consisting of temperature variations must be simulated using a mathematical model.

Computations have been carried out using three-dimensional finite elements, taking into account the non-linear characteristics of the materials (figure 8).

It could be demonstrated that crack formation and development at the Lago Bianco North dam are induced first by the variable geometry of the structure, and second by the strong action of temperature variations; alkali-aggregate reaction also has an effect. The water pressure effect is negligible. The crack on the downstream face has probably existed for a long time. However, it has been constantly increasing and has propagated over the years towards the upstream face and the abutments. There is a high probability that the crack in its current shape runs through the entire section of the dam in the central zone. The crack propagation leads to a continuous weakening of both the arches and the abutments. Due to the situation of the dam and the seepage flow observed, remedial work on the structure is planned.

Examples of accidental events leading to crack formation, are: non-foreseeable settlement of one of the abutments; a sudden movement of the foundation due to tectonic or hydro-geological disorder (as was the case for the Zeuzier dam, figure 9); high intensity seismic action; or, excessive hydrostatic load possibly leading to overtopping in the case of clogged spillways.

3.4 Le fluage et le retrait

Au fur et à mesure du vieillissement des barrages, et en particulier des barrages à accumulation annuelle, on constate souvent au cours des années une augmentation progressive des déplacements maximum et minimum, tant à lac abaissé qu'à lac plein. Cette dérive des déformations maximale et minimale annuelles peut atteindre au total plusieurs centimètres et est souvent encore décelable après plusieurs dizaines d'années d'exploitation. Sur une période encore plus longue, les mouvements peuvent dans certains cas avoir achevé leur phase différée irréversible (parfois qualifiée de «plastique») et s'effectuent annuellement de manière quasi élastique entre les positions limites atteintes. Mais, tant que cette phase de stabilisation n'a pas été directement observée, il est – dans l'état actuel de la pratique – à peu près impossible de prédire s'il y aura une stabilisation ou non et combien de temps celle-ci prendra.

Les déformations différées qui affectent les barrages peuvent être d'origines diverses et elles peuvent se manifester de façons très différentes d'un ouvrage à l'autre en fonction de sa forme et surtout de son système statique. Ces déformations différées sont issues de la combinaison de divers phénomènes et elles sont superposées à des déformations saisonnières ou cycliques. Ces diverses déformations peuvent parfois s'annuler ou au contraire s'additionner. Il est souvent difficile d'isoler les composantes différées des déplacements d'ensemble. Il existe toutefois la possibilité, suite à un abaissement exceptionnel, d'effectuer des mesures géodésiques qui fourniront des informations utiles.

Les déformations différées se produisent aussi bien dans le sens horizontal que dans le sens vertical. Le système d'auscultation doit permettre de les mesurer dans les deux directions.

Le retrait, au sens où on l'entend d'habitude, correspond à une perte de volume causée par l'évaporation de l'eau non liée chimiquement (retrait hydrique). Il dépend, pour une part, de la température du béton, mais est surtout lié au gradient hydrique qui existe entre le cœur de la structure et sa surface. Alors que le retrait se termine généralement après quelques années sur des ouvrages minces, il peut se manifester encore très longtemps, quoique de façon réduite, sur un ouvrage massif comme un barrage.

Le béton est un matériau viscoélastique, c'est-à-dire qu'un chargement mécanique est accompagné d'une déformation quasi instantanée et d'une déformation différée (fluage). Le fluage se développe assez rapidement au début et se ralentit par la suite. Il se poursuit durant plusieurs dizaines d'années après le chargement. Le béton jeune subit un fluage spécifique nettement plus important que le béton âgé. La déformation associée au fluage est, après quinze à vingt ans, de l'ordre de deux à quatre fois plus importante que la déformation instantanée.

Le fluage se définit comme la déformation permanente sous l'effet d'une charge, le plus souvent constante dans le temps. Lorsque la charge varie, le fluage qui en résulte est obtenu par application du principe de superposition. Si, par contre, ce sont les déformations imposées qui peuvent être admises comme constantes, le même phénomène entraîne une relaxation des contraintes.

Les influences respectives du retrait et du fluage sur un barrage ne sont pas aisées à dissocier. Leurs effets combinés se marquent généralement par une contraction de la structure. Une telle contraction a moins de conséquences sur les barrages-poids que sur les ouvrages moins massifs, comme les voûtes et les barrages à contreforts. Sur ces ouvrages, les contraintes de compression sont plus élevées et le retrait se manifeste dans les zones superficielles particulièrement sollicitées.

Figure 9. Barrage de Zeuzier.
Figure 9. Zeuzier dam.

3.4 Creep and shrinkage

As dams age, and in particular dams with annual operating cycles, one can often observe year after year an increase in the maximum and minimum displacements, both at full and low water levels. Such a trend in the annual maximum and minimum deformations can reach several centimetres and is often still noticeable after several years of operation. Over even longer periods of time, the displacements may have completed their differed irreversible phase (sometimes called "plastic"), and may take place each year elastically between the limiting positions. However, as long as this stabilisation phase has not been directly observed, it is almost impossible, on the basis of current knowledge, to predict whether, and when, such a stabilisation will occur.

Deferred deformations affecting dams can have various sources and can occur in very different ways from one structure to another, depending on its shape and particularly its static system. These deferred deformations are caused by a combination of various phenomena, and are superimposed to seasonal or cyclic deformations. These deformations can either compensate each other, or have to be added together. It is often difficult to isolate the differed part from the overall displacements. However, geodetic measurements can be carried out which will provide useful information.

Deferred deformations take place both in the horizontal and the vertical directions. The monitoring system must be able to measure both these directions.

Shrinkage, as one usually understands it, corresponds to a volume loss due to the evaporation of the water not chemically bonded (drying shrinkage). It partly depends on the concrete temperature, but is mostly related to the moisture gradient that exists between the core of the structure and its surface. Whereas shrinkage is usually complete after a few years for thin structures, it can last for some time, although with reduced intensity, in the case of massive structures like dams.

Concrete is a visco-elastic material, which means that mechanical loading leads to both a quasi-instantaneous deformation and a deferred deformation (creep). Creep develops quite quickly at the beginning and then slows down. It keeps affecting the structure for several tens of years after loading. Younger concrete undergoes a much stronger specific creep than older concrete. After 15 or 20 years,

Les effets du retrait et du fluage sur les différents types d'ouvrage sont les suivants:

a) Barrage-poids

Les effets restent généralement peu marqués pour les raisons évoquées précédemment. Une contraction de la masse du béton se manifeste par un tassement du couronnement, qui, selon la géométrie et la zone la plus sollicitée par le retrait, peut être accompagné d'un léger déplacement du couronnement vers l'amont ou vers l'aval.

b) Barrage-voûte

On enregistre en général un tassement du couronnement, accompagné d'un déplacement des arcs et d'un basculement des consoles vers l'aval.

Ce mécanisme engendre une décompression de la fondation au pied amont du barrage, qui, à la limite, peut avoir des conséquences défavorables pour la tenue de la fondation du point de vue structural et hydraulique:

- ouverture de discontinuités du rocher et soulèvement du pied amont du barrage, accompagnés d'une augmentation des contraintes de compression et de cisaillement dans le béton à l'aval;
- augmentation de la pression hydrostatique dans les fissures du rocher et du béton (jusqu'à concurrence de la pleine pression de la retenue) à l'amont, amplifiant ainsi le basculement des consoles et augmentant le gradient hydraulique entre l'amont et l'aval (augmentation des débits de fuite).

c) Barrage à contreforts ou à voûtes multiples

Une fissuration peut se produire là où les déplacements relatifs sont contrariés. En général, les fissures se développant dans les âmes des contreforts partent verticalement de la fondation et s'incurvent vers l'amont en remontant.

Un exemple intéressant est celui du barrage-voûte de Moiry (figure 10). Sa hauteur est de 150 m et son épaisseur varie entre 5,50 m au couronnement et 35 m à la base. Situé à 2250 m s. m., la retenue est soumise à une exploitation saisonnière (plein en septembre, vide en avril-mai). Mis en service en 1957, on dispose maintenant de plus de 40 années d'observations ininterrompues. Après 20 ans d'observation, la dérive était encore très importante et sans tendance à la stabilisation. Actuellement, après plus de 40 ans d'exploitation, on observe une tendance à la stabilisation. La stabilisation du mouvement de la fondation semble être intervenue depuis plusieurs années, alors que la structure connaît encore une légère évolution. Un pronostic sur l'évolution des déformations est difficile car elle dépend tant de la structure du barrage (construction par plots avec joints de clavage, reprises de bétonnage) que des caractéristiques du béton et des fondations.

Il ressort de l'analyse des déformations des barrages que la part du fluage peut s'avérer importante. Il a paru opportun d'effectuer des essais de laboratoire pour obtenir plus d'informations relatives au fluage. On a profité d'investigations menées sur des barrages en exploitation pour soumettre les éprouvettes extraites à des essais de fluage en cherchant à reproduire au mieux les conditions normales d'exploitation. Notons que les barrages concernés sont soumis à un cycle charge – décharge annuel (le réservoir est plein en été-automne et vide au printemps). Les échantillons ont été soumis à des charges uniaxiales constantes. Les cas de sollicitations variables et de déchargement (recouvrance) ont aussi été étudiés [8], [9].

Une étude intéressante, appuyée par une importante campagne d'essais in situ, a été menée sur le barrage d'Emosson. Elle a permis de déterminer les caractéristiques de fluage des bétons d'un barrage âgés de plus de 20 ans.

creep-induced deformations are in the order of two to four times larger than instantaneous deformations.

Creep is defined as a permanent deformation induced by loading, and usually constant loading. When loading varies, the resulting creep effects are obtained by applying the principle of cumulative effect of load. If the imposed deformations can be regarded as constant, then the same phenomenon leads to stress release.

The respective influences of shrinkage and creep on a dam are not easy to distinguish. Their combined effects are usually manifested by a contraction of the structure. Such contraction has fewer consequences on gravity dams than on thinner structures like arch or buttress dams. On such structures, the compressive stresses are higher and shrinkage occurs on the particularly stressed superficial zones.

The effects of shrinkage and creep on the different types of structures are as follows:

a) Gravity dams

The effects usually exhibit a low intensity for the reasons mentioned above. Contraction of the concrete mass leads to settlement of the crest, which can be accompanied by slight upstream or downstream displacement, depending on the geometry and on the zone most affected by shrinkage.

b) Arch dams

Usually one observes settlement of the crest, accompanied by a displacement of the arches and a movement of the cantilevers towards downstream.

This mechanism leads to a decompression of the foundation at the upstream toe of the dam, which can have unfavourable consequences for the foundation's integrity from a structural and hydraulic point of view:

- opening of rock discontinuities and uplift of the upstream toe of the dam, accompanied by an increase in the compressive and shear stresses at the downstream face;
- increase in hydrostatic pressure within both rock and concrete cracks upstream (up to values which correspond to the full water head), which amplifies movement of the cantilevers and increases the hydraulic gradient between upstream and downstream (increase in seepage flow).

c) Buttress or multiple arch dams

Cracking can occur where relative displacements are obstructed. Cracks developing in the buttress webs usually propagate vertically from the foundation upwards, and then rotate towards upstream.

One interesting example is the Moiry arch dam (figure 10). It is 150 m high and its thickness varies between 5.5 m at the crest and 35 m at the toe. Located at el. 2250 m, the lake undergoes a seasonal operating regime (full in September, and empty in April-May). Since its commissioning in 1957, 40 years of measurements are now available. After 20 years of monitoring, the trend of the deferred deformations

Figure 10. Barrage de Moiry.
Figure 10. Moiry dam.

Le barrage-voûte d'Emosson (figure 11) est implanté au droit d'un puissant verrou rocheux, à 600 m au-dessus de la vallée principale. Le ruisseau de Barberine a creusé une étroite et profonde gorge au travers de ce verrou, constitué de roches cornéennes inaltérées, de structure généralement gneisseuse. Le barrage d'Emosson, achevé en 1974, a une hauteur maximale de 180 m, pour une épaisseur de la voûte minimale de 9,0 m et maximale de 48,5 m. Le volume de béton mis en place est de 1,1 mio de m^3.

Le barrage, comme toute structure de cette importance, fait l'objet d'une observation continue et poussée. Au fil des ans, mais surtout après l'analyse des résultats des mesures géodésiques effectuées en septembre 1985 à lac plein, on a observé une augmentation des déformations de certaines parties de l'ouvrage et de sa fondation. Trois phénomènes sont constatés:

- une augmentation lente, mais continue, des déformations irréversibles du barrage, ayant son maximum à la clé et diminuant en direction des appuis;
- un déplacement vers l'aval de la partie centrale du barrage, en particulier une augmentation du déplacement du pied de la console principale d'environ 7 mm par rapport à la précédente mesure à conditions équivalentes;
- une augmentation légère, mais générale, des déplacements du verrou rocheux en rive droite.

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer le comportement du barrage:

- une déformation plastique de l'appui rive droite;
- l'ouverture de diaclases subhorizontales (perpendiculaires aux plans verticaux de schistosité) sous l'effet de la pression hydrostatique à la base du barrage;
- une déformation plastique du corps du barrage, engendrée en particulier par le fluage du béton.

Une série de dispositions ont été arrêtées pour vérifier ces hypothèses. Parmi celles-ci figurent:

- deux campagnes de mesures géodésiques exceptionnelles, exécutées en 1986, l'une à retenue basse et l'autre à nouveau à lac plein;
- le prélèvement d'échantillons de béton dans le barrage pour des essais en laboratoire, afin de vérifier les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau, en particulier l'importance de son fluage;
- les mesures de sous-pression sous la fondation du barrage, complétées par huit hydromètres;
- deux sections verticales, proches du pied de la section principale, équipées chacune de deux micromètres de forage, l'un vertical et l'autre oblique, permettant de mieux suivre les déformations dans cette région de la fondation.

Les mesures in situ ont permis, dans une certaine mesure, de confirmer les hypothèses émises. Celles-ci ont fait l'objet d'une vérification détaillée au moyen d'un modèle mathématique du barrage et de sa fondation (modèle tridimensionnel d'éléments finis de type non linéaire). Ce modèle a également tenu compte du comportement à long terme du béton, sur la base d'essais de laboratoire.

Pour définir le potentiel de fluage du béton d'Emosson, six essais de fluage en compression ont été conduits. Les six éprouvettes ont été soumises à une contrainte de compression de 7,65 N/mm^2 pendant 140 jours, durant lesquels on a mesuré les raccourcissements avec une précision de $^1/_{1000}$ de mm. Ensuite, les échantillons ont été déchargés et les mesures de déformation ont été poursuivies pendant six mois. Le déchargement permet d'estimer la déformation élastique ($\epsilon_{élast}$) et, partant, de reconstituer la déformation plastique (ϵ_{plast}) à la mise en charge. De même, on peut en déduire la déformation viscoélastique (ϵ_{ve} ou fluage «réversible») et la déformation de fluage (ϵ_{fl}) proprement dite. Il va sans dire que la séparation des différents types

was still very steep, without any sign of stabilisation. Now, after more than 40 years of operation, a tendency to stabilisation can be observed. Stabilisation of the foundation deformation seems to have occurred many years ago, whereas the structure itself is still undergoing a slight deformation. A forecast of the development of deformations is difficult as it depends on both the dam's structural system (blocks and vertical joints, construction joints) and the concrete and rock properties.

It can be deduced from an analysis of the dam's deformations that the creep-related portion may be high. It seemed appropriate to carry out laboratory tests to gather more creep-related information. Advantage was taken of investigations carried out on dams in operation and the extracted samples were tested with respect to creep by reproducing normal operating conditions as well as possible. It should be noted that the dams investigated undergo a yearly load–unload cycle (with the lake full during late summer-early autumn, and empty at the beginning of spring). The samples have been undergoing uniaxial, constant loads. Cases of variable loads and of unloading (creep recovery) have also been studied [8], [9].

An interesting study, backed up by numerous in-situ tests, has been carried out on the Emosson dam. This has made it possible to assess the creep characteristics of concrete more than 20 years old.

The Emosson arch dam (figure 11) is built in a very narrow gorge 600 m above the main valley. The gorge, cut by the Barberine stream, comprises unweathered granitic rocks with gneiss structure. The Emosson dam, completed in 1974, is 180 m high, and has a minimum crest thickness of 9.0 m and a maximum toe thickness of 48.5 m. The concrete volume is 1.1 million m^3.

Like every other structure of such a large size, the dam is monitored continuously and thoroughly. Over the years, but mainly since the analysis of the results of the September 1985 geodetic measurement carried out at full lake level, an increase in the deformations of some parts of the structure and its foundation was observed. Three phenomena were measured:

- a slow but steady increase in the irreversible deformations of the dam, with a peak at the crown and diminishing near the abutments;
- a downstream displacement of the central part of the dam, and in particular a 7 mm increase in the displacement of the toe of the main cantilever with respect to the previous measurement under the same conditions;
- a slight but general increase in the displacements of the right bank rock abutment.

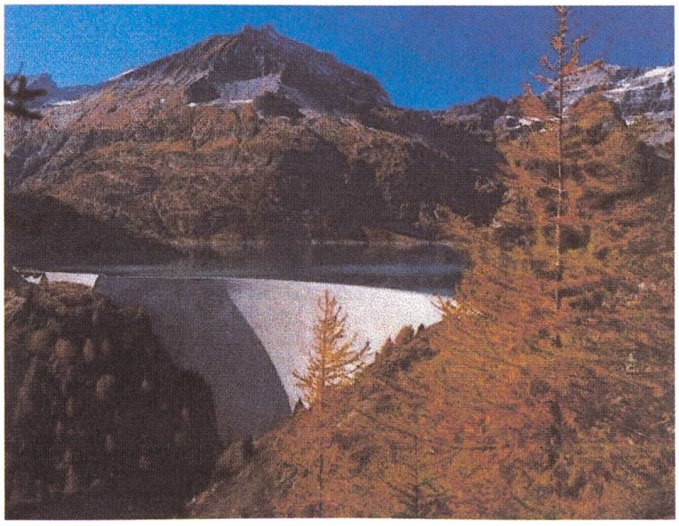

Figure 11. Barrage d'Emosson, vue de l'aval.
Figure 11. Emosson dam, downstream face.

de déformation n'est pas toujours aisée et qu'elle reste entachée d'une dispersion non négligeable. La représentation graphique d'un essai, avec la distinction des différents effets, est donnée dans la figure 12.

Les essais de fluage ont montré une capacité de déformation rhéologique importante pour un béton de cet âge, par rapport à ce qui est indiqué dans la littérature pour des bétons de masse d'âge similaire. Les caractéristiques de fluage des bétons du barrage d'Emosson correspondent en effet à celles de bétons beaucoup plus jeunes. Le fluage de ces bétons est donc considérable. Il constitue une des causes principales de l'augmentation des déformations irréversibles. Celles-ci atteignent en moyenne les 80 % de la déformation élastique.

Several suggestions have been put forward to explain the dam's behaviour:

- plastic deformation of the right bank abutment;
- opening of sub-horizontal fractures (perpendicular to the vertical schistosity planes), caused by hydrostatic pressure at the base of the dam;
- plastic deformation of the dam body due in particular to concrete creep.

A series of measurements have been undertaken to verify these assumptions. Among these were:

- two exceptional geodetic measurements, carried out in 1986, one with the lake empty and the other at full lake level;
- concrete sampling in the dam for laboratory tests, to verify the physical and mechanical characteristics of the material, in particular the creep intensity;
- measurement of uplift pressures in the dam foundation, extended by eight hydrometers;
- two vertical sections, close to the main section, both equipped with two borehole micrometers making it possible to follow the deformations better in this part of the foundation.

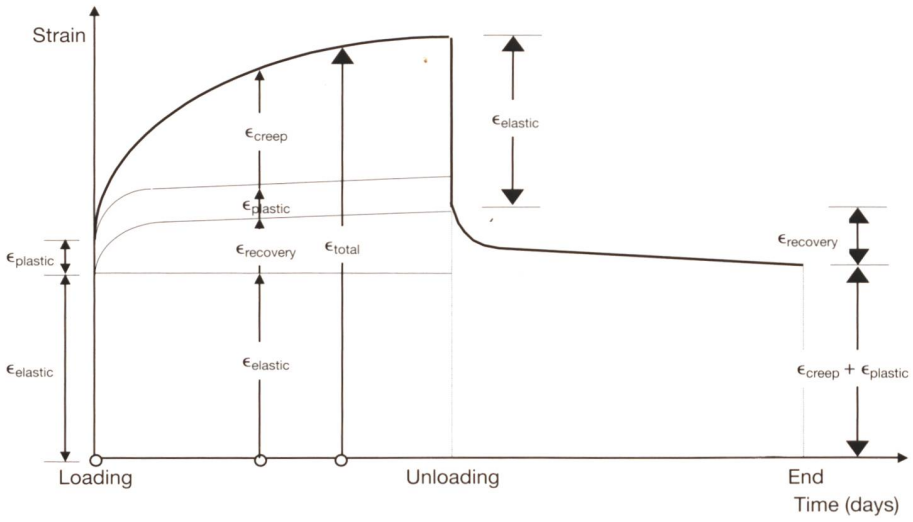

Figure 12. Essai de fluage sous charge constante. Figure 12. Creep test, with constant load.

3.5 Le gonflement

La détection d'un effet de gonflement exige d'assez longues périodes d'observation avec des systèmes de mesure basés sur des points de référence stables.

Le gonflement du béton d'un barrage peut avoir différentes origines: (a) une augmentation de température (gonflement thermique), (b) une augmentation de la teneur en eau (gonflement hydrique), (c) un processus d'hydratation (gonflement d'hydratation) et (d) d'autres réactions chimiques comme par exemple la réaction alcali-granulats (gonflement chimique).

a) Le gonflement thermique suit les cycles annuels de température et il est pratiquement réversible.

b) Le gonflement hydrique, contrairement au gonflement thermique, continue de se développer pendant une assez longue période. Le béton frais et le béton jeune n'utilisent pour l'hydratation du ciment (durcissement) qu'une partie de l'eau de gâchage. Il en résulte un matériau poreux partiellement saturé d'eau. Si le béton entre en contact avec de l'eau en phase liquide, il a tendance à se resaturer. Cette tendance est d'autant plus prononcée que l'eau est sous une pression hydrostatique importante, comme c'est le cas dans les profondeurs d'un lac. Au cours des années, cette resaturation est associée à un gonflement du béton.

c) Différentes réactions chimiques entraînant un gonflement peuvent se dérouler dans le béton durci. Si le béton est en contact avec des eaux séléniteuses (eaux contenant des sulfates), les sulfates peuvent réagir de préférence avec les aluminates du ciment et former l'ettringite ou la thaumasite. Ce gonflement, provoqué par les sulfates, peut progressivement détruire le béton à partir de la surface ou, dans les cas moins graves, contribuer au gonflement global de

In-situ measurements have, to some extent, made it possible to confirm the assumptions made. They were verified in detail using a mathematical model of the dam and its foundation (a three-dimensional model based on non-linear finite elements). The model also took into account the concretes long-term behaviour, based on the laboratory tests.

To define the creep potential of the Emosson concrete, six compression creep tests were run. The six samples were subjected to 7.65 MPa compressive stress for 140 days, during which time their shortening was measured with $^1/_{1000}$ mm accuracy. Then the samples were unloaded, and the deformation measurements were continued for a further six months. Unloading enables one to assess the elastic deformation (ϵ_{elast}), and thus to infer the plastic deformation (ϵ_{plast}) corresponding to the loading phase. Similarly, one can infer the viscoelastic part (ϵ_{ve} or "reversible" creep) and the creep deformation as such (ϵ_{fl}). It goes without saying that isolation of the different types of deformation is not always easy, and that significant dispersion remains. A graphical representation of a test, distinguishing the various effects, is shown in figure 12.

The creep tests showed a high rheological deformation capability for a concrete of such an age, in relation to what is documented in the literature for mass concretes of such an age. Thus, the creep characteristics of the Emosson dam concrete correspond to those of a much younger concrete. The creep of such concretes is thus very

la structure. Les sulfates du béton ne provoquent pas un gonflement généralisé si la température n'atteint pas des valeurs de plus de 50 °C. Dans des éléments massifs, cette température peut temporairement être dépassée durant la prise. Il y a alors un risque de formation retardée d'ettringite.

Certains minéraux, constitués de silice amorphe, sont susceptibles d'être attaqués par une solution contenant des alcalis. Ils sont dits réactifs. Or, le ciment contient toujours une certaine quantité d'alcalis (sodium et potassium). En leur présence, ces minéraux réactifs génèrent un gel qui incorpore des quantités importantes d'eau dans la structure. Ce gel produit un gonflement local qui peut donner lieu à une fissuration. Si la quantité de ces minéraux réactifs est importante et si ceux-ci sont bien distribuées dans la masse, la réaction alcali-granulats provoque un gonflement du béton. Selon les cas, ce gonflement peut conduire à une fissuration intense et à des dégâts sévères, ou rester en dessous d'un seuil critique.

Les gonflements les plus spectaculaires sont enregistrés dans des cas de réaction chimique. La réaction alcali-granulats, lorsqu'elle intervient, affecte souvent une grande partie, voire l'ensemble de l'ouvrage. Ces déformations se distinguent des déformations de fluage ou d'augmentation de température par les indices suivants:

- un démarrage différé (mais seulement en apparence car le phénomène peut avoir démarré bien avant l'apparition des indices donnés par des déformations). Les déformations se manifestent avec un certain retard qui peut être de quelques années, voire de quelques dizaines d'années;
- une accélération des déformations avec le temps (d'où l'importance de les représenter en fonction du temps pour mettre en évidence cette accélération);
- une cinématique des déformations qui traduit une expansion de volume en plan et en élévation. Ces déformations sont fonction du système statique du barrage.

Le premier élément d'identification d'un phénomène de gonflement reste avant tout la mise en évidence d'une déformation verticale de soulèvement parce que ce vecteur de déformation est celui qui contient le moins d'effets secondaires induits ou de composantes dues à d'autres sollicitations comme le sont les déformations horizontales. Il faut cependant relever que si l'apparition d'un soulèvement est un indice qui peut conduire à suspecter le gonflement, ce constat n'est pas suffisant; une analyse des déformations d'ensemble est indispensable. Pour cette analyse il faut tenir compte des points suivants:

- les déformations peuvent être influencées par une répartition non homogène des expansions dans l'ouvrage;
- le processus de création des zones de gonflement est lié à des conditions locales à l'intérieur de l'ouvrage, comme par exemple la réactivité propre des granulats et la percolation d'eau rendue possible par la porosité, dans les joints, dans les fissures ou dans les nids de gravier;
- la porosité peut en outre jouer un rôle particulier en plus de celui d'agent favorisant la percolation de l'eau. Les pores peuvent dans un premier temps agir comme vase d'expansion pour le gel gonflant et retarder ainsi l'apparition des déformations. Ce n'est que lorsqu'une partie des pores commenceront à se colmater que les premiers indices de gonflement apparaîtront. Il faut cependant relever que les connaissances actuelles nous montrent que souvent moins de 1,5% de gel de silice (volume de gel/volume de béton) peut mobiliser 5% de pores d'air occlus dans un béton. Le gonflement apparaît donc avant la mobilisation complète de tous ces vases d'expansion;
- l'expansion du béton se manifeste aussi par le développement de

strong. It constitutes one of the main sources of the increase of the irreversible deformations. These reach, on average, 80% of the elastic deformation.

3.5 Swelling

Detecting swelling effects requires quite long observation periods with measuring systems based on stable reference points.

Swelling in dam concrete can have several origins: a) a temperature increase (thermal swelling); b) an increase in the water content (moisture swelling); c) a hydration process (hydration swelling), and d) other chemical reactions like the alkali-aggregate reaction (chemical swelling).

a) Thermal swelling follows yearly temperature cycles and is practically reversible.
b) Moisture swelling, in contrast to thermal swelling, continues to develop for quite a long period of time. Fresh concrete and young concrete only use part of the mixing water for cement hydration (hardening). The result is a porous material, partially saturated with water. If the concrete is subsequently in contact with liquid water, it tends to re-saturate. This tendency is especially strong when water is under high hydrostatic pressure, as is the case deep in a lake. Over the years, this re-saturation is associated with concrete swelling.
c) Various chemical reactions leading to swelling can occur in hardened concrete. If concrete is in contact with selenitic waters (waters containing sulphates), sulphates can react mainly with the cement's aluminates and form sulpho-aluminates. Such swelling, induced by the sulphates, can completely ruin the surface zones or, in the less serious cases, contribute to the overall swelling of the structure. The sulphates of the concrete do not induce global swelling if the temperature does not reach at least 50 °C. In massive elements, this temperature can be temporarily passed during hardening. There is then a risk of delayed formation of sulpho-aluminate.

Some amorphous silicates are susceptible to attack by alkali solutions. Cement in fact always contains a certain amount of alkali (sodium and potassium). When they are present, these minerals form a gel that tends to absorb a lot of water. This gel induces local swelling, which can lead to cracking. If the amount of reactive silicates is high and if the particles are well distributed in the volume, the alkali-aggregate reaction induces global swelling. From case to case, this swelling can lead to cracking and to serious damage, or it can remain below a critical threshold.

The most spectacular swelling processes have been recorded in the case of chemical reactions. Alkali-aggregate reaction, can often affect a large part, or even the entire structure. These deformations can be distinguished from creep or temperature-induced deformations using the following signs:

- a deferred start (but only apparent, since this phenomenon may have started long before the deformations reveal it). The deformations take place with a certain time period, which can be several years, or even several tens of years;
- an acceleration of the deformations with time (hence the importance of representing them as a function of time, so as to be able to detect this acceleration);
- a deformation pattern which reveals a volume expansion in the horizontal and vertical sections. These deformations depend on the dam's static system.

The first element identifying a swelling phenomenon is generally an assessment of an upward vertical deformation, because this direction of deformation is the one which includes the fewest induced secondary effects or the fewest components of other origins, which horizontal deformations can undergo. However, it

fins décollements entre la pâte de ciment et les granulats, et de fissures lenticulaires «fusiformes» (contenant parfois du gel de silice) qui peuvent traverser les granulats et la pâte de ciment.

Les effets du gonflement sur les différents types de barrage sont les suivants:

a) Barrage-poids

Si l'on considère le cas théorique d'un gonflement homogène affectant un plot isolé d'un barrage rectiligne, on aura un déplacement du couronnement vers le haut et vers l'amont. Mais le gonflement étant d'autant plus rapide que le béton est plus humide et que la circulation d'eau est plus active, la zone amont du barrage est la plus exposée et le déplacement en crête est généralement dirigé vers le haut et vers l'aval. Une fissuration peut affecter tant le parement amont que le parement aval; les fissures amont favorisant la pénétration de l'eau et l'action des sous-pressions. En définitive, le déplacement au couronnement sera toujours dirigé vers le haut, l'orientation vers l'amont ou l'aval dépendant, elle, des conditions locales.

En ce qui concerne l'ensemble du barrage-poids, le gonflement des plots va conduire à une fermeture des joints entre plots et à l'apparition de contraintes de confinement. Cette étreinte latérale peut avoir des effets secondaires, notamment:

- ralentissement ou même arrêt, du gonflement dans la direction du confinement;
- apparition de contraintes de traction et de fissures le long de puits d'accès ou de drainage situés dans le champ des contraintes de compression;
- désordres au droit de la fondation et/ou des appuis;
- coincement de vannes par suite du gonflement des piles et réduction de la largeur des ouvertures où elles sont installées.

Il y a lieu de noter que les deux derniers genres de désordre peuvent aussi se rencontrer sur d'autres types de barrage.

b) Barrage-voûte

Une surrection du couronnement due au gonflement du béton s'accompagne généralement d'un déplacement d'ensemble vers l'amont. Les contraintes résultant du gonflement restent plus faibles que celles intervenant dans un barrage rectiligne, mais les conséquences suivantes risquent d'apparaître:

- ouverture des joints verticaux, à l'amont dans la zone de clé et à l'aval aux reins de la voûte;
- apparition de fissures sur le parement aval, parallèles à la fondation. Ces fissures sont normalement sans conséquence pour la stabilité, car le gonflement a tendance à augmenter l'effet de voûte, notamment sur les rives. Il y a lieu toutefois de suivre attentivement leur évolution.

c) Barrage à contreforts

Le gonflement se développe plus rapidement dans les têtes des contreforts que dans les âmes, qui ne sont pas en contact avec l'eau de la retenue. Le gonflement différentiel provoque un déplacement en crête vers le haut et vers l'aval, ainsi que l'apparition de zones à contraintes de traction.

Il y a lieu de noter qu'un gonflement différentiel sur l'épaisseur d'un barrage peut entraîner une fissuration des parements en forme de faïençage.

Dans le cas d'attaque des sulfates, la cristallisation de sels complexes (surtout ettringite et thaumasite) s'accompagne d'un très fort gonflement avec perte de cohésion du liant. Ce phénomène d'évolution rapide est généralement de nature locale (pas de gonflement généralisé) et conduit à une dégradation substantielle du béton.

Les mesures de déplacement sont les plus adéquates pour détecter un gonflement. En particulier le nivellement au niveau du couronnement est très sensible au phénomène. Des difficultés apparais-

should be pointed out that an observation of upward vertical deformation can lead to an assumption of swelling, but this is not sufficient information; a global analysis of the deformations is required. For such an analysis, the following points have to be taken into account:

- The deformations can be influenced by a non-homogeneous distribution of expansions within the structure.
- The creation process of swelling zones is related to local conditions within the structure, for example the aggregates' own reactivity and water seepage, which is made possible through concrete porosity, joints, cracks and honeycombing.
- Porosity can play a particular role, as well as allowing water seepage. In a first phase the pores can act as expansion volumes for the swelling gel and thus delay the occurrence of the deformations. Only when some of the pores become clogged will the first hints of swelling appear. However, current knowledge shows that often less than 1.5% of silica gel per unit volume of concrete can mobilise 5% of the pores. Thus, swelling appears before the complete mobilisation of the whole expansion volume.
- Concrete expansion is also revealed by slight loosening between the aggregates and the cement paste, and by lenticular cracks (sometimes containing silica gel), which can cross both the aggregates and the cement paste.

The effects of swelling on the various dam types are as follows:

a) Gravity dams

If one considers the theoretical case of homogeneous swelling affecting an isolated block of a linear dam, the induced displacement will take place upwards and towards upstream. But since the swelling process develops more quickly where the concrete is more humid and the seepage is more active, the upstream zone of the dam is the most affected and the crest displacement usually takes place upwards and towards downstream. Cracking can affect both the upstream and downstream faces; upstream cracks can make water seepage and the development of uplift pressure possible. In conclusion, crest displacement will always take place upwards, and the horizontal component (upstream or downstream) will depend on local conditions.

As for the gravity dam taken as a whole, swelling of the blocks will lead to a closing of the joints between the blocks and to the development of confining stresses; this lateral confinement can have secondary effects, mainly:

- slowing down and even stopping of the swelling process along the direction of the confinement;
- formation of tensile stresses and cracks along the access or drainage shafts located within the zones of compressive stress;
- disorders in the foundation and/or the abutment zones;
- gates becoming jammed due to pillars swelling and the narrowing of openings where they are installed.

It should be noted that the last two problems can also occur with other dam types.

b) Arch dams

Heave of the crest as a result of concrete swelling is usually accompanied by an overall displacement towards upstream. The stresses resulting from the swelling remain lower than those developing in a linear dam, but the following consequences appear:

- opening of the vertical joint, on the upstream face in the area of the crown, and on the downstream face along the dam's abutments;
- development of cracks on the downstream face, parallel to the foundation. These are usually without any consequence on the overall stability, because swelling tends to increase the arching effect, especially on the abutments. Their evolution should be carefully monitored, however.

sant dans l'opération de vannes, dues à des déformations de leur siège, peuvent également être des indices précurseurs d'un gonflement.

Dans tous les cas il y a lieu, une fois l'anomalie détectée, d'assurer le diagnostic exact au moyen d'essais sur éprouvettes en laboratoire.

De tels essais ont été menés sur le barrage de l'Illsee (figure 13). Ce barrage, d'une hauteur de 25 m sur fondation, se compose d'un élément arqué fermant une gorge et de deux ailes rectilignes. L'ouvrage a été construit en deux étapes.

Des mesures géodésiques ont mis en évidence

- un déplacement du couronnement vers l'amont de la partie arquée du barrage de 28 mm,
- un déplacement vers l'aval de 22 mm à la jonction entre l'aile droite et la partie arquée,
- un soulèvement du couronnement du barrage de 18 mm.

Afin de déterminer les causes de ces déformations, un programme d'analyse a été mis sur pied, comprenant en particulier:

- des analyses minéralogiques sur lames minces, pour identifier d'éventuelles formations expansives dues à la formation d'ettringite (sel de Candlot) ou de thaumasite, ou à la réaction alcali-granulat;
- des analyses chimiques du béton pour mesurer la teneur en SiO_2 et SO_3 et en alcali (Na, K);
- des analyses chimiques de l'eau;
- des analyses minéralogiques des roches dans le périmètre de la carrière (teneur en sulfure-pyrite FeS_2);
- des analyses minéralogiques par diffractométrie aux rayons X du béton et de l'encroûtement prélevé sur le parement aval du barrage.

Tous ces essais ont démontré que les déformations du barrage trouvent bien leur origine dans un phénomène de gonflement du béton. La réaction alcali-granulats constitue le principal facteur d'expansion, la formation d'ettringite restant un phénomène secondaire. Ces deux réactions concernent à des degrés divers l'ensemble de l'ouvrage.

4. Essais de contrôle

4.1 Généralités

Le premier et le plus visible des éléments qui différencient le béton de barrage des bétons de structure est la taille maximale du granulat, associée au volume considérable à mettre en place. Ce paramètre doit être pris en considération dans le programme des essais préliminaires au même titre que l'ouvrabilité, la résistance mécanique, la compacité, l'étanchéité et la résistance au gel. En effet, les gros volumes à mettre en place imposent d'utiliser dans tous les cas des matériaux du site lui-même pour les granulats et, en ce qui concerne les ciments, de choisir un lieu de production situé à une distance économiquement raisonnable. La liberté de choix est donc limitée et les contraintes géologiques et pétrographiques sont les éléments auxquels le projeteur est confronté dès les premières phases du projet. Il doit avoir recours à des essais préliminaires pour le préparer ce choix.

4.2 Structure des essais

Les essais de béton commencent déjà au stade de l'élaboration de l'avant-projet, et se poursuivent pendant l'exécution; de même, pendant la période d'exploitation, il s'agit également de procéder à des essais de contrôle. A ces différentes phases correspondent les essais suivants:

a) les essais de reconnaissance;
b) les essais préliminaires;
c) les essais de convenance, préparatoires à l'exécution;
d) les essais de contrôle d'exécution;
e) les essais de contrôle de l'ouvrage.

Figure 13. Barrage d'Illsee/Illsee dam.

c) Buttress dams

Swelling develops more quickly in the heads of the buttresses than in the webs, which are not in contact with the reservoir water. Differential swelling leads to crest displacements upwards and towards downstream, as well as to zones of tensile stresses.

It should be noted that differential settlement over the thickness of a dam can induce face cracking in the form of crazing.

In the case of sulphate attack, crystallisation of complex salts (sulpho-aluminates) is accompanied by a very strong swelling, with loss of cohesion in the cement. This rapidly evolving phenomenon is generally of a local nature (with no generalised swelling), and leads to substantial damage to the concrete.

The measurement of displacements is the most suitable way to detect swelling. In particular, monitoring of the vertical displacements on the crest is very sensitive to this phenomenon. Difficulties which become apparent in gate operation, due to deformations of their supporting zones, can also be good initial indications of a swelling phenomenon.

In any case, when the unconformity has been detected, the nature of the phenomenon must be confirmed with laboratory testing of concrete samples.

Such tests have been carried out at the Illsee dam (figure 13). This 25 m high dam comprises an arched element closing a gorge, and two linear wing sections. The structure was built in two stages.

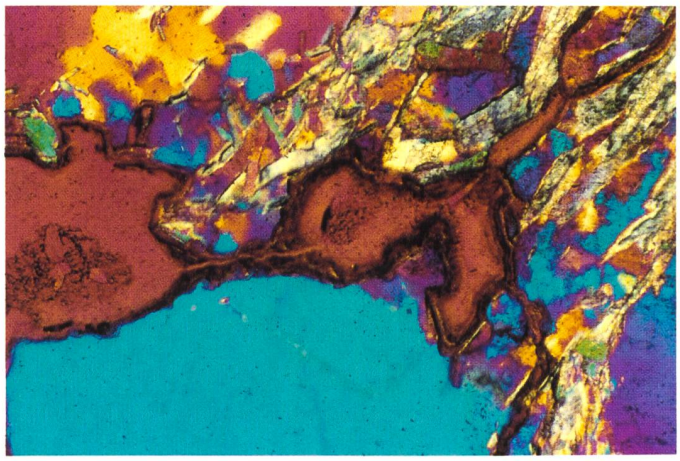

Figure 14. Barrage d'Illsee, analyses minéralogiques sur lame mince: Structure d'un granulat le long d'un chapelet d'alvéoles contenant du gel de silice.

Figure 14. Illsee dam, mineralogical analysis on thin samples: Structure of an aggregate along a chain of voids containing silica gel.

4.2.1 Les essais de reconnaissance

Cette phase prend place au moment des premières études de faisabilité de l'ouvrage, ces essais ont pour but d'apporter une réponse à différentes questions: existe-t-il des matériaux pour la fabrication du béton, sous quelle forme (gravière ou carrière), quelles sont les quantités disponibles et quels sont les types pétrographiques. A ce niveau d'avancement du projet, le choix du type d'ouvrage est encore ouvert. Les paramètres de qualité et de disponibilité des matériaux font partie des éléments de décision. Une quantité de matériaux de quelques m^3 sera prélevée (éventuellement par un essai de minage) et envoyée au laboratoire ou au chantier le plus proche pour des essais de qualification. Parmi les buts de ces essais, il s'agit de qualifier les matériaux (examens géologique et pétrographique, essais mécaniques et essais de qualification à l'alcali réaction) et d'en estimer les quantités disponibles.

4.2.2 Les essais préliminaires

Cette phase qui se déroule pendant les études d'avant-projet a pour but d'établir les spécifications techniques qui accompagneront le dossier. A ce stade, il s'agit de définir les principes régissant pour le béton la formulation, les résistances visées, les buts à atteindre pour satisfaire aux exigences de l'ouvrage. Cette phase d'essais préliminaires est de longue durée. Elle doit, de ce fait, être entreprise aussitôt que possible. Elle englobe tous les matériaux (granulats, ciment, adjuvants) ainsi que l'eau.

4.2.3 Les essais de convenance, préparatoires à l'exécution

Avant de commencer la mise en place du béton, et sitôt l'ouverture du chantier, auront lieu les essais pour la mise au point définitive des bétons dans le laboratoire du chantier. Ces essais tiendront compte des méthodes et des installations que l'entrepreneur aura choisies.

4.2.4 Les essais de contrôle d'exécution

Aux essais de mise au point succèdent les essais de contrôle d'exécution. Ceux-ci ont lieu très régulièrement au fur et à mesure du bétonnage. Les types d'essais ainsi que les cadences sont fixés par les spécifications techniques du projet. Ils comprennent, d'une part, des essais sur les bétons en fabrication par des contrôles des granulats et du béton frais (densité, consistance) et, d'autre part, des essais sur les bétons durcis au moyen d'éprouvettes et de carottages prélevés sur des bétons en place. Il s'agit entre autres de connaître les résistances à la compression et à la traction ainsi que différentes caractéristiques telles que la densité, les modules d'élasticité dynamique et statique.

La fréquence et le nombre d'essais à exécuter sont fixés dans les spécifications techniques du projet (plan d'assurance qualité); ils dépendent de la production de la centrale à béton et sont définis à raison d'un essai tous les 300 à 500 ou 600 m^3, mais en fonction également du nombre d'étapes à bétonner par jour ou par poste, et par conséquent des dimensions de l'ouvrage.

Les résultats d'essais (avec leur dispersion) seront classés par catégorie de béton. La dispersion des résultats permet d'évaluer la marge de sécurité par rapport aux contraintes effectives dans l'ouvrage. Si besoin est, le dosage sera adapté pour corriger les résistances mécaniques du béton. Dans ce processus, les essais sur les granulats, sur le béton frais et les essais de résistance à la compression à sept jours prennent une importance primordiale pour dépister au plus vite tout défaut ou baisse de qualité de la production.

4.2.5 Les essais de contrôle de l'ouvrage

Ces essais peuvent se subdiviser en deux catégories. Les essais de contrôle au moment de l'achèvement du barrage (essais en vue de la

Geodetic measurements have indicated:

- a 28 mm displacement towards upstream of the crest of the arched element,
- a 22 mm displacement towards downstream of the connection between the right wing and the arched element,
- a 18 mm heave of the crest of the dam.

To determine the origins of these deformations, a testing programme has been established, which comprises in particular:

- Mineralogical analyses on thin samples, to identify possible swelling compounds following the formation of sulphoaluminate (Candlot salt) or thaumasite, or an alkali-aggregate reaction;
- Chemical analyses of the concrete to measure the content in SiO_2, SiO_3 and alkali compounds (Na, K);
- Chemical analyses of the water;
- Mineralogical analyses of the rocks in the vicinity of the quarry (content in sulphur-pyrite FeS_2);
- Mineralogical analyses of the concrete and the efflorescence sampled on the downstream face of the dam, using X-ray diffractometry.

All these tests have shown that the deformations of the dam could actually be explained by a swelling phenomenon of the concrete. The alkali-aggregate reaction constitutes the principal swelling factor, the sulphoaluminate formation remaining an ancillary phenomenon. Both these reactions affect the entire structure with various intensities.

4. Control testing

4.1 General

The first and most obvious characteristic distinguishing dam concrete from structural concrete is the maximum size of the aggregates, associated with the substantial volume to be placed. This parameter has to be taken into consideration when designing the testing programme, together with workability, strength, compactness, water-tightness and frost resistance. The large volumes to be placed in any case require the use of site material for the aggregates and, as far as the cement is concerned, the selection of a production site located at an economically reasonable distance. The freedom of choice is thus limited, and geological as well as petrographic constraints are elements which the designer has to consider from the first phases of the project. In order to develop this, he has to rely on preliminary testing.

4.2 Programme of testing

Concrete testing starts as early as during the feasibility study, and continues during construction; and then, during the operation period, control testing must also be carried out. The following tests correspond to the different phases:

a) investigation testing;
b) preliminary testing;
c) suitability testing, prior to construction;
d) control testing during construction;
e) control testing during operation.

4.2.1 Investigation testing

This phase takes place during the first feasibility studies for the dam. The tests are aimed at answering various questions: Are the materials for concrete manufacture available? In what form (gravel pit or quarry)? What are the quantities available? What are the petrographic types? At this stage of the project, the type of structure is not yet defined. The quality and availability of the materials are among the decisive parameters. A few cubic meters of material is sampled (maybe combining a blasting test) and sent to the closest laboratory or site for qualification tests. Among the goals of this phase is an assessment of the quality of the materials (geological and petrographic evaluation, mechanical testing) and the available quantity.

réception de l'ouvrage) et des essais d'expertise relatifs à des barrages en exploitation destinés à lever une incertitude ou à rechercher une explication à un problème de comportement de l'ouvrage.

Ces essais de béton se font sur des carottes extraites de l'ouvrage par forage. Pour les essais de contrôle d'exécution il s'agit en général de forages au diamètre de 300 mm, afin d'extraire des carottes comparables aux éprouvettes de contrôle du béton des essais de suivi en cours de production. Sur certains barrages des prismes et des cubes ont été extraits pour des essais de résistance en flexion, de résistance au gel et de perméabilité (par découpage au marteau piqueur puis par sciage des éprouvettes; ces prélèvements sont en général faits en fin de campagne annuelle de bétonnage).

En ce qui concerne les essais d'expertise, les prélèvements se font par carottage. Ils sont souvent combinés à des forages liés à l'instrumentation de l'ouvrage. Le diamètre du forage est adapté aux circonstances et aux analyses demandées. Les essais peuvent avoir pour objet le contrôle des propriétés mécaniques (compression sur cylindre, traction par fendage, traction pure, mesure de la densité, mesure du module d'élasticité, ultra-sons, analyses minéralogiques et pétrographiques sur lames minces, essais de résistance au gel et de perméabilité, essais de comportement du béton à l'alcali réaction).

Pour des ouvrages dont les déformations permanentes sont importantes et évolutives, des essais de fluage sont également indispensables. Il s'agit d'essais de longue durée qui mobilisent des moyens de laboratoire importants.

4.3 Facteurs affectant la représentativité des essais

4.3.1 Dimensions des éprouvettes et effets d'échelle

La dimension des éprouvettes est un problème important pour les bétons de barrage du fait de la très grande taille des granulats. Les résultats d'essais sont très sensibles à ces dimensions ainsi qu'aux conditions aux limites.

La connaissance des lois d'échelle est une donnée essentielle pour mettre en relation les résultats d'essais avec le comportement des structures réelles. Il s'agit d'un domaine qui, pour le béton, est en plein développement et fait l'objet de recherches intenses dans divers pays, assorties d'ailleurs d'assez vives controverses.

C'est un domaine de recherche important pour les barrages pour deux raisons essentielles:

- les dimensions exceptionnelles de la structure constituée par le barrage lui-même;
- le fait que les granulats employés dans les bétons de barrage atteignent un diamètre maximum beaucoup plus élevé que pour le béton courant. Ils peuvent atteindre 150 mm.

Les effets d'échelle sont en général influencés par les conditions aux limites. On définit l'élément de volume représentatif (EVR) comme celui dont les dimensions n'influent pas sur les résultats des essais. On admet que l'on obtient le volume représentatif pour des dimensions d'éprouvettes entre cinq et dix fois la dimension maximale de la plus grande hétérogénéité.

Au niveau des éprouvettes réelles de laboratoire, on observe toujours une dispersion plus ou moins grande. Ceci signifie que les éprouvettes réelles n'ont jamais atteint les dimensions de l'EVR. En règle générale, on doit se limiter à des éprouvettes dont les dimensions sont de l'ordre du double, voire du triple, de la taille maximale des granulats.

Afin de mieux appréhender cet effet d'échelle, des essais par fendage d'éléments de dimensions variables ont été effectués en 1995 et 1996 sur des éprouvettes confectionnées directement sur place lors des travaux de surélévation des barrages de Mauvoisin et de Luzzone. Il ressort clairement des tableaux 2 et 3 que la résistance

4.2.2 Preliminary testing

This phase, which takes place during the preliminary design studies, is aimed at establishing the technical specifications that will accompany the project's file. At this stage, one must define the principles governing the concrete mix, the necessary strength, the goals to be achieved so as to comply with the structure's requirements. This stage of preliminary testing lasts for some time. Therefore, it must be undertaken as soon as possible. It encompasses all the materials (aggregates, cement, admixtures) as well as water.

4.2.3 Suitability testing, prior to construction

Before beginning to place the concrete, and as the site activities start up, testing is carried out in the site laboratory to design the definitive concrete mix. These tests take into account the methods and installations which the contractor has selected.

4.2.4 Control testing during construction

After the initial suitability tests, the construction control tests are initiated. The latter are carried out at regular intervals as concreting progresses. The types and frequencies of the tests are determined by the technical specifications of the project. They comprise both testing during the fabrication process with aggregates control and fresh concrete testing (density, consistency), and testing on hardened concrete, based on samples and cores taken from the placed concrete. Among the properties to be measured are the compressive strength, the tensile strength, as well as various characteristics such as density, and dynamic and static moduli of elasticity.

The frequency and number of tests to run are determined in the technical specifications of the project (quality assurance plan); they depend on the production capacity of the batching plant and are carried out every 300 to 500–600 m^3, or as a function of the number of lifts to be concreted per day/per team, and thus as a function of the dam's dimensions.

The test results (together with their variability) are compiled for each concrete type. The variability of the results makes it possible to assess the safety margin with respect to the effective stresses in the structure. If necessary, the cement content is adapted to correct the mechanical strength. In this process, testing of the aggregates, the fresh concrete and the seven-day compressive tests are of the utmost importance so that any possible defect or decrease in production quality can be discovered as soon as possible.

4.2.5 Control testing during operation

These tests can be sub-divided into two categories: the control tests at the time of the completion of the dam (tests for the structure's acceptance); and, expertise tests carried out on dams in operation which aim to eliminate any uncertainty or to explain behaviour problems of the structure.

These concrete tests are run on cores extracted from the structure by drilling. For construction control tests, 300 mm-diameter drillholes are generally used, so as to have cores comparable with the control samples for the follow-up of the production. Prisms and cubes have been extracted from certain dams in order to run bending strength, frost resistance and permeability tests (this involves extraction by pneumatic hammer, then sawing of the samples; the samples are generally taken at the end of a yearly concreting campaign).

As far as the expertise tests are concerned, sampling is carried out by coring. It is often combined with drilling related to the dam's monitoring system. The drillhole diameter is determined according to the individual circumstances and to the required

à la traction et l'énergie de rupture d'un béton de barrage dépendent des dimensions de l'échantillon.

Echantillons		Résistance à la traction	Energie de rupture
[cm]	nombre	[N/mm²]	[N/m]
20×20×20	6	1,82	271
40×40×40	3	1,27	334
80×80×40	3	1,43	442

Tableau 2. Influence de la taille de l'échantillon sur les caractéristiques de béton du barrage de Luzzone; module d'élasticité $E = 19000\ N/mm^2$; dosage 250 kg/m³ (CP et 50 kg de cendres volantes); granulométrie 0–63 mm.

Echantillons			Résistance à la traction		Energie de rupture	
Dimensions	Nombre		[N/mm²]		[N/m]	
[cm]	CP250	CP175	CP250	CP175	CP250	CP175
20×20×20	16	14	2,64	2,10	266	219
40×40×40	8	7	2,27	2,51	300	259
80×80×40	7	7	2,12	2,00	373	392
160×160×40	7	3	2,11	1,80	482	418
320×320×40	3	0	2,27	–	480	–

Tableau 3. Influence de la taille de l'échantillon sur les caractéristiques de béton du barrage de Mauvoisin; module d'élasticité $E = 28300\ N/mm^2$ (CP250), $E = 24300\ N/mm^2$ (CP175).

4.3.2 Effets différés

En outre, pour être complètement documentées, les fonctions caractéristiques relatives aux effets différés devraient être déterminées sur des périodes d'essais de l'ordre de la durée de vie potentielle de l'ouvrage, soit au moins la centaine d'années. Cela est évidemment impossible expérimentalement car les essais de fluage ne sont que très rarement poursuivis au-delà d'une année, ce qui correspond à 1% de la durée de vie de l'ouvrage. En outre, ils ne sont que rarement menés avec des programmes de chargement à plusieurs niveaux et sous plusieurs climats. Enfin, les lois de comportement du régime non-linéaire, qui résultent notamment des interactions avec la fissuration et la micro-fissuration sont encore mal connues, la plupart des calculs d'effets différés se faisant dans l'hypothèse d'applicabilité du principe de superposition.

4.3.3 Phénomènes physico-chimiques

Les phénomènes physico-chimiques intervenant dans le béton, et particulièrement dans les bétons de barrage, sont en général très lents, soit à cause des dimensions même de l'ouvrage, qui augmentent de façon considérable les temps de transfert des substances chimiques par diffusion, soit à cause de leur caractère intrinsèque de cinétique lente. Les caractérisations sont alors faites par des essais accélérés obtenus généralement en travaillant à une température supérieure à la température de service et dans des conditions de plus forte agressivité (fortes concentrations de la solution agressive pour les attaques chimiques, saturation complète pour le gel, etc.).

4.4 Exploitation des résultats des essais

4.4.1 Principe

L'interprétation correcte des essais est toujours délicate. Il ne faut pas perdre de vue qu'un essai n'a jamais de valeur absolue. Dans tous les

analyses. The tests can be aimed at checking the mechanical properties (compressive strength on cylinders, splitting, pure tensile strength, density measurement, modulus of elasticity, ultrasonic wave velocity, mineralogic and petrographic analyses on thin layers, frost resistance and permeability tests, alkali-aggregate reaction tests).

For structures with major and evolving permanent deformations, creep tests are also of great importance. These are tests of long duration which require the use of costly laboratory equipment.

4.3 The tests' effectiveness in representing reality

4.3.1 Sample dimensions and scale effects

The sample dimensions constitute an important problem for dam concrete because of the very large size of the aggregates. The tests results are very sensitive to these dimensions as well as to the boundary conditions.

Knowledge of the scale factors is an essential condition in relating the test results to the behaviour of the real structures. It is a developing field in concrete technology, and is under intensive research in various countries, accompanied by some controversy.

It is an important research field for dams for two essential reasons:

- the exceptional dimensions of the dam itself;
- the fact that the diameter of the aggregates used for dam concrete is much larger than for other types of concrete. It can be as much as 150 mm.

Scale effects are usually influenced by the boundary conditions. One defines the representative elementary volume (REV) as the volume with dimensions that do not influence the tests results. Admittedly the representative volume is obtained with sample dimensions between five and ten times the maximum dimension of the largest heterogeneity.

With real laboratory samples, a certain variability is always observed. This means that the real samples never reach the REV's dimensions. Generally, the limiting dimensions for the samples are two to three times the maximum size of the aggregates.

To gain a better understanding of this scale effect, resilience tests were carried out in 1995 and 1996 on samples of various dimensions fabricated on site during work for the heightening of the Mauvoisin and the Luzzone dams. It can be clearly seen from tables 2 and 3 that the tensile strength and the fracture energy of dam concrete depend on the sample dimensions.

4.3.2 Deferred effects

So that they can be completely documented, the characteristic functions relating to deferred effects should be determined over testing periods which are of the same order as the potential lifetime of the structure (at least 100 years). This is obviously impossible from the point of view of the experiment, since the creep tests are only very rarely run beyond one year, which corresponds to 1% of the lifetime of the structure. Moreover, they are seldom carried out with several levels of loading programmes and several different climatic conditions. Finally, the non-linear constitutive laws, which mainly result from the interaction with cracking and micro-cracking are still not well known, most of the computations including deferred effects being run under the assumption of the validity of the principle of cumulative effect of load.

4.3.3 Physico-chemical effects

Physico-chemical phenomena which take place in concrete, and par-

cas, il ne représente qu'un aspect limité d'une réalité que l'ingénieur doit mettre en relation avec le contexte de l'ouvrage et l'ensemble des connaissances antérieures.

L'interprétation des essais normalisés ou de contrôle courant doit se faire par comparaison avec l'ensemble des résultats d'essais de même nature disponible sur le même type d'ouvrage. Le fait d'obtenir des résultats comparables à ceux obtenus pour des ouvrages ayant donné satisfaction, fournit une bonne présomption d'un comportement correct de l'ouvrage en cours de réalisation ou en exploitation.

4.4.2 Représentativité statistique

Les résultats d'essais sont sujets à dispersion: ils varient d'une éprouvette à l'autre et doivent donc faire l'objet d'un traitement statistique avant d'être interprétés et exploités.

Des propriétés, comme la résistance mécanique, interviennent souvent par leurs valeurs extrêmes. Les valeurs retenues pour le dimensionnement sont alors des valeurs caractéristiques correspondant à un risque faible admis par le projeteur (par exemple quantile à 2,5% de probabilité, selon la loi de distribution statistique utilisée).

Dans le calcul d'un projet de barrage, on tient généralement compte de la dispersion sur les résistances mesurées en laboratoire pour fixer la composition du béton, en particulier le dosage en ciment, en fonction des contraintes calculées dans les différentes parties de l'ouvrage.

Pour le calcul des contraintes et déformations, on utilise la valeur moyenne des modules.

Pour les essais dont les résultats suivent approximativement la loi de Gauss, la plus fréquente en première approximation, le risque d'obtenir une résistance inférieure à la valeur caractéristique, est apprécié par le calcul de l'écart-type. Lorsque plusieurs variables aléatoires sont en jeu, on évalue également la matrice des covariances.

Pour évaluer la loi d'influence d'un facteur non aléatoire sur une variable aléatoire, on détermine une courbe de régression, qui peut être linéaire ou non linéaire. Pour chaque courbe de régression, on établit des courbes sensiblement parallèles qui correspondent à différents fractiles de probabilité de confiance.

En outre, certaines propriétés, comme par exemple le fluage et le retrait, n'interviennent au niveau du comportement de la structure que de façon globale. La valeur statistique appropriée est alors la moyenne stochastique des résultats des éprouvettes de même géométrie testées dans les mêmes conditions.

4.4.3 Emploi des résultats d'essais comme données pour la vérification des ouvrages

Cet emploi est délicat, car, en général, les résultats des essais ne représentent que très imparfaitement ou de manière très incomplète le comportement réel du matériau dans l'ouvrage.

Par exemple, pour les calculs modernes par éléments finis, les lois de comportement doivent être écrites sous forme du comportement multiaxial, alors qu'en général, seul le comportement uniaxial fait l'objet des essais pour un ouvrage déterminé. Pour de tels calculs les informations disponibles sont donc toujours d'ordre général, toutes issues de programmes de recherches disponibles dans la littérature, et menées sur des matériaux et dans des conditions pas forcément transposables au cas particulier à l'étude.

5. Approfondissement des connaissances

5.1 Introduction

Sur la base de l'état actuel des connaissances et des phénomènes observés sur les barrages suisses, il apparaît opportun d'étudier certains

Samples		Tensile strength	Fracture energy
[cm]	Number	[N/mm2]	[N/m]
20×20×20	6	1.82	271
40×40×40	3	1.27	334
80×80×80	3	1.43	442

Table 2. Influence of the sample size on the concrete characteristics of the Luzzone dam; modulus of elasticity $E = 19000\ N/mm^2$; cement content 250 kg/m³ (PC and 50 kg flying ashes); particle size 0–63 mm.

Samples			Tensile strength		Fracture energy	
Dimensions	Number		[N/mm²]		[N/m]	
[cm]	PC250	PC175	PC250	PC175	PC250	PC175
20×20×20	16	14	2.64	2.10	266	219
40×40×40	8	7	2.27	2.51	300	259
80×80×40	7	7	2.12	2.00	373	392
160×160×40	7	3	2.11	1.80	482	418
320×320×40	3	0	2.27	–	480	–

Table 3. Influence of the sample size on the concrete characteristics of the Mauvoisin dam; modulus of elasticity $E = 28300\ N/mm^2$ (PC250), $E = 24300\ N/mm^2$ (PC175).

ticularly in dam concrete, are generally very slow, either because of the dimensions of the structure, which considerably increase the diffusion time of the chemical compounds, or because of their intrinsic slow kinetics. The characterisation is therefore performed using accelerated tests, which are generally run at a higher temperature than the operating temperature, and in more aggressive conditions (high concentrations of aggressive solution for chemical attacks, complete saturation for frost cycles, and so on).

4.4 Using the test results

4.4.1 Principle

Correct interpretation of the tests results is always tricky. One must keep in mind that a test never has an absolute value. At least, it only represents a limited aspect of reality, which the engineer must relate to the structure's context and to knowledge which has been gathered previously.

Interpretation of normalised or regular control tests must be done by making a comparison with all the tests results of similar nature available about the same kind of structure. Obtaining results which are comparable with those collected from dams behaving satisfactorily is a good basis for the assumption that the structure being constructed or in operation will also behave correctly.

4.4.2 Statistical representation

Tests results are meant to demonstrate variability: they vary from one sample to any other, and must therefore undergo statistical treatment before being interpreted and analysed.

Some properties, such as mechanical strength, often act with extreme values. The values selected for the design are thus characteristic values, corresponding to a low risk level accepted by the designer (e.g. 2.5% likelihood quantile, depending on the probability density function used).

When computing a dam project, one usually takes into account the variability of the strengths measured in the laboratory in order to establish the concrete mix, in particular the cement content, as a function of the stress levels computed in various parts of the structure.

points particuliers et de développer des recherches en relation avec le comportement global des barrages et en particulier celui des bétons.

Quatre thèmes ont été jugés particulièrement intéressants. Leur développement doit permettre une meilleure appréciation de la sécurité des structures tant en exploitation normale que suite à un comportement inattendu du béton ou d'une sollicitation extraordinaire de l'ouvrage.

Les quatre domaines présentés ont été volontairement classés selon un ordre de priorité pratique. Ils forment un programme de base pour des recherches futures dans le domaine des bétons de barrage.

5.2 Gradients thermiques et hydriques

Un barrage en béton est constamment soumis à des sollicitations thermiques et hydriques. Les premières sollicitations thermiques apparaissent dès la construction. La chaleur libérée lors de la réaction d'hydratation du ciment avec l'eau de gâchage chauffe le cœur des blocs de béton de masse pour une longue durée de manière presque adiabatique. L'élévation de température du béton jeune qui en résulte peut aisément dépasser 20 °C. Les zones à proximité des surfaces en contact avec le milieu ambiant se refroidissent rapidement. Il en résulte un gradient de température qui lui-même implique un état de contraintes internes avec des tractions dans les zones refroidies à proximité de la surface des blocs. Si aucune mesure n'est prise, ce gradient de température peut conduire à un endommagement du béton de surface et à la formation de fissures.

Après son durcissement, le béton est soumis aux cycles journaliers et annuels des températures extérieures. De ce fait, la masse à proximité de la surface du parement aval est exposée à des contraintes alternées de traction et de compression. Sous l'effet des contraintes de traction élevées et du fait de la fatigue due à la variabilité des contraintes, le béton peut être endommagé et des fissures peuvent finalement se former.

Cet état de contraintes internes cause également une déformation globale additionnelle du barrage. Celle-ci doit être clairement déterminée afin de l'identifier comme une composante de la déformation d'ensemble du barrage.

Juste après le décoffrage, le béton est dans un état d'équilibre avec un taux relatif d'humidité de 100%. L'atmosphère avec laquelle l'ouvrage est alors en contact direct a un taux d'humidité très variable, ce qui conduit à un processus de séchage inévitable. Après le remplissage de la retenue, l'eau, soumise à la pression hydrostatique, est aspirée par capillarité dans les pores du béton à travers le parement amont. De par les dimensions des barrages, le béton de masse n'atteint jamais une situation d'équilibre hydrique, même après plusieurs années. De manière analogue aux gradients thermiques, les gradients hydriques provoquent un état de contraintes internes variable dans le temps. L'assèchement du parement aval conduit pratiquement toujours à un endommagement irréversible du béton de surface et parfois à la formation de fissures.

L'état de contraintes internes causé par les gradients hydriques implique, comme pour les contraintes d'origine thermique, une déformation globale du barrage.

Lorsque des déformations irréversibles sont constatées, et qu'une réaction alcali-granulats est suspectée, la contribution des gradients thermiques et hydriques doit être précisée en premier lieu. Une méthodologie doit être développée dans le cadre d'un projet de recherche pour définir une approche pratique pour cette analyse et une démarche en vue de la détermination des caractéristiques déterminantes du matériau.

To compute stresses and deformations, the average value of the moduli is used.

For those results which approximately follow the Gauss function (the most frequent as a first estimate), the risk of obtaining strengths lower than the characteristic value is assessed with the standard deviation. When several random variables are used, one also determines the co-variance matrix.

To assess the influence of a non-random factor on a random variable, one determines a regression curve, which can be either linear or non-linear. For each regression curve, one establishes parallel curves which correspond to various confidence intervals.

Moreover, some properties, such as creep and shrinkage, only affect the structure's behaviour in a global manner. The appropriate statistical value is thus the stochastic mean of the results from samples with similar geometry, tested in similar conditions.

4.4.3 Using the tests results as data for checking the structures

Using test results in this way has to be handled with care since, generally, the results only represent very imprecisely, or in a very incomplete way, the actual behaviour of the material within the structure.

For example, for modern computations based on the finite element method, the constitutive laws have to be established assuming multi-axial behaviour, whereas for a given structure only the uniaxial behaviour is tested. For such computations, the available information is thus always general, and based on research programmes available in the literature, and conducted on materials and in conditions which are not necessarily representative of the particular case in question.

5. Improving knowledge

5.1 Introduction

Based on current knowledge and on the observed phenomena at Swiss dams, it seems appropriate to study some particular aspects and to develop research topics related to the global behaviour of dams and in particular concrete behaviour.

Four topics are considered particularly interesting. Their development would enable a better assessment to be made of the structure's safety, both during normal operation, and following abnormal behaviour of the concrete or an exceptional effect on the structure.

The four topics dealt with in the next section have been ranked according to their level of practical priority. They form a basis for future research in the field of dam concrete.

5.2 Temperature and moisture gradients

A concrete dam is constantly subjected to thermal and moisture actions. The thermal actions develop as early as during construction. Heat generated during the cement hydration reaction with the mixed water heats up almost adiabatically and for a long period of time the core of the mass concrete blocks. The resulting temperature increase of the fresh concrete can easily reach more than 20 °C. The zones in the vicinity of the contact surfaces with the environment cool down quickly. A temperature gradient results, which induces an internal stress field with tensile stresses in the cool zones in the vicinity of the surface blocks. If no measure is taken, this temperature gradient can lead to damage to the concrete surface, and to the formations of cracks.

After hardening, the concrete undergoes daily and annual external temperature fluctuations. Hence, the concrete mass in the vicinity of the downstream face undergoes alternate tensile and compressive stresses. Due to the high tensile stresses and to the fatigue induced by the alternate stresses, the concrete can be damaged and cracks can eventually develop.

5.3 Réaction alcali-granulats, formation d'ettringite et dégradation du béton

Le développement des réactions alcali-silice et alcali-silicate a pour conséquence des dégradations lentes et irréversibles du béton. Si ces réactions sont bien connues et parfaitement identifiables, un important besoin de recherches existe néanmoins et il peut se subdiviser en trois groupes principaux:

- recherches sur l'évolution des caractéristiques des bétons affectés par des réactions alcali-silice et alcali-silicate;
- recherches sur les moyens de sauvegarde des bétons des ouvrages existants affectés par un phénomène de gonflement;
- recherches pour la mise au point d'une méthodologie de préqualification des constituants du béton et du béton lui-même, pour les ouvrages nouveaux et les surélévations de barrages.

Il s'agit avant tout d'identifier les seuils ou les limites à partir desquels les propriétés du béton ou de ses constituants doivent être considérées comme insatisfaisantes et ne permettent plus de garantir la sécurité de l'ouvrage. Ainsi il s'avère nécessaire de rechercher et d'évaluer:

- les relations entre l'évolution de l'expansion et les résistances à la compression et à la traction par fendage;
- le seuil de résistance limite ou résiduelle d'un béton affecté par un gonflement;
- les ordres de grandeur du gonflement résiduel du béton sitôt le phénomène identifié et également après la mise en place des mesures de sauvegarde.

Une mesure de sauvegarde actuellement connue est la réduction de la percolation de l'eau, élément essentiel des réactions. Mais il reste encore des nombreuses études à conduire sur les sources potentielles d'eau intervenant dans le développement des réactions (percolation, infiltration d'eau de pluie, eau de gâchage, etc.). Une circulation d'eau de percolation, même modérée, suffit pour amorcer le processus de gonflement dans certains bétons sensibles. Dans de pareils cas, les mesures de sauvegarde ou d'assainissement par limitation des circulations n'apparaissent pas comme évidentes a priori. Il convient donc de rechercher d'autres mesures de sauvegarde à appliquer à un stade précoce, avant le développement des grandes percolations et des détériorations du béton.

Il convient de soutenir le développement de modèles prévisionnels de l'évolution du comportement du béton, d'extrapolation des observations et des essais de laboratoire ainsi que des modèles de simulation.

Dans le cadre des recherches destinées à des ouvrages nouveaux, on mettra l'accent sur l'établissement d'inventaires des roches réactives, sur la détermination d'une éventuelle teneur optimale ou maximum en roche réactive, sur la définition d'un bilan critique des alcalins actifs adapté aux conditions géologiques et sur l'évaluation du rôle effectif joué par chacune des sources de gonflement de nature chimique.

5.4 Sécurité en cas de tremblement de terre

Afin de parfaire les connaissances du comportement du barrage lors de tremblements de terre, il existe, d'une part, un besoin de mieux appréhender les lois de comportement du béton et, d'autre part, un besoin de recherche en analyse structurale et d'observations in situ.

5.4.1 Lois de comportement du béton

Dans ce domaine, un accent doit être porté sur la mécanique de la rupture du béton sous sollicitations cycliques rapides. Il convient ici de considérer les aspects de formation et de propagation de fissures sèches, partiellement ou totalement saturées d'eau et en contact avec

This state of internal stress also induces an additional overall deformation of the dam. This must be clearly determined so that it can be identified as a component in the overall deformation of the dam.

After removing the formwork, the concrete is in a state of equilibrium, with 100% relative humidity. The atmosphere with which the structure is then in direct contact has a very variable relative humidity, which induces an inevitable drying process. After impounding, water, which now undergoes hydrostatic pressure, is sucked by capillary action into the concrete pores, through the upstream face. Because of the dimensions of the dam, the mass concrete never reaches a moisture equilibrium, even after several years. Similarly to the thermal gradients, the moisture gradients induce an internal state of stress which fluctuates with time. Drying of the downstream face almost always leads to irreversible surface damage to the concrete, and sometimes to the formation of cracks.

The state of internal stress induced by moisture gradients leads, as is the case for thermal stresses, to overall deformations of the dam.

When irreversible deformations are observed, and alkali-aggregate reaction is suspected, the contribution of temperature and moisture gradients has to be determined first. A methodology should be developed within the framework of a research project to define a practical approach for this analysis, and to determine the most influential characteristics of the material.

5.3 Alkali-aggregate reaction, sulpho-aluminate formation and concrete degradation

The development of alkali-silica and alkali-silicate reactions results in slow and irreversible degradation of the concrete. While these reactions are well known and easy to identify, there is nevertheless an important need for research, which can be divided into three main areas:

- research on the evolution of the characteristics of concrete affected by alkali-silica and alkali-silicate;
- research on the means of preserving concrete affected by swelling in existing structures;
- research on the design of preliminary qualification testing for new structures and the heightening of dams.

First, the thresholds and limits have to be determined, beyond which the quality of the concrete should be considered as deteriorated, and unable to guarantee the structure's safety. It then becomes necessary to research and assess:

- the relationships between the evolution of expansion and the compressive and tensile strengths, as measured by splitting tests;
- the threshold strength or the residual strength the concrete affected by swelling;
- the order of magnitude of the concrete's residual swelling immediately after the phenomenon has been identified, and also after the rehabilitation measures have been implemented.

A rehabilitation measure currently known is cutting off the water seepage, an essential element in the reaction process. However, many studies are still necessary regarding the potential water sources involved in the development of the reaction's development (seepage, rain runoff, mixing water, and so on). Swelling deformations are actually observed on concrete which has been identified as reactive, and within which the flow of seepage water is moderate. In such cases, the rehabilitation measures based on cutting off the flow do not appear to be pertinent. Thus, it seems necessary to seek other rehabilitation measures to apply at an early stage, before major seepage and concrete damage has developed.

It seems necessary to support the development of predictive models of the evolution of concrete behaviour, of the extrapolation of observations, of laboratory tests, and of the simulation models.

Within the framework of the research aimed at new structures,

la retenue. Un point particulier des études doit concerner les reprises de bétonnage et le contact barrage–fondation.

5.4.2 Comportement global

Un besoin réside dans le développement d'une méthodologie d'analyse du comportement des barrages en béton lors de tremblements de terre en intégrant les caractéristiques propres du béton ainsi que les éléments constitutifs de l'ouvrage, tels que les joints.

L'observation in situ du comportement dynamique des barrages en béton et l'interprétation de ces mesures permettent d'une part d'identifier les phénomènes importants apparaissant dans le barrage et d'autre part de calibrer en grandeur nature les modèles analytiques développés.

5.5 Caractéristiques du comportement du béton sous charge quasi-statique et dynamique

Le comportement du béton sous charge quasi-statique peut être décrit par un module d'élasticité simple, pour autant que les contraintes restent bien en dessous des limites de résistance. Sous charge dynamique, un module d'élasticité complexe est nécessaire. La variation spatiale du module d'élasticité dans le béton de masse doit encore faire l'objet de recherches pour tenir compte en particulier de la présence des joints. C'est le seul moyen pour prédire de manière réaliste la déformation globale sous des conditions de charge données.

Dans le module d'élasticité complexe se cache de manière implicite la problématique des lois d'amortissement du matériau. Cet amortissement peut être un indicateur fiable du vieillissement du béton ou d'un endommagement naissant ou en développement. Il serait souhaitable, pour autant que cela se justifie, d'effectuer régulièrement une mesure de l'amortissement du béton. Cet essai non destructif fournit une indication de qualité de l'état général du béton d'un barrage. Les bases de cette procédure doivent être établies et sa faisabilité démontrée.

Lorsque les contraintes se rapprochent des limites de résistance ou lorsque localement des déformations irréversibles apparaissent, le béton subit un certain endommagement et, le cas échéant, des fissures se forment. La rupture ou la défaillance peuvent aujourd'hui être appréhendées de manière réaliste grâce à la mécanique de la rupture nonlinéaire.

Il n'existe à l'heure actuelle que peu de résultats de mesures des grandeurs caractéristiques du béton soumis à un état de contraintes complexe, et en particulier au cisaillement. Le développement de ces mesures, quoique difficile, est possible. Une base pour une prédiction réaliste de la formation de fissures pourra alors être posée. De plus, les grandeurs caractéristiques mesurées seront utiles pour estimer la stabilité des fissures existantes.

6. Recommandations pour la surveillance des barrages

6.1 Introduction

L'analyse du comportement de nombreux barrages a montré toute l'importance de disposer de moyens et de données, qui permettent d'analyser les différentes contributions à la déformation totale de l'ouvrage. Cela doit aussi permettre d'identifier les divers phénomènes pouvant affecter un ouvrage en béton. Il est par ailleurs intéressant de connaître l'évolution dans le temps des caractéristiques du béton.

6.2 Mesures et identification des phénomènes

L'organisation du dispositif d'auscultation devrait en règle générale être telle qu'elle permette de dissocier les déformations du barrage de celles de ses fondations. Ce principe est essentiel pour la détection et

the importance should be stressed of establishing lists of reactive rocks, determining a possible optimal or maximum content of reactive rocks, defining a critical balance of the active alkalis adapted to the geological conditions, and assessing the effective role played by each of the sources of chemical swelling.

5.4 Safety in the case of seismic action

To improve knowledge of the behaviour of dams during earthquakes, there is, on the one hand, a need to gain a better understanding of the constitutive laws of concrete and, on the other hand, a need for research in the field of structural analysis and in-situ observations.

5.4.1 Concrete constitutive laws

In this field, fracture mechanics of concrete under fast cyclic loads is very important. Aspects such as the formation and propagation of dry cracks, partially or totally saturated cracks, and cracks in connection with the reservoir have to be considered. The studies should, in particular, take into account the construction joints and the dam-foundation contact.

5.4.2 Global behaviour

A methodology for the behaviour analysis of concrete dams under seismic loading should be developed, which includes the characteristics of the concrete itself, and the constitutive elements of the structure, such as the joints.

In-situ observations of the dynamic behaviour of concrete dams and the interpretation of these measurements make it possible both to identify the important phenomena occurring within the dam, and to calibrate the analytical models developed on a real scale.

5.5 Characteristics of the concrete behaviour under quasi-static and dynamic loads

Concrete behaviour under quasi-static load can be described by a simple modulus of elasticity, provided the stresses remain well below the strength limits. Under dynamic loads, a complex modulus of elasticity is necessary. The spatial variation of the modulus of elasticity within the mass concrete must still be researched, so as to take into account the joints. This is the only means of realistically predicting the global deformation under given load cases.

The complex modulus of elasticity implicitly contains the problem of the damping laws of the material. The damping ratio can be a reliable indicator of concrete ageing, or of damage being initiated or developing. It is recommended to measure the damping ratio of the concrete regularly, provided it is justified. This non-destructive test provides a good quality indication of the general condition of a dam's concrete. The basis of this procedure must be established and its feasibility proven.

When the stresses reach the strength limits, or when irreversible deformations appear locally, the concrete undergoes some damage, and cracks can form. Failure or loss of serviceability can realistically be predicted today thanks to the non-linear fracture mechanics.

Today, only a few measurement results are available of the characteristic values of concrete undergoing complex states of stress, and in particular shear. Development of these measurements is possible, although difficult. A basis for the realistic prediction of cracks will only then be possible. In addition, such measured characteristics will be useful in assessing the stability of the existing cracks.

6. Recommendations for dam monitoring

6.1 Introduction

Analysis of the behaviour of numerous dams has underlined the im-

l'analyse de phénomènes particuliers (fluage, gonflement) et d'anomalies du comportement du barrage.

Outre les effets de la poussée de l'eau et de la température, tant le fluage que le gonflement du béton engendrent des déformations horizontales et verticales. Aussi, pour être en mesure d'identifier une déformation différée ou une irrégularité du comportement du béton, il serait nécessaire de connaître les trois composantes des déplacements des points de mesure. Dans ce sens, les mesures de pendules, avec plusieurs points de mesure répartis sur la hauteur du barrage et en fondations, ou des visées sur des cibles posées sur le parement aval permettent de connaître la déformée de l'ouvrage et de suivre l'évolution des déformations horizontales à tous les niveaux. Un nivellement (ou le cas échéant la mesure d'angles verticaux) fournira une indication concernant les déformations verticales.

Lors de l'analyse des déformations, un modèle numérique de référence, bien validé, facilite l'évaluation des parts respectives des déformations élastiques et différées. Cet outil de travail est aussi très utile pour la détection d'une anomalie dans le comportement du barrage.

6.3 Détermination périodique des propriétés du béton

Pendant la durée de vie d'un barrage, il serait utile de suivre le développement des propriétés des bétons en effectuant périodiquement une série d'essais. La connaissance de leurs variations antérieures permet d'extrapoler vers le futur et d'apprécier l'évolution de la sécurité dans le temps. Une périodicité de quinze ans paraît opportune.

Les éprouvettes sont extraites soit directement du corps du barrage, soit de massifs de béton coulés en vue de ces contrôles futurs. Dans tous les cas, il faut veiller au mode de conservation des éprouvettes et des massifs (pour ces derniers, la réalisation d'un bloc de béton, protégé des courants d'air, dans une galerie du barrage est une bonne solution).

Le diamètre des éprouvettes dépend principalement de la dimension maximum des granulats et par ailleurs des moyens de forage disponibles pour leur extraction. Normalement, ce diamètre est au moins égal à trois fois le diamètre maximum des grains (une limite inférieure égale à 1,5 peut être tolérée). Un diamètre de 200 mm devrait cependant être une dimension minimum. Si l'on doit recourir à un diamètre inférieur, il serait judicieux de ne pas descendre en dessous de 100 mm et d'augmenter le nombre d'échantillons. Des éprouvettes d'un diamètre de 300 mm (voire 500 mm quand cela est possible) seraient naturellement les plus adéquates. Quant à la hauteur des éprouvettes, elle sera égale de 1,5 à deux fois son diamètre. Enfin, on évitera aussi de trier les éprouvettes afin de ne soumettre à des essais que celles qui paraissent être de bonne qualité; avec cette pratique, le risque d'obtenir des valeurs moyennes trop élevées existe.

Les contrôles devraient englober des essais de résistance mécanique en compression et à la traction (y compris des essais brésiliens) effectués sur des éprouvettes prélevées dans les bétons de masse et de parement. A titre indicatif, un nombre de six éprouvettes par type d'essais et type de béton pourrait suffire pour ces essais. D'autres caractéristiques d'un intérêt évident, comme la densité, le module d'élasticité et l'énergie de rupture, seront aussi déterminées. Une évaluation du dosage en ciment fournit une bonne indication relative à la tenue du béton. Des éprouvettes supplémentaires devraient aussi être prévues pour des essais de fluage et de retrait, en réservant l'une d'entre elles comme témoin. Le programme d'essai de fluage comprendra un cycle charge/décharge comparable au cycle d'exploitation de la retenue. Des indications complémentaires pour caler le cas échéant un modèle de comparaison sont ainsi disponibles.

portance of having available means and data to analyse the various phenomena contributing to a dam's total deformation. This should also make it possible to identify the phenomena affecting a concrete structure. Furthermore it would be interesting to have more knowledge about the development of the various characteristics of concrete over time.

6.2 Measurements and identification of the phenomena

The monitoring system should generally be organised in such a way that it makes it possible to distinguish between the dam's deformations and those of its foundations. This principle is essential for the detection and the analysis of particular phenomena (creep, swelling) and unconformities in the dam's behaviour.

Apart from the effects of water pressure and temperature, both concrete creep and swelling can lead to horizontal and vertical deformations. Thus, to identify a deferred deformation or an unconformity in concrete behaviour, it should be necessary to monitor the three displacement components of the measuring points. In this sense, pendulum measurements, with several measuring points spread throughout the height of the dam and in the foundation, or geodetic measurements of targets installed on the downstream face, make it possible to determine the deformed shape of the structure and to follow the evolution of the horizontal deformations at all levels. Levelling (or sometimes the measurement of vertical angles) provides information regarding vertical deformations.

When analysing the deformations, an appropriately validated reference numerical model can facilitate assessment of the respective proportions of elastic and deferred deformations. This tool is also very useful in detecting an unconformity in the dam's behaviour.

6.3 Periodic determination of concrete properties

During the lifetime of a dam, it would be useful to follow the evolution of concrete properties by periodically carrying out a series of tests. The knowledge of past variations would make it possible to extrapolate future values and to assess the time evolution in relation to safety. Intervals of 15 years seem appropriate.

The samples would be taken either directly from the dam body, or from concrete blocks cast for future monitoring. In any case, one should comply with preservation principles for the samples and blocks (for example, casting a concrete block which is protected from air flows in one of the dam's galleries is a good solution in this respect).

The diameter of the samples should mainly depend on the maximum dimensions of the aggregates, and also on the drilling equipment available for their extraction. Usually, this diameter is at least equal to three times the maximum diameter of the aggregates (a lower limit equal to 1.5 can be accepted). However, a 200 mm diameter should be the minimum. If a smaller diameter has to be used, it is recommended not to be below 100 mm, and in this case to increase the number of samples. 300 mm diameter samples (or even 500 mm if possible) would certainly be more appropriate. As for the samples' height, it should be equal to 1.5 to two times the diameter. Finally, the samples should not be sorted, so there will be no tendency to test only those which are of good quality; such a procedure could lead to mean values which are too high.

The controls should comprise compressive strength and tensile strength tests (Brazilian method included) performed on samples taken from mass and face concrete. As an indication, six samples per test and concrete type could be sufficient. Other characteristics of obvious interest, such as the unit weight, modulus of elasticity and fracture energy, will be determined as well. An appraisal of the cement content provides a good relative indication of the concrete quality. Additional samples should also be taken for creep and shrinkage tests,

Il est par ailleurs recommandé de conduire des essais pour contrôler si les bétons ont une tendance au gonflement. Ainsi le potentiel d'expansion par alcali-réaction des bétons devrait être évalué, au moyen d'essais accélérés appropriés, soit: des essais de stabilité dimensionnelle sur béton (essais de type performance) et des essais de qualification à l'alcali-réaction des granulats par le moyen d'un essai rapide (essai de qualification sur micro-mortier).

Par ailleurs, la détermination du module de déformation en torsion est une nouvelle méthode prometteuse appropriée pour estimer l'évolution de l'endommagement causé par la réaction alcali-silice. Ces essais de torsion, non destructifs, permettent une prévision du comportement à moyen terme (environ cinq à dix ans). En effet, par stockage des éprouvettes à température élevée (à 50 °C pendant deux mois) afin d'accélérer le processus chimique, il sera alors possible de reprendre les mesures du module en torsion sur les mêmes éprouvettes.

Il serait également intéressant de réaliser des forages ou de profiter de forages existants afin de procéder à des mesures in situ comme cela se pratique en mécanique des roches. De cette façon, il est possible de retirer de précieuses indications relatives à l'évolution du béton, entre autres en ce qui concerne son endommagement. L'incorporation de micro-capteurs sur fibres optiques peut également fournir des indications sur l'évolution des déformations permanentes.

6.4 Contrôle régulier des fissures et des suintements

L'observation visuelle des barrages permet d'obtenir des indices relatifs à la tenue de l'ouvrage. Il est donc important d'effectuer le relevé de l'ensemble des fissures (parements, galeries) et de le tenir à jour. Par opposition aux fissures provoquées par des effets de température ou par l'adaptation du barrage à son environnement, le gonflement du béton entraîne une fissuration qui donne une impression de faïençage de la surface du béton (aux contours généralement sombres).

Les infiltrations qui transitent à travers la masse du béton par des chemins préférentiels (joints, fissures, zones comportant des défauts de mise en place) conduisent à la formation de dépôts en surface (efflorescences) et dans les conduites et caniveaux. Il est utile, à intervalles réguliers (environ tous les cinq ans) de les éliminer et d'en estimer le volume. Cette pratique permet d'avoir une idée sur le délavage éventuel du béton.

7. Conclusions

Les barrages en béton occupent en Suisse une place prépondérante puisqu'ils représentent environ les 70 % de l'ensemble des ouvrages d'accumulations construits. C'est entre les années 1950 et 1970 que le plus grand nombre d'ouvrages a été érigé.

L'analyse effectuée a démontré que l'évolution de la technique et du mode de construction a eu une incidence sur la qualité et la tenue dans le temps des ouvrages. Le choix des granulats, la détermination des compositions granulométriques et l'emploi d'adjuvants sont aussi des facteurs importants qui jouent un rôle direct sur les caractéristiques mécaniques des bétons, ainsi que sur leur faculté de résistance face à des sollicitations diverses.

Le bilan des expériences acquises en suivant pendant des années le comportement des barrages montre que l'étude de leur «vieillissement» apporte beaucoup d'enseignements utiles. Par ailleurs, il ne paraît pas évident d'associer uniquement le terme de vieillissement à la dégradation et à la détérioration des ouvrages. Les réflexions qui sont faites à ce sujet amènent à relever une évolution positive de certains paramètres; aussi le vieillissement d'un barrage ne diminue pas systématiquement sa sécurité initiale.

En ce qui concerne la surveillance des barrages, le dispositif

while keeping one of them as a reference. The creep testing programme will comprise one load-unload cycle comparable with the operating cycle of the reservoir. Complementary indications to calibrate a comparison model are thus available.

It is also recommended to carry out tests to check whether the concrete has a tendency to swell. Thus, the swelling potential of the concrete by alkali-reaction should be assessed with appropriate accelerated tests, such as: dimensional stability tests on the concrete itself (performance tests), and qualification tests to alkali-reaction of the aggregates with quick tests (qualification tests on micro-mortar).

Moreover, determination of the modulus of deformation in torsion is a promising appropriate new method to assess the evolution of the damage caused by alkali-silica reaction. These non-destructive torsion tests make it possible to forecast the behaviour in the medium term (approximately five to ten years). By preserving the samples at high temperatures (50 °C for two months) to accelerate the chemical process, it will then be possible to take new measurements of the modulus in torsion on the same samples.

It would also be interesting to drill holes, or to take advantage of existing drillholes, to perform in-situ measurements, as is done in rock mechanics. It would thus be possible to gather valuable indications relating to the concrete evolution, for example information related to its damage. Incorporation of micro-sensors on optical fibers can also give indications on the evolution of permanent deformations.

6.4 Regular control of cracks and efflorescences

Visual observation of dams makes it possible to obtain information regarding their behaviour. It is therefore important to carry out a survey of all cracks (faces, galleries and so on), and to keep it up-to-date. As opposed to cracks induced by temperature effects or by the dam's adaptation to its environment, the type of cracking resulting from concrete swelling looks like crazing on the concrete face (the borders of which are generally dark).

Seepage water flowing through the concrete mass using preferred paths (joints, cracks, or zones having undergone placing defects) leads to the formation of surface deposits (efflorescences) in pipes and drainage ditches. It is useful to remove them regularly (approximately every five years) and to appraise their volume. This process gives an idea of the potential washing out of the concrete.

7. Conclusions

Concrete dams play a very important role in Switzerland, as they represent 70% of all the storage schemes developed. Most of the dams have been built between the years 1950 and 1970.

The analysis carried out has shown that the evolution of construction techniques has influenced the quality and the long-term behaviour of the dams. The selection of aggregates, the determination of the particle size curves and the use of admixtures are also important factors which have directly influenced the mechanical characteristics of concrete, as well as the resistance of dams to various actions.

The compilation of the experience gained while monitoring the behaviour of dams over years shows that studying them as they age provides a lot of useful information. Furthermore, the word ageing should not automatically be assumed to mean structural degradation or deterioration. The studies conducted on this topic have indicated a positive evolution of some parameters; thus, ageing of a dam does not necessarily lower its initial level of safety.

As far as dam monitoring is concerned, the measurement system should be designed so that both the values of the parameters acting on the structure, and the data required to obtain a picture of the behaviour of the structure and its foundation, can be gathered. In this

d'auscultation doit être conçu de telle façon qu'il permette de disposer, d'une part, des valeurs de paramètres agissant sur la structure et, d'autre part, de celles qui donnent une image du comportement global de l'ouvrage et de sa fondation. Dans ce domaine l'instrumentation s'est considérablement développée et il a fallu dans de nombreux cas adapter le dispositif existant afin qu'il réponde aux buts recherchés et aux standards les plus récents.

Le recours à un modèle numérique est d'une aide précieuse. Par un calcul de déformations de référence, il est possible de s'assurer de la régularité du comportement ou de mettre en évidence une évolution particulière de ces déformations, par exemple celles dues à un phénomène de fluage.

Il est clair que tout doit être mis en œuvre pour conserver l'aptitude au service des barrages en béton pendant de nombreuses années. L'expérience et l'information acquises ouvrent la voie à des recherches particulières dans le but d'améliorer la connaissance du comportement du béton de barrage et du barrage lui-même. Elles permettent également d'édicter des recommandations pour suivre l'évolution des caractéristiques du béton de barrage et de détecter au plus vite les phénomènes qui les concernent.

Enfin, il faut souligner que l'aspect extérieur ne doit pas laisser une impression de négligence. Il est de prime importance que la population conserve toute sa confiance aux propriétaires de barrages et aux ingénieurs.

Ce rapport constitue une synthèse d'un document plus important, en français, qui peut être obtenu auprès du secrétariat du Comité suisse des barrages.

field, the instruments have been considerably improved, and in many cases the monitoring system had to be updated to fulfil the most up-to-date goals and standards.

Numerical models provide valuable help. Using a reference computation of the deformations, it is possible to assess the regularity of a certain kind of behaviour, or to point out an unusual evolution of deformations, for example those induced by the creep process.

It is clear that every possible means must be undertaken to preserve the serviceability of the dam concrete for many years. The experience and information gained will lead to specific studies aimed at improving knowledge of the behaviour of the dam concrete, and of the dam itself. The results will in turn make it possible to develop recommendations to follow the evolution of the characteristics of dam concrete, and to detect the related phenomena as early as possible.

Finally, it must be emphasised that the external aspect of a dam must not give an impression of neglected maintenance. It is of the utmost importance that the population continues to trust both the dam owners and the engineers.

This report constitutes the synthesis of a longer document, written in French, which can be ordered from the Swiss Committee on Dams.

Ce rapport de synthèse a été rédigé par un groupe restreint formé de MM. *Bernard Hagin, Laurent Mouvet* et *Henri Pougatsch.* Traduit de l'original en français par *Thomas Meyer,* Stucky Ingénieurs-Conseils SA, 33, rue du Lac, CH-1020 Renens. Traduction révisée par *Alison Bartle,* éditeur, Hydropower and Dams.

Le rapport complet, dans sa version originale en français, peut être obtenu auprès du secrétariat du Comité suisse des barrages:

Comité suisse des barrages, c/o Laboratoire de constructions hydrauliques, EPFL-Ecublens, CH-1015 Lausanne, fax ++41-21-693 22 64, www.swissdams.ch

This short version was written by the following members of the working group: *Bernard Hagin, Laurent Mouvet* and *Henri Pougatsch.*

Translated from French original by *Thomas Meyer,* Stucky Consulting engineers Ltd., 33, rue du Lac, CH-1020 Renens. Translation reviewed by *Alison Bartle,* editor, Hydropower and Dams.

The complete report in its original french version can be ordered by the secretariat of the Swiss Committee on Dams:

Swiss Committee on Dams, c/o Laboratory of Hydraulic Constructions, EPFL-DGC, CH-1015 Lausanne, fax ++41-21-693 22 64, www.swissdams.ch

Références/References

[1] OFEE, 1996, Registre des barrages suisses soumis au règlement fédéral, wasser, energie, luft–eau, énergie, air, vol. 88, pp. 262–265, Baden.

[2] Comité national suisse des grands barrages, 1985, Barrages suisses – Surveillance et entretien, SwissCOLD, Lausanne.

[3] *Roš M.,* 1956, Ciments pour grands barrages, Association suisse des fabricants de ciment, chaux et de plâtre, Zurich.

[4] *Paillex E., 1984,* Le béton des gros ouvrages hydrauliques, Info SIKA N° 8/9, Zurich.

[5] *Bolomey J.,* 1925, Détermination de la résistance à la compression des mortiers et bétons, bulletin technique de la Suisse romande, 51e année, Lausanne.

[6] *Jäckli H., Schindler C,* 1986, Possibilités de substitution des graviers alluvionnaires de haute teneur par d'autres matières premières minérales, NF-Programm 4.294.0.79.07, Livraison série géotechnique, vol. 68, Berne.

[7] *Studer W.,* 1988, Frosteinwirkung und Sinterungen, wasser, energie, luft–eau, énergie, air, vol. 80, pp. 310–313, Baden.

[8] *Gunn R.-M.,* 1998, Non-Linear Analysis of Arch Dams Including an Anisotropic Damage Mechanics Based Constitutive Model for Concrete, PhD Thesis, University of Brighton.

[9] *Huet C.* et al., 1996, Etude expérimentale sur le fluage des bétons âgés, «Barrage de Luzzone», LMC–DMX, EPFL, Lausanne.

[10] *Pougatsch H.,* 1990, Le barrage de Zeuzier, rétrospective d'un événement particulier, wasser, energie, luft–eau, énergie, air, vol. 82, pp. 195–208, Baden.

[11] ICOLD, 1994, Ageing of Dams and Appurtenant Works, Bulletin 93, ICOLD/CIGB, Paris.

[12] *Sinniger R.* et al., 1991, Ageing of Dams, Swiss experiences, Question 65, report 10, 17th Congress in Vienna, ICOLD/CIGB, Paris.